Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021
Zborník príspevkov

Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Univerzita Komenského, Bratislava
21. apríla 2021

Proceedings of the Student Science Conference 2021

Faculty of Mathematics, Physics and Informatics
Comenius University, Bratislava
April 21, 2021



Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021: Zborník príspevkov
Proceedings of the Student Science Conference 2021
Editori: Broňa Brejová, Jaroslav Guričan, Juraj Tekel, Tomáš Vinař
Autor loga: Matej Novotný
Vydavateľ: Knižničné a edičné centrum FMFI UK, Bratislava
Vydanie: prvé
Rok vydania: 2021

ISBN 978-80-8147-107-0

Zborník obsahuje príspevky účastníkov Študentskej vedeckej konferencie, ktorá sa konala 21. apríla 2021 na Fakulte matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislave. Príspevky označené v obsahu ako "recenzované" boli pred publikovaním recenzované najmenej dvoma anonymnými recenzentami. Všetky príspevky boli posudzované aspoň trojčlennou odbornou komisiou.

http://svk.fmph.uniba.sk/

Zborník © 2021 Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Univerzita Komenského, Bratislava
Články © 2021 autori jednotlivých článkov

Predhovor

Tento zborník obsahuje príspevky zo Študentskej vedeckej konferencie, ktorá sa konala 21. apríla 2021 na Fakulte matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislave. Študentská vedecká konferencia má na fakulte dlhoročnú tradíciu a je príležitosťou pre študentov bakalárskeho, magisterského a doktorandského štúdia prezentovať vlastné vedecké a odborné práce z rozličných odborov matematiky, fyziky, informatiky a didaktiky týchto disciplín.

V roku 2021 bolo na konferenciu prihlásených 82 príspevkov v ôsmich tematických sekciách. Každý článok bol recenzovaný najmenej dvoma recenzentami a ďalej posudzovaný odbornou komisiou. Na základe tohto procesu boli do zborníka vybrané recenzované články, zvyšné príspevky sú v zborníku zastúpené formou jednostranového abstraktu. Príspevky boli prezentované 21. apríla 2021 na celodennej konferencii, ktorá sa z dôvodu pandemickej situácie konala dištančnou formou. Odborné komisie udelili v deviatich sekciách ocenenia 27 víťazom a ďalším 52 laureátom ŠVK. Komisie navrhli udeliť sedem cien Literárneho fondu, tri ceny prof. Tillmana Märka za príspevky v oblasti fyziky plazmy, cenu prof. Petra Lukáča za vynikajúcu experimentálnu prácu v oblasti fyziky plazmy, cenu Slovenskej informatickej spoločnosti za vynikajúcu prácu v oblasti informatiky, cenu FINAMIS s.r.o. za najlepšiu prácu v oblasti aplikovanej matematiky a cenu ASTROS solutions s.r.o. za vynikajúcu prácu v oblasti astronómie a astrofyziky.

Chceme poďakovať predovšetkým zúčastneným študentom a ich školiteľom, predsedom a členom jednotlivých odborných komisií, organizátorom a sponzorom. Ďakujeme za úspešný priebeh konferencie a tešíme sa na Študentskú vedeckú konferenciu 2022.

Broňa Brejová, Jaroslav Guričan,
Juraj Tekel, Tomáš Vinař
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Univerzity Komenského v Bratislave

Sponzori: Literárny fond, Slovenská informatická spoločnosť, Slovenská nukleárna spoločnosť, prof. Tillman D. Märk, prof. Peter Lukáč, FINAMIS s.r.o., ASTROS solutions s.r.o.

Zloženie komisií

Organizačný výbor: doc. Mgr. Broňa Brejová, PhD.; doc. RNDr. Jaroslav Guričan, CSc.; Mgr. Juraj Tekel, PhD.; doc. RNDr. Juraj Tóth, PhD.; doc. Mgr. Tomáš Vinař, PhD.

Predsedovia odborných komisií:
Astronómia a astrofyzika: RNDr. Roman Nagy, PhD.
Biofyzika, envirnomentálna fyzika a meteorologia: doc. RNDr. Karol Hensel, PhD.
Didaktika fyziky: doc. PaedDr. Klára Velmovská, PhD.
Didaktika matematiky a informatiky: PaedDr. Mária Slavíčková, PhD.
Fyzika plazmy: RNDr. Veronika Medvecká, PhD.
Fyzika tuhých látok: doc. RNDr. Tomáš Roch, Dr. techn.
Jadrová fyzika: doc. RNDr. Ivan Sýkora, PhD.
Informatika: prof. Ing. Igor Farkaš, Dr.
Matematika: doc. Mgr. Richard Kollár, PhD.

Recenzenti: Adriana Annušová, Stanislav Antalic, Róbert Astaloš, Pavol Bartoš, Ľubica Beňušková, Katarína Boďová, Pavol Bokes, Vladimír Boža, Bronislava Brejová, Adam Broniš, Lucia Budinská, Richard Cimerman, Barbora Cimrová, Ingrid Damborská, Peter Demkanin, Monika Dillingerová, Matej Fandl, Igor Farkaš, Marek Fila, Lenka Filová, Milan Ftáčnik, Adrián Galád, Rudolf Gális, Zuzana Garaiová, Martin Gera, RNDr. Alena Gessert, PhD., Simona Gorčáková, Branislav Grančič, Maroš Gregor, Jaroslav Gurican, Mária Hajduková, Margaréta Halická, Radoslav Harman, Marián Haršáni, Karol Hensel, František Herman, Tibor Hianik, Richard Hlubina, Rastislav Hodák, Peter Horváth, Andrea Hrušecká, Marek Husárik, Róbert Jajcay, Tatiana Jajcayová, Jana Jakubičková, Mario Janda, Ľudmila Jašková, Zlata Kelar Tučeková, Jozef Klačka, Matej Klas, Lucia Klinovská, Viktor Kocur, Richard Kollár, Leonard Kornoš, Milan Kováč, Michal Kovaľ, Stanislav Krajčovič, Rastislav Kráľovič, Zuzana Kubincová, František Kundracík, Michal Lacko, Milan Lapin, Mária Lucká, Martin Macaj, Edita Máčajová, Šimon Mackovjak, Martin Madaras, Oliver Majerský, Kristína Malinovská, Mária Markošová, Štefan Matejčík, Ján Mazák, Veronika Medvecká, Karolína Miková, Emília Miťková, Olivier Monfort, Ladislav Moravský, Pavol Mošať, Silvia Mošovská, Roman Nagy, Pavol Neilinger, Juraj Országh, Peter Papp, Dana Pardubská, Tomáš Plachetka, Pavol Quittner, Branislav Rovan, Leonid Satrapinskyy, Libuša Šikurová, Jiří Šilha, Alexander Šimko, Martin Škoviera, Mária Slavíčková, Ján Somorčík, Karolína Šromeková, Mária Stankovičová, Michal Stano, Beáta Stehlíková, Veronika Šubjaková, Ivan Sukuba, Marek Šuppa, Juraj Surovčík, Ivan Sykora, Pavol Szomolányi, Martin Takáč, Marek Tatarko, Juliána Tomeková, Juraj Tóth, Mária Trnovská, Anna Trúsiková, Peter Vankúš, Peter Vanya, Michaela Vargová, Klára Velmovská, Jakub Vícha, Jozef Világi, Tomáš Vinař, Iveta Waczulíková, Miroslav Zahoran, Anna Zahoranová.

Obsah

Matematika

Recenzované články

Eduard Bučko, Katarína Boďová: Classification of Rat Strains Using Machine Learning . . . 1

Tomáš Sásik, Martin Mačaj: O regulárnych mapách s nepárnou Eulerovou charakteristikou . . . 10

Abstrakty

Ivana Beňová, Peter Vanya: Generation of origin-destination matrices in transport modelling . . . 18

Petra Macková, Marek Fila: Solutions with moving singularities for a nonlinear diffusion equation . . . 19

Pál Somogyi, Ján Somorčík: O niektorých snahách rozšíriť Mannov-Whitneyho test do dvojrozmerného sveta . . . 20

Jozef Rajník, Edita Máčajová: Decomposing cubic graphs with cyclic connectivity 5 21

Informatika

Recenzované články

Daniel Kyselica: Advanced Algorithms for Segmentation of Space Debris Astronomical Images . . . 22

Soňa Senkovičová, Tatiana Jajcayová: Prehľadávanie literárnych textov pre príznaky afázie . . . 28

Veronika Mattová, Matej Fandl: Into the Magic Shop: An analysis of the human brain and heart's mysteries . . . 35

Martina Bodišová, Tatiana Jajcayová: Preusporiadanie dvojdimenzionálnych polí pomocou prefix reversalu . . . 39

Abstrakty

Dana Škorvánková, Martin Madaras: Human Pose Estimation using Per-Point Body Region Assignment . . . 47

Šimon Sádovský, Branislav Rovan: Usefulness of Information and Unary Regular Languages . . . 48

Askar Gafurov, Andrej Baláž, Tomáš Vinař, Bronislava Brejová: VirPool - Estimation of proportions of SARS-CoV-2 variants in a mixed sequencing sample . . . 49

Lukáš Gajdošech, Martin Madaras: Processing of Structured 3D Scans with Deep Learning . . . 50

Adrián Goga, Tomáš Vinař, Broňa Brejová: Unsupervised Demultiplexing of Nanopore Sequencing Data 51
Samuel Molčan, Peter Kosa, Bibiana Bieleková, Bronislava Brejová: Models For Monitoring Progressive Multiple Sclerosis 52
Alex Babiš, Beáta Stehlíková: Predikcia nepozorovaných hrán v znamienkovej váženej sieti 53
Adam Trizna, Alexander Šimko: Automatic Evaluation of ER Modelling Exercises . 54
Štefan Pócoš, Iveta Bečková, Igor Farkaš: Qualitative Analysis of Adversarial Examples in Deep Networks 55

Jadrová fyzika

Recenzované články

Matúš Kosťov, Oliver Majerský: Nábojová asymetria v produkcii vysoko-energetických top-kvarkových párov na experimente ATLAS 56
Otto Glavo, Adam Broniš: Comparison of models for the calculation of cross sections in the complete fusion reactions 65
Jozef Mišt, Pavol Mošať: Účinné prierezy pre produkciu izotopov seaborgia vo fúzno-výparných reakciách 75
Adriana Dohnalová: Study of the reference distributions for measurement of Bose-Einstein correlations in high energy proton-proton collisions in the ATLAS experiment 87
Adam Broniš, Stanislav Antalic: Decay studies of new isomeric states in 255No . . 99
Adam Sitarčík, Stanislav Antalic: Origin of the high-energy signals in the reaction 40Ar+197Au→237Bk* 106
Andrej Ďurica, Róbert Astaloš: Effect of the electron-positron pairs on the measurement of the Bose-Einstein correlations by the ATLAS experiment 115

Abstrakty

Zdenko Híveš, Michal Kovaľ: Štúdium časového rozlíšenia slamky Straw spektrometra v experimente NA62 127
Daniel Suchý, Rastislav Hodák, Fedor Šimkovic: Search for Double Beta Decay Transitions of 116Cd into the Excited States of 116Sn in COBRA Experiment 128

Fyzika tuhých látok

Recenzované články

Veronika Turiničová, Maroš Gregor: Nová metóda merania elektrického náboja dielektrických biomateriálov pomocou 'Pendant Drop' tenziometrie 129

Abstrakty

Martin Baránek, Pavol Neilinger, Daniel Manca, Miroslav Grajcar: Supravodivé kinetické planárne rezonátory 137
Katarína Viskupová, Branislav Grančič: Vplyv odrazených Ar neutrálov na tvrdé TaBx vrstvy 138
Hryhorii Makarov, Leonid Satrapinskyy: Photoelectrical and gas sensing properties of Mo alloyed TiO2 nanotube arrays grown by anodization of DC magnetron sputtered films 139

Magdaléna Poláčková, Maroš Gregor: Vplyv feromagnetických vrstiev na supravodivé transportné vlastnosti supravodičov NbN a MgB2 140
Adam Škrlec, Richard Hlubina: Dynesova supravodivosť za modelom BCS 141

Astronómia a astrofyzika

Recenzované články

Danica Žilková, Jiří Šilha, Pavol Matlovič, Juraj Tóth: Space debris spectra acquired with the AMOS spectral cameras 142
Karol Havrila, Juraj Tóth: Analýza dynamiky meteoritov a prachových častíc v priestore atmosféry 154
Tomáš Hrobár, Jiří Šilha, Martina Verešvarská: Rotation axis estimation of upper stages 166
Patrik Čechvala: Simulating propagation of ultra-high energy cosmic rays wih SimProp software 172

Abstrakty

Emil Puha, Jozef Klačka, Roman Nagy: Processing of the Gaia and APOGEE data 180
Martina Kováčová, Leonard Kornoš: Možnosť dopravy materiálu z trpasličej planéty Ceres k Zemi prostredníctvom rezonancie 8:3 v strednom dennom pohybe s Jupiterom 181
Adriana Pisarčíková, Pavol Matlovič, Juraj Tóth: Výskum prítomnosti organického materiálu v meteoroidoch pomocou spektrálnych pozorovaní meteorov 182

Biofyzika, environmentálna fyzika a meteorológia

Recenzované články

Karin Vančíková: Využitie textúrovej analýzy GLCM aplikovanej na T2 mapy na diagnostiku skorých degeneratívnych zmien u pacientov rok po parciálnej meniskektómii 183
Martina Velísková, Iveta Waczulíková: Ukazovatele spojené so zvýšeným rizikom úmrtia u hypertenzných pacientov s COVID-19 191
Juraj Jacko, Libuša Šikurová: Vplyv delécie génu ERG6 na vybrané membránové vlastnosti kvasiniek Candida glabrata 195
Šimon Šutý, Iveta Waczulíková: Interakcia amfifilných dendrónov s ľudskou krvou a jej zložkami 202

Abstrakty

Aleksandra Lavrikova, Helena Bujdáková, Karol Hensel: Decontamination of E. coli and S. aureus in liquids by transient spark discharge 206
Petra Kohútová, Zuzana Garaiová, Maksim Ionov, Tibor Hianik: Štúdium dendrimérov enkapsulovaných v lipozómoch a ich potenciálne využitie v terapii onkologických ochorení 207
Daniel Truchan, Adriana Annušová: Designing planar experimental model for bioconjugation 208
Daniela Džubinská, Milan Zvarík, Iveta Waczulíková: Spektrálna analýza moču – nové možnosti v diagnostike rakoviny močového mechúra 209
Pavol Nechaj, Martin Gera: Monitoring of Low-Level Wind Shear by Ground-based 3D Lidar at Bratislava Airport 210

Veronika Oravczová, Marek Tatarko, Tibor Hianik: Development of acoustic biosensors based on DNA aptamers for detection of bacteria 211

Fyzika plazmy

Recenzované články

Barbora Stachová, Ján Blaško, Juraj Országh: Elektrónmi indukovaná fluorescencia pyridínu C5H5N 212
Martin Kuťka, Michal Stano: Úprava mikroporéznych membrán plazmou pre ich použitie ako separátorov v elektrolýznych článkoch 216
Adam Kerdík, Juraj Surovčík, Veronika Medvecká: Plazmou asistovaná kalcinácia pri príprave TiO2 nanovlákien 221
Marek Pavle, Miroslav Zahoran: Simulácia reflektrónového prieletového hmotnostného spektrometra 226
Michal Damek, Mário Janda: Modelovanie plazmochemických procesov v prechodovej iskre 231

Abstrakty

Sandra Ďurčányová, Anna Zahoranová: Porovnanie účinnosti rôznych zdrojov nízkoteplotnej plazmy na povrchovú úpravu biologického materiálu 242
Kateryna Trach, Martin Sabo, Oleksandr Prystopiuk, Štefan Matejčík: Quantitative MCC-GC-IMS analysis of Arabica and Robusta coffees in mixes 243
Ján Ďurian, Štefan Matejčík: Efektívna GPU implementácia metódy 1D Particle-in-Cell/Monte Carlo Collisions na modelovanie rádiofrekvenčných výbojov . . . 244
Ján Blaško, Peter Papp, Štefan Matejčík: Elektrónmi indukovaná fragmentácia molekúl 2-methyl-2-oxazolínu a 2-etyl-2-oxazolínu 245
Oleksandr Prystopiuk, Kateryna Trach, Štefan Matejčík: Modulated high-voltage power supply based on push-pull topology for DBD plasma sources 246
Dušan Mészáros, Peter Papp, Štefan Matejčík: Nízkoenergetický elektrónový záchyt na molekulové klastre Co(CO)3NO 247
Daniel Pokorný, Peter Papp: Konformačné štúdium vybraných ftalátov a stanovenie ich protónových afinít 248
Mária Cíbiková, Karol Hensel, Richard Cimerman: Odstraňovanie naftalénu v systéme plazmovej katalýzy využitím ZrO2 a BaTiO3 materiálov 249
Romana Ružanská, Veronika Medvecká, Anna Zahoranová: Povrchová úprava skla a papiera nízkoteplotnou plazmou 250
Emanuel Maťaš, Richard Cimerman, Karol Hensel: Elektrické a optické charakteristiky povrchového bariérového výboja generovaného v perforovanom keramickom elemente 251

Didaktika fyziky

Recenzované články

Barbora Krajmerová, Klára Velmovská: Neformálne vzdelávanie vo fyzike formou online videohovorov 252
Tatiana Sukeľová, Klára Velmovská: Využitie pojmových komiksov vo fyzike v kontexte uplatnenia komunikačných schopností žiakov 263

Júlia Barabasová, Klára Velmovská: Možnosti dištančného vzdelávania vo vyučovaní fyziky 272
Linda Valkovičová, Klára Velmovská: Využitie súpravy pomôcok vo vyučovaní fyziky v 9. ročníku ZŠ 281
Jaroslava Slavkova, Peter Horváth: Skleníkový efekt vo vyučovaní fyziky na základnej a strednej škole 291

Abstrakty

Silvia Novotná, Peter Demkanin: Kontext voda v dizajne vyučovacích hodín fyziky osemročného gymnázia 299
Daša Červeňová, Peter Demkanin: Aktivizácia žiakov na hodinách fyziky 300
Michaela Mrníková, Peter Demkanin: Niekoľko pohľadov na fyzikálne vzdelávanie na slovenských základných a stredných školách 301

Didaktika matematiky a informatiky

Recenzované články

Lucia Regulyová, Monika Dillingerová: Geometrické miskoncepcie žiakov ZŠ . . . 302
Barbora Kubinová, Monika Dillingerová: Didaktické hry vo vyučovaní matematiky na druhom stupni ZŠ 308
Kristián Kolčák, Zuzana Kubincová: Vzájomné hodnotenie a sebahodnotenie vo vyučovaní informatiky 315
Dominika Valášková, Mária Slavíčková: Rozvoj funkcionálneho myslenia - lineárna funkcia 322
Barbora Ollerínyová, Mária Slavíčková: Podpora argumentácie v téme analytická geometria 328

Abstrakty

Petra Javorková, Monika Dillingerová: Rozvoj priestorovej predstavivosti žiakov druhého stupňa ZŠ 337
Barbora Stenová, Karolína Miková: Analýza ovládania detských edukačných robotických hračiek 338
Katarína Hrušková, Mária Slavíčková: Rozvoj myslenia žiakov využitím zážitkovej pedagogiky 339

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 1–9
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Eduard Bučko, Katarína Boďová

Classification of Rat Strains Using Machine Learning

Eduard Bučko[1*] Katarína Boďová[2†‡]

[1] Katedra aplikovanej matematiky a štatistiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava
[2] Katedra matematickej analýzy a numerickej matematiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstract: This study aims to find a quick and effective way of classifying four different strains of rats (two hypertensive and two normotensive strains) with machine learning. To learn classification models, we used telemetry data of rats, obtained in the experiments of Molčan et al. Three methods are employed to study the data on three different levels of granularity. Firstly, the long-term (12 hours) averages of biomarkers, i.e., blood pressure, activity, and heart rate, were compared. Secondly, the moments of five-minute beat-to-beat data were used for classification. The third method aims to improve the classification results of the coarser methods by looking at the fine properties of the recorded data. It uses an attractor method based on a 3-dimensional projection of the delayed time series. The fine-scale features of arterial blood pressure waveforms were analysed to see if the rats could be classified near real-time. The methods could differentiate between normotensive and hypertensive rats and even assign the correct of the two strains to hypertensive rats. The methods misclassified some normotensive rats, but overall the results were successful. The first and the last methods scored especially good.

Keywords: attractor reconstruction analysis, support-vector machines, automatic classification

1 Introduction

The study explores the effectiveness of machine learning when classifying rat strains. Assigning a strain to a rat is often done manually and using only rough averages. With the abundance of data stemming from the increased effectiveness of data collection comes the desire to automate the task and shorten the time needed. Machine learning methods are helpful here because they can find differences that cannot be easily spotted. Moreover, trained models give us a tool to instantly choose the strain after collecting the required data.

We consider four strains of rats:

- Wild Type *WT*
- Spontaneously Hypertensive Rats *SHR*
- Hannover Sprague-Dawley Rats *HanSD*
- Transgenic Rats *TGR*

Both *SHR* and *TGR* rats are hypertensive rats, meaning that they have persistently elevated blood pressure. *WT* and *HanSD* are normotensive.

2 Data

The rats were located in a lab with a light cycle of 12 hours of light and 12 hours of dark. Automated tracking technology recorded multiple types of information (locomotion activity, pulse pressure, etc.) at a high recording frequency (telemetry). The rats were implanted with a small chip. Three or four times per hour, a 5-minute record of the rat's blood pressure was sent wirelessly from the chip. The records were taken with a rate of 500Hz. All data were collected by Ľuboš Molčan et al. at the Faculty of Natural Sciences, Comenius University, Bratislava, in the experiments aimed at understanding circadian rhythms in mammals.

The data were sent to us in three different datasets. Each of the datasets contained a different form of data.

3 Classification using dark/light phase averages

In the first dataset, each row represents aggregate data of one 5-minute record. Some rats had records taken every 20 minutes, others every 15 minutes.

Columns included are:

- Mean blood pressure, which is the average blood pressure throughout the whole segment.
- Systolic blood pressure, which is the average of the peaks.

*eduard@bucko.sk
†katarina.bodova@fmph.uniba.sk
‡Supervisor

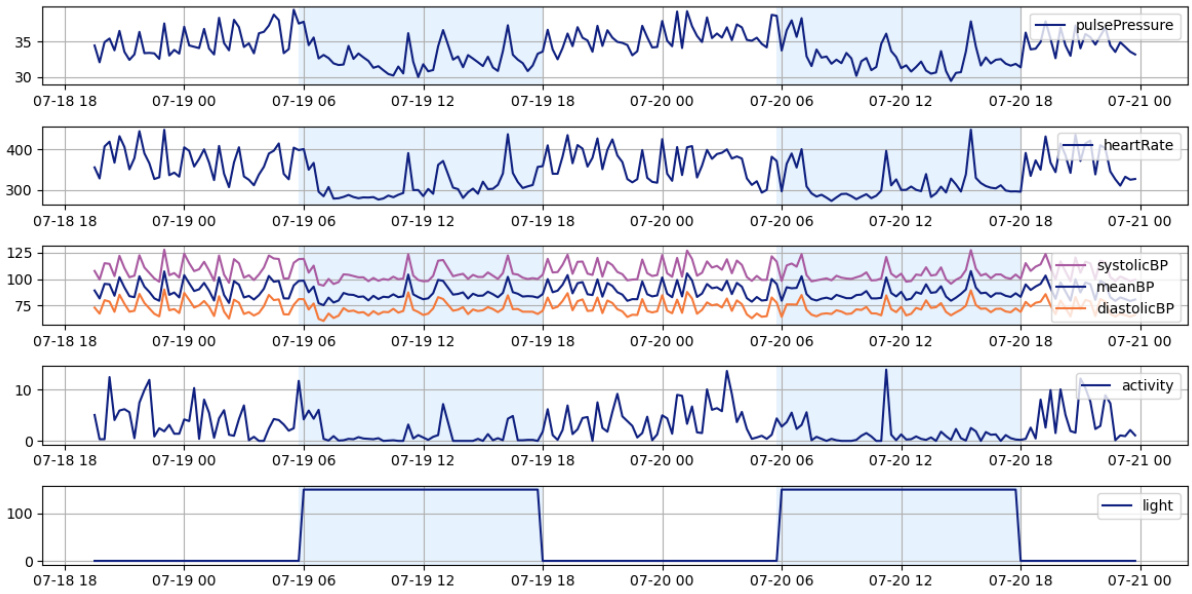


Figure 1: The time series data of the first form. The data of one rat plotted against time. The blue regions represent time periods during which an artificial lights were turned on.

- Diastolic blood pressure, which is the average of the negative peaks.
- Pulse pressure, the average distance between the systolic and diastolic blood pressure.
- Heart rate, expressed in beats per minute.
- Activity, representing the number of times the motion sensor recognised a movement of the rat.
- Timestamp.
- Id of the rat.
- Light intensity, a value of either 150 or 0 representing whether the record was taken during light or dark phase respectively.

The data of one rat is plotted in Fig. 1. Our data consisted of 193 rats, kept at the same light schedule. Out of them, 79 were *WT*, 16 were *HanSD*, 70 were *SHR*, and 28 were of *TGR* strain.

To represent each rat by a small number of statistics, we created averages of the covariates. Rats are active during night, which is illustrated in Fig.1. In the blue regions, which represent the light phase, the time series of activity, heart rate, and pulse pressure are visibly lower. Averages were thus created separately for the light phase and the dark phase. Features used as input variables in the machine learning model were:

- Mean blood pressure - Light phase average.
- Mean blood pressure - Dark phase average.
- Systolic blood pressure - Light phase average.
- Systolic blood pressure - Dark phase average.
- Diastolic blood pressure - Light phase average.
- Diastolic blood pressure - Dark phase average.
- Pulse pressure - Light phase average.
- Pulse pressure - Dark phase average.
- Heart rate - Light phase average.
- Heart rate - Dark phase average.
- Activity - Light phase average.
- Activity - Dark phase average.

As shown in Fig.2 differentiating between hypertensive and normotensive rats should not be difficult, seeing that the rats are divided into two clusters relative to their blood pressure values. Furthermore, when comparing their blood pressure

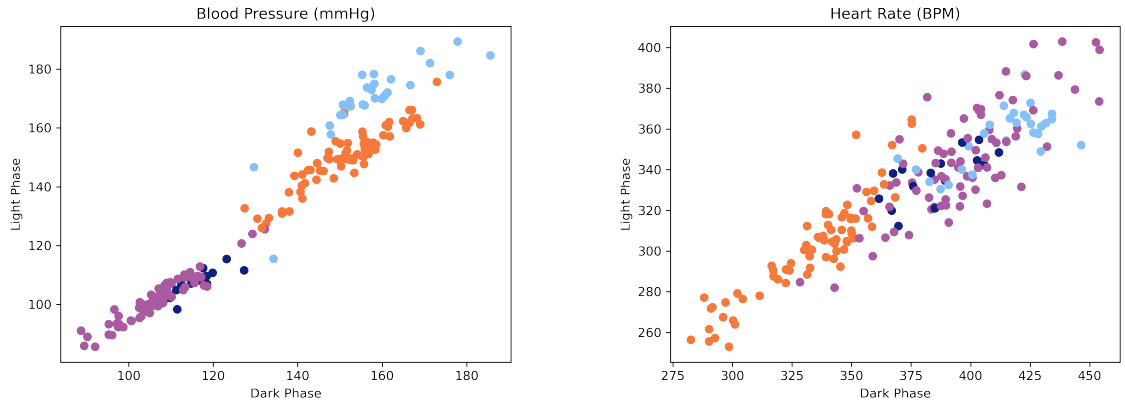


Figure 2: Scatter plots showing the average values of the features during a dark phase (x-axis) and a light phase (y-axis). Each graph shows one feature. One dot represents one rat. The dots are coloured according to the strains of the rats. Orange *SHR* and sky-blue *TGR* rats are hypertensive, and purple *WT* and dark-blue *HanSD* rats are normotensive.

during light and dark phase, and comparing their overall heart rate, the hypertensive *SHR* rats are distinguishable from the hypertensive *TGR* rats. Visually inspecting the scatter plots, it is difficult to discern any pattern differentiating between normotensive *HanSD* and normotensive *WT* rats.

The dataset was divided into a training set, on which the classifiers were fitted, and a test set, which was used to assess the performance of the classifiers. The training set consisted of 70% of the data selected randomly. For testing, we set aside the remaining 30%.

First, the data were scaled and then an SVM classifier with a linear kernel was trained on the training set. SVM finds a hyperplane in the space of input variables so that it splits the data according to their labels as accurately as possible.

As an example, decision boundaries in 2D determined by simple SVM are illustrated in Fig.3.

To choose the value of hyperparameter C, the penalty for misclassifying a datapoint, grid search was used. It considered all the values of C from the set

$$S = \{2^{2i-1} \mid i \in \mathbb{Z}, -2 \leq i \leq 9\}.$$

The performance of the model was evaluated on the test set. Predictions are summarised in a confusion matrix in Table 1. The matrix elements are the counts of instances as predicted by the algorithm. Note that the sum of the first row is six. From that can be deducted that there were six instances of *HanSD* rats in the test set. Of those six, four were classified

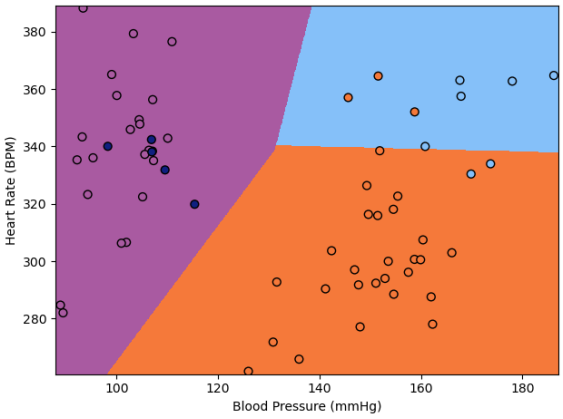


Figure 3: The decision boundaries determined by an SVM model trained for exemplary purposes. The model takes only two input values. The dots are coloured according to their label. Background colour determines the predicted label, given the *blood pressure* and *heart rate* value.

correctly as *HanSD* strain and two were classified incorrectly as *WT* strain. Similarly, the algorithm predicted 21 rats of the training dataset to be *WT* rats, yet only 19 of those were actually *WT* rats. The hypertensive rats were all classified correctly.

A classification report of the model is displayed in Table 2. *Precision* is the number of correctly predicted instances of the class divided by the total number of instances classified as that strain. In the confusion matrix, this is the number on the diagonal

divided by the sum of the corresponding column. *WT* strain has a precision of 0.90 because of 21 *WT* rats predicted, 19 were actually *WT* rats.

While the model was exact in predicting *HanSD* rats, it has a very low recall. *Recall* is the percentage of the rats with their strain correctly predicted. In the confusion matrix this is the number on the diagonal divided by the sum of the corresponding row. The model correctly recognized only $\frac{2}{3}$ of the *HanSD* rats from the test set.

The *F1-score* is calculated as

$$2 * \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall}.$$

It is a metric that combines both precision and recall, giving them equal importance.

Lastly, *support* denotes how many instances of the corresponding strain were present in the test set.

Table 1: Confusion matrix of test set classified by the first method.

		Predicted			
		HanSD	*WT*	*TGR*	*SHR*
Actual	*HanSD*	4	2	0	0
	WT	0	19	0	0
	TGR	0	0	6	0
	SHR	0	0	0	27

Table 2: Classification report. The performance metrics of the first method.

	Normotensive		Hypertensive	
	HanSD	*WT*	*TGR*	*SHR*
Precision	1.00	0.90	1.00	1.00
Recall	0.67	1.00	1.00	1.00
F1-score	0.80	0.95	1.00	1.00
Support	6	19	6	27

Overall, the model was successful in classifying most of the rats. It failed to classify some of the *HanSD* rats and predicted them to be of *WT* strain. The advantages of this method are simplicity and easy biological inference. However, this model requires 24 hours of data collection to classify a new rat. In the next section, we inspect a machine learning model trained on more granular data to examine if the process can be quickened.

4 Classification using inter-beat-intervals

The following method only uses a 5-minute record to classify the rat strain. The aim is to decrease the time needed to classify a new rat.

The second dataset consists of beat to beat data. Each data point represents a single heartbeat. Timestamps are coupled with systolic blood pressure values and interbeat intervals, i.e., the time to the previous beat. The whole data set consists of many 5-minute records. An examplary record can be seen in Fig. 4. We worked with data of six *WT*, seven *HanSD*, seven *SHR* and five *TGR* rats. The dataset contains 24-hour records starting with the light phase. The *HanSD* and *TGR* rats had their records taken every 20 minutes, translating into 72 separate 5-minute records. The rats of the other two strains had their records taken every 15 minutes. Each rat is thus represented by 96 separate 5-minute records.

Analysing box-plots in Fig 5, can be assumed that the records are not correlated in time. As a result, each one record is used as one sample point in the machine learning process.

This time, the moments of five-minute beat-to-beat data were used as input variables. For both, systolic blood presure and interbeat interval, average values were calculated, as well as standard deviations, medians and quantiles. These values were used as the input variables of the machine learning model.

Same as in the previous method, training and test set were created, the data were scaled, and SVM model was trained using grid search.

The resulting confusion matrix is in Table 3 and the classification report is in Table 4. The numbers in the confusion matrix are counts of the 5-minute segments. Most of the data are located in the top left and bottom right 2×2 submatrices of the confusion matrix. The method distinguishes between normotensive and hypertensive rats, but it fails to separate the rats within the normotensive or the hypertensive group. This method has achieved lower values of all metrics compared to the previous method.

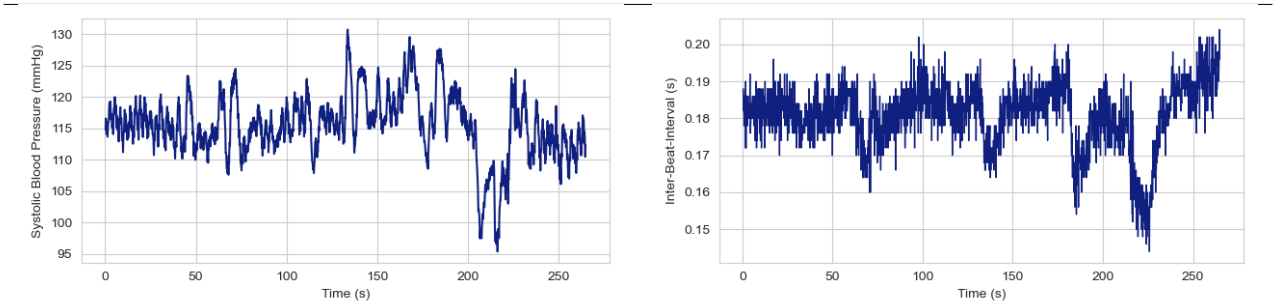


Figure 4: Plots showing one record from the second dataset. One instance is represented by a 5-minute time series of systolic blood pressure and by a time series of interbeat interval lengths.

Table 3: Confusion matrix of test set classified by the second method.

		Predicted			
		HanSD	*WT*	*TGR*	*SHR*
Actual	*HanSD*	98	49	2	0
	WT	40	149	0	0
	TGR	1	0	79	19
	SHR	0	0	18	179

Table 4: Classification report. The performance metrics of the second method.

	Normotensive		Hypertensive	
	HanSD	*WT*	*TGR*	*SHR*
Precision	0.71	0.75	0.80	0.90
Recall	0.66	0.79	0.80	0.91
F1-score	0.68	0.77	0.80	0.91
Support	149	189	99	197

5 Classification using attractor method

Here we attempt to classify the rats in near real-time. This method tries to capture differences in the arterial blood pressure waveform of the rats.

We used the original raw form of the telemetry data of four rats, one for each of the aforementioned strains. As in the previous dataset, we have 72 separate 5-minute records taken in the course of 24 hours for *HanSD* and *TGR* rats. For *WT* and *SHR*, we have 96 separate 5-minute records.

5.1 Attractor reconstruction analysis

The attractor reconstruction method is a novel method for analysing blood pressure data. Its effectiveness in combination with machine learning was demonstrated in [Lyle et al., 2017]. In this chapter we also used [Aston et al., 2014] and [Charlton et al., 2015], where the theory is described in greater detail.

5.1.1 Reconstructing the attractor

First, the time series is represented in a three dimensional phase space. Takens' embedding theorem [Takens, 1981] is used. Starting with a time series x(t), we define

$$y(t) = x(t-\tau), \qquad z(t) = x(t-2\tau).$$

This way, the time series data can be plotted as an attractor in an (x,y,z) phase space, as in Fig.6.

5.1.2 Removing baseline variation

An animal does many activities throughout the day, some are active, and some are passive. The blood pressure responds accordingly to the constant change in the activity of the animal and the level of stress in the animal. As a result, the time series of blood pressure are non-stationary. The method is insensitive to the average height of the signal but instead uses information about the functional profile. Shifting the time series by a constant $x(t) \to x(t)+c$ would cause a similar shift in the variables y and z. In the three-dimensional phase space, this would result in a shift of the attractor in the direction of the vector $(1,1,1)$.

$$(x(t),y(t),z(t)) \to (x(t)+c,y(t)+c,z(t)+c)$$

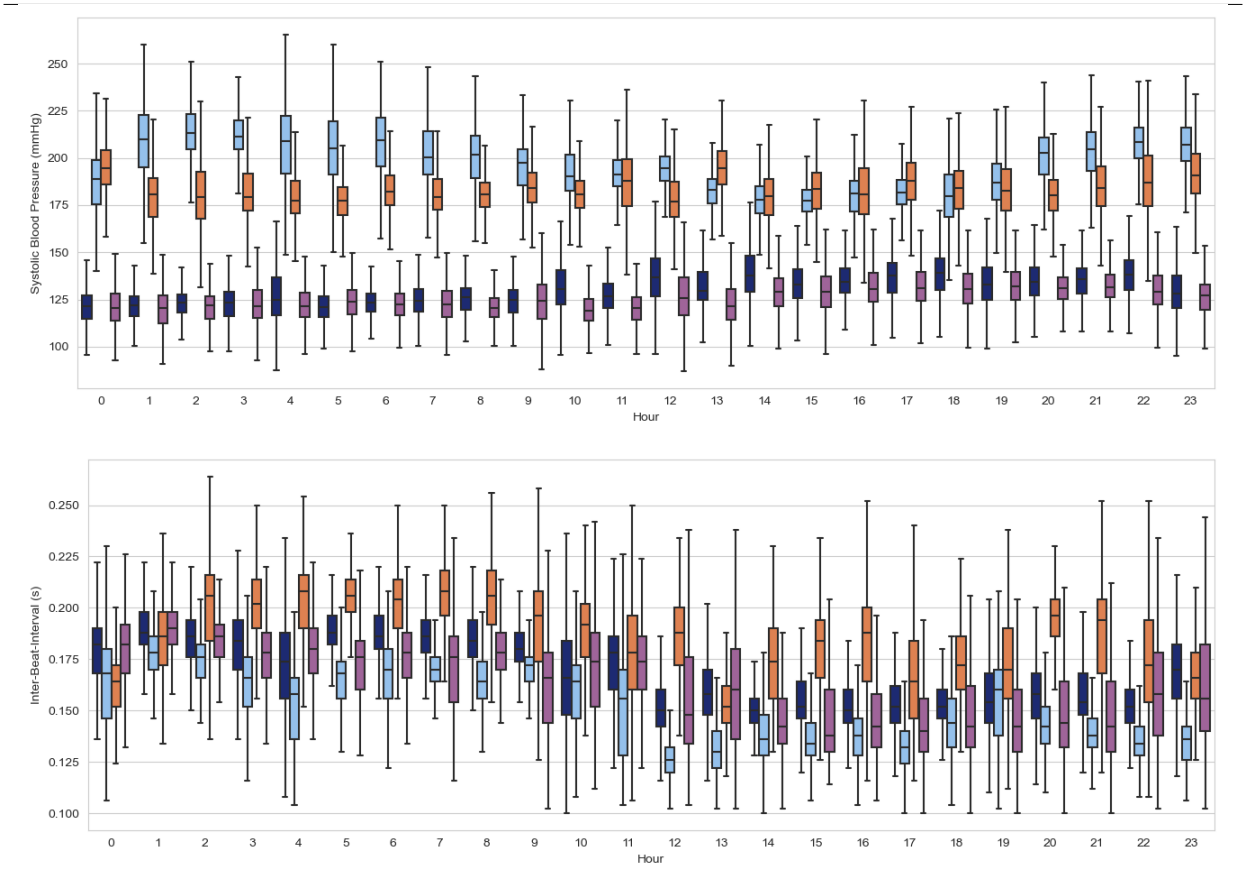


Figure 5: Box-plots of systolic blood pressure and interbeat intervals, ordered in time. Each color portrays different rat genome. From the firs plot we see the difference between the normotensive and the hypertensive rats. The box-plots of the same strain are not unambiguously correlated in time.

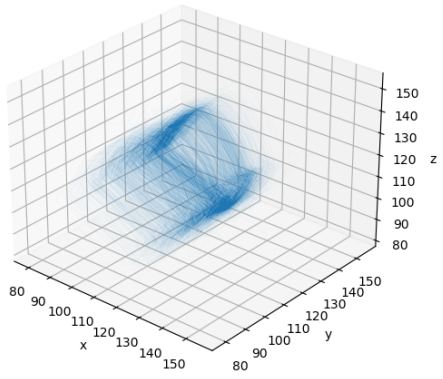


Figure 6: Signal plotted in an (x,y,z) phase space.

To remove the baseline variation, the attractor is projected onto a plane orthogonal to the vector $(1,1,1)$. New variables are defined. We decided to define the variable u differently to the [Aston et al., 2014] and [Charlton et al., 2015]. Whilst still orthogonal to the variables w and v, it now also represents the numerical second derivative of the time series.

$$w = \frac{1}{3}(x+y+z), u = \frac{1}{\sqrt{6}}(x-2y+z), v = \frac{1}{\sqrt{2}}(x-z).$$

Shifting the time series by a constant affects only the variable w. The attractor can now be projected onto the (u,v) plane, as in Fig.7. The resulting shape should only be affected by the changes to the shape of the waveform.

5.1.3 Constructing a density

A density on a uniform grid is constructed to compare projected attractors better. The bin width is specified, and a two-dimensional histogram is created. The

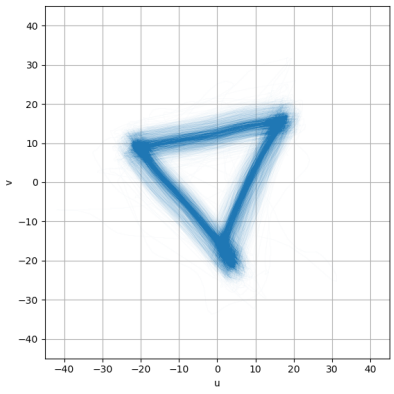


Figure 7: Signal plotted in a (u,v) phase space.

volume is then normalised to be one. An exemplary histogram can be seen in Fig.8

5.1.4 Choosing the right τ

Suppose the time series is periodic, with period T then choice of the τ parameter to be $T/3$ or $2T/3$ results in an attractor with a threefold rotational symmetry about the origin [Aston et al., 2018]. Arterial blood pressure and many other time series samples are close to but not perfectly periodic. The value of τ is chosen by finding the most symmetrical attractor. Let $D_1(\tau)$ denote the constructed density on a uniform grid. A density $D_2(\tau)$ from the attractor rotated by $\frac{2\pi}{3}$ is created, as well as $D_3(\tau)$ density created by rotating the attractor by $\frac{4\pi}{3}$. Combining three rotated histograms, new density is defined as

$$D_s(\tau) = \frac{1}{3}(D_1(\tau) + D_2(\tau) + D_3(\tau)).$$

Note that the D_s density has a three-fold symmetry from the construction. This can be seen in Fig.9

If the attractor has a three-fold symmetry, then $D_s = D_1$. Finding the optimal τ is now a problem of finding the value of τ for which the distance between $D_1(\tau)$ and $D_s(\tau)$ is minimal. Let

$$S(D_1(\tau)) = \|D_1(\tau) - D_s(\tau)\|_2,$$

be the symmetry measure of the density, the optimal τ is set by finding the minimum of the $S(D_1(\tau))$ function. Recall that the attractor has a three-fold rotational symmetry about the origin for $\tau = \frac{T}{3}$ and $\tau = \frac{2T}{3}$, which is illustrated in Fig.10.

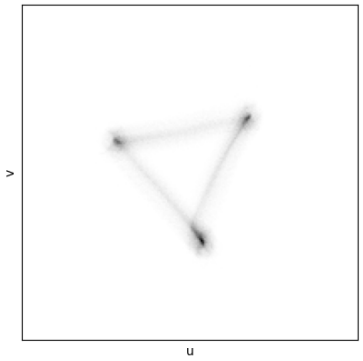


Figure 8: Histogram $D_1(\tau)$ constructed from the attractor projected onto the (u,v) phase space. We can see a higher density at the vertices.

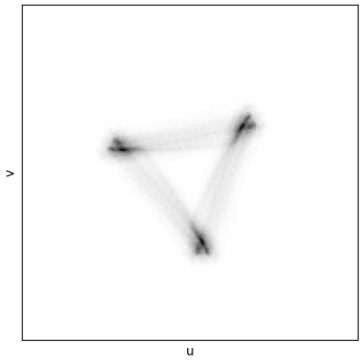


Figure 9: The density $D_s(\tau)$. Symmetrical from the construction.

5.2 Extracting Features

While reconstructing the attractors, we obtain τ_{opt}, a time delay found by minimising the symmetry function. It contains information about the estimated heart rate.

Increase in the amplitude of the original signal results in an increase in the attractors' size. Thus it is reasonable to extract the average circumscribed circle radius as one of the features.

Moreover, the clockwise rotation of the attractor arises from the increased concavity of down-strokes of the waveform. An angle of rotation form regular vertical orientation is calculated and used as a feature.

On the other hand, increased convexity of upstroke in the ABP waveform causes the attractor not to have

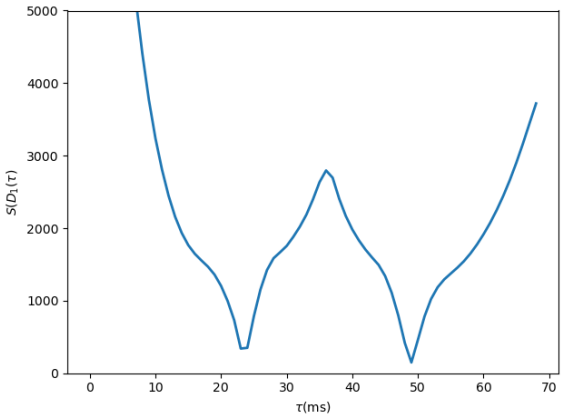


Figure 10: Plot of the symmetry measure function. Two local minima can be observed. The first minimum should correspond to the value of $\tau = \frac{\text{Heart beat period}}{3}$. The second minimum should correspond to the value of $\tau = \frac{2\times\text{Heart beat period}}{3}$

a uniform density along the edges. That is why we also extract counts of data points at the vertices of the attractors and counts at the sides.

We also calculated the average inscribed circle radius and width of the attractor at sides and vertices.

These and more features are further explained and described in [Aston et al., 2018] and [Nandi et al., 2018] along with their biological interpretation and derivation.

5.3 Results

The results were successful. This method was able to classify the rats very precisely. A comparison of selected attractors can be seen in Fig.11. The differences were hard to pinpoint by human eyes, but it was no problem for SVM.

As with the first method, this method was 100% successful at classifying *TGR* and *SHR* rats. Misclassification happened only in two instances when *HanSD* rats were classified as *WT* rats. The recall of *HanSD* rats has increased from 0.67 to 0.90. The precision of *WT* rats has also increased from 0.90 to 0.93. Despite only using 5 minutes records to classify each rat genome, this method was also the most successful.

Table 5: Confusion matrix of test set classified by the third method.

		Predicted			
		HanSD	*WT*	*TGR*	*SHR*
Actual	*HanSD*	18	2	0	0
	WT	0	28	0	0
	TGR	0	0	27	19
	SHR	0	0	0	26

Table 6: Classification report. The performance metrics of the third method.

	Normotensive		Hypertensive	
	HanSD	*WT*	*TGR*	*SHR*
Precision	1.00	0.93	1.00	1.00
Recall	0.90	1.00	1.00	1.00
F1-score	0.95	0.96	1.00	1.00
Support	20	28	27	26

6 Conclusion

Three machine learning methods were used to classify rat strains. The first method classified the rats from the test set nearly perfectly. In the second method, we tried to use more granular data whilst keeping the high accuracy of predictions. The model underperformed when compared to the results of the first method.

The last method used is a method of attractor reconstruction. This method used the most granular data. The results were the most accurate out of all the methods while using only 5-minute records of the rats.

The last approach shows that the rat genomes can be distinguished by the arterial blood pressure waveform. In future, this method can be validated on larger datasets and potentially used to classify rat genomes near real-time.

Acknowledgments

The authors thank Mgr. Ľuboš Molčan, PhD. who provided us with the data and consultancy.

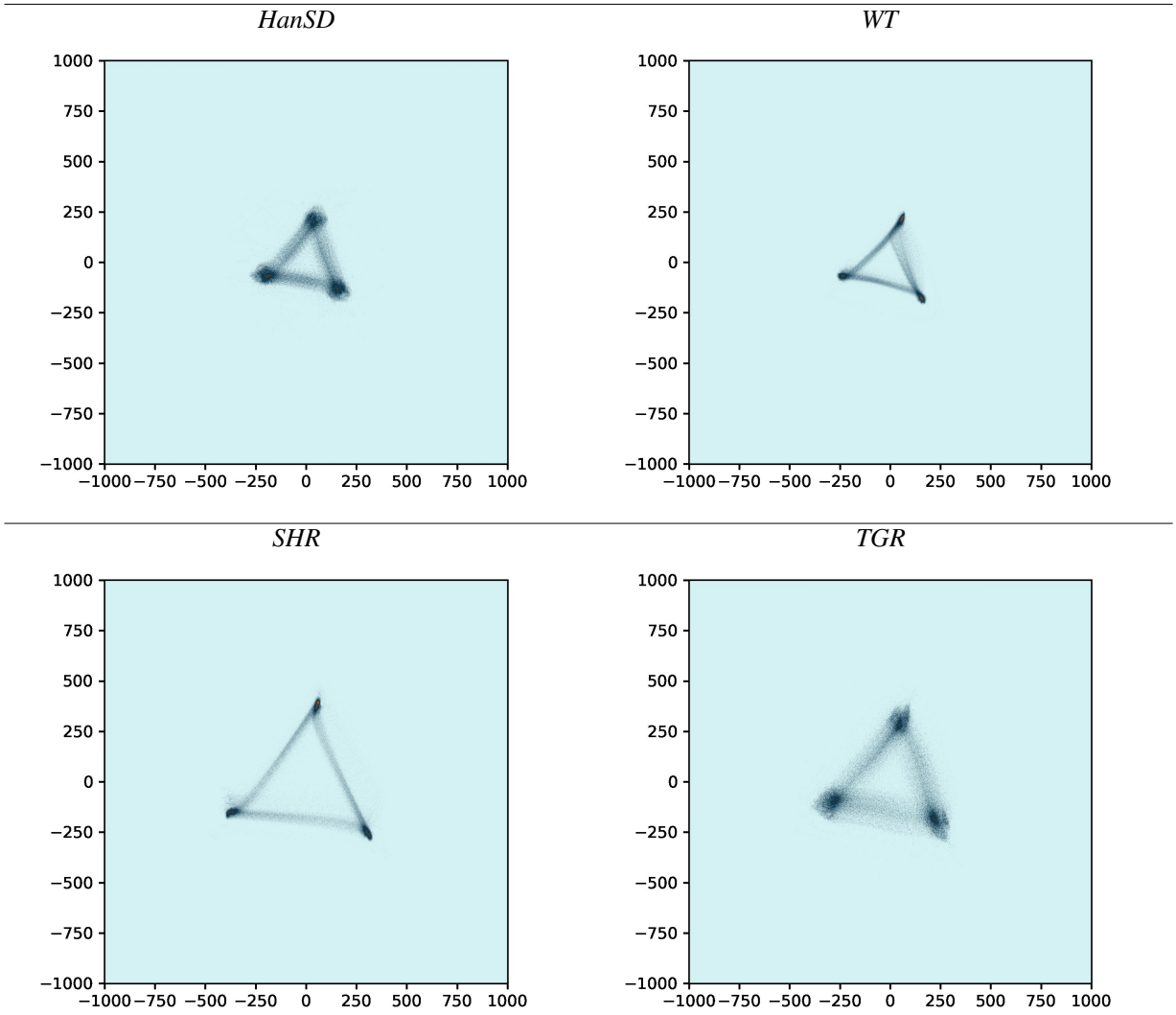


Figure 11: Comparison of the exemplary densities. The attractors in the second row are of hypertensive rats. Higher values of blood pressure results in attractors of larger size.

References

[Aston et al., 2014] Aston, P., Nandi, M., Christie, M., and Huang, Y. (2014). Comparison of attractor reconstruction and hrv methods for analysing blood pressure data. volume 41.

[Aston et al., 2018] Aston, P. J., Christie, M. I., Huang, Y. H., and Nandi, M. (2018). Beyond hrv: attractor reconstruction using the entire cardiovascular waveform data for novel feature extraction. *Physiological measurement*, 39(2):024001.

[Charlton et al., 2015] Charlton, P., Camporota, L., Smith, J., Nandi, M., Christie, M., Aston, P., and Beale, R. (2015). Measurement of cardiovascular state using attractor reconstruction analysis.

[Lyle et al., 2017] Lyle, J. V., Charlton, P. H., Bonet-Luz, E., Chaffey, G., Christie, M., Nandi, M., and Aston, P. J. (2017). Beyond hrv: Analysis of ecg signals using attractor reconstruction. In *2017 Computing in Cardiology (CinC)*, pages 1–4. IEEE.

[Nandi et al., 2018] Nandi, M., Venton, J., and Aston, P. J. (2018). A novel method to quantify arterial pulse waveform morphology: attractor reconstruction for physiologists and clinicians. *Physiological measurement*, 39(10):104008.

[Takens, 1981] Takens, F. (1981). Detecting strange attractors in turbulence. In *Dynamical systems and turbulence, Warwick 1980*, pages 366–381. Springer.

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 10–17
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Tomáš Sásik, Martin Mačaj

O regulárnych mapách s nepárnou Eulerovou charakteristikou

Tomáš Sásik[1*]

Školiteľ: Martin Mačaj[1†]

Katedra algebry a geometrie, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstrakt: Pre každú dvojicu nepárnych prirodzených čísel $m,\ k \geq 3$ zostrojíme regulárnu mapu Eulerovej charakteristiky $m+k-mk$, ktorej grupa automorfizmov je izomorfná s je izomorfná s polopriamym súčinom grúp Z_m a D_n, kde $n = 2k$.

Kľúčové slová: regulárne mapy, dihedrálne grupy, polopriamy súčin

1 Úvod

Mapy sú objekty na pomedzí algebry, kombinatoriky a geometrie plôch. Vznikajú celulárnym vložením (každá oblasť je homeomorfná otvorenému kruhu) grafu do topologickej uzavretej (kompaktnej bez hranice) plochy. Regulárne mapy preukazujú najvyšší možný stupeň symetrií a sú istým zovšeobecnením piatich dobre známych platónskych telies. Otázka klasifikácie regulárnych máp prináša podnetné a plodné prostredie, pretože spája teóriu grúp, kombinatoriku a topológiu. Všetky tri prístupy sa ukazujú užitočné a zároveň sa objavujú hlbšie súvislosti medzi týmito zdanlivo vzdialenými odvetviami matematiky, čím sa prispieva k ich vzájomnému rozvoju.

Zaujímavé sú regulárne mapy s nepárnou Eulerovou charakteristikou, pretože u týchto je zaručené, že sú neorientovateľné, lebo vzniknú vložením grafu do neorientovateľnej plochy. O neorientovateľných mapách je toho ešte veľa neznáme a nevieme ich zatiaľ presne popísať. V tomto článku skúmame mapy na základe štruktúry grupy automorfizmov. Hľadali sme mapy, ktorých grupa automorfizmov je polopriamym súčinom cyklickej a dihedrálnej grupy. Vzhľadom k tomu, že každá takáto mapa nakrýva mapu na dihedrálnej grupe, našli sme všetky mapy na polopriamom súčine nepárnej cyklickej a dihedrálnej grupy, ktoré nakrývajú nedegenerovanú mapu na dihedrálnej grupe. Takto sme našli nekonečnú triedu máp s Eulerovou charakteristikou $\chi \equiv 1 \pmod 4$. Podobným spôsobom pravdepodobne bude možné rozšíriť náš postup na prípad degenerovanej príslušnej dihedrálnej mapy.

*sasik6@uniba.sk
†macaj@dcs.fmph.uniba.sk

2 Definície a pomocné tvrdenia

2.1 Regulárne mapy

Budeme skúmať regulárne mapy čisto z algebraického hladiska, takže:

Definícia 1. *Regulárnu mapu M s grupou automorfizmov G definujeme ako $M = (G,\ x,y,z)$, grupu G s tromi význačnými prvkami $x,y,z \in G,\ x,y,z \neq 1$ pre ktoré platí $x^2 = y^2 = z^2 = (xz)^2 = 1$.*

Prvky x,y,z sa nazývajú involúcie alebo generátory mapy M

Niekedy môžeme pripustiť aj degenerovaný prípad, keď niektorrá z invlolúcií x,y,z je 1.

Poznámka 1. *V princípe, regulárne mapy sú mapy, ktoých grupa automorfizmov pôsobí tranzitívne na množinu flagov (trojicu susedných objektov (vrchol, hrana, oblasť)). Pôvodná definícia sa dá nájsť v [Nedeľa, 2007], kde je ukázaná jej ekvivalencia s našou definíciou.*

Odteraz budeme regulárne mapy nazývať len skrátene mapy, pretože budeme pracovať len s regulárnymi mapami.

Poznámka 2. *Pozoruhodná vlastnosť je, že teoreticky sa dajú všetky vlastnosti mapy popísať pomocou jej grupy automorfizmov.*

Definícia 2. *Nech $M_1 = (G_1,\ x_1,y_1,z_1)$, $M_2 = (G_2,\ x_2,y_2,z_2)$ sú mapy. Hovoríme, že M_1 nakrýva M_2 ak existuje homomorfizmus $\phi : G_1 \to G_2$ taký, že $\phi(x_1) = x_2$, $\phi(y_1) = y_2$, $\phi(z_1) = z_2$. Ak existuje takýto izomorfizmus, tak hovoríme, že M_1, M_2 sú izomorfné.*

Poznámka 3. *Všimnime si, že homomorfizmus ϕ z predchádzajúcej definície je jednoznačne určený, pretože je daný na prvkoch x_1,y_1,z_1 a tie generujú celú grupu G_1. Navyše je vždy surjektívny, lebo x_2,y_2,z_2 generujú G_2.*

2.2 Duál a Petriho duál

V kombinatorickej teórii grafov a máp sa používajú dve operácie na mape $M = (G,\ x,y,z)$. Duál M^D a Petriho duál M^P. V grupovom prístupe sa ukáže, že tieto dve operácie majú peknú analógiu a úzko súvisia so 4-prvkovou podgrupou $\langle x,z\rangle$. Môžeme si všimnúť, že ľubovoľným spermutovaním prvkov $\{x,z,xz\}$ dostaneme opäť mapu na grupe G. Dve z týchto permutácií sa zhodujú práve s operáciami duálu a Petriho duálu. Duálu zodpovedá preznačenie $x' = z, y' = y, z' = x$ (zámena vrcholov a oblastí) a Petriho duálu zodpovedá preznačenie $x' = x, y' = y, z' = xz$. Tieto dve permutácie generujú všetkých 6 permutácií prvkov $\{x,z,xz\}$.

Lema 1. *Majme mapy $M = (G,x,y,z)$, $N = (G',x',y',z')$ a nakrytie medzi nimi $\Phi : G \to G'$. Potom M^D nakrýva N^D a M^P nakrýva N^P tým istým homomorfizmom $\Phi : G \to G'$.*

2.3 Mapy na D_n

Dihedrálne grupy budeme reprezentovať nasledovne

$$D_n = \langle s,r \mid s^2 = r^n = 1, rs = sr^{-1}\rangle = \\ = \{1,r,r^2,\ldots,r^{n-1},s,sr,\ldots,sr^{n-1}\},$$

pričom občas použijeme aj ekvivalentnú prezentáciu $D_n = \langle a,b \mid a^2 = b^2 = (ab)^n = 1\rangle$

Budeme potrebovať mapy $M = (D_n,\ x,y,z)$, ktorých grupou automorfizmov je dihedrálna grupa.

S dihedrálnymi mapami úzko súvisia degenerované a redundantné mapy, ktoré rozobrali autori v článku [Li and Širáň, 2003] v ich Proposition 4. Na základe toho dostaneme lemu 2.

Definícia 3. *Nech $M = (G,\ x,y,z)$. Ak niektorý z generátorov x,y,z je 1, alebo niektoré dva z generátorov x,y,z sa rovnajú, tak mapu M nazveme degenerovaná. Ak $x \in \langle y,z\rangle$, alebo $y \in \langle x,z\rangle$, alebo $z \in \langle x,y\rangle$, tak mapu M nazveme redundantná.*

Každá degenerovaná aj redundantná mapa má dihedrálnu grupy automorfizmov. Ukáže sa, že z jednej redundantnej mapy (u nás kategória a)) vieme dostať všetky dihedrálne mapy.

Lema 2. *Nech $M = (D_n,x,y,z)$, $n = 2k$ je nedegenerovaná mapa. Potom M patrí do niektorej z nasledujúcich kategórií, pričom v každej kategórii sú všetky mapy izomorfné. Všetky kategórie sa dajú dostať z mapy typu a) aplikovaním operácií duálu a Petriho duálu.*

	x	y	z	$(a-b,k)$	$(a-b) \bmod 2$
$a)$	r^k	sr^a	sr^b	1	1
$b)$	r^k	sr^a	sr^b	1	0
$c)$	sr^a	sr^b	r^k	1	1
$d)$	sr^a	sr^b	r^k	1	0
$e)$	sr^a	sr^b	sr^{a+k}	1	1
$f)$	sr^a	sr^b	sr^{a+k}	1	0

Dôkaz. Dôkaz je založený na [Li and Širáň, 2003], Proposition 4. Podrobný dôkaz je priložený v súbore *DihedralneMapy.pdf*. □

Často budeme používať jednu konkrétnu mapu typu a), a to $x = r^k,\ y = s,\ z = sr$.

3 Polopriame súčiny a Sylowove vety

Definícia 4. *Nech N a H sú grupy a navyše H má na N akciu rešpektujúcu štruktúru grupy N, t.j. permutácia daná prvkom $h \in H$ je automorfimus grupy N. Ekvivalentne akcia grupy H na N je zobrazenie $\Phi : H \to Aut(N)$. Vytvorme množinu dvojíc prvkov $G = N \times H = \{(n,h), n \in N, h \in H\}$. Potom na G môžeme definovať operáciu*

$$(m,g) * (n,h) = (mn^{g^{-1}}, gh).$$

Potom $(G,*)$ je grupa, ktorú voláme polopriamy súčin N,H, píšeme $G = N \rtimes H$.

Lema 3. *Nech $G = N \rtimes H$. Grupa G obsahuje podgrupu izomorfnú s N ako $\{(n,1), n \in N\}$ a podgrupu izomorfnú s H ako $\{(1,h), h \in H\}$. Navyše N je normálna podgrupa G, $N \cap H = \{(1,1)\}$ a $G = NH$.*

Naopak ak ľubovoľná grupa G má normálnu podgrupu N a podrupu H s vlastnosťami $N \cap H = \{(1,1)\}$, $G = NH$, tak G je polopriamy súčin $N \rtimes H$.

Tvrdenie 1. *Nech $M = (G,\ X,Y,Z)$ je mapa na polopriamom súčine $G = N \rtimes H$. Označme $X = ax, Y = by, Z = cz$, kde $a,b,c \in N,\ x,y,z \in H$ Potom $m = (H,\ x,y,z) \cong (G/N,\ XN,YN,ZN)$ je tiež regulárna mapa.*

Poznámka 4. *Izomorfizmus týchto dvoch štruktúr (grúp s trojicou význačných prvkov) zjavne platí z*

vlastností polopriameho súčinu, takže stačí dokázať o jednej z nich, že je mapa.

Na tieto mapy sa budeme často odvolávať ako príslušná mapa k mape M na H, resp. na G/N.

Dôkaz. Počítajme pre $X = ax$.

$$1 = X^2 = (ax)^2 = aa^{x^{-1}}x^2,$$
$$1 = x^2.$$

Analogicky dostaneme $y^2 = 1, z^2 = 1$. Pre xz máme $XZ = axcz = ac^{x^{-1}}xz$, takže analogicky $(xz)^2 = 1$. Ostáva ukázať, že x,y,z generujú H, čo ukážeme na G/N. Nech $gN \in G/N$ pre nejaké $g \in G$. Keďže X,Y,Z generujú G máme $g = W_1 \cdots W_n$, kde $W_i \in \{X,Y,Z\}$. Pre triedy rozkladu platí $gN = W_1N \cdots W_nN$, takže XN, YN, ZN generujú G/N a rovnako x,y,z generujú H. □

3.1 Sylowove vety

Veta 1 (Sylowove vety)**.** *Nech G je daná konečná grupa. Podgrupu grupy G, ktorá je maximálnou p-podgrupou grupy G (t.j. nie je obsiahnutá v žiadnej väčšej p-podgrupe) nazveme Sylowova p-podgupa. Značme $v_p(m)$ násobnosť prvočísla p v prvočíselnom rozklade m. Potom*

1. *Pre každé prvočíslo p s $v_p(|G|) = n$ existuje Sylowova p-podgrupa grupy G veľkosti p^n.*
2. *Pre dané prvočíslo p sú všetky Sylowove p-podgrupy grupy G konjugované. T.j. pre ľubovoľné dve Sylowove p-podgrupy H, K existuje prvok $g \in G$ taký, že $g^{-1}Hg = K$.*

Dôsledok 1. *Každá p-podgrupa grupy G je obsiahnutá v Sylowovej p-podgrupe veľkosti p^n.*

Dôkaz. Nech H je p-podgrupa G. Z definície Sylowovej p-podgupy vyplýva, že H je obsiahnutá v nejakej Sylowovej p-podgrupe. Podľa 2. majú všetky Sylowove podgrupy rovnakú veľkosť a podľa 1. je táto veľkosť p^n. Preto H je obsiahnutá v Sylowovej p-podgrupe rádu p^n. □

Veta 2. *Majme polopriamy súčin $G = N \rtimes H$, kde N je normálna podgrupa nepárnej veľkosti. Nech $M = (G, X,Y,Z)$ je mapa s grupou automorfizmov G. Ďalej nech $m = (H, x,y,z)$ je príslušná mapa na podgrupe H. Potom existuje mapa $M' = (G, X',Y',Z')$ na G a k nej príslušná mapa $m' = (H,x',y',z')$ na H taká, že $M' \cong M$, $m' \cong m$, pričom $X',Z' \in H$, a teda $X' = x', Z' = z'$.*

Dôkaz. Označme S Sylowovu 2-podgrupu v G, ktorá obsahuje 4-prvkovú podgrupu $\langle X,Z\rangle$. Označme S' Sylowovu 2-podgrupu grupy H, ktorá obsahuje $\langle x,z\rangle$. Keďže $|N|$ je nepárna, tak $v_2(G) = v_2(N)$, a teda S' je aj Sylowova 2-podrupa G. Potom S, S' sú konjugované nejakým prvkom $g \in G$, čiže $g^{-1}Sg = S'$. Označme $X' = g^{-1}Xg, Y' = g^{-1}Yg, Z' = g^{-1}Zg$. Konjugácia prvkom g dáva automorfizmus grupy G, takže $M' = (G, X',Y',Z')$ je mapa izomorfná s M. Príslušná mapa na H bude $m' = (H, x',y',z')$. Keďže $X,Z \in S$, tak $X',Z' \in S' \subset H$. Takže $X' = x', Z' = z'$. Ostáva ukázať $m' \cong m$. Využijeme, že m, m' sú zároveň mapy na G/N a konjugácia prvkom g dáva na G/N automorfizmus zhodný s konjugáciou prvkom gN, pričom $g^{-1}wNg = g^{-1}WNg = W'N = w'N$ pre $w \in \{x,y,z\}$. Týmto dostávame izomorfizmus m a m'. □

3.2 Polopriamy súčin Z_m a D_n

Zopakujme označenie $Z_m = \langle a \mid a^m = 1\rangle = \{a^i,\ 0 \le i < m\}$ a $D_n = \langle s,r \mid s^2 = r^n = (sr)^2 = 1\rangle = \{s^i r^j,\ 0 \le i < 2,\ 0 \le j < n\}$. Nech $G = Z_m \rtimes D_n$, teda D_n má akciu na Z_m rešpektujúcu štruktúru Z_m. Takúto akciu reprezentujeme ako homomorfizmus $\Phi : D_n \to Aut(Z_m)$. Pôsobenie prvku $d \in D_n$ na prvok $b \in Z_m$ píšeme niektorým z nasledujúcich spôsobov: $b^d = \Phi(d)(b) = b^{\Phi d}$. Každý prvok $g \in G$ vieme písať v tvare $g = a^i d$, $a^i \in Z_m$, $d \in D_n$. Pre násobenie prvkov $g = a^i d,\ h = a^j e$ platí

$$gh = a^i da^j e = a^i da^j d^{-1} de = a^i \left(a^j\right)^{d^{-1}} de =$$
$$= a^i \left(a^{d^{-1}}\right)^j de.$$

Nájdeme všetky takéto polopriame súčiny. Majme spomínaný polopriamy súčin, pričom platí $a^s = a^b, a^r = a^c, 0 \le b,c < m$. Potom použitím faktu, že identity $s^2, r^n, (sr)^2$ dihedrálnej grupy pôsobia na Z_m ako identita, dostávame

$$a = a^{s^2} = (a^s)^s = \left(a^b\right)^s = (a^s)^b = a^{b^2},$$
$$a = a^{r^n} = (a^r)^{r^{n-1}} = (a^c)^{r^{n-1}} = \left(a^{r^{n-1}}\right)^c = \cdots = a^{c^n},$$
$$a = a^{(sr)^2} = a^{b^2c^2}.$$

Z rovností prvkov v cyklickej grupe pre exponenty platí

$$1 \equiv b^2 \pmod m,$$
$$1 \equiv c^n \pmod m,$$
$$1 \equiv b^2c^2 \pmod m.$$

Tieto podmienky sú ekvivalentné s

$$b^2 \equiv 1 \pmod{m}, \tag{1}$$
$$c^2 \equiv 1 \pmod{m}, \tag{2}$$
$$c^n \equiv 1 \pmod{m}, \tag{3}$$

a v prípade párneho n je tretia navyše, pretože vyplýva z druhej, v prípade nepárneho n sa druhá a tretia podmienka zredukujú na $c \equiv 1 \pmod{m}$.

Uvidíme, že platí aj opačná implikácia.

Lema 4. *Nech pre b,c platia podmienky (1), (2). Potom existuje jednoznačne daný polopriamy súčin $G = Z_m \rtimes D_n$ spĺňajúci podmienky $a^s = a^b, a^r = a^c$.*

Dôkaz. Treba dokázať, že máme jednoznačne určenú akciu grupy D_n na Z_m, ktorá rešpektuje grupovú štruktúru Z_m. Takáto akcia je vyjadriteľná ako homomorfizmus $\Phi : D_n \to Aut(Z_m)$. Homomorfizmus stačí definovať na generátoroch, t.j. na s,r. Potrebujeme definovať automorfizmus $\Phi(s)$. Ten je znovu definovaný na generátore a v Z_m, lebo $a^{\Phi s} = a^b$. Ide skutočne o automorfizmus, pretože $a^s = a^b$, pričom $(m,b) = 1$ vďaka (1). Podobne $a^r = a^c$ definuje automorfizmus $\Phi(r)$, pretože $(m,c) = 1$. Teraz máme definované obrazy generátorov D_n zobrazením Φ v grupe $Aut(Z_m)$. Stačí overiť, že generujúce identické vzťahy

$$s^2, r^n, (sr)^2$$

sa zobrazia na identický automorfizmus. Napríklad pre prvý z nich chceme, aby $(\Phi(s))^2$ bol identický automorfizus. Znovu stačí overiť na generátore a, že sa správa ako identita, $a^{(\Phi s)^2} = a$. To je však presne spôsob, akým sme skonštruovali podmienky (1), (2), takže prirodzene to platí, rovnako pre ostatné generujúce identické vzťahy. Teda naozaj dostávame želaný homomorfizmus $\Phi : D_n \to Aut(Z_m)$, teda aj vyhovujúcu akciu. □

4 Mapy na $Z_m \rtimes D_n$

Chceli by sme nájsť všetky mapy na polopriamom súčine $G = Z_m \rtimes D_n$. Majme teda takú mapu $M = (G,X,Y,Z)$, kde $X = a^{i_x}x, Y = a^{i_y}y, Z = a^{i_z}z$, kde $x,y,z \in D_n$. Podľa tvrdenia 1 príslušná mapa na D_n je $M_1 = (D_n,x,y,z)$. Potrebujeme určiť X,Y,Z, čo znamená určiť i_x,i_y,i_z a dostaneme tak všetky mapy.

Rozoberme prípad, keď M_1 je nedegerovaná mapa na D_n. Čiže n je párne a máme dočinenia s niektorou zo šiestich typov máp a) - f). Keďže všetky typy vzniknú z typu a) pomocou operácií duálu a Petriho duálu, tak podľa lemy 1 nám na ich nájdenie stačí stačí uvažovať D_n typu a) a ostatné mapy dostaneme práve aplikovaním duálu a Petriho duálu.

Za predpokladu nepárnej cyklickej grupy Z_m, teda že m je nepárne môžeme spraviť nasledovné zjednodušenie. Použitím vety 2, ktorá využíva Sylowove vety dostávame mapu M' na D_n izomorfnú s M. Keďže príslušné mapy na D_n sú $M_1' \cong M_1$, tak M_1' je tiež typu a). Navyše $X' = x', Z' = z'$. Môžme hľadať mapy M len v tvare M', teda s predpokladom $X = x, Z = z$. Takto dostaneme všetky mapy až na izomorfizmus.

Majme mapu M na G a príslušnú mapu M_1 na D_n typu a). Zvoľme si BUNV vzhľadom na izomorfizmus $M_1 = (D_n,x,y,z)$ tak, že $x = r^k$, $y = s$, $z = sr$, kde $k = n/2$. Toto môžeme spraviť, pretože každá mapa typu a) je izomorfná s našou zvolenou mapou M_1. Stačí preznačiť generátory r,s. Tým sa však môže zmeniť polopriamy súčin, konkrétne jeho parametre b,c z lemy 4, avšak G je stále „nejaký“ polopriamy súčin $Z_m \rtimes D_n$. Túto úpravu vieme rovnako spraviť aj s pridaným predpokladom $X = x, Z = z$.

Nájdeme ekvivalentné podmienky tomu, že $M = (G,\ X,Y,Z)$, kde $X = a^{i_x}x, Y = a^{i_y}y, Z = a^{i_z}z$ je mapa, kde $(D_n,\ x,y,z)$ je príslušná mapa na D_n typu a). Všimnime si, že zatiaľ nepracujeme s pridaným predpokladom $X = x, Z = z$, preto aby sme dostali všeobecnejší výsledok. Spočítajme najskôr, kedy budú X,Y,Z involúcie.

$$1 = X^2 = \left(a^{i_x}r^k\right)^2 = a^{i_x(c^k+1)},$$
$$1 = Y^2 = \left(a^{i_y}s\right)^2 = a^{i_y(b+1)},$$
$$1 = Z^2 = \left(a^{i_z}sr\right)^2 = a^{i_z(bc+1)},$$
$$XZ = a^{i_x}r^k a^{i_z}sr = a^{i_x+i_z c^k}xz,$$
$$\| \quad\quad\quad\

Nakoniec potrebujeme nájsť podmienku na zabezpečenie toho, že $\{X,Y,Z\}$ generujú G. Musíme vedieť vygenerovať prvok a. Naopak, ak vieme vygenerovať prvok a, tak $x = a^{-i_x}X$, $y = a^{-i_y}Y$, $z = a^{-i_z}Z$ a z $\langle x,y,z\rangle = D_n$ máme želanú vlastnosť $\langle X,Y,Z\rangle = G$. Ak by sme vedeli vygenerovať a, nech $a = W_1 \dots W_N$, kde $W_j \in \{X,Y,Z\}$, čiže $W_j = a^{i_j} w_j$, $w_j \in \{x,y,z\}$. Potom

$$Z_m = [a] = [W_1]\cdots[W_n] = [w_1]\cdots[w_N] = [w_1 \cdots w_N],$$

takže $w_1 \dots w_n \in Z_m$, a keďže $Z_m \cap D_n = \emptyset$, tak $w_1 \dots w_n = 1$.

Majme $W_1 \cdots W_N$ také, že $w_1 \cdots w_N = 1$. Potom $W_1 \cdots W_N \in Z_m$. Zaujíma nás, ktoré všetky prvky Z_m takto dokážeme vygenerovať. Ukáže sa, že nám stačí skúmať základné identity z D_n a z nich „poskladáme“ ľubovoľnú identitu $1 = w_1 \dots w_n$ z Dn. Využijeme vyjadrenie

$$D_n = \left\langle x,y,z \mid y^2 = z^2 = (yz)^n = x(yz)^k = 1 \right\rangle.$$

Lema 5. *Majme prvok $g = W_1 \cdots W_N$, pričom $w_1 \cdots w_N = 1$. Označme $S = \left\langle (YZ)^n, X(YZ)^k \right\rangle$, $S \leq Z_m$. Potom*

$$W_1 \cdots W_N \in \left\langle (YZ)^n, X(YZ)^k \right\rangle, \qquad \textit{resp.} \qquad g \in S.$$

Dôkaz. Budeme postupovať indukciou vzhľadom na počet krokov odvodenia identity $w_1 \cdots w_N = 1$. Pre $N = 0$ tvrdenie platí. Majme dva prvky

$$\begin{aligned} g_1 &= U_1 \cdots U_K V_1 \cdots V_M \in Z_m \\ g_2 &= U_1 \cdots U_K W_1 \cdots W_L V_1 \cdots V_M \in Z_m, \\ U_i, V_i, W_i &\in \{X,Y,Z\}. \end{aligned}$$

pričom pre príslušné zložky z D_n platí $u_1 \cdots u_K v_1 \cdots v_M = 1$ a $u_1 \cdots u_K w_1 \cdots w_L v_1 \cdots v_M = 1$, kde $u_i, v_i w_i \in x,y,z$ a $w_1 \cdots w_L$ je generujúca identita(relátor). Zavedieme pár označení pre stručnosť zápisu. Keďže $w_1 \cdots w_L = 1$, tak $W_1 \cdots W_L \in Z_m$, teda

$$W_1 \cdots W_L = a^i.$$

Nech

$$\begin{aligned} &U_1 \cdots U_K = a^j d, \quad d \in D_n, \\ &a^{d^{-1}} = a^e, \\ &U_1 \cdots U_M = U. \end{aligned}$$

Počítajme

$$\begin{aligned} g_2 = a^j d a^i U = a^j \left(a^{d^{-1}}\right)^i dU = \\ = a^j a^{ie} dU = (a^i)^e a^j dU = (a^i)^e g_1. \end{aligned}$$

Keďže $a^i = W_1 \cdots W_L \in S$ (v prípade relátorov y^2, z^2 máme $Y^2 = Z^2 = 1 \in S$ a pre zvyšné dva relátory $(yz)^n, x(yz)^k$ priamo z definície S), tak $g_1 \in S \iff g_2 \in S$. Každý prvok identity $w_1 \cdots w_N$ vieme dostať vkladaním a odstraňovaním relátorov, pričom sme ukázali, že v každom kroku sa zachová členstvo g v S, takže $g \in S$. □

Zistíme ako vyzerá S, na čo nám stačí vypočítať jej dva generátory:

$$(YZ)^n = \left(a^{i_y+i_z b} yz\right)^n,$$

označme $A = a^{i_y+i_z b}$ a predvypočítajme si

$$a^{r^{-1}} = a^{r^{n-1}} = a^{c^{n-1}} = a^c,$$

posledná rovnosť platí vzhľadom k $c^{n-1} \equiv c \pmod m$, lebo $c^2 \equiv 1 \pmod m$ a n je párne. Ďalej

$$\begin{aligned} (YZ)^n = (Ayz)^n = \prod_{i=0}^{n-1} A^{(zy)^i} (yz)^n = \prod_{i=0}^{n-1} A^{(r^{-1})^i} = \\ = \prod_{i=0}^{n-1} A^{c^i} = A^{\sum_{i=0}^{n-1} c^i}, \text{ kde} \end{aligned}$$

$$\sum_{i=0}^{n-1} c^i = \begin{cases} \frac{c^n-1}{c-1}, & c \neq 1, \\ n, & c = 1, \end{cases}$$

avšak symbolicky budeme aj prípad c=1 značiť takto,

$$\begin{aligned} X(YZ)^k = X(Ayz)^k = a^{i_x} x A^{\frac{c^k-1}{c-1}} (yz)^k = \\ = a^{i_x} (A^x)^{\frac{c^k-1}{c-1}} x (yz)^k = a^{i_x} A^{c^k \frac{c^k-1}{c-1}}. \end{aligned}$$

Nakoniec

$$S = \left\langle a^{(i_y+i_z b)\frac{c^n-1}{c-1}},\ a^{i_x+(i_y+i_z b)c^k \frac{c^k-1}{c-1}} \right\rangle.$$

Spomeňme si, že $\{X,Y,Z\}$ generuje G práve vtedy, keď $a \in S$, čo je práve vtedy, keď $S = Z_m$. Prvky v Z_m vygenerujú celú cyklickú grupu práve vtedy, keď pre ich exponenty platí

$$\mathrm{NSD}\left(m, (i_y+i_z b)\frac{c^n-1}{c-1}, i_x + (i_y+i_z b)c^k \frac{c^k-1}{c-1}\right) = 1. \tag{8}$$

Tým sme našli podmienku ekvivalentnú tomu, že G je generovaná involúciami $\{X,Y,Z\}$.

Tvrdenie 2. *Podmienky (4) - (8) na parametre b,c,i_x,i_y,i_z sú spolu s podmienkami (1), (2) na polopriamy súčin ekvivalentné skutočnosti, že takto zostrojená $M=(G,\ x,y,z)$ je mapa.*

4.1 Zjednodušenie Sylowovými vetami

Teraz pridáme už aj predpoklad m je nepárne, teda stačí uvažovať $X=x,Z=z$, t.j. $i_x=0,i_z=0$. Podmienka (8) nadobudne tvar

$$\mathrm{NSD}\left(m,\ i_y\frac{c^n-1}{c-1},\ i_yc^k\frac{c^k-1}{c-1}\right)=1.$$

Musí platiť $(m,i_y)=1$. Potom a^{i_y} generuje grupu Z_m, takže ho môžeme preznačiť na a (zvolíme ho za generátor grupy Z_m). Týmto preznačením opäť zmeníme parametre b,c polopriameho súčinu $Z_m\rtimes D_n$. Avšak všetky podmienky 4)-8) ostanú zachované. Máme teda $Y=ay$, $i_y=1$.

Zároveň $(m,c)=1$, pretože $m\mid c^2-1$, takže $(m,c^k)=1$. Použijeme ešte $c^n=(c^k-1)(c^k+1)$ a dostaneme

$$\begin{aligned}1&=\mathrm{NSD}\left(m,\ \frac{c^k-1}{c-1}(c^k+1),\ \frac{c^k-1}{c-1}\right)=\\&=\mathrm{NSD}\left(m,\ \mathrm{NSD}\left(\frac{c^k-1}{c-1}(c^k+1),\ \frac{c^k-1}{c-1}\right)\right)=\\&=\mathrm{NSD}\left(m,\ \frac{c^k-1}{c-1}\right),\end{aligned}$$

čo je ekvivalentné s pôvodnou podmienkou.

Vzhľadom na $i_y=1$, z podmienky (5) máme $b\equiv -1\pmod m$, takže $b=-1$.

Poznámka 5. *Ukázali sme, že za našich predpokladov nám stačí uvažovať situáciu $b=-1$, $i_x=0$, $i_y=1i_z=0$. Za týchto predpokladov sú podmienky (4) - (7) automaticky splnené. Už nám stačí overovať platnosť len dvoch podmienok, (2): $c^2\equiv 1\pmod m$ a (8): $\left(m,\ \frac{c^k-1}{c-1}\right)=1$ a za ich splnenia určite dostaneme mapu.*

Spočítajme počet vrcholov, hrán a oblastí V, E, F nájdených máp. Neskôr budeme vedieť dostať ich Eulerovu charakteristiku χ. Budeme potrebovať rády prvkov $YZ=ayz=ar$ a $XY=xay=a^{x^{-1}}xy=a^{r^k}r^ks=a^{c^k}sr^k$. Pre rád YZ máme $(YZ)^l$ patrí do Z_m práve vtedy, keď $r^l=1$, to jest $n\mid l$, $l=nl'$. Potom

$$(YZ)^{nl'}=((ar)^n)^{l'}=\left(a^{\frac{c^n-1}{c-1}}\right)^{l'}=a^{\frac{c^k-1}{c-1}(c^k+1)l'}.$$

Keďže $\left(\frac{c^k-1}{c-1},\ m\right)=1$, tak $(YZ)^{nl'}=1$ práve vtedy, keď $(c^k+1)l'\equiv 0\pmod m$. Najmenšie také l' je $\mathrm{Rad}(c^k+1)$ v aditívnej cyklickej grupe $\mathbb{Z}_m$. Takže $\mathrm{Rad}(YZ)=n\,\mathrm{Rad}(c^k+1)$

Pre rád XY máme $(XY)^2$ patrí do Z_m, lebo $(sr^k)^2=1$, takže rád XY je párny, to jest $l=2l'$. Potom

$$(XY)^{2l'}=\left(a^{c^k}\left(a^{c^k}\right)^{sr^k}\right)^{l'}=\left(a^{c^k}a^{-c^n}\right)^{l'}=a^{(c^k-1)l'}.$$

Vidíme, že $(XY)^2l'=1$ práve vtedy, keď $(c^k-1)l'\equiv 0\pmod m$, najmenšie také l' je $\mathrm{Rad}(c^k-1)$, čiže $\mathrm{Rad}(XY)=2\,\mathrm{Rad}(c^k-1)$.

Potom dostávame

$$\begin{aligned}V&=\frac{|G|}{2\,\mathrm{Rad}(YZ)}=\frac{m}{\mathrm{Rad}(c^k+1)}=(m,\ c^k+1),\\E&=\frac{|G|}{2\,\mathrm{Rad}(XZ)}=\frac{mn}{2}=mk,\\F&=\frac{|G|}{2\,\mathrm{Rad}(XY)}=\frac{mk}{\mathrm{Rad}(c^k-1)}=k(m,\ c^k-1).\end{aligned}$$

Lema 6. *Využili sme a ešte sa nám zídu nasledovné počty.*

1. *Pre $a\in\mathbb{Z}_m$ platí $\mathrm{Rad}(a)=\frac{m}{(m,a)}$.*
2. *Vďaka $m\mid(c-1)(c+1)$ a m je nepárne platí $m=(m,c-1)(m,c+1)$.*

Rozlíšme ešte dva prípady podľa parity k. Ak je k párne, z podmienky $\left(m,\ \frac{c^k-1}{c-1}\right)=1$ dostávame

$$\frac{c^k-1}{c-1}=\frac{(c^2)^{k/2}-1}{c-1}=\frac{(c^2-1)(\dots)}{c-1}=(c+1)(\dots),$$

takže $(m,\ c+1)=1$ a následne $(c-1)(c+1)\equiv 0\pmod m$ sa zredukuje na $(c-1)\equiv 0\pmod m$, čiže $c=1$. Potom $\frac{c^k-1}{c-1}=k$, takže $(m,k)=1$.

$$V=1,\qquad E=mk,\qquad F=mk.$$

Dostávame mapy s Eulerovou charakteristikou $\chi=V-E+F=1$, takže mapy v projektívnej rovine. Tieto nie sú pre nás veľmi zaujímavé, pretože všetky mapy v projektívnej rovine sú známe a podrobne popísané.

Nech k je nepárne. Podmienka (8) sa bude dať ekvivalentne upraviť na tvar $((m,k),\ c-1)=1$. Využitím $c^2\equiv 1\pmod 2$ upravíme podmienku $\left(m,\ \frac{c^k-1}{c-1}\right)=1$ nasledovne: $\frac{c^k-1}{c-1}=\sum_{i=0}^{k-1}c^i=1+(c+$

$1)\frac{k-1}{2}$. Označme $d_1 = (m,\ 1+(c+1)\frac{k-1}{2})$ a $d_2 = (m,k,c-1)$. Keďže $d_1 \mid m = (c-1)(c+1)$, ale $(d_1,\ c+1) = 1$, tak $d_1 \mid c-1$. Navyše $0 \equiv 1+(c+1)\frac{k-1}{2} \equiv 1+2\frac{k-1}{2} = k \pmod{d_1}$, čiže $d_1 \mid d_2$. Keďže $d_2 \mid c-1$, tak $1+(c+1)\frac{k-1}{2} \equiv k \equiv 0 \pmod{d_2}$, čiže $d_2 \mid d_1$. Vidíme, že $d_1 = d_2$, takže $d_1 = 1$ práve vtedy, keď $d_2 = 1$. Podmienka $((m,k),\ c-1) = 1$ má už výhodu, že je ľahké nájsť všetky c, ktoré ju spĺňajú pre dané m,k.

Keďže $c^2 \equiv 1 \pmod{m}$ a k je nepárne, tak počty V, E, F sú

$$V = (m,\ c+1), \qquad E = mk, \qquad F = k(m,\ c-1).$$

Všimnime si, že pre dané m,k môžeme pre viacero volieb c-čka dostať rovnaké počty V,E,F, takže je možné, že takto dostaneme izomorfné mapy. Taktiež je však možné, že pre rôzne m,k by sme mohli dostať izomorfné mapy voľbou vhodného c. V najbližšom rozhodneme túto otázku. Budeme potrebovať nasledujúcu lemu.

4.2 Ďalšia redukcia pre nepárne k

Lema 7. *Nech* $N = \langle a^{c-1} \rangle$ *a* $H = \langle Y,\ Z \rangle$. *Potom* $N \cong Z_{m'}$ *a* $H \cong D_{n'}$, *kde* $m' = (m,c+1)$ *a* $n' = n(m,c-1)$ *a platí* $G = N \rtimes H$.

Dôkaz. Grupa N je ako podgrupa cyklickej grupy tiež cyklická, jej veľkosť je rád prvku a^{c-1}, čo je $\mathrm{Rad}(c-1) = \frac{m}{(m,c-1)} = (m,c+1) = m'$. V H majú prvky Y,Z rád 2 a rád prvku YZ sme už počítali a je $\mathrm{Rad}(ar) = n\,\mathrm{Rad}(c+1) = n(m,c-1) = n'$, takže $H \cong D_{n'}$. Generátory tejto grupy označíme $s' = Y = as$, $r' = YZ = ar$.

Dokážme, že N je normálna podgrupa. Nech $a^{(c-1)i} \in N$. Potom $a^{-1}a^{(c-1)i}a = a^{(c-1)i} \in N$, $s^{-1}a^{(c-1)i}s = a^{(c-1)ib} \in N$, $r^{-1}a^{(c-1)i}r = a^{(c-1)ic} \in N$. Z generátorov túto vlastnosť ľahko rozšírime na všetky prvky G, takže N je normálna.

Pozrime sa, ako vyzerajú prvky H. Sú to $(r')^i = a^{\frac{c^i-1}{c-1}}r^i$ a $s'(r')^i = a^{1-\frac{c^i-1}{c-1}}sr^i$ pre $0 \le i \le n'$. Prvky grupy N sú a^{di}, kde $d = (m,c-1)$, $0 \le i \le m'$. Teraz potrebujeme $N \cap H = \{1\}$. Keďže prvky $s'(r')^i \in H$ obsahujú vo svojom kanonickom zápise s, tak tieto nie sú v N. Ak by prvok $a^{\frac{c^i-1}{c-1}}r^i \in N$, tak $n \mid i$, aby $r^i = 1$. Nech $i = nj$. Potom $(r')^{nj} = \left(a^{\frac{c^n-1}{c-1}}\right)^j = a^{\frac{c^k-1}{c-1}(c^k+1)j} = a^{\frac{c^k-1}{c-1}(c+1)j}$. Musí platiť $d \mid \frac{c^k-1}{c-1}(c+1)j$, ale $(d,\frac{c^k-1}{c-1}) = 1$ a $(d,c+1) = 1$, takže $d \mid j$. Potom však $n' \mid i$, takže $(r')^i = 1$, máme skutočne len triviálny prienik N a H.

Nakoniec potrebujeme dokázať, že NH dá celú grupu G. Keďže $|N| \cdot |H| = |G|$, stačí nám na to, že v každej triede rozkladu podľa N je jeden prvok z H. Dokážeme, že žiadne dva prvky z H nie sú v rovnakej triede. Ak by boli, tak sa líšia o násobok prvkom a^{dl}, takže $a^{dl}(r')^i = (r')^j$, t.j. $a^{dl}a^{\frac{c^i-1}{c-1}}r^i = a^{\frac{c^j-1}{c-1}}r^j$ alebo $a^{dl}s'(r')^i = s'(r')^j$, t.j. $a^{dl}a^{1-\frac{c^i-1}{c-1}}sr^i = a^{1-\frac{c^j-1}{c-1}}sr^j$. V prvom prípade musí platiť $r^i = r^j$, takže $i \equiv j \pmod{n}$, taktiež musí platiť $\frac{c^i-1}{c-1} \equiv \frac{c^j-1}{c-1} \pmod{d}$. Keďže $c \equiv 1 \pmod{d}$, tak $\frac{c^i-1}{c-1} = 1+c+\cdots+c^{i-1} \equiv i \pmod{d}$, tak $i \equiv j \pmod{d}$. Vzhľadom na podmienku $(m,k,c-1) = 1$ platí $(d,n) = 1$ a máme $n' = dn$, takže $i \equiv j \pmod{n'}$. Tým pádom $(r')^i = (r')^j$ a ide o ten istý prvok.V druhom prípade dostaneme analogicky $s'(r')^i = s'(r')^j$, takže $NH = G$. Tým sme dokázali, že $G = N \rtimes H$. □

Sme v situácii, že máme mapu $M = (G,\ X,Y,Z)$ na $G = Z_m \rtimes D_n = Z_{m'} \rtimes D_{n'}$. Nech príslušné mapy na D_n a $D_{n'}$ sú $M_1 = (D_n,\ x,y,z)$ a $M_1' = (D_{n'},\ x',y',z')$. Dokážeme, že M_1' je tiež typu a). Pri označení $k' = n'/2$ a $d = (m,c-1)$ spočítajme prvok $(r')^{k'} = a^{\frac{c^{k'}-1}{c-1}}(r^k)^d = a^{\frac{c^{k'}-1}{c-1}}(r^k)$, keďže d je nepárne. Keďže $\frac{c^{k'}-1}{c-1} \equiv k' = kd \equiv 0 \pmod{d}$, tak $(r')^{k'} \in r^kN$. Ďalej máme $X = x = r^k \in (r')^{k'}N$, $Y = ay = as = s'$, $Z = z = sr = s'r'$. Preto $x' = (r')^{k'}$, $y' = s'$, $z' = s'r'$. Ide naozaj o typ a).

Taktiež m', k' sú stále nepárne, máme splnené všetky požadované podmienky a môžeme urobiť znova zjednodušujúce kroky. Najskôr nájdeme zo Sylowových viet izomorfnú mapu M' na G, v ktorej $X' = x', Z' = z'$. Následne preznačíme generátory $a' = a^{c-1}$ v Z_m' a s',r' v $D_{n'}$ tak, aby $x' = (r')^{(}k')$, $y' = a's'$, $z' = s'r'$. Pri tom sa nám mohli zmeniť parametre b',c' polopriameho súčinu $Z_{m'} \rtimes D_{n'}$. Počty vrcholov V pre novú mapu M' dostaneme už odvodeným predpisom $V = (m',c'+1) = ((m,c+1),c'+1)$ a ten musí byť rovnaký ako $V = (m,c+1)$ v pôvodnej izomorfnej mape. Keďže $m' = (m,c+1) = V = (m',c'+1)$, tak $m' \mid c'+1$, z čoho máme $c' \equiv 1 \pmod{m'}$, teda $c' = -1$. Dosiahnutý výsledok sformulujeme do vety.

4.3 Hlavné výsledky

Veta 3. *Každá mapa* M *na nejakom polopriamom súčine* $Z_m \rtimes D_n$ *s* $m \equiv 1 \pmod{2}$, $n \equiv 2 \pmod{4}$ *s príslušnou mapou typu a) na* D_n *je izomorfná s nejakou mapou* M' *na nejakom polopriamom súčine*

$Z_{m'} \rtimes D_{n'}$, kde $m' \equiv 1 \pmod 2$, $n' \equiv 2 \pmod 4$ s príslušnou mapou typu a) na $D_{n'}$ a s parametrami tohto polopriameho súčinu $b = -1, c = -1$ a parametrami mapy M' z vety 2 $i_x = 0, i_y = 1, i_z = 0$.

Na nájdenie všetkých hľadaných máp sa nám preto stačí zamerať na prípad $c = -1$. Teraz spočítame V, E, F pre tieto mapy, $V = (m, c+1) = (m, 0) = m$, $E = mk$, $F = k(m, c-1) = k(m, -2) = k$, $\chi = m - mk + k = -(m-1)(k-1) + 1$.

5 Záver

Dostali sme mapy s nepárnou Eulerovou charakteristikou, ktoré sú jednoznačne určené nepárnymi parametrami m, k, pričom žiadne dve z nich nie sú izomorfné, pretože pre rôzne m sa líšia v počte vrcholov a pre rôzne k sa líšia v počte oblastí. Platí pre ne

$$V = m, \qquad E = mk, \qquad F = k,$$

$$\chi = m + k - mk.$$

Ďalšie súvisiace mapy dostaneme aplikovaním duálu a Petriho duálu.

Literatúra

[d'Azevedo et al., 2004] d'Azevedo, A. B., Nedela, R., and Širáň, J. (2004). Classification of regular maps of negative prime euler characteristic. *American Mathematical Society*, 357:4175–4190.

[Li and Širáň, 2003] Li, C. H. and Širáň, J. (2003). Regular maps whose groups do not act faithfully on vertices, edges, or faces. *European Journal of Combinatorics*, 26:521–541.

[Nedeľa, 2007] Nedeľa, R. (2007). *Maps, Hypermaps and Related Topics*. Matej Bel University, Banská Bystrica, Slovakia.

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 18
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Ivana Beňová, Peter Vanya

Generation of origin-destination matrices in transport modelling

Ivana Beňová[1]* Supervisor: Peter Vanya[2] †

[1] Katedra aplikovanej matematiky a statistiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava
[2] Útvar hodnoty za peniaze, Ministerstvo financií SR, Štefanovičova 2968/5, 811 04 Bratislava

In this work, we propose alternative methods to the iterative model for the generation of origin-destination (OD) matrices in macroscopic transport modelling. Before building a new road or railway section, we should first understand the demographic and economic composition of the population to estimate the future demand. Such a forecast can be obtained by transport modelling. One of the steps in solving this complex problem is trip distribution, estimation of the flows of people between the origin and the destination. The result is an OD matrix. The gravity model for the generation of OD matrix T is

$$T_{ij} = A_i B_j O_i D_j e^{-\beta c_{ij}}, \tag{1}$$

where T_{ij} represents the number of trips between zone i and j, O_i represents the sum of all trips originating at zone i and D_j is sum of all trips attracted to zone j, both vectors obtained from previous step of transport modelling called trip generation and $e^{-\beta c_{ij}}$ is deterrence function as it demotivates to travel with increase of cost c_{ij}, parameter β is calibrated by its own algorithm, so that the modelled and estimated average cost of travel are equal.

The main idea of iterative method is that balancing factors A_i and B_j, that ensure that $\sum_j T_{ij} = O_i$ and $\sum_i T_{ij} = D_j$ and therefore look like this

$$\begin{aligned} A_i &= \left[\sum_j B_j D_j e^{-\beta c_{ij}}\right]^{-1}, \\ B_j &= \left[\sum_i A_i O_i e^{-\beta c_{ij}}\right]^{-1}, \end{aligned} \tag{2}$$

are found iteratively by setting all $A_i = 1$ and solving for B_j, which are then used to re-estimate A_i. The process is repeated until the convergence is achieved.

We reproduce OD matrices using the iterative method for zones with different spatial and population dispersions. We observe the matrix entropy through iterations because it was derived in [Ortuzar and Willumsen, 2011] that the formula (1) is also a solution of the entropy-maximizing approach with a set of constraints about trip production and attraction.

The motivation behind the search for an alternative method is that in practice is the need for systematic addition of new constraints representing experimental knowledge about the mobility (eg. mean trip length), which is very complicated in the iterative method. As the first alternative, we extend the demon algorithm, a Monte Carlo simulation for microcanonical ensembles in statistical mechanics from [Creutz, 1983], where a mean trip length has the role of energy. The second explored approach is convex optimization, which can be represented as exponential cone programming and then solved using the ECOS solver.

We investigate the computational complexity, the convergence to desired mean trip length, and the entropy of matrices for each of these algorithms for different spatial and population dispersions. The extended demon algorithm was not effective as the time complexity was too large, and the accuracy was insufficient for the majority of simulations. The convex optimization showed promising results even though it is a slower method than the iterative method.

We focuse on adding new constraints, using convex optimization. We test the purpose of the algorithm on the simple example of a network with constraints on elements of the OD matrix. We try three possibilities and that is direct input as equity constraints, subtraction of the square of the difference of the actual and desired values from the objective function and subtraction of the absolute value of the difference. The best option for implementing new constraints is subtracting the absolute value of differences. It is more computationally expensive than the approach with equity constraints, but it stores the information we obtained with the highest entropy of all approaches.

References

[Creutz, 1983] Creutz, M. (1983). Microcanonical monte carlo simulation. *Phys. Rev. Lett.*, 50:1411–1414.

[Ortuzar and Willumsen, 2011] Ortuzar, J. d. D. and Willumsen, L. (2011). *Modelling transport*. Wiley, 4 edition.

*benova117@uniba.sk
†Supervisor

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 19
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Petra Macková, Marek Fila

Solutions with moving singularities for a nonlinear diffusion equation

Petra Macková[1*] Marek Fila[1†‡]

[1] Department of Applied Mathematics and Statistics, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

This work concerns a qualitative analysis of singular solutions of the Cauchy problem for nonlinear diffusion equation

$$v_t = \Delta v^m, \qquad y \in \mathbb{R}^n \setminus \{\xi(t)\}, \quad t > 0, \qquad (1)$$

where $m > 0$, $n \geq 2$, and $\xi \in C^1([0,\infty);\mathbb{R}^n)$ is a given function. Equation (1) is known as porous medium equation if $m > 1$, fast diffusion equation if $0 < m < 1$, and heat equation if $m = 1$.

If $\xi \equiv \xi_0$ and $n \geq 3$, equation (1) has singular steady states of the form

$$\tilde{v}(y) = K\psi^{1/m}(|y-\xi_0|), \qquad y \in \mathbb{R}^n \setminus \{\xi_0\},$$

where K is an arbitrary positive constant and

$$\psi(r) := \begin{cases} r^{-(n-2)}, & n \geq 3, \quad r > 0, \\ -\log r, & n = 2, \quad r > 0. \end{cases}$$

Since ψ has a logarithmic singularity when $n = 2$, we obtain analogous singular steady states in the domain $B_1(\xi_0) \setminus \{\xi_0\}$. It is well-known that $\tilde{v}$ satisfies

$$-\Delta\tilde{v}(y) = C\delta_{\xi_0}(y) \quad \text{in} \quad D'(\mathbb{R}^n),$$

for some $C > 0$, where δ_{x_0} denotes the Dirac measure on $\mathbb{R}^n$ giving unit mass to the point $x_0 \in \mathbb{R}^n$.

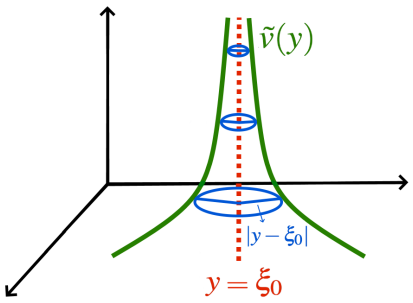


Figure 1: Radially symmetric steady state $\tilde{v}$

Assuming $n \geq 3$ and $m > m_* := (n-2)/(n-1)$, the authors of [Fila et al., 2019] constructed singular solutions of problem (1), which for a given function $k(t)$ behave as

$$v^m(y,t) = k^m(t)\psi(|y-\xi(t)|) + o(\psi(y-\xi(t)))$$

as $y \to \xi(t)$. To construct such solutions, conditions on ξ', k, and k', were imposed. It was shown that m^* is a critical exponent for the existence of such solutions.

In this project, we show that solutions from [Fila et al., 2019] satisfy

$$v_t = \Delta v^m + (n-2)k^m(t)\delta_{\xi(t)}(y) \text{ in } D'(\mathbb{R}^n \times (0,\infty)).$$

Moreover, using the method of sub- and supersolutions, in [Fila et al., 2020] we prove that for $n = 2$ and $m > m_*$, there exist solutions with the behavior

$$v^m(y,t) = k^m\psi(|y-\xi(t)|) + o(\psi(y-\xi(t)))$$

as $y \to \xi(t)$. Here, k is assumed to be a positive constant, which allows conditions on ξ' to be weaker than in [Fila et al., 2019].

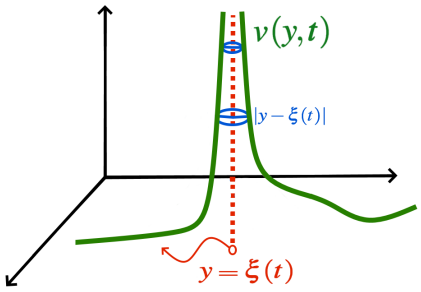


Figure 2: Asymptotically radially symmetric solution v from [Fila et al., 2019] and [Fila et al., 2020]

Acknowledgments

This work has been supported by VEGA grant 1/0339/21 and by the Comenius University Grant for Young Researchers.

References

[Fila et al., 2020] Fila, M., Macková, P., Takahashi, J., and Yanagida, E. (2020). Moving singularities for nonlinear diffusion equations in two space dimensions. *Journal of Elliptic and Parabolic Equations*, 6:155–169.

[Fila et al., 2019] Fila, M., Takahashi, J., and Yanagida, E. (2019). Solutions with moving singularities for equations of porous medium type. *Nonlinear Analysis*, 179:237–253.

*petra.mackova@fmph.uniba.sk
†fila@fmph.uniba.sk
‡Supervisor

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 20
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Pál Somogyi, Ján Somorčík

O niektorých snahách rozšíriť Mannov-Whitneyho test do dvojrozmerného sveta

Pál Somogyi[1*] Ján Somorčík[1†‡]

[1] Katedra aplikovanej matematiky a štatistiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Predstavujeme nové a upravené neparametrické testy polohy dvoch dvojrozmerných súborov. Presnejšie, testujeme prítomnosť posunu pravdepodobnostných rozdelení, z ktorých pochádzajú naše súbory. Východiskom pre tvorbu týchto upravených testov boli články [Sen and Mathur, 2000] a [Mathur, 2009]. Testy v týchto článkoch sú založené na myšlienke Mannovho-Whitneyho testu pre jednorozmerný dvojsúborový prípad. Dvojrozmerné dáta sa charakterizujú pomocou sklonov dátových polpriamok z počiatku súradnicovej sústavy do jednotlivých dát, resp. pomocou vzdialeností dátových bodov od počiatku súradnicovej sústavy. Pre bod $(x,y)^T$ definujeme sklon m ako podiel jeho súradníc $m = \frac{y}{x}$ a vzdialenosť D ako $D = \sqrt{x^2+y^2}$.

Kvôli vyššej citlivosti na porušenie nulovej hypotézy navrhujeme skombinovať tieto dva testy do jedného, kde pri výpočte testovej štatistiky zohľadníme aj sklony, aj vzdialenosti. Vytvoríme testový vektor, ktorého zložky budú štandardizované testové štatistiky vzdialenostného a sklonového testu. Následne skúmame druhú mocninu euklidovskej normy testového vektora. Naša testová štatistika má za istých predpokladov asymptoticky χ^2_2-rozdelenie. Simulácie ukazujú, že vo väčšine prípadov je skombinovaný test silnejší než Mathurov, resp. Senov-Mathurov test.

V snahe zvýšiť sily jednotlivých testov z článkov [Sen and Mathur, 2000] a [Mathur, 2009] sme heuristicky skúmali možnosť začínať vyššie spomenuté dátové polpriamky vo vhodnejšom bode než autormi navrhovaný počiatok súradnicovej sústavy. Simulačne sme skúmali rôzne možnosti polohy tohto referenčného bodu. Ukazuje sa, že najväčšiu silu má test založený na vzdialenostiach v prípade, keď si referenčný bod zvolíme na priamke, ktorá spája stredy rozdelení, z ktorých naše súbory pochádzajú. V prípade testu založeného na sklonoch sa najvhodnejšia poloha referenčného bodu zdá byť na kolmici na spojnicu spomínaných stredov rozdelení, pričom táto kolmica by mala byť vztýčená v strede spomínanej spojnice. V praxi potrebujeme stredy rozdelení odhadnúť - používame priemery resp. pozložkové mediány a porovnávame vplyv tejto voľby na kvalitu testov. V prípade odhadu pomocou mediánu dostaneme robustnejší a silnejší test.

Ukazujeme, že nami vylepšené testy vykážu rovnaké hodnoty testových štatistík, ak referenčné body na navrhnutých priamkach zvolíme veľmi ďaleko od stredov rozdelení. Navyše tieto testy v tomto prípade splynú s už známym testom z článku [Wilcox, 2004], ktorý je namiesto sklonov resp. vzdialeností založený na špeciálnych kolmých priemetoch dát do jednorozmeru.

Keby sme poznali priamku, ktorá spája skutočné stredy rozdelení, mohli by sme testovať pomocou asymptotickej normality. V praxi ju však musíme odhadnúť. To spôsobí, že vzdialenosti, resp. sklony, resp. priemety získané z prvého súboru dát už nebudú nezávislé od tých získaných z druhého súboru. Tento jav spôsobí nekontrolovateľnosť chyby prvého druhu pri použití testu s predpokladom asymptotickej normality testovej štatistiky. Preto navrhujeme použiť permutačný prístup.

Simulačné štúdie ukazujú, že nami upravené testy optimalizujúce polohu referenčného bodu sú silnejšie než Mathurov test na základe vzdialeností, resp. Senov-Mathurov test na základe sklonov a tiež silnejšie než kombinovaný test, ktorý sme navrhli my.

Literatúra

[Mathur, 2009] Mathur, S. (2009). A new nonparametric bivariate test for two sample location problem. *Stat. Methods Appl.*, 18:375–388.

[Sen and Mathur, 2000] Sen, K. and Mathur, S. (2000). A test for bivariate two sample location problem. *Communication in Statistics*, 29:417–436.

[Wilcox, 2004] Wilcox, R. R. (2004). A multivariate projection-type analogue of the wilcoxon-mann-whitney test. *The British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 57:205–213.

*somogyi2@uniba.sk
†somorcik@fmph.uniba.sk
‡Školiteľ

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 21
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Jozef Rajník, Edita Máčajová

Decomposing cubic graphs with cyclic connectivity 5

Jozef Rajník[1*] Edita Máčajová[1†‡]

Katedra informatiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

An *edge-cut* of a connected graph G, or a *cut* for short, is any set S of edges of G such that $G-S$ is disconnected. An edge-cut is *cycle-separating* if at least two components of $G-S$ contain a cycle. One can clearly see that a cut S of minimal size consists of independent edges and that $G-S$ has exactly two components called *cyclic parts*.

We say that a connected cubic graph G is *cyclically k-connected* if it contains no cycle-separating cut consisting of fewer than k edges. The largest number $k \leq |E(G)| - |V(G)| + 1$ such that G is cyclically k-connected is called the *cyclic connectivity* of G. The cyclic connectivity of every graph G is bounded from above by the *girth* of the graph G, which is the length of a shortest cycle in G.

The study of 3-regular graphs, also called *cubic* graphs, offers a convenient approach to several widely-open conjectures such as the Tutte's 5-flow conjecture or the cycle double cover conjecture. It is known that minimal counterexample to those conjectures are cubic. Moreover, it has been proven that the minimal counterexample to the 5-flow conjecture is cyclically 6-connected [Kochol, 2004] and cyclically 4-connected for the cycle double cover conjecture [Zhang, 1997].

Furthermore, cubic graphs with small cycle-separating cuts enable us to use inductive arguments. We can decompose a given cubic graph along a cut into two smaller graphs. Often, it is useful to require additional properties from the smaller graphs. Andersen et al. proved that each cyclic part of a cubic graph with cyclic connectivity 4 can be completed to a cyclically 4-connected cubic graph by adding a pair of adjacent vertices and restoring 3-regularity [Andersen et al., 1988]. Using this result, Goedgebeur et al. constructed a complete list of the smallest cubic graphs with rare properties related to potential minimal counterexamples [Goedgebeur et al., 2020].

In our work, we prove a similar result for cubic graphs with cyclic connectivity 5. We show that if H is a cyclic part of a cubic graph with cyclic connectivity 5, then H can be completed to a cyclically 5-connected cubic graph by adding three vertices on a path of length two, unless H is a cycle of length 5.

Our proof consists of two steps which we briefly sketch. At first, we establish a weaker result that we can complete the cyclic part H to a cubic graph H_1 with girth at least 5 by adding a path xyz of length two. This result is convenient to prove since it is sufficient to choose an order a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 of the five 2-valent vertices of H in such a way that $\mathrm{dist}_H(a_1,a_2) \geq 3$, $\mathrm{dist}_H(a_4,a_5) \geq 3$ and $a_3a_i \notin E(H)$ for each $i \in \{1,2,4,5\}$. Then the graph H_1 is obtained from H by adding a path xyz of length teo and edges xa_1, xa_2, ya_3, za_1, and za_5.

In the second step, we assume that H_1 contains a cycle-separating cut S of size smaller than 5 for otherwise we are done. Since H_1 has girth at least 5, we can show that $|S| = 4$ and that the cut S separates $\{x,a_1,a_2\}$ from $\{z,a_4,a_5\}$. According to this structure of H_1, we find another way how to complete H to a cubic graph H_2 with girth at least 5. Then we show that H_2 is cyclically 5-connected, which concludes our proof.

Acknowledgments

The authors acknowledge partial support from the grants VEGA 1/0813/18 and APVV-19-0308.

References

[Andersen et al., 1988] Andersen, L., Fleischner, H., and Jackson, B. (1988). Removable edges in cyclically 4-edge-connected cubic graphs. *Graphs Combin.*, 4:1–21.

[Goedgebeur et al., 2020] Goedgebeur, J., Máčajová, E., and Škoviera, M. (2020). The smallest nontrivial snarks of oddness 4. *Discrete Appl. Math.*, 277:139–162.

[Kochol, 2004] Kochol, M. (2004). Reduction of the 5-flow conjecture to cyclically 6-edge-connected snarks. *J. Combin. Theory Ser. B.*, 90:139–145.

[Zhang, 1997] Zhang, C. Q. (1997). *Integer Flows and Cycle Covers of Graphs*. Marcel Dekker, New York.

*rajnik@dcs.fmph.uniba.sk
†macajova@dcs.fmph.uniba.sk
‡Supervisor

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 22–27
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Daniel Kyselica

Advanced algorithms for segmentation of space debris astronomical images

Daniel Kyselica*

Katedra aplikovanej informatiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstract: The rising population of space debris is a threat to satellites. Knowledge of position and trajectories of these objects is necessary to prevent collisions between space debris and functional satellites. The existing system, developed by the Department of Astronomy and Astrophysics, [Silha et al., 2019] is capable of tracking objects from series of observations. The current — analytical — solution might produce undesirable false positives due to its architecture. Machine learning is a rising field with a big potential. Using a neural network to create tracklets can remove the downsides of the current system.

Keywords: segmentation, object tracking, processing of astronomical images

1 Introduction

In recent decades, interest in space flights has increased rapidly. Many companies and nations are now sending their satellites to Earth's orbit. Satellites serve many different functions: navigation, data trafficking, weather forecast, space observation etc. With increased activity in the orbit, the population of space debris has risen as well. In the future, if we do not find a solution to this problem, Earth's orbit might become unusable for satellites. Regarding this issue, space agencies around the world are developing systems to monitor and collect space debris. Our university created system processing of series of images of artificial objects orbiting Earth [Silha et al., 2019]. In recent years, machine learning is the best performing method in for various problems. It can also be used in prediction of positions of moving objects.

1.1 Space debris

Objects orbiting the Earth, which do not serve any functions, are called **space debris**. Size of these objects varies from less than millimeter up to meters. Smaller objects are almost impossible to track, yet they make up the majority of space debris. Collisions with these fast moving object can lead to high damage on satellites and space crafts as in figure 1.

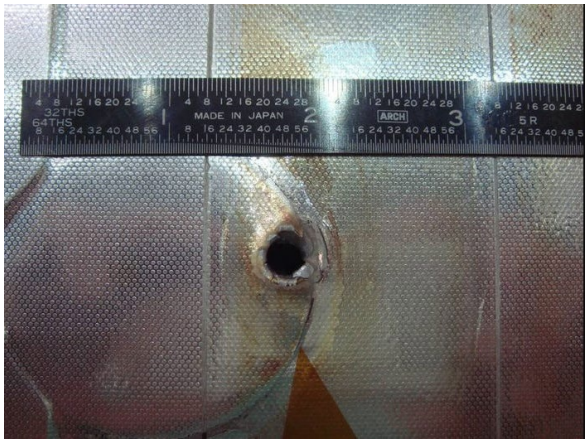


Figure 1: A space debris hit to space shuttle Endeavor. The entry hole is 0.25 inches wide. The exit hole is twice as large. Image downloaded from (NASA 2020).

Only objects with certain sizes at certain altitude can be tracked by optical devices. US Space Surveillance Network (USSSN) maintains a database of such tracked objects. The database consists of more than 42 thousand objects objects, with more than a half of the objects still orbiting the Earth.

Without resolving this problem, phenomenon called *Kessler syndrome* could occur. It represents a state where rate of collisions and space debris population in orbit would increase exponentially. To prevent this scenario, we need to first track space debris and then collect it from the Earth orbit. Source of information in this section is [Krajčovič, 2018].

1.2 Existing system

The Department of Astronomy and Astrophysics (DAA), Faculty of Mathematics, Physics and Informatics of Comenius University in Bratislava, Slovakia developed system for processing space debris and other objects from observation series made by 70 cm Newtonian telescope, AGO70. Series of consecutive observations are processed by the system to find

*kyselica12@st.fmph.uniba.sk

and catalogue moving objects. System input are series of FITS images - Flexible Image Transport System. System pipeline consists of multiple steps, such as image preprocessing, data correlation, output formatting. [Krajčovič et al., 2019].

1.3 Tracklet building - Analytic solution

Tracklet building belongs to the data correlation part of the existing system pipeline. Algorithm finds moving objects from equatorial positions of objects. Input sequence contains list of positions which correspond to the positions of objects in the image. Input positions of objects are processed into tracklet. Existing system uses analytical approach to solve this problem.

1.4 Tracklet

A tracklet is a data structure containing positions of an moving object in time. We can refer to tracklet as trajectory of the object.

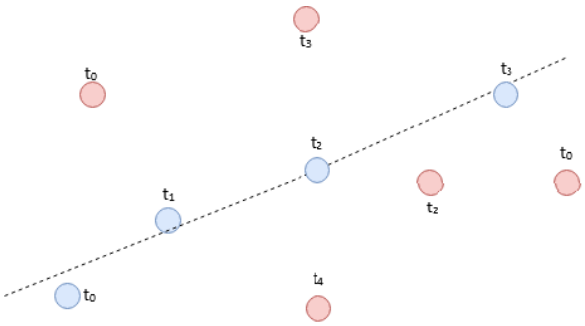


Figure 2: A trajectory and tracklet of an object. The object positions are represented by blue points.

Blue points in the figure 2 represents tracklet and red points represents positions which do not belong to the tracklet. We can then approximate this positions by imaginary line which represents trajectory of the object.

2 Trackled building - Machine learning solution

RNN or recurrent neural network model is supervised learning model used for sequences modeling. We can use LSTM cells to predict current position of moving object from previous positions. We use the predicted positions to build tracklet for moving object. According to article ‚*MX-LSTM: mixing tracklets and vislets to jointly forecast trajectories and head poses* [Hasan et al., 2018], LSTM is good choice for this problem. LSTM are commonly used and well implemented RNN networks in many frameworks. Due to this reasons we used LSTM cells to solve this problem.

2.1 Algorithm

An input sequence contains a list of positions for each corresponding image. Each list contains positions of light sources in corresponding image. Masking processes the sequence to remove objects which appear at approximately the same position throughout the series. We create pairs as a Cartesian product of two initial input lists. Each tuple represents potential positions of a moving object - tracklet. The model predicts the next position for each tracklet (position from the next list). The Matching function finds the closest positions to the already predicted positions in the tracklet from the next list. If the function is not able to find any position within the threshold, the position is marked as missing in the resulting tracklet. If we have already processed whole input sequence, currently constructed tracklets are returned as result tracklets. Otherwise, if at least **k** positions in row are marked as missing in tracklet, it is left as incomplete. Remaining tracklets are updated. We continue by model prediction.

- **Input data** is a sequence consisting of lists. Each list contains positions of objects in a corresponding image. Lists are ordered by the image's capture time.
- **Masking** is a process of removing stationary objects. Removal of non-moving objects increases speed and accuracy of finding correct tracklet.
- **Create tuples** function creates tuples with size 2 of positions from first two images in a sequence.
- **Model predicts** next position of moving object from its previous positions stored in tracklet.
- **Matching function** assign position from the next image to each predicted position.
- **Tracklet update** recomputes match confidence number and vector confidence number with new information from last prediction. **Match confidence** number represents proportion of found positions to total number of positions. **Vector confidence** number from represents average of difference between the norm of true vector and

the norm of difference between the true and prediction vector all divided by norm of true vector.
- **The output** of the system are two .tsv files. First file contains object's positions, second file contains confidence numbers for tracklet.

System has 4 main adjustable parameters:

- **Masking threshold** - If the distance between two points during masking process is equal or less than the masking threshold, these points are considered to be one object. The bigger the value is the more positions are thrown away during masking.
- **Matching threshold** - tells us the maximum distance between predicted position and position in an image. This value can influence total amount and accuracy of found tracklets.
- **Value k** - is the maximum number of missed consecutive positions in tracklet. Objects in an image might not get recognised by the segmentation algorithm and their positions are not in the input sequence for our system. Therefore, the value of k allow system to find tracklets with missing positions.
- **Overlap** - The system can only process sequences with maximum length 8. Overlap value tells us overlap between processed subsequences of input sequence.

3 The Neural network

For purpose of predicting position of moving object in specific time from its previous positions we chose RNN (recurrent neural network) network.

3.1 Topology

To function properly, neural network has to be designed well. For a trajectory forecast we chose a network with LSTM. It accumulates information about the movement of an object from his previous positions to predict current position in the image.

The neural network topology is illustrated in figure 4. Positions from an input sequence are fed into LSTM layers. LSTM projects points from input dimension into hidden dimension space. Before entering the output linear layer, a nonlinear activation function is applied (tanh, ReLU). Output layer

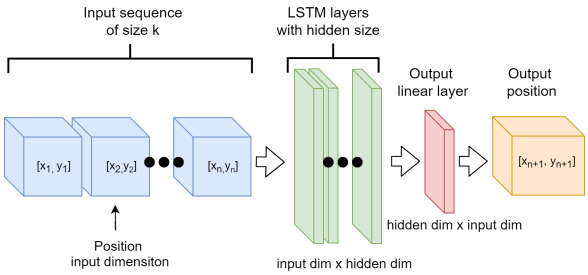


Figure 3: Topology of the neural network. Input sequence is processed by LSTM layers. Output is produced by linear layer to transform LSTM output to input dimension space.

projects data from hidden dimension to input dimension space. The result is vector of the same dimension as the input.

3.2 Training data

Training data are crucial for neural network performance. Large amounts of data is needed for network to be properly trained. In our case, only insufficient amount was available. We resolve this problem by creating training data generator. The way how the trajectory of moving objects in training data is calculated is crucial for model behaviour. A trained model will be able to recognized only objects with this type of trajectory.

3.2.1 Data generator - StarGen.py

The Department of Astronomy and Astrophysics has its own capability to generate synthetic data similar to real observation series taken by a telescope. **StarGen.r** script is written in R language and is capable of generating a single FITS image. This script didn't fulfill all requirements in our case. Therefore, it was rewritten to Python and modified. Final script produces:

- **Series of images** - series of 8 images which is necessary for model learning.
- **Moving objects** - variable number of moving objects. Their trajectories are straight lines and each image in sequence contains one position of an object on specific line.
- **Output .tsv file** - Positions of stars and moving objects are stored in .tsv file.

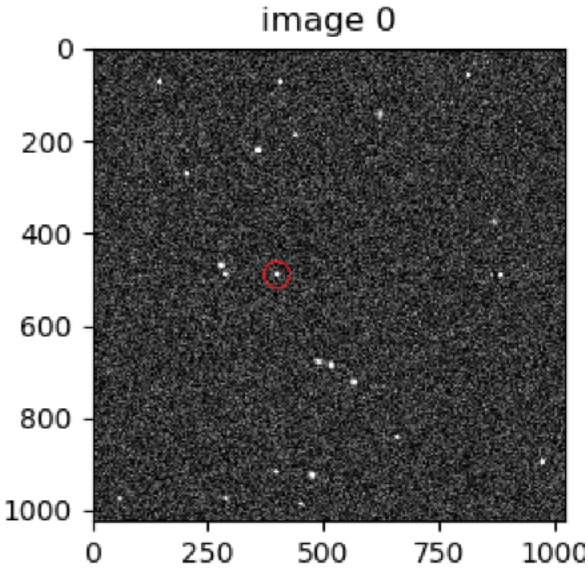


Figure 4: First image from series produces by StarGen.py script. Point in the red circle is the moving object.

3.3 Network selection

Neural network has two adjustable parameters: **hidden dimension** and **number of LSTM layers**. In order to choose the best parameters, we trained multiple models for 20 epochs (learning iteration) with 500 batches each containing 32 sequences with length 2. Moreover, the specification of input and output form of the network is needed. Our strategy is to create complex model, which is complex enough to solve this problem with an acceptable training time.

- **Hidden dimension** - LSTM projects inputs into hidden dimension space. In order to accumulate enough information in the hidden state, it must be in higher dimension space than input. Higher values than 50 lead to higher training error and slower training, as shown in the table 1. For this reason, we choose the highest value of hidden dimension without significantly increasing the training error after 20 epochs. Network with hidden dimension higher than 5 is able to learn solution to the problem. We set **hidden dimension to 50**. Its safer to choose slightly higher value than minimal sufficient value.
- **Number of LSTM layers** - Number of LSTM cells in the network. Use of multiple LSTM cells leads to the increase of training time required. The training error is also converging slower as we can see in the table 2. For these reasons we chose **number of layers 1**.

hidden dim	training error [px]
2	72
5	20
15	6
50	6
100	9

Table 1: The table shows how training error is effected by size of the hidden dimension. Training error is Euclidean distance between predicted and the real position in pixels.

Number of LSTM layers testing		
number of layers	**training error [px]**	**epoch time [s]**
1	6	1.9
2	11	2.55
3	13	3.13
5	18	4.5

Table 2: Change in training error and epoch time for different numbers of LSTM layers in network. Training error is euclidean distance between predicted and true next position in pixels. Epoch time is average duration for training one epoch.

- **Network input** - Decision was made between input sequence with length 2 (containing previous two positions of an object) and input sequence with variable length. In [Kyselica, 2021] section 5.3.3 decision process is described. Model trained with variable sequence length turns out to have more consistent predictions than one trained with fixed input sequence length 2. **Variable input sequence length** was chosen.
- **Network output** - For network output, direction vector from last position to new predicted position was chosen due to its practicality in further operations.

4 System behaviour

System was tested with different parameter on testing data provided by the Department of Astronomy and Astrophysics. System has four adjustable parameters.

1. **Masking threshold (default 0.002)** - Masking threshold is the maximum distance between positions in masking process. Value v represents $v \times image_size$. Different values of masking threshold do not have significant influence on system functionality. The bigger the value is, the less positions are in the input sequence, so the system can process them faster. Yet, with high value we can lose some important positions from sequences.
2. **Matching threshold (default 0.003)** - Matching threshold is the maximum allowed distance between positions in matching process. Value v represents $v \times image_size$. Matching threshold has a huge influence on system behaviour. As the value rises, so does the total number of found tracklets.
3. **K value (default 2)** - K value is the maximum number of missing consequent positions of moving object. K value is responsible for the total number of found tracklets. K value greater or equal to 3 cause the system to produce some tracklets with low confidence values, especially match confidence values. If K is equal to 1, system is not able to find tracklet with only one missing position.
4. **Overlap (default 2)** - System is trained to create tracklets from sequences with maximal length 8. To process longer sequences we create subsequences with overlap. Minimal value is 2, because we need at least to positions for prediction.

More detailed information about parameters are in [Kyselica, 2021] section 5.5.1 .

5 Results

New RNN system was tested against current analytical system on testing data given by the Department of Astronomy and Astrophysics. Testing data contains 26 processed image series from AGO70 telescope. Each series contains positions of one of the 5 real moving objects. 24 series contains 20 images, one series of 19 and one series of 21 images. Objects are real satellites: 2 GPS, 2 GLONASS and one broadcasting satellite. For each series tracklet created by analytical algorithm was given. These tracklets are confirmed to contain only positions of moving object - ground truth for our system, if is not stated otherwise. New system successfully created correct tracklet for every test sequence.

Tracklets, created by the existing analytic system, were compared with ones created by new system using RNN. For every sequence, tracklets found by both systems contained positions of the same moving object. In most cases tracklets found by the RNN system are longer (tracklet contains more positions of moving object). In the figures 5, 6, 7 and 8, there are examples of output tracklets from both systems. Green points are positions for given measurement time that are in both tracklets, blue points are positions only from the RNN system tracklet and red points are positions only from the analytic system tracklet.

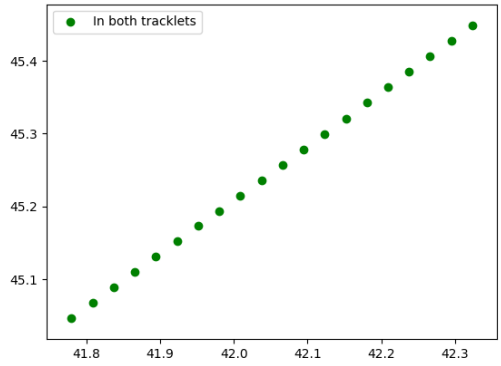


Figure 5: Tracklets for cosmos 2460 satellite. Tracklets from both systems are the same.

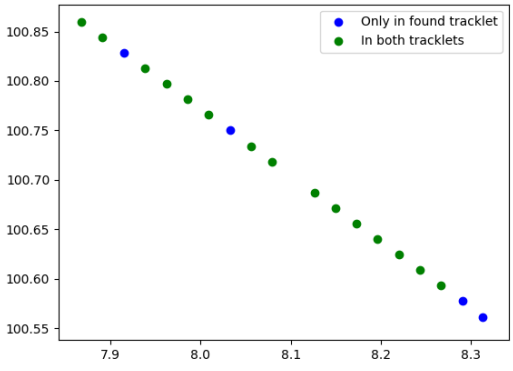


Figure 6: Tracklets for GPS 51 satellite. Tracklet from the new system is 4 positions longer than tracklet from the analytic system.

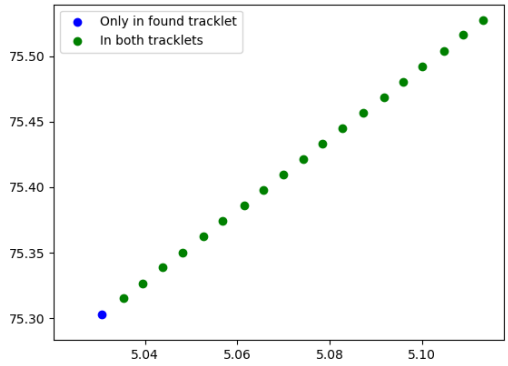


Figure 7: Tracklets for AMC-14 satellite. Tracklet from the new system is 1 positions longer than tracklet from the analytic system.

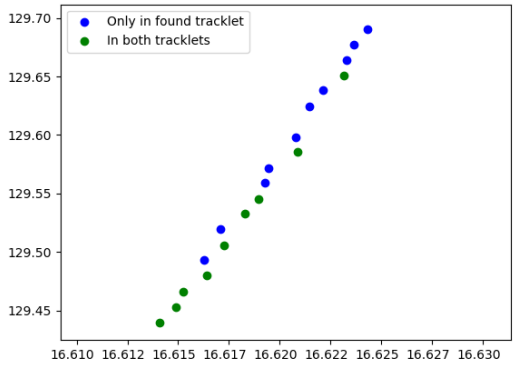


Figure 9: Tracklets for AMC-14 satellite. Tracklet from the new system is 10 positions longer than tracklet from the analytic system. Vector confidence value for this tracklet is 0.90.

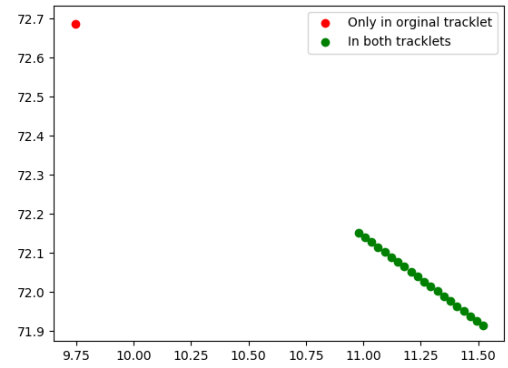


Figure 8: Tracklets for GPS 60 satellite. Tracklet from the analytic system is 1 position longer than tracklet from the RNN system. The additional position from tracklet is a mistake made by the analytic system.

Acknowledgments

I'm extremely grateful to my supervisor Mgr. Stanislav Krajčovič for his insightful suggestions. Thanks should also go to Mgr. Jiří Šilha, PhD. for his invaluable insight into astronomy.

References

[N2Y,] N2yo - live real time satellite tracking and predictions. `https://www.n2yo.com/`, visited 27.1.2021.

[Ahmad, 2020] Ahmad, I. (2020). *40 Algorithms Every Programmer Should Know*. Packt Publishing.

[Hasan et al., 2018] Hasan, I., Setti, F., Tsesmelis, T., Bue, A. D., Galasso, F., and Cristani, M. (2018). Mx-lstm: Mixing tracklets and vislets to jointly forecast trajectories and head poses. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, page 10.

[Kouprianov, 2008] Kouprianov, V. (2008). Distinguishing features of ccd astrometry of faint geo objects. *Advances in Space Research*, 41(7):1029–1038.

[Krajčovič et al., 2019] Krajčovič, S., Ďurikovič, R., and Šilha, J. (2019). Selected modules from the slovak image processing pipeline for space debris and near earth objects observations and research. In *2019 23rd International Conference Information Visualisation (IV)*, pages 112–117. IEEE-CS.

[Krajčovič, 2018] Krajčovič, M. S. (2018). Development of an efficient tracklet building algorithm for space debris objects. Master's thesis, FMFI UK Bratislava.

[Kyselica, 2021] Kyselica, D. (2021). Advanced algorithms for segmentation of space debris astronomical images. Master's thesis, FMFI UK Bratislava.

[Silha et al., 2019] Silha, J., Krajčovič, S., Zigo, M., Zilkova, D., Zigo, P., Simon, J., Toth, J., Kornos, L., Setty, S., Flohrer, T., et al. (2019). Development of the slovak 70-cm optical passive system dedicated to space debris tracking on leo to geo orbits. *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS)*, page 85.

[Thompson, 2006] Thompson, W. (2006). Coordinate systems for solar image data. *Astronomy & Astrophysics*, 449(2):791–803.

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 28–34
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Soňa Senkovičová, Tatiana Jajcayová

Prehľadávanie literárnych textov na príznaky afázie

Soňa Senkovičová[1*] Tatiana Jajcayová[1†‡]

[1] Katedra aplikovanej informatiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstrakt: Afázia je porucha porozumenia a produkcie reči spôsobená poškodením zodpovedajúcich častí mozgu. U pacientov sa prejavuje rôznymi spôsobmi, ako v hovorenej, tak aj písanej reči. V tomto článku analyzujeme niekoľko textov a hľadáme v nich znaky afázie pomocou algoritmov na vyhľadávanie v texte. Najprv si v krátkosti predstavíme a vysvetlíme použité algoritmy. Neskôr skúmame príznaky afázie a ako by sme ich mohli využiť v spojení s vybranými algoritmami na posúdenie toho, či texty tieto znaky vykazujú. Na záver prezentujeme naše experimenty a zistenia.

Kľúčové slová: prehľadávanie textu, analýza textu, Rabin-Karpov algoritmus, približný vyhľadávací algoritmus, afázia, ŠVK

1 Úvod do problematiky

Afázia je definovaná ako strata reči spôsobená poruchou rečového centra v mozgu [Cséfalvay, 2007], [Cormen et al., 2009], [Cséfalvay, 2012], [Hasan et al., 2015]. Cieľom našej práce je nájsť spôsob diagnostiky tejto poruchy cez automatizovanú analýzu textu. Táto snaha je riešená viacerými odvetviami vedy [Cormen et al., 2009], [NIDCD, 2016] a my sa na ňu pozeráme z pohľadu informatického pomocou algoritmov. Naším počiatočným riešením problému je analýzu textu uskutočniť s použitím algoritmov na vyhľadávanie v texte. V rámci našej diplomovej práce sme skúmali a implementovali množstvo rôznych algoritmov od naivného, cez konečný automat po približné algoritmy. Po dostatočnej analýze sme sa rozhodli skúsiť tieto algoritmy aplikovať na reálny problém, v našom prípade hľadanie príznakov afázie v texte. V tomto článku prezentujeme výsledky experimentov dvoch z nich, keďže sme usúdili, že tieto najviac vystihujú našu prácu: Rabin-Karpov algoritmus a približný vyhľadávací algoritmus [A.S.Hornby, 1989], [Eyigoz et al., 2020], [Rasool et al., 2012]. V nasledujúcej časti oba stručne popíšeme.

Afázia sa najčastejšie prejaví ako následok úrazu hlavy, konkrétne do miest zodpovedných za reč. Okrem mechanických úrazov môže afázia vzniknúť časom, napríklad kvôli nádoru na mozgu. Často však býva spôsobená aj mŕtvicou. [Cséfalvay, 2007], [Cormen et al., 2009], [Cséfalvay, 2012], [Hasan et al., 2015].

Je mnoho spôsobov akým sa porucha reči vie prejaviť a teda existuje mnoho typov afázie. Niektorí pacienti môžu mať problém s pomenovaním objektov a iní s repetíciou počutých slov [Hasan et al., 2015]. Nás v našich experimentoch zaujímal problém s vynechávaním krátkych slov, najmä slov, ktoré nie sú podstatné mená, prídavné mená, slovesá a číslovky. Články, ktoré sme skúmali boli v angličtine a teda príkladmi vynechaných slov môžu byť “a“,“an“,“the“, tvary neplnovýznamového slovesa byť a podobne.

Paul West bol americký spisovateľ narodený v Anglicku v roku 1930. Počas svojho života napísal vyše päťdesiat diel v rôznych literárnych žánroch od poézie cez novely po eseje. V roku 2003 dostal mŕtvicu, ktorej následkom utrpel globálnu afáziu, nemohúc slovám porozumieť a ani ich rozprávať. Po tom, čo mu doktori nedokázali pomôcť prehovoriť viac ako pár slov mu jeho žena, Diana Ackerman, navrhla napísať prvý afaický memoár [West, 2008]. Diana Ackerman vo svojom predslove k memoáru píše:

"Písanie tejto knihy bola najlepšia terapia reči, ktorá mu mohla byť predpísaná. Tri vyčerpávajúce hodiny každý deň nútil svoj mozog verbovať mozgové bunky, vytvárať nové spojenia, nájsť správne zvuky k slovám a skladať celé vety. Prejdenie textu na ďalší deň pomohlo jeho myšlienky uhladiť a ukázať mu niektoré odtlačky afázie v próze."

Po troch rokoch rokoch bola kniha napísaná, nazvali ju The Shadow Factory a toto dielo bude predmetom nášho výskumu.

*senkovicova1@fmph.uniba.sk
†tatiana.jajcayova@fmph.uniba.sk
‡Školiteľ

2 Predbežné štúdie

Začneme s krátkym popisom dvoch algoritmov na vyhľadávanie v texte, jedného presného a jedného približného. Ako názov napovedá, vyhľadávanie v texte je problém nachádzania všetkých výskytov vzoru $P[1..m]$ v reťazci $T[1..n]$. Súčasťou tohto problému je aj nájdenie spôsobu, akým toto hľadanie uskutočniť čím efektívnejšie - či už z pohľadu časového alebo pamäťového.

2.1 Rabin-Karpov Algoritmus

Tento presný algoritmus využíva na prehľadávanie porovnania číselých hodnôt reprezentujúcich vzor a časti textu.

Priebeh naivného vyhľadávacieho algoritmu [A.S.Hornby, 1989], [Rasool et al., 2012] vieme ilustrovať ako posúvanie vzoru P pri texte T a hľadanie pozícií, kedy sa ich znaky zhodujú. Začína sa na pozícii $S = 0$, ak sa prvé znaky zhodujú, skontrolujeme druhé, tretie a tak ďalej až prídeme na buď na koniec vzoru alebo sa znaky prestanú zhodovať. V oboch prípadoch posunieme vzor o jeden znak doprava, teda na pozíciu $S = 1$ a pokračujeme v porovnávaní.

Rabin-Karpov algoritmus [A.S.Hornby, 1989], [Rasool et al., 2012] funguje na podobnom princípe, ale samotné znaky porovnáva iba v niektorých prípadoch a tým šetrí čas. Na zistenie týchto "niektorých prípadov" používa číselnú reprezentáciu reťazcov, ako sme spomínali a modulo funkciu. Modulo, označované ako *mod* je definované ako zvyšok po delení *d* po tom, čo sme vydelili číslo *a* číslom *b*.

Algoritmus vypočíta hodnoty reprezentujúce vzor a časť textu rovnakej dĺžky ako vzor, porovná ich a iba ak sa zhodujú (lebo ak sa nezhodujú, znaky sa nezhodujú určite) začne porovnávať jednotlivé znaky. Rýchlosť algoritmu spočíva v myšlienke, že je rýchlejšie vypočítať reprezentácie a vykonať ich porovnanie a až potom sa venovať porovnávaniu znakov, než kontrolovať všetky znaky od začiatku ako pri naivnom prístupe.

Mohla by však nastať situácia, kedy sú reprezentácie čísel tak dlhé, že ich porovnanie nám čas neušetrí. Preto na obe reprezentácie aplikujeme funkciu *mod q* a tým zaručíme, že čísla, ktoré budeme porovnávať nebudú väčšie ako *q-1*.

Keďže teraz nevyužívame presnú reprezentáciu, ale iba výsledok modulo funkcie, môže sa stať, že výsledné reprezentácie sa zhodujú aj keď pôvodné čísla boli rôzne. Toto spôsobí, že sa môžu začať porovnávať aj reťazce, ktoré by sa v predošlej verzii k porovnávaniu nedostali. Opäť sa však spoliehame na myšlienku, že porovnávanie krátkych čísel aj za cenu porovnávania očividne nezhodných reťazcov je rýchlejšie ako porovnávanie príliš dlhých čísel.

Na ďalšie zrýchlenie algoritmu nepočítame nové číselné reprezentácie textu zakaždým od začiatku, ale lineárne. Vieme si to predstaviť ako "odtrhnutie" najvyššie položeného čísla (teda toto na začiatku) a "pripísanie" nového čísla reprezentujúce ďalší znak na koniec.

Pri implementácii sme mali dve možnosti postupu. Prvým bolo nechať algoritmus tak, ako bol myslený a nič na ňom neupraviť. To by však znamenalo, že algoritmus bude niekedy porovnávať iba časti slova, prípadne viac slov naraz so vzorom, čo nie je správanie, ktoré chceme, keď sa snažíme porovnávať počty slov. Preto sme zvolili druhý postup a algoritmus upravili tak, aby vedel porovnávať iba slová. Teda nepôjde slepo cez text, ale bude skákať na začiatky slov. Ak by sme mali v programe hľadať vzor P = "ahoj" v texte T = "ahoj ako sa mas", porovnávanie sa vykoná iba na pozíciách, kde začínajú slová a ak je dĺžka slova zhodná s dĺžkou vzoru. Tým predídeme aj prípadom, kedy je vzor podreťazcom slova v texte ako napríklad pri P = "of" a T = "off". V tomto prípade tento výskyt počítať nebudeme.

2.2 Približný vyhľadávací algoritmus

Kým predošlý algoritmus prestal hľadať zhodu v momente, keď našiel nezhodujúce sa znaky, tento algoritmus [Eyigoz et al., 2020] tak nemusí urobiť vždy.

Pred začiatkom vyhľadávania definujeme premennú "edit distance" označovanú *d* vďaka ktorej bude algoritmus vedieť, či má po nezhode pokračovať v porovnávaní alebo prestať. Táto premenná nám vo svojej podstate hovorí aké množstvo nezhôd

je prípustné na to, aby sme stále uznali daný výskyt ako platný. "Nezhodu" definujeme ako miesto, kde pridaním, zamenením alebo ostránením znaku sa množstvo nezhôd zníži. Napríklad ak máme $d = 1$, môžeme vo vzore alebo časti textu upraviť jedno písmeno. Ak sa potom tieto reťazce rovnajú, berieme to ako zhodu a počítame ju ako každý iný platný výskyt vzoru P v texte T. V tomto prípade by sme teda o vzore P = "aho" a texte T = "ahoj" povedali, že sa v texte T nachádza.
Algoritmus sa dá implementovať rôznymi spôsobmi. Naivný spôsob by zahŕňal vypočítanie jednotlivých nezhôd pre vzor P a všetkých podreťazcov textu T. Potom by sme tieto porovnali s uvedenou *edit distance* a spočítali množstvo tých, ktoré najviac tak veľké ako *edit distance*.

Druhá možnosť je použiť dynamické programovanie. Na začiatku máme dvojrozmerné pole $L[]$ o veľkosti $|P|x|t|$, kde t je podreťazec T, ktorý práve porovnávame. Každé políčko reprezentuje počet nezhôd medzi podreťazcami P a t a vypočíta sa z predošlých nezhôd. Prvý riadok a stĺpec zaplníme číslami od 0 po dĺžky podreťazcov. Každé ďalšie políčko $L[i, j]$ je najmenšia hodnota z políčok $L[i-1, j-1]$, $L[i-1, j]$, $L[i, j-1]$ a k tomu je pripočítaná $+1$ ak sa aktuálne znaky nezhodujú.

Výsledný (a zároveň najnižší možný) počet nezhôd je v políčku $L[|P|, |t|]$ (ak indexujeme od 1).

3 Experimenty

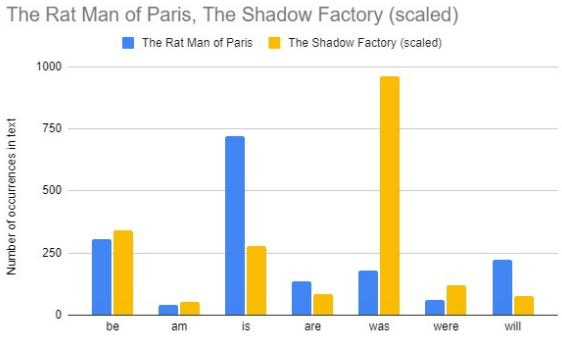
Skúmané algortimy sme sa rozhodli použiť na analýzu rôznych textov od ľudí trpiacich afáziou. Cieľom bolo zistiť, či sa z textu dá programovou analýzou zistiť jej výskyt a teda či vieme v týchto textoch nájsť spoločné vlastnosti spôsobené afáziou. Zároveň by sme mali vedieť povedať, ktoré dielo bolo napísané skôr a ktoré neskôr. Dielo napísané neskôr by v malo obsahovať znaky afázie a tým by sme ho mali vedieť odlíšiť. V experimentoch sme použili dve diela od amerického spisovateľa Paula Westa, ktorý, ako sme spomínali vyššie, dostal globálnu afáziu. Prvé dielo, Rat Man of Paris (1986), bolo napísané pred a druhé, The Shadow Factory (2008), po tom, čo ju dostal.

3.1 Hľadanie znakov afázie

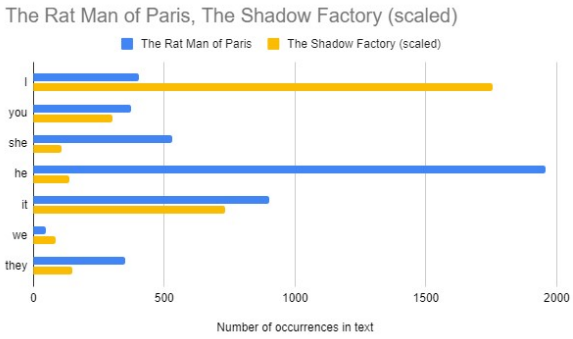
Po preskúmaní znakov afázie [Cséfalvay, 2007], [Cormen et al., 2009], [Cséfalvay, 2012], [Hasan et al., 2015] a príznakov, ktorými trpel Paul West [West, 2008] sme sa rozhodli otestovať hypotézu, že afázia by sa mohla prejaviť aj v písanom texte vynechávaním slov ako sú napríklad zámená, predložky a častice. V testoch hľadáme slová ktorých dĺžka je najviac tri (a pár iných, ktoré by mohli byť vynechané taktiež), spočítame ich výskyty v oboch dielach a porovnáme. Keďže afázia má spôsobovať vynechanie týchto slov, dielo napísané pred jej utrpením by malo obsahovať ich väčšie množstvo. Ako uvidíme neskôr, výsledky našich experimentov túto teóriu jednotne nepotvrdzujú. Na tieto experimenty sme využili viaceré algoritmy na vyhľadávanie v texte a nižšie prezentujeme výsledky, ktoré boli dosiahnuté pomocou dvoch z nich - Rabin-Karpov algoritmus a približný vyhľadávací algoritmus.

Na grafoch nižšie sú niektoré zaujímavé výsledky našich testov na jeho dvoch dielach Rat Man of Paris a The Shadow Factory. Obrázky 1 až 8 ukazujú použitie slov, ktoré by mohli byť v reči vynechané. Obrázky 9 až 12 ukazujú celkové počty slov. Obe diela sú v anglickom jazyku. Zistili sme, že kniha Rat Man of Paris je približne 1.36-krát dlhšia v počte slov a 1.4-krát dlhšia v celkovom počte znakov. Nasledujúce grafy ukazujú porovnania, kde bol počet slov v The Shadow Factory adekvátne škálovaný.[Eyigoz et al., 2020]

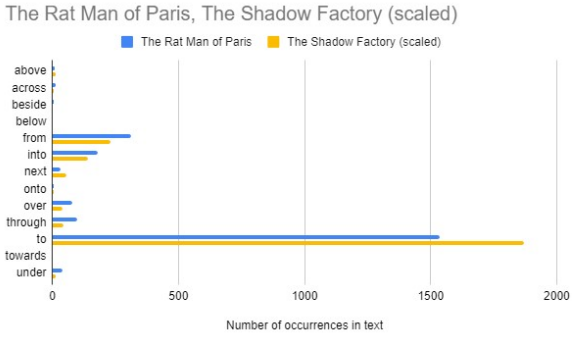
Ako vidíme, výsledky na obrázkoch 1-2 za použitia Rabin-Karpovho algoritmu ukazujú zmiešané výsledky, čo však môže byť z časti vysvetlené odlišnými štýlmi diel. Obrázky 3-4, s výnimkou slova 'to' a 'an', podporujú našu hypotézu.



Obr. 1: Využívanie tvarov slovesa byť

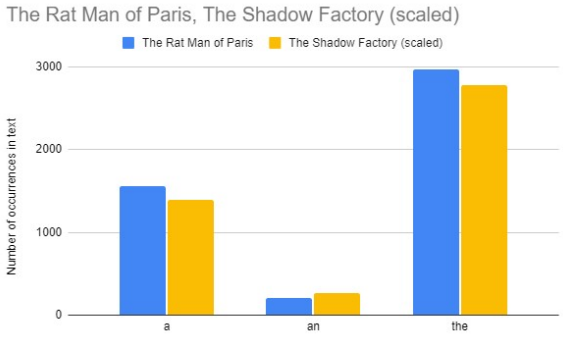


Obr. 2: Využívanie tvarov zámen

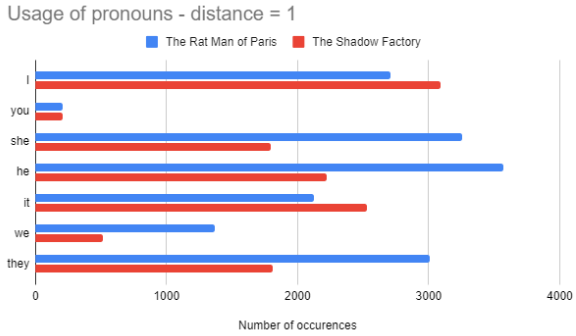


Obr. 3: Využívanie predložiek miesta

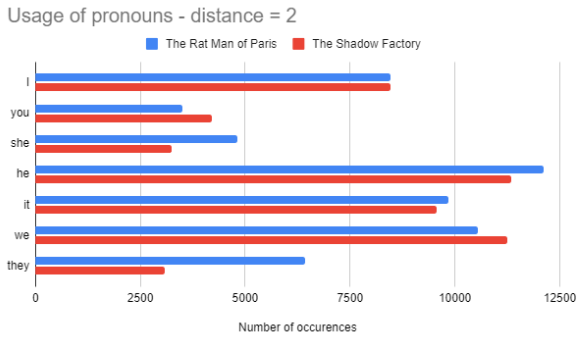
Obrázky nižšie (5-6) ukazujú výsledky rovnakého testu na oboch textoch ale s použitím približného vyhľadávacieho algoritmu. Pri testovaní sme skúšali viacero hodnôt edit distance *d*, ale zistili sme, že pri tak krátkych slovách, ktorým sa venujeme my, dáva akákoľvek hodnota väčšia ako *d=2* nezmyselné výsledky. Obrázok 5 našu hypotézu zväčša podporuje.



Obr. 4: Využívanie členov

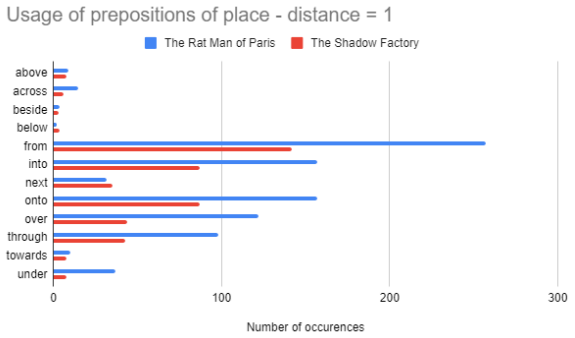


Obr. 5: Využívanie zámen, d=1

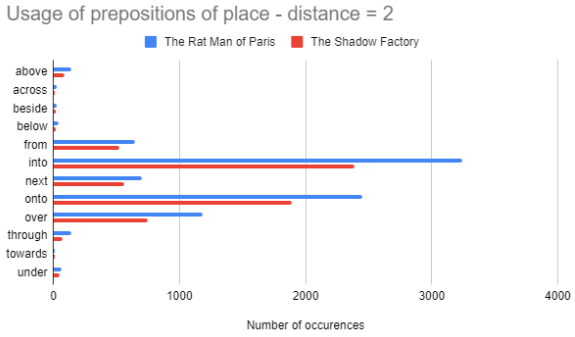


Obr. 6: Využívanie zámen, d=2

Rovnako našu hypotézu podporuje aj obrázok 7, kde sledujeme používanie predložiek miesta, opäť za pomoci približného vyhľadávacieho algoritmu s *d=1*. Pre zaujímavosť prikladáme aj graf, kde je *d=2*.



Obr. 7: Využívanie predložiek miesta, d=1

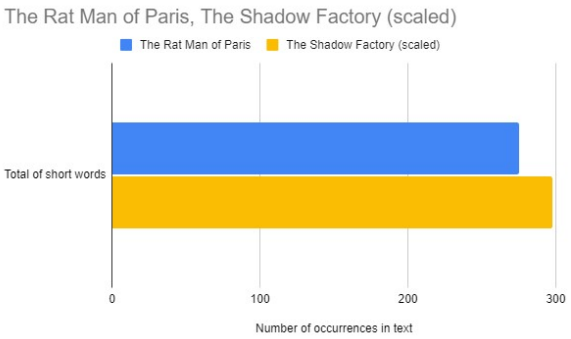


Obr. 8: Využívanie predložiek miesta, d=2

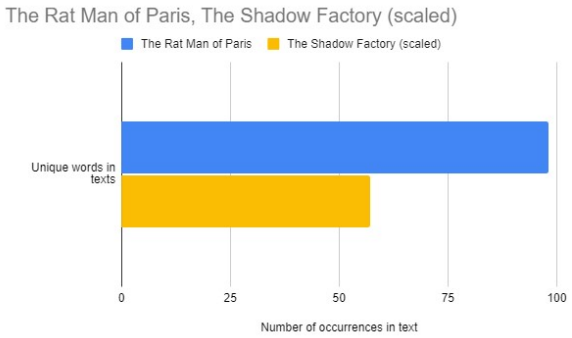
Aj keď sa nám testami nepodarilo potvrdiť našu teóriu, že využitie krátkych slov nám vie ukázať, ktoré dielo bolo napísané pred a po utrpení afázie, musíme vziať aj do úvahy proces písania knihy. Kým sa kniha vydá, je čítaná a upravovaná mnohými ľuďmi mnohokrát, aj samotný West sa na druhý deň vracal k tomu, čo napísal a upravoval, ako písala jeho žena. Je možné, že sa akékoľvek chyby spôsobené afáziou vytratili po tom, čo ich autor či editor opravil. Vo svojom predslove k The Shadow Factory West neskôr píše, že takéto opravy robil, aj keď nie vždy. Jeho cieľom bolo čitateľovi priblížiť stav jeho mysle v dobe tesne po nadobudnutí afázie, nie spraviť knihu nečitateľnou.

Čítanie The Shadow Factory je zaujímavý zážitok. Text, ktorý sa venoval jednej téme je zrazu prerušený slovom, ktoré nezapadá. Chvíľu niečo takéto môže pôsobiť ako štýl písania - čitateľ nakoniec nemusí rozumieť všetkému ihneď a možno nejaké slová majú vo svete jeho knihy aj ďalší význam ako v tom našom. Ak by sme to mali k niečomu prirovnať, bolo by to k textu, ktorý napísala AI. Gramatika je v poriadku, slovosled je správny, ale celkový tón vety je skrátka iný, ako by mal byť. Ak by sme chceli ešte bližšie prirovnanie, použili by sme automatické dopĺňanie slov pomocou automatických návrhov v mobile. Napíšete prvé slovo a potom len pridávate navrhnuté slová. Gramaticky je to správna veta, významovo však nie celkom. Po prečítaní predslovu je však jasné, že toto nie je prípad iného štýlu písania, sú to naozaj chyby, ktoré Westova myseľ urobila v čase písania.

Okrem počtu jednotlivých slov sme sa rozhodli venovať aj celkovému počtu krátkych slov v oboch dielach. Obrázok 9 ukazuje tento počet, na jeho zistenie sme využili Rabin-Karpov algoritmus. Ako môžeme vidieť, The Shadow Factory obsahuje väčšie množstvo krátkych slov, čo je priamo v rozpore s našou hypotézou. Keď sme sa však rozhodli pozrieť na množstvo originálnych slov v texte, teda koľko slov sa nachádza v jednom diele ale nie v druhom, zistili sme, že Rat Man of Paris obsahuje takmer dvakrát toľko originálnych slov ako The Shadow Factory. Na obrázku 10 vidíme toto porovnanie.



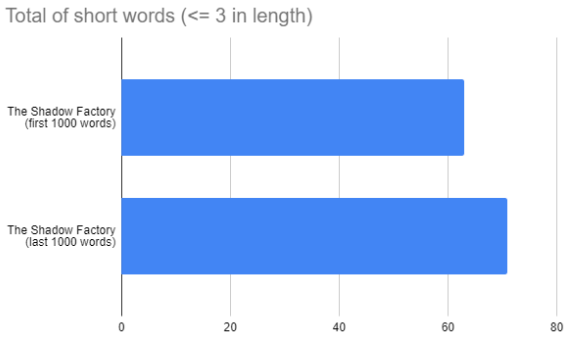
Obr. 9: Počet všetkých krátkych slov



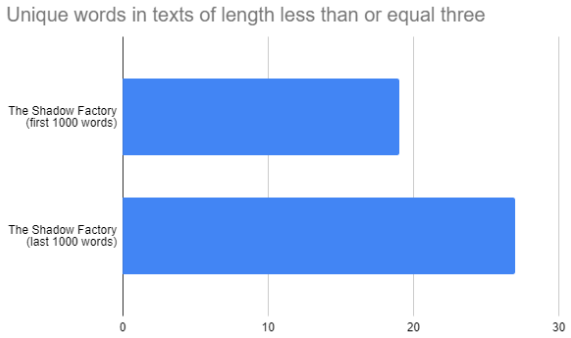
Obr. 10: Počet originálnych krátkych slov

Keďže sa naša hypotéza zakladá na fakte, že po afázii pacient vynecháva v písanom texte slová, napadlo nám otestovať aj časti The Shadow Factory s inými časťami The Shadow Factory. Keďže bol začiatok diela písaný skôr, teda bližšie k utrpeniu afázie, skoršie časti diela by mali ukazovať signifikantnejšie znaky ako časti písané neskôr. Na obrázku 11 je porovnanie výskytu slov v prvých a posledných tisíc slovách The Shadow Factory.

Pri oboch grafoch vidíme, že našu teóriu podporujú. Nielen že skôr napísaná časť má celkovo menej krátkych slov, ale má aj menej slov, ktoré sa na konci nenachádzajú. Tento test sme neskôr opakovali na prvých a posledných tridsiatich stranách s rovnakými výledkami.



Obr. 11: Počet krátkych slov v prvých a posledných 1000 slovách



Obr. 12: Počet originálnych krátkych slov v prvých a posledných 1000 slovách

Posledné zistenia nás vedú k novej hypotéze, že napriek tomu, že samotný text nemá významné vynechávanie krátkych slov, West mohol množstvo krátkych slov zabudnúť. Tieto slová by však mohli byť skôr podstatné mená, prídavné mená a podobne, nie slová, ktoré sme vyššie testovali.

Zhrnutie

Výsledky experimentov vyššie sú len malou časťou výskumu na diagnostiku mozgových ochorení, ktoré sa prejavujú v jazyku [Cormen et al., 2009], [NIDCD, 2016]. Texty, ktoré neboli pred analýzou editované by zrejme dávali iné výsledky, pri najmenšom by boli presnejšie v overovaní hypotéz. Taktiež by v diagnostikovaní afázie mohli byť viac nápomocné komplexnejšie algoritmy, ktoré analyzujú obsah textu na hlbšej úrovni.

Poďakovanie

Ďakujem mojej školiteľke doc. RNDr. Tatiane Jajcayovej, PhD. za rady, nápady a povzbudenia pri písaní práce a článku. Tiež ďakujem členom mojej rodiny, ktorí mi, ako nezaujatí pozorovatelia, pomáhali vyhodnocovať naše testy a určovať, či potvrdzujú alebo vyvracajú našu hypotézu.

Literatúra

[A.S.Hornby, 1989] A.S.Hornby (1989). *Oxford Advanced Learner's Dictionary, Fourth Edition*, page 45.

Oxford University Press, Oxford, Great Britain.

[Cormen et al., 2009] Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., and Stein, C. (2009). *Introduction to algorithms, Third Edition*, pages 988–994. The MIT Press, Cambridge, Massachusets.

[Cséfalvay, 2007] Cséfalvay, Z. (2007). Súčasný pohľad na diagnostiku a terapiu afázie. *Česká a slovenská neurologie a neurochirurgie*, 70/103(2):118–128.

[Cséfalvay, 2012] Cséfalvay, Z. (2012). Neurogénne poruchy komunikácie – úvod. *Neurologie pro praxi*, 13(6):303.

[Eyigoz et al., 2020] Eyigoz, E., Mathur, S., Santamaria, M., Cecchi, G., and Naylor, M. (2020). Linguistic markers predict onset of alzheimer's disease. *EClinicalMedicine*, 28.

[Hasan et al., 2015] Hasan, S. S., Ahmed, F., and Khan, R. S. (2015). Approximate string matching algorithms: A brief survey and comparison. *International Journal of Computer Applications*, 120(8).

[NIDCD, 2016] NIDCD (2016). What is aphasia? https://www.nidcd.nih.gov/health/aphasia.

[Rasool et al., 2012] Rasool, A., Tiwari, A., Singla, G., and Khare, N. (2012). String matching methodologies:a comparative analysis. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 3(2).

[West, 2008] West, P. (2008). *The Shadow Factory*. Lumen Books, Santa Fe, New Mexico.

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 35–38
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Veronika Mattová, Matej Fandl

Into the Magic Shop: An analysis of the human brain and heart's mysteries

Veronika Mattová[1]* Matej Fandl[2‡§]
[1] Katedra aplikovanej informatiky, FMFI UK, Mlynska dolina, 842 48 Bratislava
[2] Katedra aplikovanej informatiky, FMFI UK, Mlynska dolina, 842 48 Bratislava

Abstract

Connections between human's heart and brain are undoubtedly strong. In this paper, an abstract key to the neuroplasticity will be presented by comparing cognitive and emotional system on its basic level. For this purpose, the term Magic Shop will be used in summarizing field with a holistic view of an understanding the possible ways, how to grasp the human complexity, itself, through clarifying the impact on human-beings in a picture, that does not describe this issue separately, but on the other hand, it tends to be more connected, just like the brain and heart is.

Keywords: Magic Shop, psychodrama, heart, brain, neuroplasticity, compassion, empathy, ANS, HRV.

1 Introduction

Trying to unveil the mysteries of brain and its connection to human mind, is by itself a very fascinating way of finding out more about ourselves in general. There is no doubt that science plays a very significant role in the way of understanding human beings. But even to this date, some puzzles remain to be more apprehensible. In this category, we can find phenomena, such as compassion, altruism and empathy, which had become the base stones for James Doty, an author of the book called: Into the Magic Shop: A neurosurgeon's true story of the life-changing magic of mindfulness and compassion, which was also the main inspiration for writing this paper.

Nevertheless, James Doty, is not only well-known author, but he is manifesting his research abilities through the own research centre beneath the wings of Stanford University [CCARE, 2019].

The act of creation such a scientific field is supporting his desire to analyze the effect of Magic Shop relating to the interaction of the body and the mind.

2 Duality of the Training Program and Psychodrama

There are many ways how to grasp the concept of Magic Shop. The first one is advocating it as an in-depth training program with the transformational practices.

On the other hand, there is a possibility to apprehend it through the concept of psychodrama. Therefore, Magic Shop is also a useful tool for finding the balance between people's skills and weaknesses and it uses the method of psychodrama [Able, 2013].

In general, psychodrama is an experiential form of therapy, allowing those in treatment to explore issues through action methods (dramatic actions) [GoodTherapy, 2016].

And described approach, linked with the psychodrama was developed by Jacob Levy Moreno method as the psychotherapeutic technique useful in work with patients during individual and group psychotherapy. This method offers significant changes through the role playing and dramatization, resulting in many areas, such as insight, abreaction, acceptance of internal impulses, confrontation with the feelings of other people and training of alternative behaviours [Litwińska-Rączka, 2018].

Whether we are talking about the first or second definition of Magic Shop, it can be a double-sided weapon linked to maintaining own physiological and psychological well-being.

2.1 Purpose of Psychosomatic Exercises

Concrete exercises of Magic Shop are investigated in Doty's book, where he divided them into four tricks: Relaxing the Body, Taming the Mind, Opening the Heart, Clarifying Your Intent.

Mentioned techniques can be also found as Ruth's tricks, allowing us to dive into deep stages of relaxation, breathing sessions and mind training, affecting our nervous system. The first trick can be also considered as the first phase of guided meditation, which is aiming the experience of

* mattova25@uniba.sk
‡ matej.fandl@fmph.uniba.sk
§ Supervisor

whole-body-relaxation. The second one is describing the process of taming the mind by learning to direct our thoughts back to a chosen focal point. Another one is dealing with opening our heart by focusing on the feeling of unconditional love and offering that love to others, even those whom we dislike or have difficulty with. And the last one is to clarify our intent in a way of visualizing the attainment of set goals in vivid and florid details, which helps us to specify and ultimately manifest, what we want to achieve [IntoTheMagicShop, 2016].

Skills gained through multiple sessions can be seen as an element, instilled in a life-shaping clue [Stubbs, 2019].

In order to understand techniques deeper, Doty conducts scientific research, which assist him to grasp the techniques deeper and discover the mechanisms behind the observed phenomena.

2.2 Heart-Brain Connection

The concept of Magic Shop, which Doty presents, initiated in a research, showing the heart as an organ of intelligence.

It has its own profound influence not only from our brain but on our brain, our emotional system along with choice-making and reasoning. Also, the heart is not an exception, because it not only thinks for itself but sends out signals to the rest of the body. The part of the vagus nerve that arises in the brainstem and that has immense innervation in the heart and other organs is part of the autonomic nervous system (ANS). The pattern of heart rhythms known as heart rate variability (HRV) stands for a simplified reflective view of our current emotional status with inner influences and is induced by the ANS [Doty, 2016].

An above-mentioned pattern of ANS proves, that communication between the heart and brain is a not a static, rather dynamic both-sided dialogue, with significant influence on each other other's function. Possible exchange of information can be diverse. The heart uses four pathways for inducted communication. Firstly, it speaks to the brain in a neurological way, through the transmission of nerve impulses. Secondly, it provides information biochemically, via hormones and neurotransmitters. Then biophysically, which uses pressure waves. and lastly energetically, through specific electromagnetic field interactions. Indeed indisputable, this communication along all these conduits significantly affects the brain's activity [McCraty, 2016].

The next important phenomenon linked with mentioned communication is presented with the core effect of neuroplasticity, which is defined as the ability to create new neural connections. Through advances in neuroscience, a clearer understanding of the complexity of the brain's interconnectedness and its ability to adapt to the environment is provided, while learning in a prosper way is significant part of the process, leading us to straightforward understanding the brain's capacity regarding the neuroplastic change [Jasey et al., 2019].

Potential of neuroplastic change is indeed significant, when we think about the door with various possibilities, which can be open for new treatments replacing the classical ones. There are many ways how we can gain the effect of neuroplasticity, including the Magic Shop techniques, but more serious conditions as organic brain damage require more attention and delicate approach.

That can be provided by using a non-invasive technique, such as electroconvulsive therapy (ECT), transcranial electrical stimulation (TES), static magnet stimulation, transcranial direct current stimulation (tDCS), transcranial alternating current stimulation (tACS) or transcranial magnetic stimulation (TMS), which has the ability to pave the future path of deeper understanding of the neuroplasticity itself [Polanía et al., 2018].

2.3 Neural Base of Emotional and Cognitive Empathy

Neuroplasticity is also linked with mirroring the pain. Emotional and cognitive empathy has its own base related to the periaqueductal grey matter, and its connections to the orbitofrontal cortex are responsible in great part for nurturing these kinds of behaviour. Signs of suffering or pain indication from others, gives the brain a clear signal, which is indicating our predisposition to be wired together with the deep intent to help others when they are in need. Therefore, when we are in the situation of observing someone acting kindly or providing us any kind of help, this in turn causes us to act more compassionately [Doty, 2016].

To support our compassionate, there has been described a compassion meditation (CM) and related meditation practices, including loving-kindness meditation (LKM) and exercises, which can significantly enhance unconditional, positive emotional states of kindness and compassion with a relieved mind state [Hofmann et al., 2011].

In another study, the main focus was put into the compassion cultivation training (CCT). These findings suggest that empathy and prosocial cultivation training affects cognitive factors, in a pure functioning of the nervous system that support psychological flexibility of maintaining the state, which can be described as more adaptive [Jazaieri et al., 2014].

Cognitive and emotional factors, that create our minds are often misunderstood and incorrectly considered as parts of two separate systems but through this comparison of studies, we can clearly see that their relationship is dynamic and a lot more complex.

3 Conclusion

The term magic can be seen in society as something that carries supernatural power. Magic Shop is not an exception. Thus, it has a lot of forms and names, Magic Shop is our deep understanding of heart and brain in the harmony.

We often compare ourselves to others and hope we could be better than we are. Specific traits like social ability, patience and cleverness are examples that require time and practice. But it seems that Magic Shop is the key to it [Rautiainen, 2002].

This method as a psychodramatic strategy can offer help to everybody through the use of fantasy [Koile, 2011].

The purpose of this paper was trying to discover a significant proof, that current research's attempts are slowly, but steady showing that cognitive correlates of Magic Shop are strictly linked to the brain and heart connection, with a strong emphasis on practising concrete techniques, which are also creating a proof for clarifying the physiological connection of metaphorically contrasting organs. Clearer understanding of nervous system connection with our heart gives us not only a better framing concept for mentioned cooperation with described techniques. It also can be seen as a tool for improving our research knowledge based on the present results of Stanford research centre's scientific aim. Those can as well bring possible future improvements in our medical care in which the outcome of the studies will be implemented.

Of course, there are some areas that need to be more unveiled, but the general idea always stays the same: Whenever we are ready, the Magic Shop is always open and waiting for us [BTS, 2018].

References

[Able, 2013] Able, M. (2013). THE MAGIC SHOP: How to find the balance between skills/qualities and weakness. Grundtvig Learning Partnership. Retrieved January 20, 2021, from https://1e65442b-eb9e-4ef0-85e7-c776614711d5.filesusr.com/ugd/86b667_99a5e2f0924b43c8a16a2413964ff23b.pdf

[CCARE, 2019] CCARE (2019). Mission & Vision. Stanford Medicine. Retrieved December 03, 2020, from http://ccare.stanford.edu/about/mission-vision/

[BTS, 2018] BTS (2018). BTS - Magic Shop. Love Yourself 轉 'Tear' (English Translation). Retrieved January 20, 2021, from https://genius.com/Genius-english-translations-bts-magic-shop-english-translation-lyrics

[Doty, 2016] Doty, J. R. (2016). Into the magic shop: A neurosurgeon's quest to discover the mysteries of the brain and the secrets of the heart. New York: Avery.

[GoodTherapy, 2016] GoodTherapy (2016). Psychodrama. Types of therapy. Retrieved January 21, 2021, from https://www.goodtherapy.org/learn-about-therapy/types/psychodrama

[Hofmann et al., 2011] Hofmann, S. G., Grossman, P., & Hinton, D. E. (2011). Loving-kindness and compassion meditation: Potential for psychological interventions. *Clinical Psychology Review*, 31, 1126-1132. Retrieved January 20, 2021, from https://doi.org/10.1016/j.cpr.2011.07.003

[IntoTheMagicShop, 2016] IntoTheMagicShop, (2016). Ruth's Tricks: Mindfulness. Retrieved January 20, 2021, from https://intothemagicshop.com/exercises

[Jasey et al., 2019] Jasey, N., & Ward, I. (2019). Neuroplasticity in Brain Injury: Maximizing Recovery. *Curr Phys Med Rehabil Rep 7*, 333–340. Retrieved January 20, 2021, from https://doi.org/10.1007/s40141-019-00242-7

[Jazaieri et al., 2014] Jazaieri, H., McGonigal, K., Jinpa, T., Doty, J. R., Gross, J. J., & Goldin, P. R. (2014). A randomized controlled trial of compassion cultivation training: Effects on mindfulness, affect, and emotion regulation. *Motivation and Emotion*, 38, 23-35. Retrieved January 20, 2021, from https://doi.org/10.1007/s11031-013-9368-z

[Koile, 2011] Koile, E. (2011). The Magic Shop: The therapist masquerades as a shopkeeper. *Voices: The Art and Science of Psychotherapy*, Spring 2011. Retrieved December 03, 2020, from https://www.aapweb.com/wp-content/uploads/2019/03/voices-sample-koile.pdf

[Litwińska-Rączka, 2018] Litwińska-Rączka, K. (2018). Jacob Levy Moreno's Psychodrama As a Work Technique For Treating Patients in Group and Individual Psychotherapy. *Current Problems of Psychiatry*, vol. 19, no. 4, pp. 248–259. Retrieved May 05, 2021, from https://doi.org/10.2478/cpp-2018-0019

[McCraty, 2016] McCraty, R. (2016). Science of the Heart: Exploring the Role of the Heart in Human Performance. *HeartMath Institute*, vol. 2. Retrieved January 20, 2021, from https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3873.5128

[Poerio et al., 2015] Poerio, G., Totterdell, P., Emerson, L., & Miles, E. (2015). Love is the

triumph of the imagination: Daydreams about significant others are associated with increased happiness, love and connection. *Consciousness and Cognition*, vol. 33, pp. 135-144 Retrieved December 03, 2020, from https://doi.org/10.1016/j.concog.2014.12.011

[Polanía et al., 2018] Polanía, R., Nitsche, M. A., & Ruff, C. C. (2018). Studying and modifying brain function with non-invasive brain stimulation. *Nature neuroscience*, 21(2), 174–187. Retrieved March 01, 2021, from https://doi.org/10.1038/s41593-017-0054-4

[Rautiainen, 2002] Rautiainen, R. (2002). Using the Magic Shop in a work counselling group. *Centre for Playback Theatre*. Retrieved December 03, 2020, from http://www.playbacktheatre.org/wp-content/uploads/2010/04/Rautiainen_Magic-Shop.pdf

[Stubbs, 2019] Stubbs, I. (2019). The Magic Shop. Retrieved December 05, 2020, from https://medium.com/tts-clues/5-the-magic-shop-962da60c208a

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 39–46
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Martina Bodišová, Tatiana Jajcayová

Preusporiadanie dvojdimenzionálnych polí pomocou prefix reversalu

Martina Bodišová[1*] Tatiana Jajcayová[1†‡]

[1]Katedra aplikovanej informatiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstrakt: Problém preusporiadania polí pomocou prefix reversalu, známy aj ako problém triedenia palaciniek, predstavil už pred viac ako 45 rokmi Harry Dweighter. V pôvodnej verzii je úlohou utriediť pole celých čísel $\{1,2,\ldots,n\}$ pomocou jedinej operácie - prefix reversalu, ktorá spočíva v prevrátení poradia prvých $k \leq n$ prvkov poľa. Vo verzii s takzvanými spálenými palacinkami má každá palacinka dve rôzne otočenia - spálenou časťou nahor alebo nadol. V tomto prípade sa teda počas tejto operácie navyše invertuje otočenie palacinky, čo sa na poli čísel prejavuje zmenou znamienka.

V našej práci uvažujeme aj dvojdimenzionálne zovšeobecnenie tohto problému na poli veľkosti $n \times m$, využívajúc už dve operácie - horizontálny a vertikálny prefix reversal. Pomocou týchto dvoch operácii vieme prevrátiť prvých $j \leq n$ riadkov, respektíe prvých $k \leq m$ stĺpcov poľa. V práci analyzujeme predošlé prístupy od A. Yamamura [Yamamura, 2015] a P. Šiškovej [Šišková, 2017], a aj na ich základe navrhujeme nové vylepšenia. Venujeme sa štúdiu a popisu súvisiacich štruktúr (grupy, grafy), a ohraničení problému (dolnému a hornému ohraničeniu minimálneho počtu preusporiadaní potrebného na utriedenie poľa). Preskúmali sme reálne počty permutácií, ktoré vieme získať aplikovaním práve d operácií, na základe čoho formulujeme nové hypotézy pre ohraničenia minimálneho počtu preusporidaní potrebného na utriedenie poľa. Taktiež navrhujeme a implementujeme algoritmus na zistenie palacinkových čísiel pre väčšie dvojrozmerné polia.

Kľúčové slová: problém triedenia palaciniek a jeho zovšeobecnenia, palacinkové číslo, graf, grupa

1 Úvod a východiská práce

Problém prvýkrát publikoval v roku 1975 Jacob I. Godman v časopise American Mathematical Monthly s krátkym príbehom:

"The chef in our place is sloppy, and when he prepares a stack of pancakes they come out all different sizes. Therefore, when I deliver them to a customer, on the way to the table I rearrange them (so that the smallest winds up on top, and so on, down to the largest on the bottom) by grabbing several from the top and flipping them over, repeating this (varying the number I flip) as many times as necessary. If there are n pancakes, what is the maximum number of flips (as a function of n) that I will ever have to use to rearrange them?" [Dweighter, 1975]

Godman bol v tom čase iba na začiatku svojej kariéry. Problém považoval za triviálny, a keďže nechcel, aby si ostatní mysleli, že sa zaoberá iba jednoduchými úlohami, publikoval ho pod zábavným pseudonimom Harry Dweighter (harried waiter - uponáhľaný čašník).

Ako sa však neskôr ukázalo, problém je síce jednoduché predstaviť, no jeho riešenie vôbec nie je triviálne. 40 rokov po prvom predstavení Bulteau, Fertin a Rusu vo svojom článku [Bulteau et al., 2015] redukciou na 3-SAT dokázali, že sa jedná o NP-ťažký problém a ešte aj dnes, po takmer 50 rokoch, sa mu vo viacerých obmenách venujú matematici a informatici z rôznych kútov sveta.

1.1 Problém triedenia palaciniek

V tejto základnej verzii problému ide, formálnejšie povedané, o usporiadanie neusporiadaného poľa prirodzených čísel $1,2,\cdots,n$ použitím jedinej operácie - *prefix reversalu* (ďalej zvanej aj *flip(k)*) - obrátenia poradia prvých k prvkov tak, že k-ty prvok sa stane prvým a prvý k-tym, pričom $k \leq n$. Vykonanie tejto operácie sa na poli prejaví nasledovne:

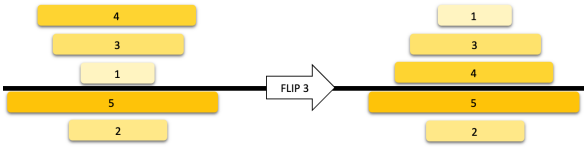
$$[a_1,a_2,\cdots,a_{k-1},a_k,a_{k+1},\cdots,a_{n-1},a_n] \longrightarrow$$
$$[a_k,a_{k-1},\cdots,a_2,a_1,a_{k+1},\cdots,a_{n-1},a_n]$$

Napríklad na poli $[4,3,1,5,2]$ by vykonanie flipovej operácie prých troch prvkov viedlo k novému poradiu prvkov poľa $[1,3,4,5,2]$, ako je demonštrované aj na obrázku 1.

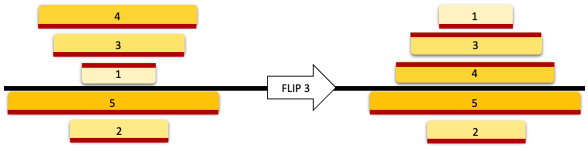
Takzvané *palacinkové číslo* predstavuje minimálny potrebný počet vykonaných flipových operácii prinajhoršom môžem usporiadaní n palaciniek, resp. n-prvkového poľa.

Tejto základnej verzii problému sa napríklad venoval vo svojom jedinom článku

*martina.bodisova@fmph.uniba.sk
†tatiana.jajcayova@fmph.uniba.sk
‡Školiteľ



Obr. 1: Demonštrácie operácie *flip(3)* na *[4,3,1,5,2]*, základná verzia problému



Obr. 2: Demonštrácie operácie *flip(3)* na *[4,3,-1,5,2]*, verzia so spálenými palacinkami

[Gates and Papadimitriou, 1979] aj zakladateľ spoločnosti Microsoft, Bill Gates, ktorý spolu s Christosom Papadimitriou pracovali na upresnení horných aj dolných ohraničení palacinkového čísla. Neskôr však bolo dolné ohraničenie vylepšené v článku [Heydari and Sudborough, 1997] autorov Heydari a Sudborough, a horné ohraničenie v práci [Chitturi et al., 2009] od Chitturi a jeho kolegov. Aktuálne najpresnejšie ohraničenie tohto problému je teda:

$$\left\lfloor \frac{15n}{14} \right\rfloor \leq f(n) \leq \frac{18n}{11} + O(1)$$

n	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
$f(n)$	0	1	3	4	5	6	7	8	9	11
n	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**
$f(n)$	13	14	15	16	17	18	19	20	22	?

Tabuľka 1: Tabuľka aktuálne známych palacinkových čísel $f(n)$

Doposiaľ najpresnejšie dolné ohraničenie opísal Josef Cibulka [Cibulka, 2011], a to:

$$\left\lfloor \frac{3n+3}{2} \right\rfloor \leq g(n)$$

Doposiaľ najpresnejšie horné ohraničenie určili pre $n \leq 10$ Gates a Papadimitriou v už vyššie spomínanom článku [Gates and Papadimitriou, 1979], a pre $n > 10$ Cohen a Blum [Cohen and Blum, 1995]:

$$g(n) \leq \begin{cases} 2n+3, & n \leq 10 \\ 2n-2, & n > 10 \end{cases}$$

n	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
$g(n)$	1	4	6	8	10	12	14	15	17
n	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**
$g(n)$	18	19	21	22	23	25	26	28	?

Tabuľka 2: Tabuľka aktuálne známych spálených palacinkových čísel $g(n)$

1.2 Problém triedenia spálených palaciniek

V tejto verzii problému má každá palacinka jednu stranu spálenú a druhú nie, pričom je potrebné, aby po usporiadaní boli všetky palacinky otočené nespálenou stranou nahor.

V jednorozmernom poli celých čísel využívame znamienko mínus na označenie, že palacinka je spálenou stranou otočená nahor. Oproti klasickej verzii problému sa teda do flipovej operácie pridá aj násobenie celej otáčanej časti číslom (-1). Vykonanie tejto operácie sa na poli teda prejaví nasledovne:

$$[a_1, a_2, \cdots, a_{k-1}, a_k, a_{k+1}, \cdots, a_{n-1}, a_n] \longrightarrow$$
$$[-a_k, -a_{k-1}, \cdots, -a_2, -a_1, a_{k+1}, \cdots, a_{n-1}, a_n]$$

Napríklad na poli $[4,3,-1,5,2]$ by vykonanie flipovej operácie prých troch prvkov viedlo k novému poradiu prvkov poľa $[1,-3,-4,5,2]$, ako je demonštrované aj na obrázku 2.

1.3 Dvojdimenzionálny problém triedenia palaciniek

Dvojdimenzionálny problém triedenia palaciniek je stále pomerne novým problémom, ktorý prvýkrát popísal Akahiro Yamamura [Yamamura, 2015] iba v roku 2015. Narozdiel od jednodimenzionálnej verzie problému, v tomto zovšeobecnení pracujeme s dvoma základými operáciami – *horizontálnym* a *vertikálnym flipom*. Utriedené pole má podľa definície tvar:

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \cdots & m-1 & m \\ m+1 & m+2 & \cdots & 2m-1 & 2m \\ 2m+1 & 2m+2 & \cdots & 3m-1 & 3m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (n-1)m+1 & (n-1)m+2 & \cdots & nm-1 & nm \end{bmatrix}$$

Majme maticu $A_{n\times m}$. *Horizontálny flip* $hflip(j)$, kde $j \leq n$, prevráti poradie prvkov prvých j riadkov matice A a zároveň prevráti poradie týchto j riadkov samotných. Inak povedané táto operácia predstavuje

vykonanie štandardnej operácie $flip(m)$ na všetkých poliach $A_{i\leq j}$, spolu s vykonaním operácie $flip(j)$ na poli vektorov A.

Vertikálny flip $vflip(l)$, kde $l \leq m$, prevráti poradie prvkov v prvých l stĺpcoch matice A a zároveň prevráti aj poradie stĺpcov samotných. Inak povedané táto operácia predstavuje vykonanie štandardnej operácie $flip(n)$ na všetkých poliach $A_{*,k\leq l}$, spolu s vykonaním operácie $flip(l)$ na všetkých poliach $A_{i\leq n}$.

Pre ilustráciu uvažujme maticu identity $E_{5\times 5}$:

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \\ 11 & 12 & 13 & 14 & 15 \\ 16 & 17 & 18 & 19 & 20 \\ 21 & 22 & 23 & 24 & 25 \end{bmatrix}$$

Vykonanananím operácie $hflip(2)$ z nej získame maticu A_1, zobrazenú nižšie, a vykonaním operácie $vflip(2)$ z pôvodnej matice E získame A_2. Vykonanie týchto operácií vizuálne pripomína predelenie poľa na vybranom indexe čiarou v smere zvolenej osi na dve menšie dvojrozmerné polia, a otočenie prvého z nich o 180°.

$$A_1 = \begin{bmatrix} 10 & 9 & 8 & 7 & 6 \\ 5 & 4 & 3 & 2 & 1 \\ 11 & 12 & 13 & 14 & 15 \\ 16 & 17 & 18 & 19 & 20 \\ 21 & 22 & 23 & 24 & 25 \end{bmatrix} A_2 = \begin{bmatrix} 22 & 21 & 3 & 4 & 5 \\ 17 & 16 & 8 & 9 & 10 \\ 12 & 11 & 13 & 14 & 15 \\ 7 & 6 & 18 & 19 & 20 \\ 2 & 1 & 23 & 24 & 25 \end{bmatrix}$$

Zložené operácie

Yamamura tieto operácie pôvodne definoval všeobecnejšie: $hflip(i,j)$, $i \leq j$, a $vflip(k,l)$, $k \leq l$. Prvý a druhý parameter operácie predstavujú indexy hraničných riadkov (respektíve stĺpcov) matice, od ktorých po ktoré sa flipová operácia vykoná. Operácia $hflip(1,j)$ zodpovedá vyššie uvedenej zjednodušenej verzii $hflip(j)$, a analogicky $vflip(1,l)$ zodpovedá vyššie uvedenému $vflip(l)$. Platí pritom, že:

$$hflip(i,j) = hflip(1,j) \circ hflip(1,i) \circ hflip(1,j)$$
$$vflip(k,l) = vflip(1,k) \circ vflip(1,l) \circ vflip(1,k)$$

Pôvodnú všeobecnejšiu operáciu $hflip(\cdot,\cdot)$ teda vieme realizovať aj pomocou zjednodušenej $hflip(\cdot)$, rovnako tak aj $vflip$.

Taktiež zadefinoval aj operácie horizontálny suffix reversal $hflip(j,n)$, $1 \leq j \leq n$ a vertikálny suffix reversal $vflip(k,m)$, $1 \leq k \leq m$.

Okrem týchto dvoch základných operácií zadefinoval aj operáciu *corner exchange* (ďalej aj ako CE), ktorá slúži na spermutovanie prvkov $(ad)(bc)$ v rohoch matice A – t.j. na permutovanie prvkov (a,d) aj prvkov (b,c) – na získanie matice A':

$$A = \begin{bmatrix} a & \cdots & b \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c & \cdots & d \end{bmatrix} \qquad A' = \begin{bmatrix} d & \cdots & c \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b & \cdots & a \end{bmatrix}$$

Operácia CE je zadefinová skladaním vyššie spomínaných operácii ako:

$$\begin{aligned} CE =& hflip(n,n) \circ vflip(1,1) \circ \\ & hflip(n,n) \circ vflip(1,1) \circ hflip(1,1) \end{aligned}$$

Ďalej autor definoval aj operáciu *twin transposition* vzhľadom na stĺpec – TT_c, a vzhľadom na riadok – TT_r. Uvažujme štyri prvky a,b,c,d, ktoré sú na dvoch rôznych riadkoch i,j a dvoch rôznych stĺpcoch k,l – ako je znázornené v matici A nižšie. Potom môžeme vytvoriť permutáciu $(ac)(bd)$ ako TT_r a získať tak maticu v tvare A'. Permutáciu $(ab)(cd)$ zas môžeme získať ako TT_c a získať tak maticu A'' .

$$A = \begin{bmatrix} & & \cdots & & \\ \cdots & a & \cdots & b & \cdots \\ & & \vdots & & \\ \cdots & c & \cdots & d & \cdots \\ & & \cdots & & \end{bmatrix}$$

$$A' = \begin{bmatrix} & & \cdots & & \\ \cdots & c & \cdots & d & \cdots \\ & & \vdots & & \\ \cdots & a & \cdots & b & \cdots \\ & & \cdots & & \end{bmatrix} \qquad A'' = \begin{bmatrix} & & \cdots & & \\ \cdots & b & \cdots & a & \cdots \\ & & \vdots & & \\ \cdots & d & \cdots & c & \cdots \\ & & \cdots & & \end{bmatrix}$$

Operácia TT_c je zadefinovaná skladaním vyššie spomínaných funkcií ako:

$$\begin{aligned} TT_c\Big((i,k) \leftrightarrow (j,k), (i,l) \leftrightarrow (j,l)\Big) = \\ & hflip(j,n) \circ hflip(1,i) \circ vflip(m-k+1,m) \circ \\ & vflip(1,m-l+1) \circ hflip(1,1) \circ CE \circ hflip(1,1) \circ \\ & vflip(m-k+1,m) \circ vflip(1,m-l+1) \circ \\ & hflip(j,n) \circ hflip(1,i) \end{aligned}$$

Transpozícia vzhľadom na riadok je zložená analogicky.

Ohraničenia a dosiahnuteľnosť

Yamamura sa zaoberal aj problémom dosiahnuteľnosti. Vo svojom článku ukázal, že všetky permutácie matice $A_{n\times n}$ sú usporiadateľné práve využitím spomínaných operácií, okrem prípadov kedy $n \equiv 0(mod\ 4)$, zároveň $m \equiv 0(mod\ 4)$ a permutácia je nepárna.

Popísal taktiež aj horné ohraničenie problému dvojdimenzionálnych palaciniek ako:

$$f'(n) \leq \begin{cases} 34m-17, & n=2 \\ (13n+100)\times(nm-1), & m,n>2, n\equiv 1,3(mod\ 4) \\ (38n+37)\times(nm-1), & n,m>2, n\equiv 2(mod\ 4) \\ 280\times(nm-1), & n,m\equiv 0(mod\ 4) \\ & \text{a párne permutácie} \end{cases}$$

Krátko po Yamamurovi sa začala problému vo svojej diplomovej práci [Šišková, 2017] venovať aj P. Šišková. Navrhla a popísala prístup po vrstvách na základe palacinkových grafov (bližšie popísaných v časti 2.2), a určila spodné ohraničenie problému ako:

$$f'(n) \leq \arg\min_k \left(1+(n+m-1)\sum_{i=1}^{k}(n+m-2)^i \geq (n\times m)!\right)$$

Uviedla tiež hypotézu, podľa ktorej by malo byť horné ohraničenie dvojnásobkom dolného ohraničenia, no táto hypotéza doposiaľ nebola dokázaná.

$\mathbf{n\times m}$	$\mathbf{2\times 2}$	$\mathbf{2\times 3}$	$\mathbf{2\times 4}$	$\mathbf{3\times 3}$	$\mathbf{2\times 5}$
f'	4	9	12	13	13

Tabuľka 3: Tabuľka aktuálne známych palacinkových čísel f' dvojrozmerných polí

1.4 Dvojdimenzionálny problém triedenia spálených palaciniek

Dvojdimenzionálny problém triedenia spálených palaciniek je najnovšou obmenu problému, ktorú predstavili a popísali v článku [Yamamura et al., 2020] Yamamura, Kase a Jajcayová v roku 2020. Ako názov napovedá, ide o zavedenie obmien orientácií palaciniek do dvojdimenzionálneho problému triedenia, respektíve o dvojdimenzionálne zovšeobecnenie problému triedenia spálených palaciniek.

V tejto verzii problému opäť uvažujeme dve základné operácie - horizontálny a vertikálny prefix reversal, doplnené o zmenu orientácie pretáčaných palaciniek analogicky ako pri jednodimenzionálnom probléme triedenia spálených palaciniek.

Spodné ohraničenie problému doposiaľ nebolo určené, horné ohraničenie bolo určené ako:

$$g'(n) \leq \begin{cases} 330m-17, & n=2, m\equiv 0,2(mod 4) \\ 70m-17, & n=2, m\equiv 1,3(mod 4) \\ x & m,n>2, n\equiv 1,3(mod\ 4) \\ (38n+37)(nm-1)+328nm, & n,m>2, n\equiv 2(mod\ 4) \\ 608mn-280, & n,m\equiv 0(mod\ 4) \end{cases}$$

$$x=(13n+100)(nm-1)+328nm+\frac{n-1}{2}(66(n-1)+1397)$$

Doposiaľ neboli publikované výsledky pre žiadne konkrétne polia.

2 Palacinky a matematika

V našej práci sa zaoberáme zatiaľ dvoma súvisiacimi štruktúrami - grafmi a grupami. Najnovší článok [Yamamura et al., 2020] z roku 2020 však prvýkrát popisuje súvis aj s ďalšou zaujímavou štruktúrou - grupoidmi, a to v súvislosti s dvojrozmerným problémom triedenia spálených palaciniek.

2.1 Grupy v probléme triedenia palaciniek

Nespálené palacinky

Najintuitívnejšou reprezentáciou kopy n nespálených palaciniek v jednorozmernom poli je permutácia π prirodzených čísiel $1,2,...,n$. Permutácia $\pi_i(\pi)$ je taká permutácia, kde prvých $1 \leq i \leq n$ prvkov je v obrátenom poradí, napríklad pre $\pi = 1,2,3,4,5$ je $\pi_3(\pi) = 3,2,1,4,5$. [1]

Môžeme si všimnúť, že permutácia ostáva po obrátení iba prvého prvku rovnaká, a teda môžeme tvrdiť, že $\pi_1(\pi)$ je neutrálnym elementom.

Taktiež môžeme pozorovať, že vykonaním rovnakej flipovej operácie dvakrát po sebe získame pôvodnú permutáciu, respektíve že $\pi_i = \pi_i^{-1}$. Všetky permutácie sú teda idempotentami.

Všetky možné permutácie n prvkov tvoria symetrickú grupu S_n generovanú $\{\pi_2, \pi_3, ..., \pi_n\}$, v ktorej identita je $e_n = [1,2,\ldots,n]$. Funkcia $f(\pi)$ predstavuje najmenší možný počet flipových operácií použitím ktorých vieme pretransformovať konkrétnu permutáciu π na identitu. Hodnotou $f(n)$, kde n je číselný argument, označujeme najväčšie $f(\pi)$ zo všetkých per-

[1] Využívajúc notáciu zavedenú v úvode $\pi_3(\pi)$ pre $\pi = 1,2,3,4,5$ zodpovedá aplikovaniu operácie $flip(3)$ na pole $A = [1,2,3,4,5]$

mutácií $\pi \in S_n$: [Šišková, 2017]

$$f(n) = \max_{\pi \in S_n} f(\pi)$$

Spálené palacinky

Podobne ako pri nespálených palacinkách, aj tu uvažujeme grupu B_n pozostávajúcu zo všetkých permutácii poľa, tentokrát však aj s ohľadom na orientáciu palaciniek (meniace sa znamienko). Prvok grupy B_n môže okrem spermutovania navyše invertovať alebo ponechať znamienko každého elementu permutácie. B_n je generovaná pomocou operícií $\{\beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_n\}$, pričom β_i zodpovedá obrátenia poradia prvých $1 \leq i \leq n$ prvkoch a invertovanie ich znamienka. Narozdiel od nespálených palaciniek uvažujeme aj β_1, pretože v tomto prípade dochádza ku zmene znamienka prvého elementu. Rovnako platí, že $\beta_i = \beta_i^{-1}$. [Šišková, 2017]

2.2 Grafy v probléme triedenia palaciniek

Ďalšou vhodnou štruktúrou popisujúcou problém triedenia palaciniek sú grafy. Uvažujeme, že každý vrchol grafu G reprezentuje jednu permutáciu π, flipové operácie predstavujú hrany grafu. Nakoľko vieme, že platí $\pi_i = \pi_i^{-1}$, jedná sa o neorientovaný graf. Tento graf je b-regulárny, pretože na každú permutáciu π môžeme aplikovať práve b flipových operácii, a teda všetky vrcholy sú práve stupňa b.

V prípade problému triedenia jednorozmerného poľa nespálených palaciniek A_n pomocou prefix reversalu je k dispozícii n flipových operácií. Avšak keďže $\pi_1(\pi) = \pi$ vytvára sľučku, tak túto operáciu môžeme opomenúť a ďalej budeme uvažovať že vrcholy takéhoto grafu G majú stupeň $b = n-1$. Takýto graf obsahuje $n!$ vrcholov – jeden pre každú možnú permutáciu π.

V prípade 2D poľa nespálených palacinik $A_{n\times m}$ môžeme vykonať obrátenie 1 až n riadkov a 1 až m stĺpcov, čo je dokopy $n+m$ operácii. Avšak obrátením n riadkov alebo m stĺpcov získavame rovnakú permutáciu, a teda vrcholy sú stupňa $b = n+m-1$. Takýto graf obsahuje $(n \times m)!$ vrcholov.

Prípady problémov so spálenými palacinkami sú analogické. Pri jednorozmernom poli však uvažujeme $b = n$, pretože $\pi_1(\pi) \neq \pi$ (dochádza k zmene znamienka prvého prvku poľa), a počet vrcholov grafu stúpa na $2^n n!$, pretože každý z elementov poľa môže mať dve rôzne znamienka. Pri dvojrozmernom poli $b = n+m-1$ ostáva nezmenené, počet vrcholov však opäť stúpa na $2^{nm}(nm)!$.

Cesta z vrchola v_A do vrchola v_B predstavuje sekvenciu flipových operácií, ktorá transformuje konfiguráciu poľa A (permutáciu π_A) do konfigurácie B (na permutáciu π_B). Palacikové číslo $f(n)$ v predstavuje priemer grafu, teda najdlhšiu optimálnu cestu medzi ľubovoľnými dvoma vrcholmi.

Dôležitou vlastnosťou všetkých palacinkových grafov je, že sú vrcholovo tranzitívne. To znamená, že pre každú dvojicu vrcholov v_A a v_B existuje automorfizmus grafu, ktorý mapuje v_A na v_B. [Cohen and Blum, 1995]

3 Náš prístup a implementácia

Graf G (ako je opísaný v časti 2.2) prehľadávame do šírky (BFS). Zaujíma nás, koľko nanajvýš vrcholov môžeme nájsť vo vzdialenosti práve d od počiatočného vrcholu v_0. Uvažujeme polia nespálených palaciniek, pričom faktor vetvenia prehľadávacieho stromu pri jednorozmernom poli je $b = n-1$ a pri dvojrozmernom $b = n+m-1$.

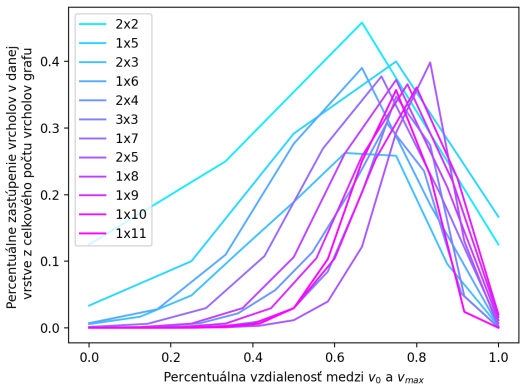
Vo vzdialenosti $d = 0$ je iba jeden vrchol, a to vrchol v_0. Vo vzdialenosti $d = 1$ vieme nájsť b vrcholov v_1, ktoré získame aplikovaním všetkých možných flipových operácií na hodnotu v_0. Vo vzdialenosti 2 vieme nájsť $b^2 - b$. V tomto prípade sa z každého z b vrcholov v_1 vieme dostať do b ďalších vrcholov spolu teda b^2), avšak z každého z vrcholov v_1 sa dostaneme jednou z operácií aj naspäť k vrcholu v_0 a z tohto dôodu je teda potrebné tento počet odpočítať. Vo všeobecnosti platí, že vo vzdialenosti práve d od vrchola v_0 sa môže nachádzať nanajvýš $b(b-1)^{d-1}$ vrcholov – reálne to však bude menej, nakoľko permutácie sa môžu opakovať. Pokiaľ označíme V_d ako množinu všetkých vrcholov v_d vo vzdialenosti d, tak v prípade jednorozmerného poľa A_n platí $|V_d| \leq (n-1)(n-2)^{d-1}$, a v prípade dvojrozmerného poľa $A_{n\times m}$ platí $|V_d| \leq (n+m-1)(n+m-2)^{d-1}$.

Pomocou prehľadávania do šírky sme vyčíslili reálne zastúpenie vrcholov $|V_d|$ vo všetkých vzdialenostiach d, pre rôzne veľkosti polí, ako je uvedené v tabuľke 4. V tabuľke, ako aj v grafoch 3 a 4 sú polia usporiadané podľa prislúchajúceho faktora vetvenia b, a so stúpajucou hodnotou aj farebne odlíšené.

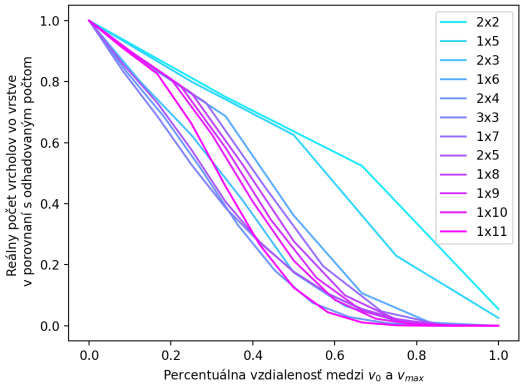
Ako môžeme vidieť v grafe 3, krivky zastúpení vrcholov v rôznych vzdialenostiach majú '*klobúkový*' tvar posunutý v smere osi x, ktorá predstavuje percento vzdialenosti medzi v_0 a v_{max} – najvzdialenejším

Rozmer poľa	b	$\lvert V_d\rvert$ **pre všetky** $d \geq 0$
$\mathbf{2\times 2}$ $\mathbf{1\times 4}$	3	[1, 3, 6, 11, 3]
$\mathbf{1\times 5}$	4	[1, 4, 12, 35, 48, 20]
$\mathbf{2\times 3}$	4	[1, 4, 12, 35, 86, 136, 189, 186, 69, 2]
$\mathbf{1\times 6}$	5	[1, 5, 20, 79, 199, 281, 133, 2]
$\mathbf{2\times 4}$	5	[1, 5, 20, 79, 284, 871, 2277, 4572, 8213, 12394, 9496, 2084, 24]
$\mathbf{3\times 3}$	5	[1, 5, 20, 79, 291, 1021, 3449, 10749, 30677, 73587, 125992, 99614, 17155, 240]
$\mathbf{1\times 7}$	6	[1, 6, 30, 149, 543, 1357, 1903, 1016, 35]
$\mathbf{2\times 5}$	6	[1, 6, 30, 149, 686, 2816, 11117, 41422, 143284, 441379, 1063806, 1446232, 471362, 6510]
$\mathbf{1\times 8}$	7	[1, 7, 42, 251, 1191, 4281, 10561, 15011, 8520, 455]
$\mathbf{1\times 9}$	8	[1, 8, 56, 391, 2278, 10666, 38015, 93585, 132697, 79379, 5804]
$\mathbf{1\times 10}$	9	[1, 9, 72, 575, 3963, 22825, 106461, 377863, 919365, 1309756, 814678, 73232]
$\mathbf{1\times 11}$	10	[1, 10, 90, 809, 6429, 43891, 252737, 1174766, 4126515, 9981073, 14250471, 9123648, 956354, 6]

Tabuľka 4: Reálne počty $|V_d|$ vo všetkých vzdialenostiach d



Obr. 3: Percentuálne zastúpenie vrcholov grafu vo vzdialenosti d od v_0



Obr. 4: Porovnanie reálnej a maximálnej mohutnosti vrcholov vo vzdialenosti d od v_0

vrcholom v_d. Zo začiatku hodnota stúpa exponenciálne, ako sa dá aj podľa vyššie uvedeného odhadu očakávať, avšak zhruba v 60-80% dosiahne svoje maximum s takmer 40% všetkých možných možných konfigurácii v jednej vzdialenosti a následne začne prudko klesať. Tento jav je spôsobený tým, že skladaním rôznych operácii sa vieme dostať do rovnakých konfigurácií, ako sú tie, ktoré sa vyskytujú už aj v menších vzdialenostiach.

Vykonali sme aj niekoľko experimentov, v rámci ktorých sme vyčíslili $|V_d|$ do rôznych vzdialeností d aj pre väčšie grafy a prekladali sme získané krivky cez už známe krivky grafov vyberaných na základe viacerých kritérií. Po preložení sme sa snažili hľadať podobnosti a presná formulácia hypotézy bude jedným z bodov našej ďalšej práce.

S rovnakým odhadom počtu vrcholov vo vzdialenosti d od vrchola v_0 počítala v práci [Šišková, 2017] aj P. Šišková pri formulácii doposiaľ najpresnejšieho dolného ohraničenia problému triedenia dvojdimenzionálnych palaciniek. Ako však vidieť v grafe 4, presnosť odhadu prudko klesá s pribúdajúcou vzdialenosťou, v posledných približne 20% vzdialenosti potrebnej na obsiahnutie všetkých možných konfigurácií je takmer nulová. Na bližšie určenie je potrebné podrobnejšie preskúmať skladanie operácií a jeho vplyv na zastúpenie vrcholov vo vzdialenosti d od v_0. Ako si môžeme všimnúť v tabuľke 4, polia s rovnakým faktorom vetvenia b (napr. 1×6, 2×4 a 3×3) majú počty vrcholov vzdialených $d \leq 4$ rovnaké a pri d=5 sa už výrazne líšia. Na základe toho predpokladáme, že preskúmanie skladania aspoň štvoríc operácií môže priniesť zlepšenie dolného ohraničenia a bude jedným z bodov našej ďalšej práce.

3.1 Implementácia

Toto prehľadávanie do šírky sme implementovali v jazyku Scala. Zapracovali sme aj modifikáciu algoritmu obojsmerného prehľadávania do šírky, čo nám v rámci výskumu umožňuje pomerne efektívne a rýchlo nájsť najkratšiu cestu (najmenší možný počet potrebných operácii na usporiadanie) simultánnym spustením prehľadávania grafu do šírky z vybranej konfigurácie a identity.

Základná implementácia

Palacinky sme reprezentovali priamočiaro ako dvojrozmerné polia celých čísel. Na ukladanie množiny navštívených vrcholov sme sa spočiatku rozhodli použiť lexikografický strom, čo sa v danej situácii ukázalo byť postačujúco efektívne riešenie.

Nemalou výhodou tohto prístupu je, že jednoduchý na implementáciu. Dôležitejšie však je, že aj na bežných zariadeniach vieme pomerne rýchlo zistiť $|V_d|$ vo všetkých vzdialenostiach d od v_0 pre $p \leq 11$, a že vieme nazrieť aj na vývoj mohutností pre $p \geq 12$.

Lexikografický strom permutácií obsahuje

$$\sum_{i=0}^{p} \frac{p!}{(p-i)!}$$

vrcholov, z čoho je $p!$ listov reprezentujúcich permutácie. Hodnota p predstavuje počet čísiel v poli, ktoré permutujeme, teda $p = n$ pre jednorozmerné polia A_n, respektíve $p = nm$ pre dvojrozmerné $A_{n\times m}$. Nevýhodou tohto prístupu je potreba držať v pamäti až o

$$\sum_{i=0}^{p-1} \frac{p!}{(p-i)!}$$

vnútorných vrcholov viac. Pri optimálnej implementácii týmto spôsobom potrebujeme na udržanie stromu v pamäti pre $p = 11$ približne 3GB pamäte a pre $p = 12$ viac ako 30GB, čo je príliš veľa, avšak nie je kritickým bodom tohto prístupu. Najkritickejšou a na pamäť veľmi náročnou časťou je budovanie zásobníku počas prehľadávania do šírky. Požiadavky na pamäť sú tak vysoké, že aj bez akéhokoľvek ukladania navštívených vrcholov (permutácií) nie je možné udržať zásobník v pamäti bežného počítača pri úplnom prehľadávaní grafu s $p \geq 12$.

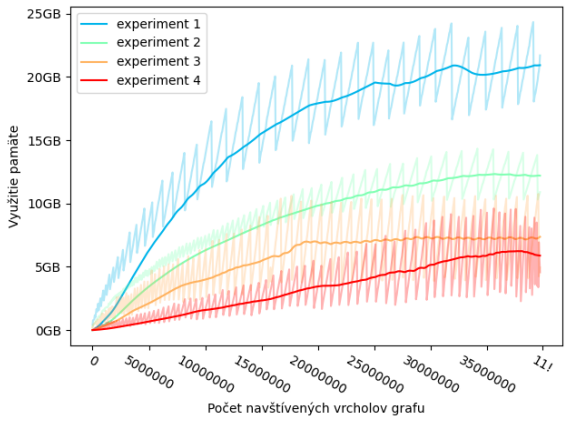
Vylepšenia

Zo vznikajúcej potreby študovať vývoj $|V_d|$ vo všetkých vzdialenostiach d a získať palacinkové čísla aj pre väčšie polia sme sa teda rozhodli zvoliť inú reprezentáciu permutácií poľa a aj následné ukladanie navštívených vrcholov. Pomocou bijekcie z permutácií p prvkov na celé čísla z rozsahu $[1,\ldots,p!]$ vieme efektívne palacinky uložiť ako číslo, minimalizovať tak pamäťovú náročnosť zásobníka a tiež aj ukladať informácie o navštívených vrcholoch v poli binárnych hodnôt veľkosti $p!$. Pokiaľ navyše viac binárnych hodnôt skonverujeme na 32-bitové číslo použitím bitových operácií, môžme použiť aj kratšie pole čísel, čo je ešte menej náročné na pamäť.

Tento prístup je náročnejší na prevedenie, avšak jeho nižšia náročnosť na pamäť a vyššia rýchlosť umožňujú preskúmať aj väčšie palacinkové grafy na bežných počítačoch. Pre porovnanie s predpošlým (jednoduchším) prístupom, čisto uloženie navštívených vrcholov do novej štruktúry si vyžaduje už iba približne 5MB pre $p = 11$ a 60MB pre $p = 12$.

Experimenty

Vykonali sme niekoľko experimentov, v ktorých sme porovnávali vyťaženie pamäte za behu programu počas prehľadávania grafu s $p = 11$ (teda 11! vrcholmi) využitím vyššie popísaných prístupov. Namerané hodnoty sú vyobrazené svetlými farbami v grafe na obrázku 5. Pre prehľadnosť sme do grafu tmavou farbou zobrazili zodpovedajúce trendy vypočítané ako pohyblivý priemer s oknom veľkosti 1,5 milióna navštívených vrcholov. Prudké výstupy a poklesy sú spôsobené hromadiacimi sa objektami v pamäti a následným Java garbage collection.



Obr. 5: Využitie pamäte pri jednotlivých prístupoch

Experiment 1 predstavuje štandardnú implementáciu spojenia prehľadávania do šírky a lexikografic-

kého stromu. *Experiment 2* predstavuje implementáciu rovnakého prístupu, avšak po programátorskej optimalizácií - napríklad zníženie presnosti premenných či obmedzenie vytvárania objektov. Okrem celkového poklesu pamäťovej náročnosti môžeme sledovať aj nižšie periodické výkyvy oproti trendu. *Experiment 3* bol medzikrokom medzi základným a vylepšeným prístupom. V tomto prípade sme nahradili lexikografický strom množinou implementovanou cez HashSet, do ktorej sme navštívené vrcholy pridávali vo forme celých čísel, ktoré sme mapovali priamočiaro konkatenáciou poľa. V *experimente 4* už využívame ideu bijekcie permutácií p prvkov na celé čísla z rozsahu $[1,\ldots,p!]$, do zásobníka vkladáme teda už iba čísla a informáciu o navštívených vrcholoch ukladáme do poľa binárnych hodnôt.

Trend v *experimentoch 1-3* pripomína logaritmickú krivku, zatiaľ čo pri *experimente 4* sa javí skôr ako lineráne stúpanie. Taktiež môžeme pozorovať, že pri tomto experimente sa aj výrazne zvyšuje amplitúda a zmenšuje perióda výkyvov. Tento jav je pravdepodobne spôsobený veľkým počtom vytváraných objektov v pamäti. V poslednej tretine behu sa pamäťová náročnosť tejto implementácie vyrovnáva hodnotám nameraným počas *3. experimentu*, avšak hodnoty pomyselného dolného ohraničenia krivky nám potvrdzujú, že zvolený prístup by mohol byť pri vhodnej implementácií skutočne vysoko efektívny. Ďalším z bodov našej budúcej práce bude teda implementovať tento prístup optimálnejším spôsobom.

3.2 Ďalšia práca

Okrem spomínaného formulovania a overovania hypotéz či optimálnejšej implementácie navrhnutého algoritmu bude ďalším bodom našej práce aj návrh a implementácia nového programu, pomocou ktorého budeme môcť určiť ďalšie palacinkové čísla pre dvojrozmerné polia. Tentokrát plánujeme použiť iteratívne prehľadávanie do hĺbky (IDDFS) na zistenie priemeru grafu. Algoritmus je obmedzený na určitú hĺbku, preto sa nemôže stať, že by nezastavil, pričom hĺbka sa iteratívne navyšuje, vďaka čomu vieme presne určiť palacinkové číslo. IDDFS má iba konštantne vyššiu časovú zložitosť než štandardné prehľadávanie do hĺbky (DFS), je však konečný a optimálny, rovnako ako BFS. Dobre tak spája výhody a snaží sa vyhnúť nevýhodám algoritmov BFS a DFS.

Narozdiel od BFS si IDDFS nevyžaduje použitie zásobníka, čím je výrazne menej náročné na pamäť. V kombinácií s použitím vyššie opísanej štruktúry na ukladanie navštívených vrcholov, ktorá si vyžaduje iba 1 bit na uloženie permutácie poľa, predpokladáme, že sa nám podarí určiť palacinkové čísla aj pre ďalšie dvojrozmerné polia využitím štandardných osobných počítačov.

Poďakovanie

Rada by som poďakovala mojej školiteľke doc. RNDr. Tatiane Jajcayovej, PhD. za cenné rady, ochotu a čas, ktorý mi venuje počas výskumu. Tiež by som rada poďakovala aj Mgr. Jurajovi Holasovi a RNDr. Petrovi Borovanskému, PhD. za cenné konzultácie a rady v oblasti implementácie.

Literatúra

[Bulteau et al., 2015] Bulteau, L., Fertin, G., and Rusu, I. (2015). Pancake flipping is hard. *Journal of Computer and System Sciences*, 81(8):1556–1574.

[Chitturi et al., 2009] Chitturi, B., Fahle, W., Meng, Z., Morales, L., Shields, C. O., Sudborough, I. H., and Voit, W. (2009). An (18/11) n upper bound for sorting by prefix reversals. *Theoretical Computer Science*, 410(36):3372–3390.

[Cibulka, 2011] Cibulka, J. (2011). On average and highest number of flips in pancake sorting. *Theoretical Computer Science*, 412(8-10):822–834.

[Cohen and Blum, 1995] Cohen, D. S. and Blum, M. (1995). On the problem of sorting burnt pancakes. *Discrete Applied Mathematics*, 61(2):105–120.

[Dweighter, 1975] Dweighter, H. (1975). Problem e2569. *American Mathematical Monthly*, 82(10).

[Gates and Papadimitriou, 1979] Gates, W. H. and Papadimitriou, C. H. (1979). Bounds for sorting by prefix reversal. *Discrete mathematics*, 27(1):47–57.

[Heydari and Sudborough, 1997] Heydari, M. H. and Sudborough, I. H. (1997). On the diameter of the pancake network. *Journal of Algorithms*, 25(1):67–94.

[Yamamura, 2015] Yamamura, A. (2015). Rearranging two dimensional arrays by prefix reversals. In *International Workshop on Reachability Problems*, pages 153–165. Springer.

[Yamamura et al., 2020] Yamamura, A., Kase, R., and Jajcayová, T. B. (2020). Groupoid action and rearrangement problem of bicolor arrays by prefix reversals. In *International Computer Science Symposium in Russia*, pages 419–431. Springer.

[Šišková, 2017] Šišková, P. (2017). Rearranging two dimensional arrays by prefix reversals. Master's thesis.

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 47
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Dana Škorvánková, Martin Madaras

Human Pose Estimation using Per-Point Body Region Assignment

Dana Škorvánková* Martin Madaras†‡

Katedra aplikovanej informatiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Regarding existing human pose estimation methods based on deep learning, the network usually regresses the 3D skeletal joint coordinates directly from a single 2D image. Most of the research is currently focused on estimating the pose from RGB data [Artacho and Savakis, 2020], mainly due to data availability. On the other hand, methods processing depth data on the input proved to be beneficial in terms of accuracy, providing the additional spatial information. Most frequently, 3D data is passed to the network in form of depth maps or voxelized grids [Xiong et al., 2019].

Our work solves the task of human pose estimation from depth data using a novel two-stage deep learning-based method called Segmentation-Guided Pose Estimation (SGPE) (Figure 1). To avoid the projection of 3D human pose to 2D image space, we employ unorganized and unordered point clouds on the input to compute 3D skeletal joint coordinates as a result. We enhance the local and global feature propagation by performing an auxiliary semantic segmentation into the body regions. First, a corresponding body region is assigned to each point of the point cloud in a segmentation stage. To enable the network to fully perceive the data in its local, as well as global context, we also make use of the intermediate concatenation of pointwise and aggregated features inside the model. Second, the input point cloud containing the point coordinates is concatenated with the per-point body region labels, adding the fourth channel to the data. Afterwards, the four-channel point clouds are fed into the regression model, which is where the resulting joint coordinates are estimated as an output. Moreover, to help preserve gradient flow, we engaged residual skip-connections into the model.

Our method outperforms state-of-the-art on MHAD dataset[1], lowering the mean per joint position error (MPJPE) by almost 65% to 1.39 cm; as well as on CMU dataset[2], where our model reached MPJPE of 2.11 cm (shown in Figure 2).

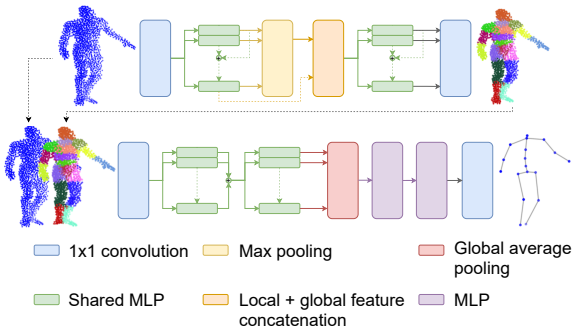


Figure 1: The overview of the proposed Segmentation-Guided Pose Estimation pipeline: First, the point clouds are segmented into body regions in the segmentation network (*top*), then the input point clouds are concatenated with the predicted per-point body region assignment as a fourth channel, and fed into the regression network (*bottom*).

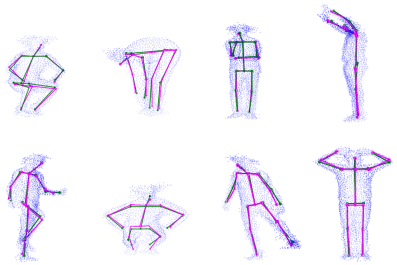


Figure 2: Qualitative results of our method on CMU dataset. The ground truth skeletons (*green*) vs. our estimation (*magenta*). Best viewed in color.

References

[Artacho and Savakis, 2020] Artacho, B. and Savakis, A. (2020). Unipose: Unified human pose estimation in single images and videos. *arXiv preprint arXiv:2001.08095*.

[Xiong et al., 2019] Xiong, F., Zhang, B., Xiao, Y., Cao, Z., Yu, T., Zhou, J. T., and Yuan, J. (2019). A2j: Anchor-to-joint regression network for 3d articulated pose estimation from a single depth image. In *The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*.

*dana.skorvankova@fmph.uniba.sk
†madaras@fmph.uniba.sk
‡Supervisor

[1]https://tele-immersion.citris-uc.org/berkeley_mhad

[2]http://domedb.perception.cs.cmu.edu/

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 48
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Šimon Sádovský, Branislav Rovan

Usefulness of Information and Unary Regular Languages

Šimon Sádovský[1*] Branislav Rovan[1†‡]

Katedra informatiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Despite years of existence of computer science there is no generally agreed definition of *information* that would capture many of its informally used aspects. Research focused on formalizing various aspects of information was initiated at our department over fifteen years ago. We further elaborate the notion of *usefulness of information* in the setting of regular languages (see [Rovan and Sádovský, 2018] for an overview of past results).

The essence of our approach to the notion of usefulness of information can be described as follows: *Information is useful if it helps to solve a given problem easier.* A problem to be solved is formalized by a language L and its solution by the minimal automaton accepting it. In this paper we limit our attention to unary regular languages and deterministic finite automata. Given a problem L, we measure the complexity of its solution – a minimal finite automaton A accepting L – using state complexity denoted by $sc(A)$. A supplementary information (advice) L_{adv} given by A_{adv} is useful if a problem L_{new} given by A_{new} exists such that $L = L_{new} \cap L_{adv}$ and both L_{new} and L_{adv} are simpler than L. One can interpret A_{new} as a simplified solution to the original problem relying on the provided advice. Since we look for simple solutions it is natural to consider minimal automata. This idea is formalized via the notion of *decomposability* of a finite automaton and a regular language.

Definition 1. *Let A be a DFA. We say that two DFAs A_1 and A_2* form a decomposition of *A if $L(A) = L(A_1) \cap L(A_2)$, $sc(A_1) < sc(A)$ and $sc(A_2) < sc(A)$. In case such decomposition of A exists we say that A is* decomposable. *We say that $L \in \mathscr{R}$ is* deterministically decomposable *if the minimal DFA accepting L is decomposable.*

When considering deterministic finite automata over unary alphabet (UDFA for short), one can easily observe that all of them have very similar shape. Each UDFA consist of (possibly empty) initial path, which is also called a tail, which is followed by exactly one cycle. Thus it is convenient to think about state complexity of a UDFA in terms of the sizes of its tail and cycle.

Definition 2. *The size of a UDFA A is the pair (λ, μ) where λ is the number of states in the cycle of A and μ is the number of states in the tail of A.*

Definition 3. *Let L be a unary infinite language and $\lambda \in \mathbb{N}$. We say that L is* λ-cyclic *if there exists a UDFA A of the size $(\lambda, 0)$ such that $L(A) = L$. L is called* properly λ-cyclic *if it is λ-cyclic, but not λ'-cyclic for any $\lambda' < \lambda$. We say that L is* ultimately λ-cyclic *if for some $\mu \in \mathbb{N}$ there exists a UDFA A of the size (λ, μ) such that $L(A) = L$. L is called* properly ultimately λ-cyclic *if it is ultimately λ-cyclic, but not ultimately λ'-cyclic for any $\lambda' < \lambda$.*

It is easy to prove that finite unary regular languages and properly ultimately 1-cyclic languages are not deterministically decomposable. For our characterization of properly λ-cyclic languages upon deterministic decomposability we refer to [Pighizzini et al., 2021]. Our characterization of properly ultimately λ-cyclic languages follows.

Theorem 1. *Let L be a properly ultimately λ-cyclic language for some $\lambda \geq 2$ such that the minimal UDFA A accepting L has size (λ, μ) for some $\mu > 0$. L is deterministically decomposable if and only if at least one of the following holds:*

(i) $a^{\mu-1} \notin L$

(ii) there exists $\lambda' \in \mathbb{N}$ *such that* $1 < \lambda' < \lambda$ *and* $\lambda' | \lambda$ *for which it holds that* $L \subseteq \{a\}^* - \{a^{\mu+k\lambda'-1} \mid k \in \mathbb{N}^+\}$.

References

[Pighizzini et al., 2021] Pighizzini, G., Rovan, B., and Sádovský, Š. (2021). Usefulness of information and unary languages. In Leporati, A., Martín-Vide, C., Shapira, D., and Zandron, C., editors, *Language and Automata Theory and Applications*, volume 12638, pages 131–142, Cham. Springer International Publishing.

[Rovan and Sádovský, 2018] Rovan, B. and Sádovský, Š. (2018). *On Usefulness of Information: Framework and NFA Case*, volume 11011, pages 85–99. Springer International Publishing, Cham.

*sadovsky@dcs.fmph.uniba.sk
†rovan@dcs.fmph.uniba.sk
‡Supervisor

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 49
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Askar Gafurov, Andrej Baláž, Tomáš Vinař, Bronislava Brejová

VirPool - Estimation of proportions of SARS-CoV-2 variants in a mixed sequencing sample

Askar Gafurov[1*] Andrej Baláž[2†] Tomáš Vinař[2‡] Bronislava Brejová[1§]

[1] Katedra informatiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava
[2] Katedra aplikovanej informatiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Estimation of proportions of novel SARS-CoV-2 variants (e.g. British variant B.1.1.7, South-African variant B.1.351) in a population is currently done by sequencing individual samples, which demands individual laboratory processing of each sample. This labor can be significantly reduced by mixing several samples together and processing them in one batch. Our project aims to estimate the proportion of samples with given variants from such mixtures using probabilistic modeling.

Let $p_{k,i,a}$ denote the probability of observing symbol $a \in \{A,C,G,T,N\}$ at position i in the viral genome in the k-th variant (symbol 'N' represents deletions). These probabilities are estimated from sequenced genomes in the GISAID database [Shu and McCauley, 2017].

Let $W = (w_1, \ldots, w_K)$ denote the unknown weights of individual variants in the mixture. Then, the probability of observing symbol a at position i in the mixture is equal to $m_{i,a} = \sum_{k=1}^{K} w_k \cdot p_{k,i,a}$.

The experimental data consists of random subsequences (reads) of the examined genome mixture with possible alterations due to sequencing errors. Let $O_{i,a}$ denote the count of observed symbol a at position i in the sequencing reads aligned to the reference genome. Assuming uniform read coverage and error-free sequencing, the probability of observing data O for a given mixture W is then equal to

$$Pr[O|W] = \prod_i \prod_a \left(\frac{m_{i,a}}{N}\right)^{O_{i,a}}.$$

This model can also be used to estimate a posteriori probability of individual reads belonging to a particular variant (see Figure 1).

The estimation of optimal mixture weights is then done by maximising the log-likelihood function:

$$W^* := \arg\max_W \sum_i \sum_a O_{i,a} \cdot \log m_{i,a},$$

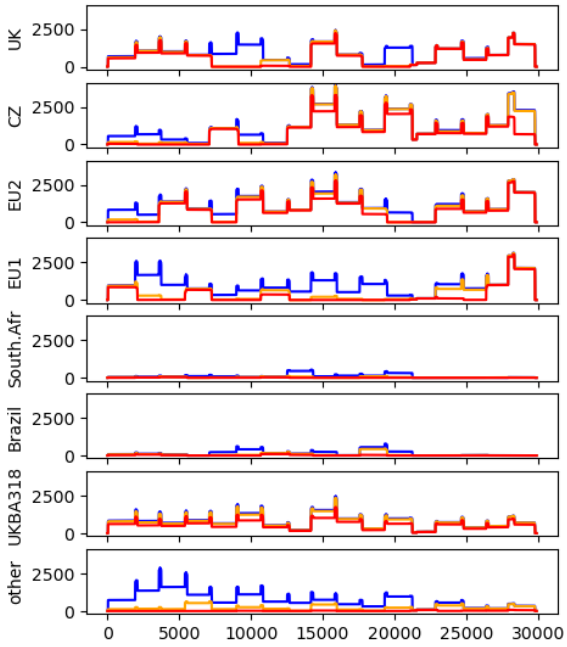


Figure 1: Classification of reads of a simulated mixture into variants by maximum a posteriori probability (MAP). The horizontal axis represents reference genome position, vertical axis represents read coverage. Blue line represents all reads of a given variant, orange line includes only reads with MAP $> 50\%$, red line only reads with MAP $> 90\%$.

which is done by the L-BFGS-B optimisation algorithm (`scipy.optimize` Python library).

This model can be extended to take into account sequencing errors, such as letter substitutions and deletions.

References

[Shu and McCauley, 2017] Shu, Y. and McCauley, J. (2017). Gisaid: Global initiative on sharing all influenza data–from vision to reality. *Eurosurveillance*, 22(13):30494.

*gafurov@dcs.fmph.uniba.sk
†andrej.balaz@fmph.uniba.sk
‡vinar@fmph.uniba.sk
§brejova@dcs.fmph.uniba.sk

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 50
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Lukáš Gajdošech, Martin Madaras

Processing of Structured 3D Scans with Deep Learning

Lukáš Gajdošech[1*] Martin Madaras[1†‡]

Katedra aplikovanej informatiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

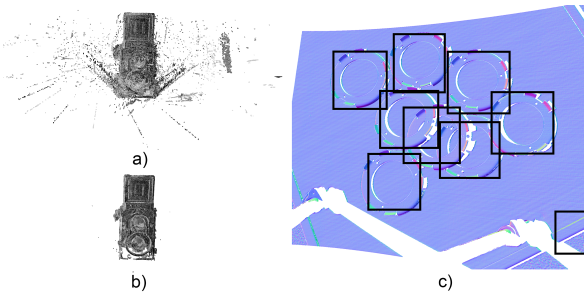


Figure 1: a) raw scans b) filtration c) localization

In recent years, deep convolutional neural networks achieved tremendous success in solving different tasks over 2D Images. Ever since, these models are applied to different types of inputs, such as unorganized point clouds. In this work, we adapt these models to yet another type of data, the organized 3D scans produced by structured light scanners. This kind of data shares properties of both 2D images and unorganized sets of points in space, being organized in a matrix, but also representing a 3D object by containing depth and normal information. With ideas from renowned models such as U-Net [Biasutti et al., 2019] and YOLO [Redmon and Farhadi, 2017], we are able to solve tasks of *artefact filtering* and *machine part detection*, exemplifying the usability of such models over this new domain. We compare results of novel approaches to analytical solutions, which are in an existing pipeline for 3D scans processing. It is desirable to find alternatives to existing methods as for these tasks they are often non-robust, slow, hard to maintain or require additional information. Data is not as abundant as in the case of 2D images, since a special hardware is needed. Therefore we generate synthetic data using a simulator, showing how a model can be trained over synthetic data, while giving reasonable results over the real scans.

The loss function defines the goal of the filtration network. Let p denote the predicted classification by the network. For notational convenience we define p_t to be equal to p when the ground truth prediction y is 1 and $1-p$ otherwise. With this simplification, the cross-entropy loss function can be written as $\mathrm{CE}(p_t) = -\log(p_t)$. It has problems when working with heavily imbalanced datasets, as in artefact filtering, where only 1-5% of points are artefacts. [Lin et al., 2017] proposes to introduce a class-weightening factor α and a modulating factor $(1-p_t)^\gamma$ (α_t is defined analogously to p_t):

$$\mathrm{FL}(p_t) = -\alpha_t(1-p_t)^\gamma \log(p_t)$$

For the artefact filtering, we have set $\alpha = 0.07$ and $\gamma = 5$. YOLO architectures such as the one for machine part detection use multi-part loss functions, we omit the full definition for brevity.

Data	*base.*	*net.*
crocs	0.899	0.919
flexa	0.738	0.873
hover	0.748	0.750
ski	0.790	0.854
statue	0.913	0.942
total	0.818	0.868

Part	*IoU*	F_1
circlet	0.91	0.91
plate	0.91	0.91
thruster	0.91	0.91
total	0.91	0.91

Table 1: **Left)** $\overline{IoU}$ of the baseline vs. our network **Right)** F_1 and $\overline{IoU}$ for the part detection.

Both networks are evaluated using the intersection over union metric, see Table 1. Filtration is compared to a baseline morphological opening operator with manually chosen structuring element. We used *IoU* threshold of 0.45 for classifying TP bounding boxes in the part detection.

References

[Biasutti et al., 2019] Biasutti, P., Lepetit, V., Aujol, J., Brédif, M., and Bugeau, A. (2019). LU-Net: An Efficient Network for 3D LiDAR Point Cloud Semantic Segmentation Based on End-to-End-Learned 3D Features and U-Net. In *2019 IEEE: ICCVW*.

[Lin et al., 2017] Lin, T., Goyal, P., Girshick, R., He, K., and Dollár, P. (2017). Focal Loss for Dense Object Detection. In *2017 IEEE: ICCV*.

[Redmon and Farhadi, 2017] Redmon, J. and Farhadi, A. (2017). YOLO9000: Better, Faster, Stronger. In *2017 IEEE: CVPR*.

*l.gajdosech@gmail.com
†madaras@skeletex.xyz
‡Supervisor

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 51
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Adrián Goga, Tomáš Vinař, Broňa Brejová

Unsupervised Demultiplexing of Nanopore Sequencing Data

Adrián Goga[1*] Tomáš Vinař[2†‡] Broňa Brejová[1§]

[1] Katedra informatiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava
[2] Katedra aplikovanej informatiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Multiplexing in DNA sequencing is a technique that allows simultaneous sequencing of multiple samples which are first labeled by distinct barcodes and then mixed together. This method is economically advantageous, since it uses a single-use flow cell to run several sequencing experiments. The challenge this method poses is demultiplexing, i.e. classifying the reads based on their barcode sequences. The original approaches based on finding barcodes in basecalled DNA sequences typically render up to 15% of the reads unusable due to errors in the basecalling process. The recent approach of Wick et al. [Wick et al., 2018] is based on a Convolutional Neural Network that operates with raw sequencing signal, which is not polluted by the errors of the basecalling process and also contains more information. It established a new state of the art with only $\approx 5.2\%$ of reads being unclassified and a $\approx 1.6\%$ error rate.

We present a novel approach that also operates with raw sequencing signals. As opposed to the previous attempts at this problem, however, our method works in an unsupervised manner, i.e. without the preceding knowledge of the barcode sequences.

The main idea is to compare sequencing signals by the similarity of their barcode-containing regions, which are typically starts of the reads. Our similarity function combines the concepts of Dynamic Time Warping (DTW) and local alignment, resulting in local DTW (LDTW). The LDTW score highlights the most similar subsequences of two signal sequences. If they share the same barcode, the LDTW should yield the alignments of barcode subsequences (see Fig. 1, 2).

We then built a clustering scheme on the basis of our metric. To accommodate a large number of reads in a single sequencing run, we needed to adapt commonly used clustering schemes to operate in a data stream fashion. We structured our method into two phases. In the first phase we sample a number of reads (several thousands), compute the LDTW scores between all pairs and use a common clustering algorithm to obtain the clusters, which should represent the barcodes used in the sequencing.

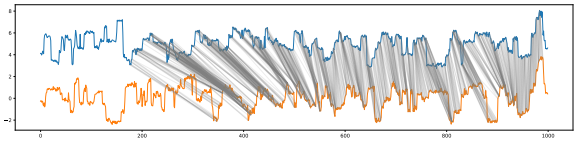


Figure 1: Example of regions containing the same barcodes.

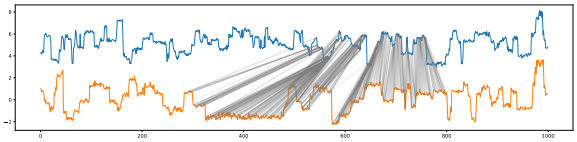


Figure 2: Much shorter alignment, likely corresponding to the barcode flanking sequences.

In the second phase, we choose a small number of representatives from each barcode-cluster and each read is assigned to a cluster based on the LDTW scores to the cluster representatives.

Experimental results show that the performance of our approach is comparable to that of Wick et al., if the barcode classes are not severely imbalanced. The less frequent barcodes may get either omitted or polluted by dominant barcodes.

Our method is easily parallelizable and scalable for any number of CPU threads, with a possibility of a GPU extension to obtain another potential speed up.

References

[Wick et al., 2018] Wick, R. R., Judd, L. M., Holt, K. E., and Pertea, M. (2018). Deepbinner: Demultiplexing barcoded Oxford Nanopore reads with deep convolutional neural networks. *PLOS Computational Biology*, 14(11).

*adrian.goga@uniba.sk
†vinar@fmph.uniba.sk
‡Supervisor
§brejova@dcs.fmph.uniba.sk

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 52
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Samuel Molčan, Peter Kosa, Bibiana Bieleková, Bronislava Brejová

Models For Monitoring Progressive Multiple Sclerosis

Samuel Molčan[1*] Peter Kosa[2] Bibiana Bieleková[2] Bronislava Brejová[1†‡]

[1] Katedra informatiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava
[2] The National Institutes of Health, 9000 Rockville Pike Bethesda, Maryland 20892 USA

The advancement of progressive multiple sclerosis can be slow, and the detection of deterioration by standard clinical scales requires observation over long periods. More sensitive methods are needed to evaluate treatment effects in a shorter time. In this work, we examine the CombiWISE 1.0 scale [Kosa et al., 2016], which was developed using optimization techniques and linear mixed models. We explore variants of these methods and extend them to include data from NeurEx application [Kosa et al., 2018] for recording examinations by clinicians.

CombiWISE 1.0 is a linear combination of multiple disability scales and neurological tests. The weights of the attributes were optimized by genetic algorithm and linear mixed model. The NeurEx dataset consists of longitudial records for 212 subjects (patients), and each record is composed of 81 numerical attributes that are more detailed and cover more difficulties caused by multiple sclerosis than standard disability scales. Some of the attributes have low sensitivity confounded by measurement noise.

For optimization of the weights we examine combinations of various optimization methods such as the genetic algorithm, SLSQP, L-BTGS-B etc. and various fitness functions. We consider fitness functions based on t-value of the regressor from linear mixed model (LME) [Pinheiro and Bates, 2006] or a simpler z-score. In LME, t-value is used to test significance of the relevant regressor, so we maximize *t-value* of *time* parameter as that maximizes the evidence of a change over time [Kosa et al., 2016].

We eliminate part of the noise by merging groups of highly correlated attributes. For the same purpose, but also to avoid overfitting, we select attributes with high normalized change over time. Problem of overfitting is furthermore adressed by ridge penalization of the fintess function of the form: $\lambda \sum_{i=1}^{n} w_i^2$.

Experiments show that the best combination of used methods and parameters achieves median of t-values 9.870 (in comparison with median t-value of 2.718 for *CombiWISE 1.0* and 4.211 for *NeurEx*). We call this new score *CombiWISE 2.0*.

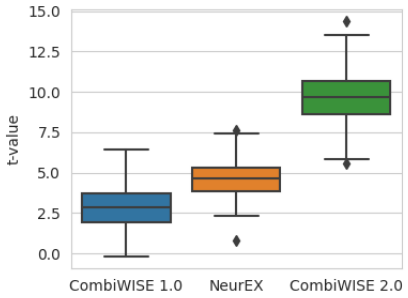


Figure 1: Comparison of t-values of different scales

Acknowledgements The NeurEx data were collected from participants enrolled in the protocol: Comprehensive Multimodal Analysis of Neuroimmunological Diseases in the Central Nervous System (Clinicaltrials.gov identifier NCT00794352). All study participants gave informed consent.

The research was supported in part by the Intramural Research Program of the National Institutes of Health (NIH), National Institute of Allergy and Infectious Diseases (NIAID).

References

[Kosa et al., 2018] Kosa, P., Barbour, C., Wichman, A., Sandford, M., Greenwood, M., and Bielekova, B. (2018). Neurex: digitalized neurological examination offers a novel high-resolution disability scale. *Annals of clinical and translational neurology*, 5(10):1241–1249.

[Kosa et al., 2016] Kosa, P., Ghazali, D., Tanigawa, M., Barbour, C., Cortese, I., Kelley, W., Snyder, B., Ohayon, J., Fenton, K., Lehky, T., et al. (2016). Development of a sensitive outcome for economical drug screening for progressive multiple sclerosis treatment. *Frontiers in neurology*, 7:131.

[Pinheiro and Bates, 2006] Pinheiro, J. and Bates, D. (2006). *Mixed-effects models in S and S-PLUS*. Springer Science & Business Media.

[Scrucca et al., 2013] Scrucca, L. et al. (2013). Ga: a package for genetic algorithms in r. *Journal of Statistical Software*, 53(4):1–37.

*molcan23@uniba.sk
†brejova@dcs.fmph.uniba.sk
‡advisor

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 53
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Alex Babiš, Beáta Stehlíková

Predikovanie nepozorovaných hrán v znamienkovej váženej sieti

Alex Babiš[1*] Beáta Stehlíková[1†‡]

[1]Katedra aplikovanej matematiky a štatistiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Predikcia nepozorovaných alebo budúcich hrán v sieťach je jednou z aktuálnych tém, ktorou sa v uplynulých dvoch dekádach zaoberalo množstvo ľudí.

Úzko súvisí s typom sietí, s ktorými pracujeme. Väčšina existujúcich prístupov sa zaoberá predikciou hrán v binárnych, poprípade vážených sieťach [1]. Prístupy sa dajú rozdeliť do troch väčších skupín. Prvú tvoria metódy využívajúce topologické vlastnosti siete. Druhú veľkú kategóriu tvoria pravdepodobnostné metódy, ktoré pomerne rozsiahlo využívajú Bayesovo pravidlo. Tretiu kategóriu prístupov tvoria metódy využívajúce moderné techniky strojového učenia.

V práci pracujeme s korelačnými sieťami. Tie predstavujú špecifickú kategóriu sietí, takzvané znamienkové vážene siete, ktoré neobsahujú násobné hrany ani slučky. Jeden spôsob ako predikovať hrany v znamienkových vážených sieťach je pripočítať dostatočne veľkú konštantu k váham hrán, a tým docieliť prevedenie siete iba na váženú sieť. To môže spôsobovať isté problémy, napríklad ak berieme kladné aj záporne hrany ako istú formu symetrickej informácie. Preto je lepšie zaviesť a pracovať s technikami, ktoré budú schopné s takouto formou informácie pracovať priamo.

Našim cieľom je v práci zovšeobecniť prístupy využívajúce lokálnu topológiu sietí tak, aby ich bolo možno pohodlne aplikovať na znamienkové vážené siete, a zároveň aby pôvodná myšlienka prístupu ostala čo najviac nepozmenená.

Zovšeobecnené prístupy aplikujeme na zostavenie jednoduché algoritmu pre filtrovanie informácie z plných sietí a porovnávame ho s existujúcimi prístupmi pre filtrovanie informácie, akými sú minimálna kostra grafu a trojuholníkovo maximálne filtrovaný graf (TMFG) [2] . Základnou myšlienkou algoritmu je postupné pridávanie hrán na základe podobností vrcholov v jednotlivých podsieťach, ktoré pridávaním hrán vznikajú. Ako začiatočnú sieť využívame minimálnu kostru grafu. Výsledné filtrované siete sú porovnávane na základe podobnosti zhlukovaní, ktoré vznikajú aplikovaním algoritmov na hľadanie komunít v sieťach na filtrované siete. Výsledne zhlukovania sú iné v porovnaní s minimálnou kostrou, z čoho vieme dedukovať, že vzhľadom na zhlukovanie vrcholov, dostávame dodatočnú informáciu oproti zhlukovaniu minimálnej kostry. Zároveň sú zhlukovania pri všetkých prístupoch iné, ako zhlukovanie TMFG, z čoho vieme usúdiť, že pridaná informácia, vzhľadom na zhlukovanie, je iná, ako informácia pridaná pomocou TMFG.

Literatúra

[1] Pandey, Babita, et al., A comprehensive survey of edge prediction in social networks: Techniques, parameters and challenges, *Expert Systems with Applications* 124, 2019, p 164-181

[2] Massara, Guido Previde et al., Network filtering for big data: Triangulated maximally filtered graph, *Journal of complex Networks* 5.2, 2017, p 161-178

* alexbabis96@gmail.com
† stehlikova@fmph.uniba.sk
‡ Školiteľ

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 54
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Adam Trizna, Alexander Šimko

Automatic Evaluation of ER Modelling Exercises

Adam Trizna[1*] Alexander Šimko[1†‡]

[1] Katedra aplikovanej informatiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Database design is one of the skills, acquired by students enrolled in the *Databázy (1)* course, taking place at FMFI UK. Modelling exercise assignment describes an information system which uses a database to carry out it's primary tasks. Student's task is to construct an entity-relationship (ER) model, defining a database for described system.

Currently due to it's complexity, only manual evaluation of student-created design is possible, performed by a supervising reviewer. Thus, our goal is to propose an algorithm for automatic student solution evaluation by comparing it to an exemplar solution.

The most familiar existing approach we've analyzed is described in [Melnik et al., 2002]. Proposed algorithm represents input relational models as graphs, then computes graphs vertex mapping. However, specificity of our problem prevents us from using graph matching algorithms of this kind. Firstly, this approach is not suitable for faulty, illogical models, which is, naturally, mostly the case of student's submissions. Secondly, acknowledging problem complexity, these algorithms are semi-automatic only, proposing possible models match scenarios, leaving the decision to the human factor.

In our previous work [Trizna, 2019], studying the same problem, we've proposed an algorithm searching for an optimal entity set mapping between the exemplar and student's model. This algorithm executes an exhaustive search in the space of entity set mappings, evaluating each mapping with a penalty function. Search space is pruned based on heuristic functions, inspired by the Branch & Bound methods. To deal with cases, when two structurally inequal ER models represent the same idea, a preprocessing step was introduced, transforming the input models.

In our current work we define the original algorithm's shortcomings, analyzing problematic data inputs. Furthermore, we propose a new algorithm, also based on the entity set mapping search idea, but remaking the transformation mechanism. Instead of transforming in a separate phase, model transformation is incorporated in the mapping search. Various model transformations are executed and reverted, as the algorithm traverses the search space. A search space node then consists of mapped entity set pairs and a set of transformations, executed along the way.

Finally, we evaluate both algorithms, using real student solutions, gathered at the *Databázy (1)* course. For each input example, we've prepared a target reference entity set mapping. As metric, we compute the precision and recall rates of computed and target mapping pairs match. As shown in table 1, new algorithm yields more accurate results in all measured fields.

We believe that the new proposed algorithm makes progress in the automatic modeling exercises evaluation. In our current work, we also analyze particular examples, which are problematic for the new algorithm as well, listing known open issues. As it is an open question how to solve them, these are to be worked on in future works.

Dataset	Algorithm	Precision		Recall	
		average	std. dev	average	std. dev
Train[2]	[Trizna2019]	.8149	.1385	.7675	.1259
Train	Current	.9841	.0297	.9370	.1021
Test	[Trizna2019]	.7880	.1255	.7331	.1674
Test	Current	.8627	.1018	.8274	.1344

Table 1: Algorithms quality evaluation results

References

[Melnik et al., 2002] Melnik, S., Garcia-Molina, H., and Rahm, E. (2002). Similarity flooding: a versatile graph matching algorithm and its application to schema matching. In *Proceedings 18th International Conference on Data Engineering*, pages 117–128.

[Trizna, 2019] Trizna, A. (2019). Automatic checking of entity-relationship models. Bachelor thesis, FMFI UK, Bratislava, Slovakia.

*trizna3@uniba.sk
†alexander.simko@uniba.sk
‡Supervisor

[2] "Train" dataset consists of input examples, which were analyzed thoroughly and served as inspiration for different types of ER model transformations. There is no algorithm training phase.

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 55
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Štefan Pócoš, Iveta Bečková, Igor Farkaš

Qualitative Analysis of Adversarial Examples in Deep Networks*

Štefan Pócoš[1†] Iveta Bečková[1‡] Igor Farkaš[1§¶]

[1] Katedra aplikovanej informatiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Deep neural networks are powerful tools for solving various problems. However, as first pointed out in [Szegedy et al., 2014], they can be fooled using adversarial examples. A lot of work has already been dedicated to finding the cause of existence of adversarial examples. Numerous defence mechanisms have been proposed, but most of them do not work well (after a novel defence is proposed, in no time an adaptive attack is constructed, which beats the defence). So far, the most promising one is the so-called adversarial training (based on enhancing the training set with adversarial inputs), but it is computationally demanding and cannot guarantee absolute robustness.

In this work, we analyse six types of adversarial examples generated for MNIST and CIFAR-10 datasets. Four of them are generated with constraints defined in different L_p-norms (L_0, L_1, L_2, L_∞), and two types are of the so-called rubbish-class examples. We mainly focus on their hidden layer representations in a trained neural network classifier. An important quality of adversarial examples is their proximity to the original data manifold, since the constraints only govern the magnitude of perturbation and not its direction. For our analysis, we approximate the data manifolds using k-NN (nearest neighbors) method. Then, we propose and explore two methods of assessing the hidden layer representations of adversarial examples. In the first method, for each hidden layer we count the number of the closest activations of the train-set examples from two classes (original and predicted). That way, we can create a graph of how the proximity of adversarial inputs to manifolds of original vs. predicted class develops in the network. The second method computes the projection of an image activations onto the manifold of the train-set activations but instead of directly computing the distance to this projection, we only remember the indices of k-NN and their respective coefficients (from the convex combination given by the projection onto the manifold). These are used to compute the corresponding convex combination of images in the input space, which is then projected onto the class-specific manifolds. In both methods, we successfully avoided the problem of inconsistent comparisons of the Euclidean distances in spaces of different dimensions.

To visualise the development of mutual relationships between adversarial examples and test-set examples, we use UMAP [McInnes et al., 2018]. Adversarial examples (excluding the rubbish-class examples) seem to be entangled with the original data. We confirm the entanglement in the non-reduced space with soft nearest neighbor loss [Frosst et al., 2019]. The entanglement may come as a surprise, as one could expect the adversarial examples to cause out-of-distribution activations.

Our analyses suggest that the individual methods of generating adversarials do not only differ visually, but they also cause distinct changes in network's behaviour. We observe that PGD attack (using the L_∞ norm) produces adversarials that are farther from the data manifolds, than the other attacks. We also find out that some adversarial examples are close to the correct manifold in almost all of the layers, and some change their manifolds (to an incorrect one) towards the final layer, which is an indicator of where exactly the network considers the adversarial example as belonging to a wrong class. Our work may serve as an inspiration to evaluate novel attacks, or as a score to pick the right methods for adversarial training.

References

[Frosst et al., 2019] Frosst, N., Papernot, N., and Hinton, G. (2019). Analyzing and improving representations with the soft nearest neighbor loss. In International Conference on Machine Learning.

[McInnes et al., 2018] McInnes, L., Healy, J., Saul, N., and Großberger, L. (2018). UMAP: Uniform manifold approximation and projection. Journal of Open Source Software.

[Szegedy et al., 2014] Szegedy, C., Zaremba, W., Sutskever, I., Bruna, J., Erhan, D., Goodfellow, I., and Fergus, R. (2014). Intriguing properties of neural networks. In International Conference on Learning Representations.

*Supported by TAILOR, a project funded by EU Horizon 2020 research and innovation programme under GA No 952215.

†stefan.pocos@fmph.uniba.sk

‡iveta.beckova@fmhp.uniba.sk

§igor.farkas@fmph.uniba.sk

¶Supervisor

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 56–64
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Matúš Kosťov, Oliver Majerský

Nábojová asymetria v produkcii vysoko-energetických top-kvarkových párov na experimente ATLAS

Matúš Kosťov* Oliver Majerský†‡

Katedra jadrovej fyziky a biofyziky, FMFI UK, Mlynská Dolina, 842 48 Bratislava

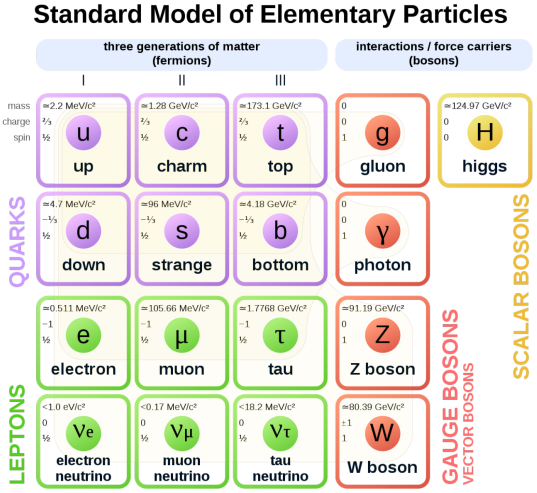
Abstrakt: V tejto práci skúmame nábojovou asymetriu v produkcii top-kvarkových párov, s cieľom optimalizovať metódu rozpoznávania top kvarku od top anti-kvarku využitím elektrického náboja rozpadových produktov top kvarku. Práca využíva simulované dáta top-kvarkovej produkcie v protón-protónových zrážkach na experimente ATLAS pri zrážkovej energii 13 TeV. Preskúmali a zoptimalizovali sme dve definície váhovaného elektrického náboja jetu pre rozlišovanie náboja top kvaru a top anti-kvarku.

Kľúčové slová: top kvark, nábojová asymetria, jet

1 Štandardný model

Na pochopenie toho, ako vesmír vznikol potrebujeme poznať, z čoho je zložený. Dobrú predstavu nám o tom podáva Štandardný Model (ŠM) - základ časticovej fyziky (obr. 1). Podľa ŠM existujú častice reprezentujúce hmotu - fermióny, so spinom 1/2. Fermióny ďalej delíme na dve skupiny - kvarky a leptóny. Experimenty odhalili aj existenciu tzv. antihmoty, pričom hlavný rozdiel medzi hmotou a antihmotou je, že nesú elektrický náboj s opačným znamienkom.

Fermióny medzi sebou interagujú. Zatiaľ poznáme 4 základné interakcie: silnú, slabú, elektromagnetickú a gravitačnú interakciu. Napriek mnohým snahám, gravitačnú silu sa doteraz nepodarilo začleniť do ŠM. Podľa ŠM k interakciám dochádza pomocou výmeny častíc, takzvaných intermediálnych bozónov. Intermediálne bozóny majú spin 1. Poznáme ich 4: gluón, fotón, W bozón a Z bozón. Fotón má nulovú pokojovú hmotnosť a nenesie žiadny náboj. Fotóny spolu neinteragujú, t.j. pohybujú sa priestorom bez toho, aby o sebe vedeli. Elektromagnetická interakcia je sprostredkovaná výmenou fotónu čo je bližšie popísané v kvantovej elektrodynamike (QED). Ďalším intermediálnym bozónom je gluón, zodpovedný za



Obr. 1: Elementárne častice podľa Štandardného modelu [5].

silnú interakciu. Ten má tiež nulovú hmotnosť a nulový elektrický náboj, ale je nositeľom tzv. farebného náboja. Gluóny vďaka farebnému náboju môžu vzájomne interagovať. Silné interakcie popisuje kvantová chromodynamika (QCD) [1]. W a Z bozóny sprostredkúvajú slabú interakciu. Z bózon je nábojovo neutrálny s hmotnosťou 91,2 GeV [2]. V práci sa čiastočne zaoberáme W bozónom ktorého hmotnosť je 80,4 GeV [2]. W bozón môže mať kladný alebo záporný elektrický náboj s hodnotou $1e$.
Zbierku častíc uzatvára Higgsov bozón, ktorý bol experimentálne potvrdený v LHC v roku 2012. Táto častica má nulový spin a hmotnosť približne 125 GeV [3, 4]. Higgsov bozón už nereprezentuje silové pôsobenie, ale súvisí s mechanizmom, ktorý podľa ŠM dodáva časticiam hmotnosť.

1.1 Kvarky

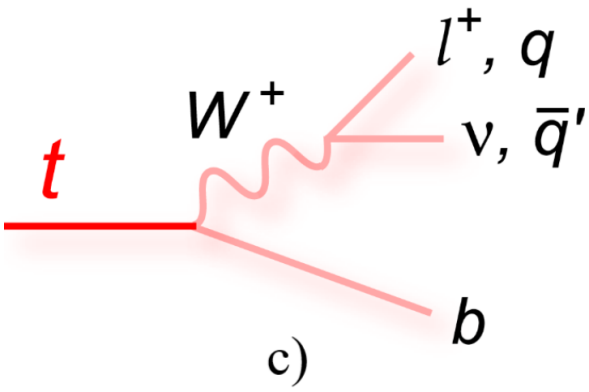
Poznáme šesť vôní kvarkov: up, down, charm, strange, top a bottom. Kvarky nedokážu existovať samostatne a nachádzame ich vždy vo viazanom stave s inými kvarkami. Tento viazaný stav nazývame hadrón. Ako príklad uvádzame najznámejšie hadróny:

*kostov2@uniba.sk
†oliver.majersky@cern.ch
‡Školiteľ

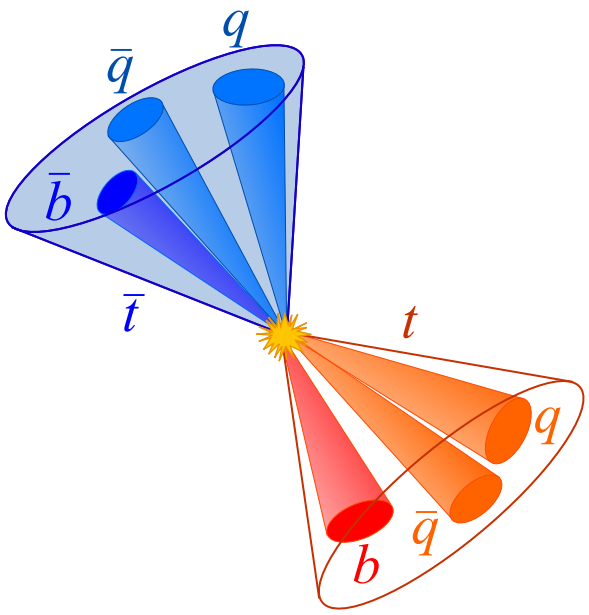
protón a neutrón, ktoré tvoria jadrá atómov (tzv. nukleóny). Nukleóny v jadrách sú poskladané z up a down kvarkov. Kvarky sú nositeľom tretinového elementárneho elektrického náboja e. Konkrétne up kvark má 2/3 e a down kvark $-1/3\,e$. Protón má náboj 1, preto je logické, že ho budú tvoriť dva up kvarky a jeden down kvark - uud. Podobne neutrón má nulový elektrický náboj a preto jeho zloženie bude udd. Tieto trojice kvarkov sú viazané silnou interakciou, čiže výmenou gluónov.
Na poskladanie jadra atómu nám teda stačia up a down kvarky. Spolu s elektrónom a elektrónovým neutrínom tvoria tzv. prvú generáciu častíc. Okrem nej existujú ešte ďalšie dve generácie: vynechajúc leptóny, do druhej patrí charm a strange, a do tretej top a bottom kvark. Tieto dve generácie sú teoreticky schopné tvoriť hadróny rovnako, ako tomu je v prvej generácií. Kvôli výrazne vyšším hmotnostiam sú takéto hadróny nestabilné a rozpadajú sa na hadróny tvorené ľahšími kvarkami.

1.1.1 Top kvark

Top kvark je najťažší z pomedzi kvarkov a tiež z pomedzi všetkých elementárnych častíc. Jeho hmotnosť je približne 173 GeV a nesie elektrický náboj $2/3e$ [2]. To znamená, že na vytvorenie top-kvarkového páru ($t\bar{t}$ pár) je potrebná veľká energia. Top kvark je mimoriadne nestabilný a kvôli veľmi krátkej dobe života ($\approx 10^{-25}s$) [2] sa pár rozpadne ešte pred hadronizáciou. Top kvark sa rozpadá na b-kvark a W bozón. W bozón sa následne rozpadá semi-leptónovo alebo hadrónovo. Oba tieto rozpady sú znázornené v obr.2.
Nás bude zaujímať prípad, kedy sa top kvark rozpadne na b-kvark(-1/3e) a W^+ bozón(+1e), resp. na $\bar{b}$-kvark(+1/3e) a W^- bozón (pre top anti-kvark), kde oba W bozóny sa hadrónovo rozpadnú na kvark a anti-kvark (obr. 3). Vyprodukované kvarky pozorujeme ako spŕšky častíc vytvárajúce tzv. jety. Tieto spŕšky častíc vznikajú pri procese zvanom hadronizácia. Pri hadronizácií vznikajú nové hadróny ako rozpadové produkty, ktoré letia približne v smere pôvodného kvarku, z ktorého táto spŕška vznikla. V detektore potom pozorujeme stopy častíc, ktoré sa nachádzajú v určitom kónuse okolo smeru pohybu pôvodného kvarku.



Obr. 2: Ilustrácia semi-leptónového (l^+, ν, b) a hadrónového ($q, \bar{q}', b$) rozpadu top kvarku.



Obr. 3: Hadrónový rozpadový kanál $t\bar{t}$ páru.

1.2 Leptóny

Najznámejší leptón je elektrón. Je to bodová častica s elektrickým nábojom -1e. Má hmotnosť 0,51 MeV. Spolu s elektrónovým neutrínom patria do prvej generácie leptónov. Neutrína sú mimoriadne ľahké častice [6]. S hmotou interagujú prostredníctvom slabej jadrovej sily, a je veľmi ťažké neutrína pozorovať. Rovnako ako pri kvarkoch, aj pri leptónoch pozorujeme 3 generácie. Mión z druhej a tau leptón z tretej generácie. Oba tieto leptóny majú aj príslušné neutríno tj. miónové neutríno a tau neutríno. Leptóny druhej a tretej generácie majú väčšiu hmotnosť a sú nestabilné,ale správajú sa podobne ako prvá generá-

cia leptónov.

2 Nábojová asymetria top-kvarkovej párovej produkcie

Na urýchľovači LHC, kde dochádza k protón-protónovým zrážkam (pp) pri zrážkovej energii 13 TeV, vzniká $t\bar{t}$ pár najčastejšie pri gluónovej fúzii: gg$\rightarrow t\bar{t}$ (90%) alebo pri anihilácii kvarku a anti-kvarku: $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$ (10%).
Asymetriu je je možné pozorovať v niektorých kinematických distribúciach top kvarkových párov. Jednou z nich je rapidita top kvarku a top anti-kvarku.
Definícia rapidity (y) je

$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_z c}{E - p_z c} \tag{1}$$

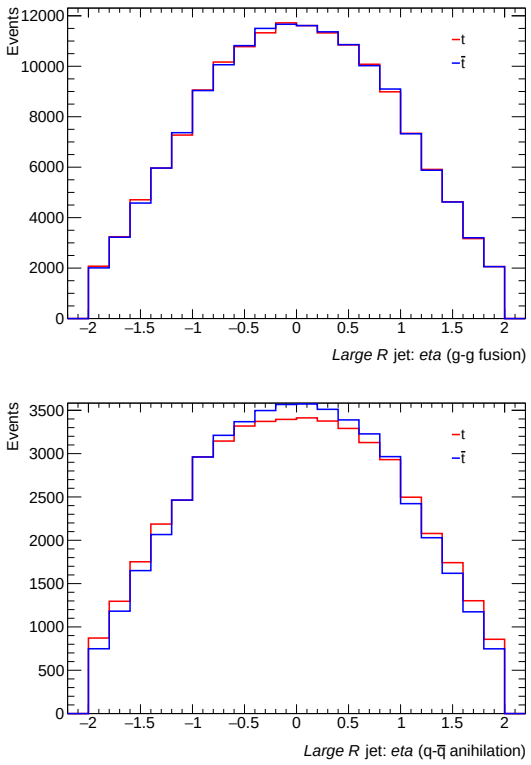
kde E je energia častice a p_z je hybnosť častice v smere nalietavajúcich protónov. Rapidita teda súvisí so smerom pohybu častice vzhľadom na os z, ktorá je stotožnená so smerom pohybu protónového zväzku v urýchľovači. Porovnaním absolútnej hodnoty rapidity top kvarku a top anti-kvarku tj.

$$\Delta|y| = |y_t| - |y_{\bar{t}}| \tag{2}$$

zistíme, že častejšie pozorujeme $\Delta|y| > 0$ než $\Delta|y| < 0$. Nejde teda o nábojovo symetrický proces. Nábojovú asymetriu označíme ako A_C a jej experimentálna definícia je

$$A_C = \frac{N(\Delta|y| > 0) - N(\Delta|y| < 0)}{N(\Delta|y| > 0) + N(\Delta|y| < 0)} \tag{3}$$

kde $N(\Delta|y| > 0)$ udáva počet kvarkových párov s kladnou hodnotou $\Delta|y|$ a $N(\Delta|y| < 0)$ udáva počet top-kvarkových párov so zápornou hodnotou $\Delta|y|$. K tejto asymetrii dochádza len pri $q\bar{q}$ anihilácii, pri gg fúzii k nej nedochádza (nakoľko pri gg fúzii ide o nábojovo-symetrický počiatočný stav). Môžme to vidieť porovnaním histogramov a) a b) v obr. 4. Pri $q\bar{q}$ anihilácií pozorujeme, že top kvark (červená) je častejšie produkovaný v smere s väčšou hodnotou pseudorapidity (dopredný smer) ako top anti-kvark.
Meranie asymetrie podľa rovnice (3) si vyžaduje rekonštrukciu top kvarkov z ich rozpadových produktov. Okrem toho je potrebné odlíšiť top kvark od top anti-kvarku, čo je primárnym cieľom tejto štúdie.



Obr. 4: Pseudorapidita veľkého jetu produkovaného gg fúzou (a) a $q\bar{q}$ anihiláciou (b). Červenou farbou sú znázornené udalosti majúce pôvod v top kvarku a modrou v top anti-kvarku.

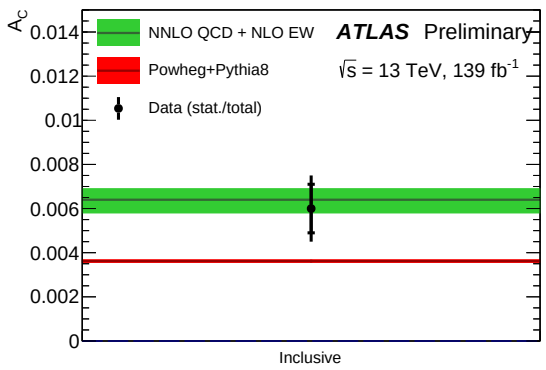
2.1 Pôvod nábojovej asymetrie

Štandardný model predpovedá veľmi malú asymetriu v $q\bar{q}$ anihilácii ktorá sa prejavuje väčšou pravdepodobnosťou produkcie top kvarku v smere počiatočného kvarku. Pôvod tejto asymetrie súvisí s korekciami vyššieho rádu v poruchovej teórii kvantovej chromodynamiky a kvantovej elektrodynamiky [7]. Potenciálne meranie vyššej asymetrie ako predpovedanej asymetrie by mohlo byť indíciou novej fyziky za Štandardným modelom.

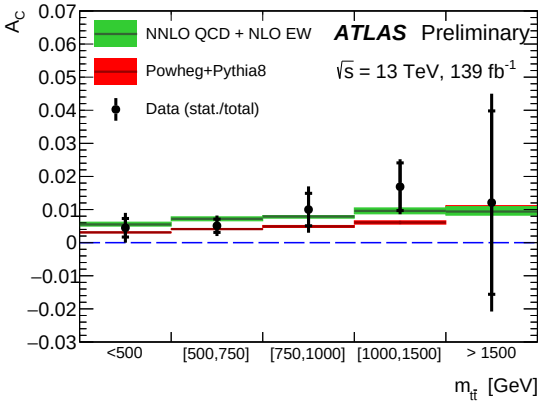
2.2 Súčasný stav problematiky

Aktuálne najpresnejšie meranie nábojovej asymetrie produkcie $t\bar{t}$ páru v pp zrážkach pri zrážkovej energii 13 TeV bolo merané v jedno-leptónovom rozpadovom kanáli použitím Run-II dátovej vzorky s luminozitou[1] 139 fb^{-1}.

[1] Luminozita udáva počet častíc v zrážaných zväzkoch počas jedného obehu na plochu prierezu zväzku. V tomto prípade



Obr. 5: Porovnanie teoretickej hodnoty [9] nábojovej asymetrie v $t\bar{t}$ produkcii (zelený pás) s experimentálnou hodnotou (čierny bod) [8]. Červená čiara predstavuje predpoveď z MC simulácie.



Obr. 6: Porovnanie teoretickej predpovede [9] (zelené pásy) a meranie (čierne body) nábojovej asymetrie v závislosti od invariantnej hmotnosti $t\bar{t}$ páru [8].

Nameraná hodnota bola $A_C = (0{,}0060 \pm 0{,}0015)$ [8], čo je v dobrom súlade s teoretickou predpoveďou, viď. obr. 5. Z pohľadu tejto práce je najzaujímavejšie meranie asymetrie ako funkcie invariantnej hmotnosti $t\bar{t}$ páru (obr. 6), pretože sa ukazuje, že predpoveď asymetrie stúpa s rastúcou invariantnou hmotnosťou $t\bar{t}$ páru. Tento nárast súvisí s tým, že s rastúcou invariantnou hmotnosťou sa zväčšuje aj pravdepodobnosť toho, že daný pár bol vyprodukovaný pri $q\bar{q}$ anihilácii namiesto gg fúzie. Oblasť s vysokou invariantnou hmotnosťou je presne tá, v ktorej sa očakávajú prejavy fyziky za ŠM a v ktorej je potrebné presnejšie meranie nábojovej asymetrie, pričom narastanie neistoty merania je z veľkej časti spôsobené nedostatkom štatistiky. Táto práca sa zaoberá práve touto vysoko-energetickou oblasťou, nakoľko kombinácia meraní v jedno-leptónovom a hadrónovom kanáli by zvýšila senzitivitu v tejto oblasti.

3 Analýza simulovaných dát

3.1 Simulácia top-kvarkovej párovej produkcie

Dáta s ktorými pracujeme sú simulované pomocou Monte Carlo metód a obsahujú simuláciu $t\bar{t}$ párovej produkcie v pp zrážkach na urýchľovači LHC ako aj simuláciu odozvy ATLAS detektora a rekonštrukčných algoritmov. Vzorka zodpovedá podmienkam na urýchľovači LHC a detektore ATLAS v rokoch 2015 - 2018 počas ktorých prebiehal zber dát, tzv. Run-II, kedy LHC zrážal protóny pri ťažiskovej energii 13 TeV a integrovaná luminozita dosiahla 139 fb^{-1}. Simulácia nám poskytuje rôzne informácie o vlastnostiach jetov.

Dvomi pre nás najpodstatnejšími vlastnosťami sú priečna hybnosť (p_T) a pseudorapidita (η). Nakoľko sa zaoberáme vysoko-energetickými časticami, simulujeme veľké jety s priečnou hybnosťou $p_T >$ 300 GeV a kónusom jetu R=1 [2].

Priečna hybnosť je veličina opisujúca veľkosť hybnosti častice v smere kolmom na os z , t.j. na os nalietavajúcich protónov v urýchľovači:

$$p_T = |\vec{p}| sin\theta \tag{4}$$

kde θ je uhol, ktorý zviera vektor hybnosti $\vec{p}$ s osou z.

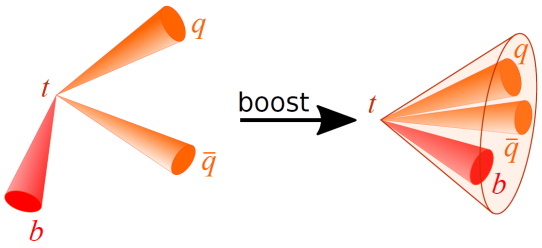
Pseuorapidita η je definovaná ako:

$$\eta = -ln(tan\frac{\theta}{2}) \tag{5}$$

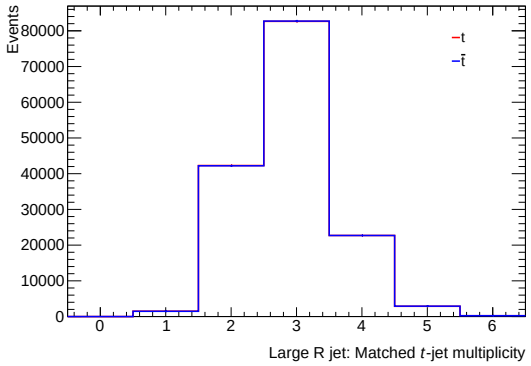
Pre $\theta = 90°$ bude $\eta = 0$ a ide do nekonečna (resp. do – nekonečna) pre $\theta \to 0°$ (resp.180°). Podľa hodnoty pseudorapidity je možné rýchlo odhadnúť smer, ktorým častica letela v detektore. Pozorované hodnoty pseudorapidít sú v rozmedzí $|\eta| < 2{,}5$, pričom jej maximálna hodnota je limitovaná konštrukciou detektora ATLAS.

sa myslí hodnota integrovanej luminozity, t.j. súhrnná hodnota luminozity za celé obdobie.

[2] Kónus jetu je udaný vzdialenosťou $R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2}$, kde $\Delta\eta$ je vzdialenosť v pseudorapidite a $\Delta\phi$ je uhlová vzdialenosť v rovine kolmej na os z.



Obr. 7: Ilustrácia vplyvu Lorentzovského boostu v hadrónovom rozpade top kvarku na uhlovú separáciu rozpadových produktov.



Obr. 8: Počet trekových jetov vo veľkom jete.

3.2 Rekonštrukcia top-kvarku

Pri hadrónovom rozpade top (anti-)kvarku pozorujeme v detektore tri trekové jety (obr.3). Pre rekonštrukciu $t\bar{t}$ páru v hadrónovom rozpadovom kanáli preto hľadáme šesť jetov. Algoritmy, ktoré sa využívajú pre rekonštrukciu $t\bar{t}$ párov v iných rozpadových kanáloch sú v našom prípade nepoužiteľné. V hadrónovom kanáli máme totiž veľké mnohojetové pozadie [10]. V prípade vysoko-energetických top kvarkov je ich identifikácia možná vďaka Lorentzovskému boostu - uhlová separácia rozpadových produktov top kvarku s jeho narastajúcou hybnosťou klesá, vďaka čomu je možné rekonštruovať tieto rozpadové produkty ako jeden jet s veľkým kónusom (obr.7). Vnútorná štruktúra jetu umožňuje efektívnejšie rozlíšenie od pozadia. Pre efektívnu rekonštrukciu veľkého jetu musíme požadovať, aby priečna hybnosť p_T veľkého jetu bola vyššia ako 300 GeV.
Veľký jet je rekonštruovaný z energetických depozitov v hadrónovom kalorimetri detektora ATLAS. Vnútornú štruktúru jetu skúmame rekonštrukciou jetov zo stôp nabitých častíc detekovaných dráhovým detektorom (trekové jety), ktoré majú variabilnú veľkosť kónusu v závislosti od p_T jetu (kónus klesá ako funkcia $1/p_T$). Dôvod použitia trekových jetov zo stôp nabitých častíc je lepšie uhlové rozlíšenie stopového detektora pre vnútornú štruktúru jetu, možnosť využiť náboj trekových jetov pre identifikáciu náboja top kvarku ktorý veľký jet inicioval, ako aj vysoká účinnosť algoritmu pre identifikáciu jetu z b-kvarku na trekových jetoch.
Veľký jet nie vždy obsahuje práve tri trekové jety, viď. obr.8, z ktorých jeden je b-tagovaný. Preto budeme dodatočne požadovať toto kritérium aby sme potlačili zle rekonštruované top-kvarkové veľké jety.

3.3 Rekonštukcia náboja jetov

Na zistenie toho, či veľký jet pochádza z top kvarku alebo top anti-kvarku, môžeme využiť náboje troch identifikovaných trekových jetov. Na zistenie náboja trekových jetov (Q_J) sa použijú dve definície:

$$Q_J^{Def1} = \frac{\Sigma_{i\in jet} Q_i \mid \vec{j}\cdot\vec{p}_i \mid^{\kappa}}{\Sigma_{i\in jet} \mid \vec{j}\cdot\vec{p}_i \mid^{\kappa}} \tag{6}$$

$$Q_J^{Def2} = \frac{\Sigma_{i\in jet} Q_i p_{T,i}^{\kappa}}{\Sigma_{i\in jet} p_{T,i}^{\kappa}} \tag{7}$$

Sumuje sa cez čísla i, ktoré sú priradené jednotlivým stopám v trekovom jete. V rovnici (6) $\vec{j}$ predstavuje jednotkový vektor osi jetu a $Q_i, \vec{p}_i$ sú náboj a hybnosť i-tej stopy tohto jetu. V druhej definícii nám stačí poznať len náboj Q_i a priečnu hybnosť $p_{T,i}$ i-tej stopy zodpovedajúceho jetu. Vystupuje tu aj parameter $\kappa > 0$ ktorý chceme vybrať tak, aby maximalizoval rozdiel medzi jetmi pochádzajúcimi z top kvarku a jetmi z top anti-kvarku. Náboje jetov Q_J zodpovedajúce jednotlivým definíciám boli vypočítané zo simulovaných dát pre hodnoty parametra κ ={0,1; 0,2; ... ;1,0}. Našou úlohou bolo tieto údaje spracovať a nájsť najoptimálnejšiu hodnotu κ pre b-jet, najenergetickejší a druhý najenergetickejší trekový jet z ľahkých kvarkov nachádzajúci sa v danom veľkom jete.

3.4 Optimálny parameter κ

Najvhodnejšiu hodnotu κ hľadáme pomocou tzv. separačnej sily S. Separačná sila nám kvantitatívne udáva rozdiel náboja j-teho trekového jetu z veľkého jetu iniciovaného top kvarkom (s_i) a náboja j-teho

trekového jetu z veľkého jetu iniciovaného top anti-kvarkom (b_i) ako je uvedené vo vzťahu:

$$S = \frac{1}{2}\Sigma_i \frac{(s_i - b_i)^2}{s_i + b_i} \tag{8}$$

pričom s_i a b_i sú hodnoty binov príslušných histogramových rozdelení, pričom tieto rozdelenia sú normalizované na hodnotu 1.
Následne sme zostavili tabuľky tab.1 a tab.2. Separačná sila vychádzala rovnako (s presnosťou na 10^{-5}) pre obe definície Q_J, čiže je jedno, s ktorou z nich by sme pracovali. Najoptimálnejšie parametre pre jednotlivé jety vyšli:

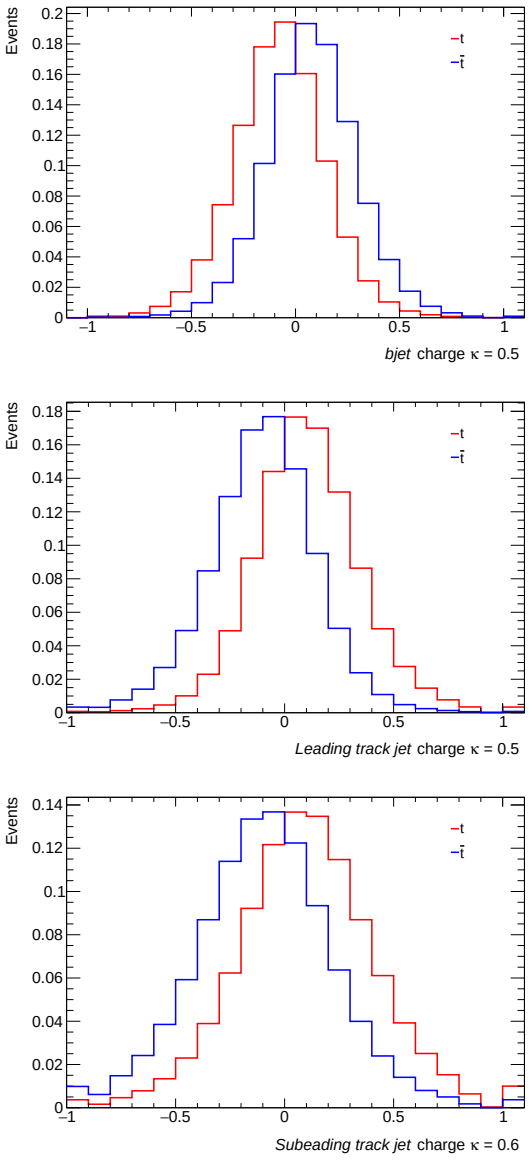
- b-jet: $\kappa = 0{,}5$
- Najenergetickejší jet: $\kappa = 0{,}5$
- Druhý najenergetickejší jet: $\kappa = 0{,}6$

Dôkladnejšou analýzou sme zistili, že v závislosti od intervalu hodnoty p_T veľkého jetu sa ideálna hodnota κ môže trochu zmeniť, ale pohybuje sa v rozmedzí 0,4 - 0,6. Distribúcia náboja pre jednotlvé trekové jety je zobrazená na obr.9.

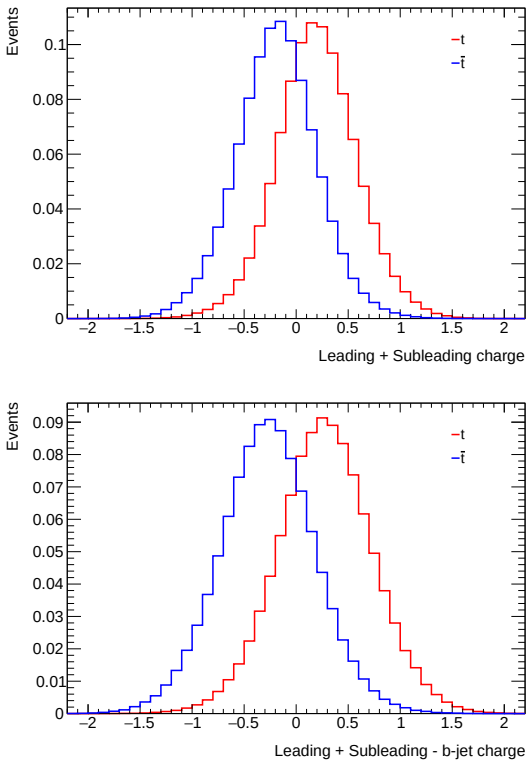
3.5 Kombinácia nábojov

Po nájdení optimálneho κ parametra, vieme vypočítať náboje pre b-jety a 2 lahké jety obr.9. Tieto náboje sa potom vhodne skombinujú v snahe dosiahnuť čo najväčšiu separačnú silu tejto kombinácie. Najprv sa kombinujú samostatne náboje ľahkých jetov, potom sa k nim zaráta aj náboj b-jetov. Jety pochádzajúce z W bozónu z rozpadu top kvarku by ideálne mali mať spolu hodnotu náboja W^+ bozónu t.j. +1 a jety z antitop-kvarku –1, preto náboje ľahkých kvarkov sčítavame - $Q_{t_0} + Q_{t_1}$. Na histograme sa to prejaví väčšou separáciou rozdelení náboja. Náboj b-kvarku má opačné znamienko ako náboj W bozónu s ktorým vzniká, preto ho do kombinácie nábojov zarátame s opačným znamienkom - $Q_{t_0} + Q_{t_1} - Q_b$. Odčítaním náboja b-kvarku by sme teoreticky dostali celkový náboj kvarkov +4/3 (resp. –4/3) čím by sa mala dosiahnuť väčšia hodnota separačnej sily S. (obr.10). Separačná sila pre jednotlivé kombinácie je:

- $Q_{t_0} + Q_{t_1}$: S = 0,2111
- $Q_{t_0} + Q_{t_1} - Q_b$ b-jetu: S = 0,2823



Obr. 9: Náboj Q_J trekového b-jetu (hore), najenergetickejšieho trekového jetu (stred) druhého najenergetickejšieho trekového jetu (dole). Farebné rozdelenie znázorňuje náboj trekového jetu pochádzajúceho z rozpadu top kvarku (červená), resp. top anti-kvarku (modrá).



Obr. 10: Nábojové rozdelenie pre kombináciu nábojov $Q_{t_0} + Q_{t_1}$ (hore) a $Q_{t_0} + Q_{t_1} - Q_b$ (dole).

Dosiahnutie väčšej separačnej sily pre zvolenú kombináciu nábojov trekových jetov naznačuje, že daná kombinácia $(Q_{t_0} + Q_{t_1} - Q_b)$ by mohla byť dobrá na použitie pri optimalizácii algoritmu na rozlišovanie top kvarkov od top anti-kvarkov v $t\bar{t}$ pároch.

4 Záver

V práci sme skúmali možnosť rozlišovania top kvarku od top anti-kvarku v hadrónových rozpadoch s vysokou priečnou hybnosťou. Táto štúdia je nevyhnutným krokom k meraniu nábojovej asymetrie v top-kvarkovej párovej produkcii v hadrónovom rozpadovom kanáli. Študovali sme dve rôzne definície váhovaného náboja trekových jetov, ktoré by mali byť citlivé na náboj top kvarku ktorého rozpadové produkty tieto trekové jety zahŕňajú. Zoptimalizovali sme hodnotu voľného parametra κ pre obe definície váhovaného náboja trekového jetu. Pre b-jet a najenergetickejší jet je najlepšia hodnota parametra $\kappa = 0{,}5$ a pre druhý najenergetickejší jet to je $\kappa = 0{,}6$.
Porovnaním separačnej sily oboch definícií váhovaného náboja jetu sa ukázalo, že obe definície sú rovnako dobré.
Vhodnou kombináciou informácie o náboji ľahkých kvarkov a b-kvarku vieme zvýšiť presnosť metódy. Sčítaním náboja ľahkých kvarkov a odčítaním náboja b-kvarku sa dosiahne najväčšia separácia náboja. Táto kombinácia nábojov trekových jetov je vhodná ako diskriminátor pre priradenie náboja top kvarku, resp. top anti-kvarku dvom veľkým jetom rekonštruovaným v hadrónovom kanáli, ktoré predstavujú rekonštruovaných kandidátov pre top-kvarkovú párovú produkciu.

Poďakovanie

Chcel by som sa poďakovať môjmu školiteľovi Mgr. Oliverovi Majerskému, PhD. a konzultantovi Mgr. Pavlovi Bartošovi, PhD za trpezlivosť, vedenie pri práci a za pomoc pri nejasnostiach a profesorovi RNDr. Stanislavovi Tokárovi, DrSc za uvedenie do problematiky časticovej fyziky.

Literatúra

[1] Particle Data Group. Color charge and confinement. <http://pdg.web.cern.ch/pdg/cpep/color.html>, n.d. Citované 04.04.2021.

[2] Particle Data Group Collaboration. Review of particle physics. *Phys. Rev. D*, 98:030001, Aug 2018.

[3] ATLAS Collaboration. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Phys. Lett. B*, 716:1, 2012.

[4] CMS Collaboration. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. *Phys. Lett. B*, 716:30, 2012.

[5] Standard Model of Elementary Particles. <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg>. Citované 28. 3. 2021.

[6] Zackaria Chacko, Abhish Dev, Peizhi Du, Vivian Poulin, and Yuhsin Tsai. Cosmological limits on the neutrino mass and lifetime. *Journal of High Energy Physics*, 2020(4), Apr 2020.

[7] J. H. Kühn a G. Rodrigo. Charge asymetry of heavy quarks at hadron colliders. *Physical Review*, Phys. Rev. D 59, 054017, 1999.

[8] Inclusive and differential measurement of the charge asymmetry in $t\bar{t}$ events at 13 TeV with the ATLAS detector. Technical report, CERN, Geneva, Jul 2019. https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/CONFNOTES/ATLAS-CONF-2019-026.

[9] Michal Czakon, David Heymes, Alexander Mitov, Davide Pagani, Ioannis Tsinikos, and Marco Zaro. Top-quark charge asymmetry at the LHC and Tevatron through NNLO QCD and NLO EW. *Phys. Rev. D*, 98(1):014003, 2018.

[10] Georges Aad et al. Measurements of top-quark pair single- and double-differential cross-sections in the all-hadronic channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector. *JHEP*, 01:033, 2021.

[11] A Top Antitop Qark Event from the D-Zero Detector at Fermilab. <https://ed.fnal.gov/samplers/hsphys/activities/graphics/grimm_collision_150c.gif>. 1995.

Tabuľka 1: Hľadanie optimálnej κ hodnoty pomocou separačnej sily pre Q_J^{Def1}. Leading a subleading jet predstavujú najenergetickejší a druhý najenergetickejší trekový jet z ľahkých kvarkov.

b-jet		**Leading jet**		**Subleading jet**	
κ	Separačná sila	κ	Separačná sila	κ	Separačná sila
0,1	0,0614	0,1	0,0996	0,1	0,0521
0,2	0,0799	0,2	0,1237	0,2	0,0632
0,3	0,0970	0,3	0,1455	0,3	0,0747
0,4	0,1070	0,4	0,15450	0,4	0,0850
0,5	**0,1113**	**0,5**	**0,15452**	0,5	0,0884
0,6	0,1111	0,6	0,1495	**0,6**	**0,0886**
0,7	0,1088	0,7	0,1428	0,7	0,0873
0,8	0,1054	0,8	0,1357	0,8	0,0851
0,9	0,1019	0,9	0,1292	0,9	0,0826
1	0,0984	1	0,1235	1	0,0802

Tabuľka 2: Hľadanie optimálnej κ hodnoty pomocou separačnej sily pre Q_J^{Def2}.

b-jet		**Leading jet**		**Subleading jet**	
κ	Separačná sila	κ	Separačná sila	κ	Separačná sila
0,1	0,0613	0,1	0,0995	0,1	0,0521
0,2	0,0798	0,2	0,1236	0,2	0,0630
0,3	0,0969	0,3	0,1454	0,3	0,0745
0,4	0,1070	0,4	0,1544	0,4	0,0848
0,5	**0,1112**	**0,5**	**0,1545**	0,5	0,0882
0,6	0,1111	0,6	0,1495	**0,6**	**0,0885**
0,7	0,1087	0,7	0,1427	0,7	0,0872
0,8	0,1053	0,8	0,1357	0,8	0,0850
0,9	0,1019	0,9	0,1293	0,9	0,0826
1	0,0988	1	0,1235	1	0,0802

Tabuľka 3: Parameter κ pre rôzne intervaly priečnej hybnosti veľkého jetu.

Interval p_T	**Optimálny parameter κ**		
[GeV]	**b-jet**	**Leading jet**	**Subleading jet**
>300	0,5	0,5	0,6
(350-500)	0,5	0,4	0,6
(500-750)	0,5	0,4	0,5
>750	0,6	0,4	0,5

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 65–74
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Otto Glavo, Adam Broniš

Comparison of models for the calculation of cross sections in the complete fusion reactions

Otto Glavo[1]* Adam Broniš[1]†‡

[1]Department of nuclear physics and biophysics, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstract: The effective cross section of nuclear reaction plays a major role in the nuclear physics. In general, the effective cross section of compound nucleus reaction describes the probability of the formation and decay in specific way. We can use program calculation to evaluate reaction cross section in order to use most advantageous reaction to produce isotopes in practice. Also it is necessary to estimate the effective cross section in order to use suitable spectroscopic technique. There are several programs based on different theoretical models that have been developed. From the first codes like JORPLE or SPIT to newer programs like HIVAP and NRV. Both HIVAP and NRV, use different approach, making them appropriate for comparison. In this paper, relevant parameters of these codes are explained. Furthermore, the two programs are compared, and differences are demonstrated on two reactions $^{52}Cr + ^{149}Sm$ and $^{48}Ca + ^{208}Pb$. In addition, the HIVAP and the NRV calculation were compared with experimental effective cross sections to confirm validity of parameters tuned in this work. Our set of parameters should be able to produce reliable results not only for our reactions but for a group of reactions with similar characteristics.

Keywords: Heavy ion, effective cross section, fusion

1 Reaction cross section

The effective cross section or reaction cross section is value reflecting the probability that a fusion evaporation reaction will occur in a particular way, regarding different evaporation channels. If we want to calculate cross section for any possible evaporation channel, we say we want to calculate total reaction cross section. Reaction cross section denoted as σ, which can be desctibed as characteristic area, has a unit called barn, b, which is equal to $10^{-28}m^2$. Reaction cross section is expressed as circular area perpendicular to path of projectile nucleon and can-

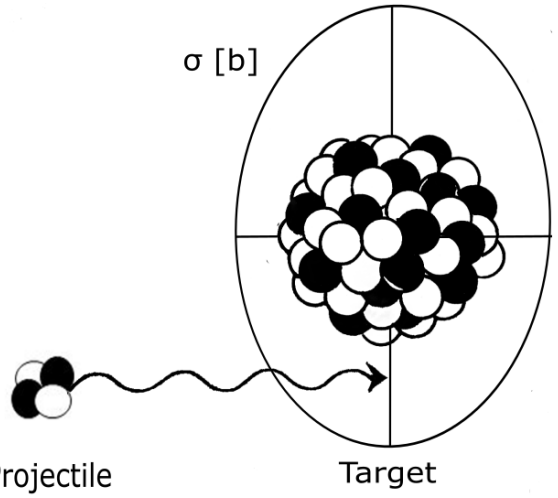


Figure 1: Ilustration of nuclear reaction cross section.

tered at the target nucleon as shown in Fig. 1 . The given reaction will occur if projectile trajectory leads through this area.

If we consider typical radius of nucleus to be in order of $10^{-14}m$ and spherical shape of nucleus, we can expect the reacton cross sections in order of 10^{-28} m^2. In experiments, we find that reaction cross sections vary enormously for different reactions. For example, gamma ray absorbtion reactions has cross sections in order of 10^3 b and in some cases slow neutron capture reactions show a cross sections in order of 10^{-3} b. In this work, we focus on compound nucleus reactions. Fusion evaporation reaction cross section can be written as a sum of all partial waves with different probabilities for different proceses, according to compound nucleus assumption of Bohr. [Ghoshal, 1950]

$$\sigma = \pi\lambda^2 \sum_{l=0}^{l_{crit}} (2l+1) P_{cont}(E,l) P_{xn}(E+Q,l) \qquad (1)$$

where l is angular momentum, E is kinetic energy, Q is the $Q-value$, P_{cont} is probability of contact and capture and P_X is probability that nucleus will decay in desired way [Sahm et al., 1985]. Compound nucleus created in fusion may deexcite through different

*glavo2@fmph.uniba.sk
†adam.bronis@fmph.uniba.sk
‡Supervisor

evaporating chanels. Different chanells have different combinations of neutrons, protons, alpha particles etc..

1.1 Spectroscopy as reaction cross section evaluation method

To detect different evaporation channels, we need to measure decay of different residual nuclei. In order to select adequate method, we need to predict which residual nuclei will be present and how many events/decays will occur in specific time. We select different spectroscopy methods based on quantity of residual nuclei, which depends on reaction cross section. Therefore, the spectroscopy method is selected based on value of the effective cross section: e.g. laser spectroscopy for efficient cross section higher than 1 μb , gamma spectroscopy for efficient cross section higher than 1 nb , alpha spectroscopy for efficient cross section higher than 100 pb.

2 Nuclear fusion

Fusion is nuclear reaction where projectile nucleus gets on the other side of potential barrier, also known as interaction barrier, and two body interaction between projectile nucleus and undefined nucleon of target nucleus occurs. There are two extreme scenarios that can occur. In the first scenario (direct reactions), two nuclei are within interaction range for very short time, only one of the nuclei may interact. In the second scenario, the two nuclei are within interaction range long enough occuring a large number of interactions between nucleons, leading to compound nucleus formation.

According to Bohr's compound nucleus assumption, also called Bohr amnesia assumption, every fusion reaction has two stages. In the first stage, a quasi-stable compound nucleus is formed. In the second stage, compound nucleus decays trought evaporation channels [Bohr, 1936]. Compound nucleus can decay via compound elastic scattering, when the decay products are the same as projectile and target nucleus (Fig. 2). The compound nucleus reactions, which is the result of a series of complex processes, has a time scale of about 10^{-18} s to 10^{-15} s . This is comparatively longer than the typical length of a direct nucleon transfer reaction, which is of the order of 10^{-22} s. Because of the long lived character of

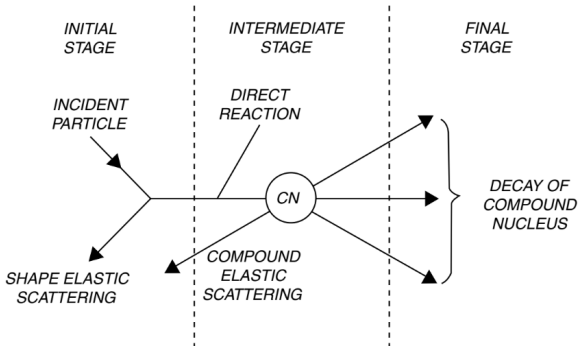


Figure 2: Ilustration of different stages of compound nucleus reactions [Loveland et al., 2006].

compound nucleus, first and second stages are independent [Ghoshal, 1950].

According tthe Borh amnesia assumtions, the decay of the compouned nucleus does not depend on the way in which the nucleus was formed, but on its excitation energy and angular momentum. It can be demonstrated by work of Ghoshal. Ghoshal performed experiment, forming compound nucleus in two different ways, specifically $^{63}\mathrm{Cu} + p$ and $^{60}\mathrm{Ni} + \alpha$. These reactions lead to formation of compound nucleus ^{64}Zn. Next, he compared yields of different isotopes and confirmed same amounts for both reactions with experimental uncertainty 10%. [Ghoshal, 1950]

We will focus on heavy-ion-reactions, induced by projectiles heavier than an alpha particle. Their unique characteristic is relatively large value of the angular momentum. For example, we can compare reactions $^{40}\mathrm{Ar} + ^{165}\mathrm{Ho}$ and $p + ^{165}\mathrm{Ho}$. In reaction with ^{40}Ar we find that $l_{max} = 163\ \hbar$ but in case of reaction induced by p we find $l_{max} = 9\ \hbar$ [Loveland et al., 2006].

2.1 Reaction potentials

If we want to simulate fusion, we must calculate probability that one will occur. First, we need to know effective potential function, $V(R)$. Potential function is composed of three components: coulomb repulsive potential, centrifugal potential and nuclear potential. Reaction effective potential form a pocket which is necessary in formation of compound nucleus. Different approximations use different mathematical models and may also use multiple corrections. For example, Wood-Saxon potential or Yukawa potential could be considered as nuclear potential

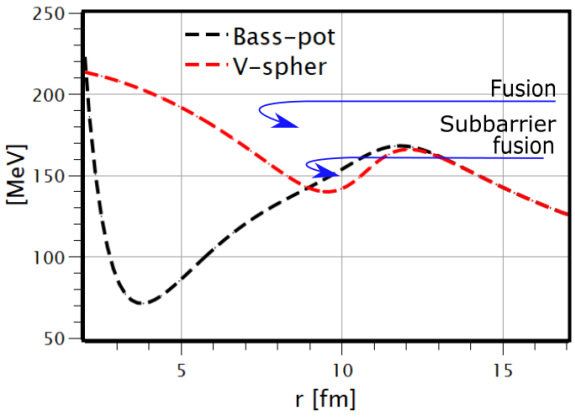


Figure 3: Graph of two different nuclear reaction potentials for $^{52}Cr + ^{149}Sm$ and ilustrated fusion and subbarier fusion.

component.

The deeper is this pocket, the higher is probability that fusion will occur. The pocket has a local maximum called potential barrier. We need to calculate potential barrier which the projectile ion must overcome for the fusion to occur. This barrier is also known as interaction barrier. If the probability of fusion is to be non-zero, two conditions must be met. First, there must be a local minimum and maximum, that mean pocket. Second, energy of the projectile must be higher than local minimum. Sub-barrier fusion has occurred if energy of the projectile was between local maximum and minimum of the potential. If energy of projectile is higher than local maximum of potential, fusion has occurred.

According to Reiner Bass book [Bass, 1980], we can form potential as follows,

$$V(R_{int}) = \frac{1,44(Z_1 Z_2)}{R_{int}} - \frac{R_1 R_2}{R_1 - R_2} \tag{2}$$

$$R_{int} = R_1 + R_2 + 3.2fm \tag{3}$$

$$R_i = 1.12A_i^{1/3} - 0.94A_i^{-1/3} \tag{4}$$

where R_i is radius of ith nuclei and R_{int} is interaction radius. This way we can determine threshold of subbarrier fusion.

As shown in Fig. 3 where Bass-pot is nuclear reaction potential according to Eq. 2 and V-spher is nuclear reaction potential calculated accordingly to NRV, we see that using the Bass potential it is a problem to derremine if subbarrier fusion is possible. However the Bass potential can be used as approximation of height of interaction barrier.

While Bass nuclear reaction potential is sensitive to the relative deformation, it can not represent different orientations of two deformed nuclei. In Fig 3 V-spher is only approximation of nuclear reaction potential if we consider both nuclei are spherical, but NRV [Zagrebaev, 2020], or Nuclear Reaction Video, take into consideration orientation of the two nuclei. Bass nuclear potential is one-dimensional representation. This is important fact, if we compare approach of HIVAP [Reisdorf and Schädel, 1992] and NRV model to calculation and modelling of potential. We know that HIVAP use one-dimensional nuclear potential thus not considering orientation of deformed nuclei. Another important value is angular momentum l. Value of angular momentum is affecting centrifugal force component of potential. For too big value of angular momentum, there might be no pockets. We can tell the same about Coulomb potential. For too high protons numbers, Coulomb potential will outweigh nuclear potential and the pocket might not occur.

3 Programs used to calculate efective cross section

First codes used to calculate reactions cross section were not coded from scratch. Existing codes were adapted for the task. For example, SPIT [Wild, 1988] is based on neutron evaporation code that has been used at Lawrence Berkeley National Laboratory and Lawrence Livermore National Laboratory. Original code written in fortran was altered in 1988 by John Wild. SPIT is code for calculating fusion evaporation reaction cross sections but only for neutron evaporation channels. We can compare SPIT to even older code called JORPLE by Jose Alonso [Alonso, 1974]. Major improvement is in assumed potentials. While JORPLE uses Coulomb and Wood-Saxon potential , SPIT uses a Bondorf, Sobel and Serber Coulomb potential [Bondorf et al., 1974] and the Bass proximity potential [Bass, 1974]. SPIT code is one of simpler as it require only proton and nucleon number of target and projectile nucleus. This program is still used in some parts of nuclear physics as it provides consistent results in order of magnitude with a litle effort. JORPLE or SPIT have narrower uses and greater shortcomings than the models currently in use.

We will focus on newer, more flexible progams HIVAP and NRV. Those utilize more parameters to

calculate cross section more precisely.

3.1 HIVAP and its parameters

HIVAP code is based on two steps dynamics. First there will be complete fusion and second statistical de-excitation of compound nucleus through rezidue evaporation channel. The HIVAP program is an extension of the GROGI program [Gilat,]. Compared to JORPLE or SPIT, HIVAP has a much wider use not only thanks more parameters but also due to the fact that it takes into account phenomena of the formation of a complex nucleus. Thus it is possible to obtain much more accurate values of effective cross sections for specific reactions. In contrast to GROGI, HIVAP takes into account more modern ideas of nucleus and nuclear potential.

Problem with potential calculation model used in GROGI was that the calculation was based on liquid drop model considered as nuclear potential. Liquid drop model shows that nuclei with a proton number greater than 100 cannot exist [Strutinsky, 1967]. The reason is the Coulomb repulsion, which outweighs the attractive nuclear forces. [Patin, 2002] According to the liquid drop model, the difference between repulsive and attractive forces for heavy nuclei is very small and this corresponds to a short half-life. Therefore, it was necessary to consider the so-called shell model for HIVAP. The shell model speaks of nucleons as fermions that are subject to the fermi exclusion principle. Thus, there must be energy layers (shells) that neutrons and protons occupy. These layers are also called energy levels. The strength of this model is the fact that it can explain why nuclei with closed neutron a proton layers are more stable. Considering this expanded model shell model correction of potential was added. HIVAP has problem calculating sub-barrier fusion because in case of sub-barrier fusion, a Wentzel-Kramers-Brillouin approximation [Wentzel, 1926, Kramers, 1926] has been used to calculate the barrier penetration, what leads to underprediction of the fusion cross section. [Vaz et al., 1981].

There are many parameters, but we focus on the most important ones, e.g.:

- Q_2 - quadrupol deformation of target nucleus
- r_0 - radius parameter
- $Sigr_0$ - fluctuation of interaction barrier
- A_f/A_n - relative density for states undergoing by spontaneous fission and particle evaporation
- $Levpar$ - scale parameter for the level density
- $Barfac$ - parameter scaling fission barrier

Those parameters relate to the potential function of the reaction. For example as parameter scaling interaction radius calculation. First we tried to alter parameters separately to study direct dependence of calculation and specific parameter. Based on this sensitivity we were able to find best parameters.

3.2 NRV and its parameters

First we need to emphasize that NRV uses potential dependent on orientation.

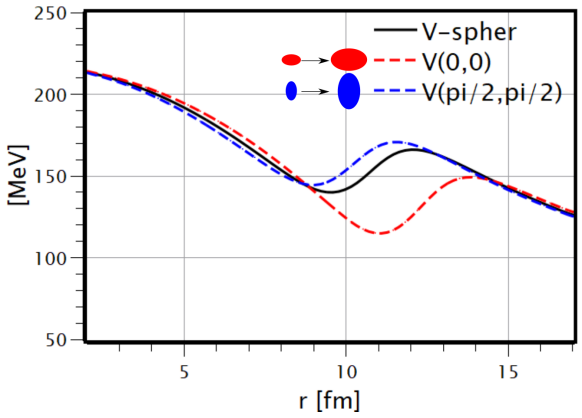


Figure 4: Nuclear reaction potential functions of deformed Projectile and target reaction.

In Fig. 4 we can see function of potential if we consider two spherical nuclei coliding $(V-spher)$, function of potential if two nuclei colide nose-to-nose $(V(0,0))$ and function of potential if two nuclei colide side-to-side $(V(\pi/2,\pi/2))$. Also, in Fig. 5 we notice a more detailed dependence of potential on orientation. This is important inprovement over HIVAP, which take into account only fixed value of relative deformation.

To solve the problem of sub-barrier fusion of single barrier model, the multi-barrier was suggesed, using coupled channel calculations [Dasso et al., 1983, Lindsay and Rowley, 1984, Jacobs and Smilansky, 1984].The coupled channel method is matematical approach, which can be used to calculate nuclear fusion cross section. Instead of suming through partial waves as

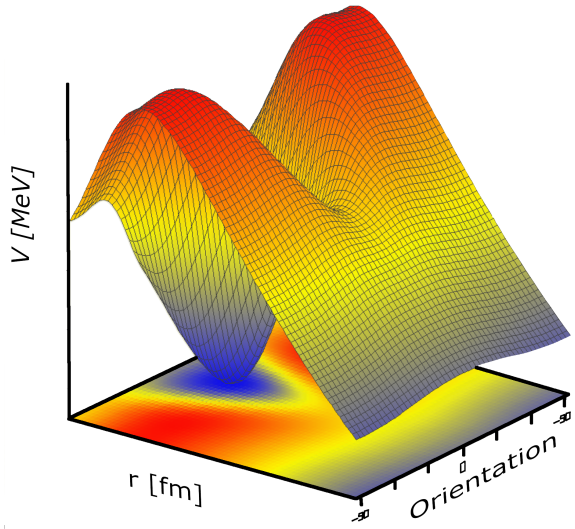


Figure 5: Nuclear reaction potential function of deformed Projectile and target reaction, with two variables being relative orientation and distance.

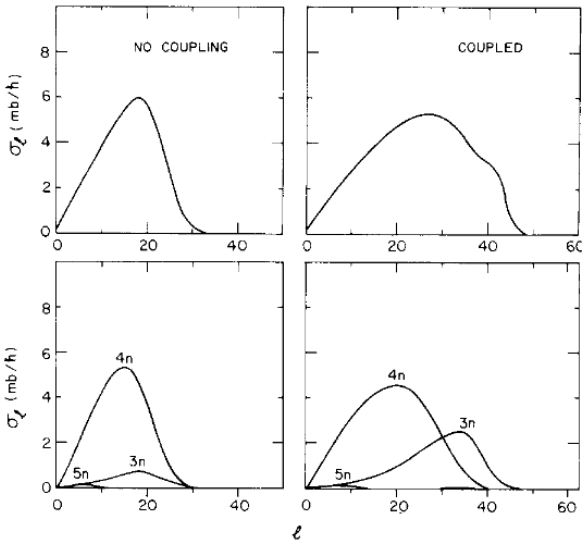


Figure 6: Graphs comparing cross sections regarding angular momentum for calculation with and without channel coupling method [Landowne and Dasso, 1983].

shown in Eq. 1, matrices are used. Off diagonal components of those matrices then enhance or decrease transmission in the area of sub-barrier fusion or fusion over barrier. Also coupled channel method increases the probability of forming the compound nucleus with high angular momenta as shown in Fig. 6 [Landowne and Dasso, 1983]. Furthermore Reisdorf suggested that multi-barrier can be considered fluctuating fusion barrier with distribution assumed to be of Gaussian shape [Reisdorf and Schädel, 1992]. One of many programs using this channel coupling calcalculation is CCFULL [Hagino et al., 1999] or NRV. We focus on NRV. Another important feature is channel coupling which is important in determining the distribution of angular momentum afther compound nucleus formation [Landowne and Pieper, 1984]. Channel coupling directly affects ability of transmission above and below the barrier. [Dasso et al., 1983]. This is considered as natural explanation of relatively large cross secrions observed in sub-barier fusion in the past. [Dasso et al., 1983] As the matter of fact, extensive studies have revealed that in case of fusion reaction below the Coulomb barrier, coupling of the relative motion of nuclei to nuclear intristic motions.

Therefore, problem of quantum tunneling in the presence of coupling can be addresed [Hagino et al., 1999]. As well as HIVAP and SPIT, NRV is build on pre-existing models describing nuclear fusion processes. In combination with the statistical model, NRV is able to calculate cross sections for heavy-ion reaction. Two channel coupling models are included in NRV knowledge base: quantum model and empirical model. Both models produce very similar results [Karpov et al., 2016]. It has to be notet that probability of compound nucleus formation is allways considered $P_{CN} = 1$.

We focus on quantum model of fusion-evaporation, specificaly parameters of nuclear potential. We can select one of three basic approximations: W. S. Volume , W. S. Surface and Promixity. Different approximations use different parameters. We decided to use W. S. Volume as approximation of nuclear potential as this approximation best represents actual conditions in fusion evaporation reactions. There are only three parameters related to nuclear potential function we can alter. [Rachkov et al., 2014]

- $V_0{}^{vol}$ - depth of pocket
- $r_0{}^{vol}$ - potential position
- a^{vol} - curvature of potential

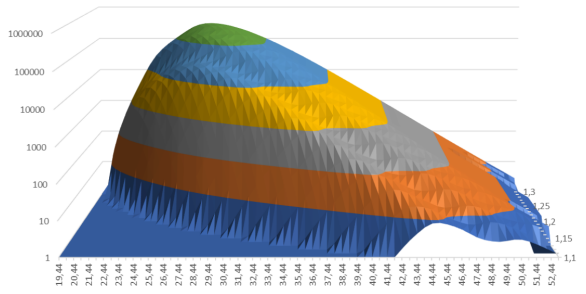


Figure 7: Dependence of cross sections of $2n$ evaporation channel for $^{52}Cr + ^{149}Sm$ reaction in NRV.

4 Methods and Results

We altered one parameter at time slightly many times producing clear dependence of results, as shown in Fig. 7. In this way, we can better understand the role of parameters. Last step was to find set of parameters that would reliably predict fusion evaporation cross sections.

Focusing on NRV, we first try calculation with basic parametrization of nuclear reaction potential. Than we repeat the proces of altering one parameter at time, again producing clear dependence of results, as shown in Fig. 7. It is important to say that basic parametrization of nuclear potential function is derived of Bass potential function [Bass, 1980]. For different reactions, basic set of parameters is changed so that both barriers are as similar as posible. This is visible in Fig. 3 This may be good indication of final parameters, as we established that Bass potential function is good approximation of barrier height but not depth of the pocket.

To estimate threshold of sub-barrier fusion we calculated height of the Bass barrier by Eq. 2. Than we found coresponding excitation energy level, $E^*[MeV]$. Height of Bass barrier is marked in our graphs. Excitation energy representation of height of Bass barrier is $B = 37.44\ MeV$ for $^{52}Cr + ^{149}Sm$ reaction and $B = 23.13\ MeV$ for $^{48}Ca + ^{208}Pb$ reaction.

4.1 Reaction $^{52}Cr + ^{149}Sm$

In Tab. 1, we summarize the setting of the parameters in HIVAP, which deliver the best results.

In Fig. 8 there are portrayed data from [Mošať, 2015]. Dotted line for HIVAP calculation and points depicting results from experiments of Mošať. All values of maximum cross sections and appropriate energies are written down in Tab. 3. Height of the Bass barier is: $B = 27\ MeV$.

Af/An	$Barfac$	$Sigr0$	$Q2$
1,1	0,77	3	0,183
$Cutoff$	$Sigr$	$V0[MeV]$	$r0[fm]$
2,6	1,6	59	1,11

Table 1: Table of HIVAP parameters for $^{52}Cr + ^{149}Sm$ reaction.

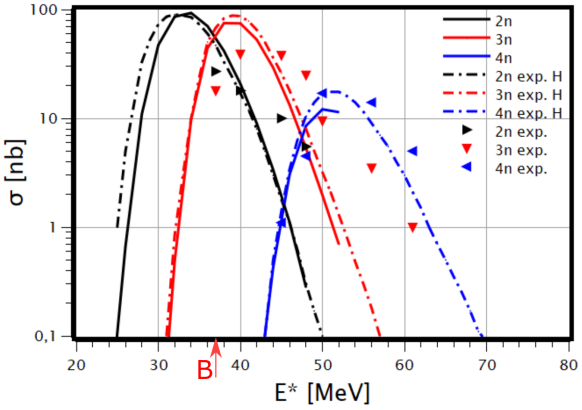


Figure 8: Cross sections obtained from our HIVAP calculation (full line), referential HIVAP calculation (dashed line) and experimental data from work of Mošať [Mošať, 2015] for reaction $^{52}Cr + ^{149}Sm$.

In Tab. 2, we summarize the setting of the parameters in NRV, which deliver the best results.

$V_0{}^{vol}[MeV]$	$r_0{}^{vol}[fm]$	a^{vol}	$\beta_2{}^{Projectile}$	$\beta_2{}^{Target}$
-40	2,5	0,75	0,2123	0,183

Table 2: Table of NRV parameters for $^{52}Cr + ^{149}Sm$ reaction.

In Fig. 9 there are portrayed data from [Mošať, 2015]. Dotted line for NRV calculation and points depicting results from experiments of Mošať. All values of maximum cross sections and appropriate energies are written down in Tab. 3. Height of the Bass barier is: $B = 27\ MeV$.

4.2 Reaction $^{48}Ca + ^{208}Pb$

In Fig. 10 there are portrayed data from [Gäggeler et al., 1989]. Dotted line for HIVAP calculation and points depicting results from experiments of Gäggeler. All values of maximum cross

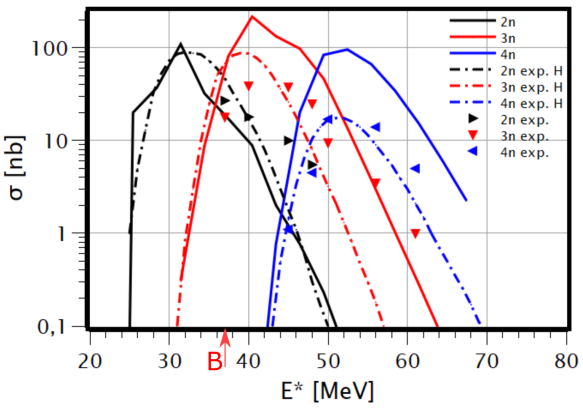


Figure 9: Cross sections obtained from our NRV calculation (full line), referential HIVAP calculation (dashed line) and experimental data from work of Mošať [Mošať, 2015] for reaction $^{52}Cr + ^{149}Sm$.

		$2n$	$3n$	$4n$
reference data	$\sigma[nb]$	90	88	17,5
	$E^*[MeV]$	32	39	51
HIVAP	$\sigma[nb]$	93	75	12
	$E^*[MeV]$	34	38	50
NRV	$\sigma[nb]$	109	217	96
	$E^*[MeV]$	31	40	52

Table 3: Table of positions of the maximum of the fusion evaporation cross sections for reaction $^{52}Cr + ^{149}Sm$

sections and appropriate energies are written down in Tab. 6. Height of the Bass barier is: $B = 23\ MeV$.

In Tab. 4, we summarize the setting of the parameters in HIVAP, which deliver the best results.

Af/An	$Barfac$	$Sigr0$	$Q2$
1	1,1	5	0,0563
$Cutoff$	$Sigr$	$V0[MeV]$	$r0[fm]$
3,9	2,7	59	1,1177

Table 4: Table of HIVAP parameters for $^{48}Ca + ^{208}Pb$ reaction.

In Fig. 11 there are portrayed data from [Gäggeler et al., 1989]. Dotted line for NRV calculation and points depicting results from experiments of Gäggeler. All values of maximum cross sections and appropriate energies are written down in Tab. 6. Height of the Bass barier is: $B = 23\ MeV$.

In Tab. 5, we summarize the setting of the parameters in NRV, which deliver the best results.

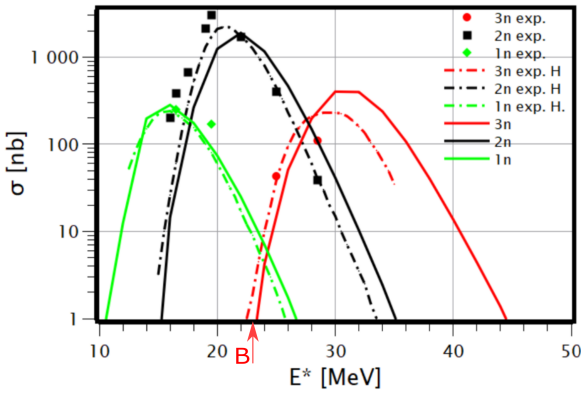


Figure 10: Cross sections obtained from our HIVAP calculation (full line), referential HIVAP calculation (dashed line) and experimental data from work of Gäggeler [Gäggeler et al., 1989] for reaction $^{48}Ca + ^{208}Pb$.

$V_0{}^{vol}[MeV]$	$r_0{}^{vol}[fm]$	a^{vol}	$\beta_2{}^{Projectile}$	$\beta_2{}^{Target}$
-95	1,145	1	0,1043	0,0563

Table 5: Table of NRV parameters for $^{48}Ca + ^{208}Pb$ reaction.

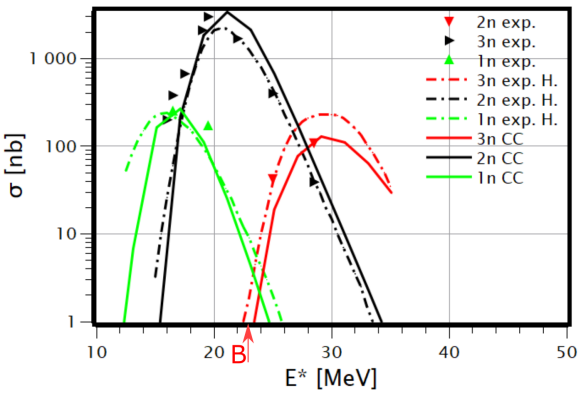


Figure 11: Cross sections obtained from our NRV calculation (full line), referential HIVAP calculation (dashed line) and experimental data from work of Gäggeler [Gäggeler et al., 1989] for reaction $^{48}Ca + ^{208}Pb$.

5 Discussion

Here we will discuss if our results are correct or precise. Also if we have some deviations, we will dis-

		$1n$	$2n$	$3n$
reference data	$\sigma[nb]$	240	2200	230
	$E^*[MeV]$	16	21	29
HIVAP	$\sigma[nb]$	282	1890	401
	$E^*[MeV]$	16	22	30
NRV	$\sigma[nb]$	266	3400	128
	$E^*[MeV]$	17	21	29

Table 6: Table of positions of the maximum of the fusion evaporation cross sections for reaction ^{48}Ca + ^{208}Pb

cuss why. It has to be noted that reaction ^{52}Cr + ^{149}Sm will be compared only to referential HIVAP calculation of Mošať, as target was contaminated with other isotopes of samarium [Mošať, 2015].

5.1 Reaction ^{52}Cr + ^{149}Sm

Results from our HIVAP calculation (Fig. 8) gives us results in very good alignment with referential data from [Mošať, 2015], even though 2n, 3n and 4n channel has slightly lower maximal cross section (Tab. 3). This difference is in order of magnitude, so it can be neglected. For this calculation, only problem might be that difference between excitation energies of 2n evaporation channel for maximal cross section for HIVAP and referential data is higher than in any other calculation, although this difference is also neclectible as it is smaller than spread of maximum.

On the other hand results of our NRV channel coupling calculation which (Fig. 9,Tab. 3) are visibly disturbed and 3n and 4n channels are strongly overpredicted. Interestingly the shape of cross sections function of sub-barrier fusion are heavily distorted thus it is harder to say if the results are correct. In the process of finding parameters, we heavily modified potential function, and as a result potential pocket was very shallow (only few MeV). In our calculations, distortion often occurred for shallow pockets. We can not with certainty say if cross section on 2n channel in maximum are correct, as there might be calculation instability of some kind resulting in situations when some results being off. If we remove some values, including maximum, from graph we acquire more typical shape of 2n channel. That would mean we underpredict sub barrier fusion for 2n channel and overpredict fusion over barrier for 3n and 4n as shown in figure Fig 12. We earlier mentioned that this may occur.

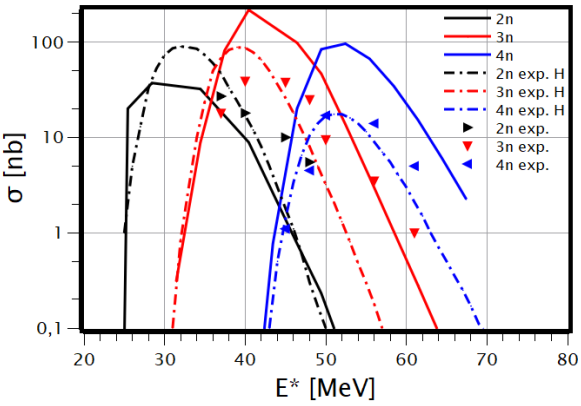


Figure 12: Cross sections obtained from our NRV calculation for ^{48}Ca + ^{208}Pb reaction and control data from.

In this case, we found right parameters for HIVAP calculation, but further finetuning of more different parameters for NRV might be needed if we want to acquire better results. We can also pinpoint that two parameters V_0 and r_0 which are present in both HIVAP and NRV have different impact on calculation, because even though these parameters meaning is the same in both codes, our final parameters are different for both codes.

5.2 Reaction ^{48}Ca + ^{208}Pb

In case of reaction ^{48}Ca + ^{208}Pb, (Fig. 10, Tab. 6) channels 1n, 2n and 3n are in good alignment, with difference up to one magnitude, with referential HIVAP calculation from [Gäggeler et al., 1989]. But looking at experimental data, we can not say with certainty if we overpredicted maximum of 3n channel because there is not enough data to predict maximal cross section.

Results depicted in Fig 11 from NRV calculation for this reaction are of the same value as results from HIVAP. This is because again channels 1n, 2n and 3n are in alignment with referential data with difference up to one magnitude. Only difference is in this case we overpredict cross section for 2n evaporation channel and underpredict cross sections for 3n evaporation channel. In the process of finding parameters for NRV and reaction ^{48}Ca + ^{208}Pb, we found parameters (Tab. 5) that do not deviate heavily from parameters automatically set to pattern Bass potential. This may be because ^{48}Ca, ^{208}Pb can be considered as two

spherical nuclei, thus fact that Bass potential function do not take deformation into account may be neglected. So if we were to use Bass potential function without any parametrizations, we may get, although worse, still very convenient results. In this case, even our r_0 parameters for HIVAP and NRV are similar as we can see by comparing values in Tab. 4 and Tab 5.

6 Conclusion

We aimed to compare two different codes used to calculate fusion-evaporation reactions cross sections, HIVAP and NRV. Our results were in good alignment, apart from channels 3n and 4n (Fig. 9), with control data from work of Mošať [Mošať, 2015] and work of Gäggeler [Gäggeler et al., 1989]. Over all, both programs are able to produce solid results or estimate of fusion evaporation reaction cross section, regarding scale of the results, 10^{-28} m. Eventhough NRV has least adjustable "primary" parameters and more nuclear reactions mechanisms incorporated, HIVAP seems to provide reliable results even in terms of subbarrier fusion. We can also conclude that as a newer and more complex code, it is harder to use full potential of heavily adjustable fusion evaporation cross section program. With aditional fine tuning of more than just three parameters we could obtain very precise results. On the other hand HIVAP is more practical as calculations take less time and even with more parameters it is easy to produce good result.

Acknowledgments

I want to thank to my supervisor Adam Broniš.

References

[Alonso, 1974] Alonso, J. (1974). *Gmelin Hanbuch der Anorganishen Chemie*. Springer-Verlag, New York.

[Bass, 1974] Bass, R. (1974). Fusion of heavy nuclei in a classical model. *Nuclear Physics*, A231.

[Bass, 1980] Bass, R. (1980). *Nuclear reactions with heavy ions*. Inst. fuer Kernphysik, Frankfurt, Germany.

[Bohr, 1936] Bohr, N. (1936). Neutron capture and nuclear constitution. *Nature*, 137.

[Bondorf et al., 1974] Bondorf, J. P., Sobel, M. I., and Sperber, D. (1974). Classical dynamical theory of heavy ion fusion and scattering. *Physics Reports, Physics Letters Section C*, 15c.

[Dasso et al., 1983] Dasso, C. H., Landowne, S., and Winther, A. (1983). Channel-coupling effects in heavy-ion fusion reactions. *Nuclear Physics*, A405.

[Gäggeler et al., 1989] Gäggeler, H. W., Jost, D. T., Türler, A., Armbruster, P., Brüchle, W., Folger, H., Heßberger, F. P., Hofmann, S., Münzenberg, G., Ninov, V., Reisdorf, W., Schädel, M., Sümmerer, K., Kratz, J. V., Scherer, U., and Leino, M. E. (1989). Cold fusion reactions with. *Nuclear Physics*, A502.

[Ghoshal, 1950] Ghoshal, S. N. (1950). An experimental verification of the theory of compound nucleus. *Physical Review*, 80.

[Gilat,] Gilat, J. Grogi-2 a nuclear evaporation computer code. *BNL Report No. BNL50246*.

[Hagino et al., 1999] Hagino, K., Rowley, N., and Kruppa, A. T. (1999). A rogram for coupled-channel calculations with all order couplings for heavy-ion fusion reactions. *Computer Physics Communications*, 123.

[Jacobs and Smilansky, 1984] Jacobs, P. M. and Smilansky, U. (1984). Comments on the description of subbarrier fusion in terms of dissipative tunnelling. *Physics Letters*, 127B.

[Karpov et al., 2016] Karpov, A. V., Denikin, A. S., Alekseev, A. P., Zagrebaev, V. I., Rachkov, V. A., Naumenko, M. A., and Saiko, V. V. (2016). Nrv web knowledge base on low-energy nuclear physics. *Physics of Atomic Nuclei*, 79.

[Kramers, 1926] Kramers, H. A. (1926). Wellenmechanik und halbzahlige quantisierung. *Zeitschrift für Physik*, 39.

[Landowne and Dasso, 1983] Landowne, S. and Dasso, C. (1983). Examining the enchancement of sub-barrier cross sections by neutron transfer with positive q values. *Physics Letters*, 138B.

[Landowne and Pieper, 1984] Landowne, S. and Pieper, S. C. (1984). Coupled-channels fusion calculations for $^{58}\mathrm{Ni}+^{58}\mathrm{Ni}$. *Phys. Rev. C*, 29.

[Lindsay and Rowley, 1984] Lindsay, R. and Rowley, N. (1984). Approximate treatment of coupled-channels effects in sub-barrier fusion. *Journal of Physics G: Nuclear Physics*, 10.

[Loveland et al., 2006] Loveland, W., Morrisey, D. J., and Seaborg, G. T. (2006). *Modern Nuclear Chemistry*. A John Wiley and sons, inc., publication, Hoboken, New Jersey.

[Mošať, 2015] Mošať, P. (2015). Identifikácia produktov reakcie $^{52}\mathrm{Cr}+^{149}\mathrm{Sm}$. Master's thesis, Comenius University in Bratislava.

[Patin, 2002] Patin, J. B. (2002). *Experimentl Cross Section for Reactions of Heavy Ions and ^{208}Pb, ^{209}Bi, ^{238}U and ^{248}Cm Targets*. PhD thesis, University of California, Berkeley.

[Rachkov et al., 2014] Rachkov, V. A., Karpov, A. V.,

Denikin, A. S., and Zagrebaev, V. I. (2014). Examining the enchancement of sub-barrier cross sections by neutron transfer with positive q values. *Phys. Rev. C*, 90.

[Reisdorf and Schädel, 1992] Reisdorf, W. and Schädel, M. (1992). How well do we understand the synthesis of heavy elements by heavy-ion induced fusion. *Hadrons and Nuclei*, 343.

[Sahm et al., 1985] Sahm, C. C., Clerc, H. G., Schmidt, K. H., Reisdorf, W., Armbruster, P., Hessberger, F. P., Keller, J. G., Münzenberg, G. M., and Vermeulen, D. (1985). Neutron capture and nuclear constitution. *Nuclear Physics*, A441.

[Strutinsky, 1967] Strutinsky, V. M. (1967). *Nuclear Physics*, A95 420.

[Vaz et al., 1981] Vaz, L. C., Alexander, J. M., and Satcher, G. R. (1981). Fusion barriers, empirical and theoretical: evidence for dynamic deformation in sub barrier fusion. *Physics reports*, 69.

[Wentzel, 1926] Wentzel, G. (1926). Eine verallgemeinerung der quantenbedingungen für die zwecke der wellenmechanik. *Zeitschrift für Physik*, 38.

[Wild, 1988] Wild, J. (1988). Wellenmechanik und halbzahlige quantisierung. *Zeitschrift für Physik*.

[Zagrebaev, 2020] Zagrebaev, V. I. (2020). Cc fusion code of nrv. *http://nrv.jinr.ru/nrv/*.

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 75–86
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Jozef Mišt, Pavol Mošať

Účinné prierezy pre produkciu izotopov seaborgia vo fúzno-výparných reakciách

Jozef Mišt[1*] Pavol Mošať[1†‡]

[1]Katedra jadrovej fyziky a biofyziky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

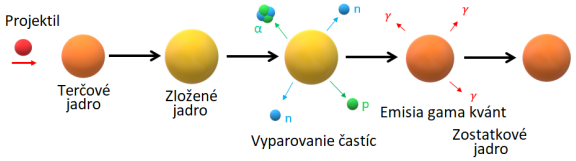
Abstrakt: Jedinou metódou, ktorou je možná produkcia superťažkých jadier je využitie fúzno-výparných reakcií. Dôležitým faktorom pri ich syntéze je účinný prierez príslušnej reakcie. Pre čo najvyššiu efektivitu produkcie je nutné poznať závislosť účinného prierezu od energie projektilov, teda príslušnú excitačnú funkciu. V tejto práci sa zameriavame na vyhodnotenie excitačných funkcií izotopov seaborgia, ktoré boli produkované v piatich rôznych experimentoch v reakciách $^{206-208}\mathrm{Pb}(^{54}\mathrm{Cr},xn)^{(260-262)-xn}\mathrm{Sg}$ v zariadení SHIP v GSI Darmstadt. Vykonali sme analýzu každej z týchto reakcií pri niekoľkých energiách projektilov a použitím časovo-pozičných korelácií sme identifikovali vyprodukované izotopy seaborgia a vypočítali príslušné účinné prierezy.

Kľúčové slová: účinný prierez, excitačné funkcie, fúzno-výparné reakcie

1 Teoretický úvod do problematiky

1.1 Fúzno-výparné reakcie

Fúzno-výparné reakcie sú dvojkrokové jadrové reakcie. V prvok kroku dôjde k interakcii medzi projektilom a terčovým jadrom, pričom samotný projektil v terčovom jadre uviazne. Jeho energia sa rozdistribuje medzi nukleóny vzniknutého systému, pričom vzniká relatívne dlho žijúci prechodný stav, tzv. *zložené jadro*. Jeho doba života sa väčšinou pohybuje v rozmedzí $10^{-18} - 10^{-16} s$. V druhom kroku dochádza k vyparovaniu zloženého jadra, teda k emisii nukleónov, čím sa znižuje jeho excitačná energia. Okrem samostatných nukleónov je možné aj vyparenie alfa častice ako viazaného stavu dvoch protónov a dvoch neutrónov. Keď už excitačná energia zloženého jadra nie je dostatočná na emitovanie nukleónu, dochádza k emisii γ kvánt a vzniku zostatkového jadra. Priebeh fúzno-výparných reakcií je znázornený na Obr. 1 [W. D. Loveland, 2006].



Obr. 1: Schematický náčrt priebehu fúzno-výparných reakcií.

Pre excitačnú energiu zloženého jadra vieme napísať nasledovný vzťah:

$$E^* = (m_P + m_T - m_{CN})c^2 + \frac{m_T}{m_P + m_T} T_a \qquad (1)$$

kde m_P, m_T a m_C sú hmotnosti projektilu, terčového jadra a zloženého jadra a T_P je kinetická energia projektilu.

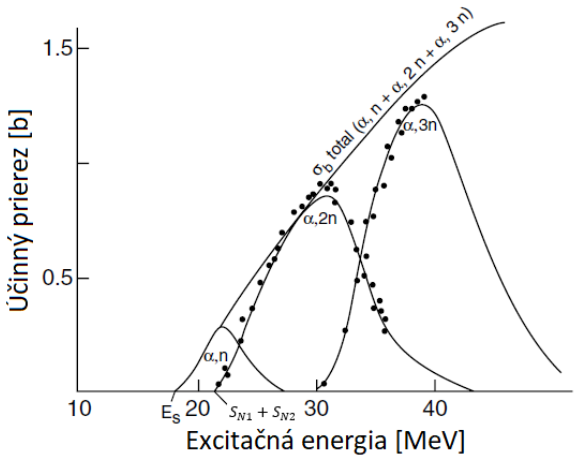
Pravdepodobnosť určitej reakcie vyjadruje jej účinný prierez σ. Jednotkou účinného prierezu je *barn*, $1b = 10^{-28} m^2$. Experimentálne ho môžeme určiť podľa vzťahu

$$\sigma = \frac{N}{N_P n_T} \qquad (2)$$

kde N je počet produktov príslušnej reakcie, N_P je počet projektilov, ktoré dopadli na terč a n_T je počet terčových jadier na jednotku plochy.

Závislosť účinného prierezu reakcie od excitačnej energie zloženého jadra sa nazýva excitačná funkcia. Na Obr. 2 je znázornená excitačná funkcia pre fúzno-výparnú reakciu $^{209}\mathrm{Bi}(\alpha,xn)$. Aby mohlo dôjsť k emisii neutrónu zo zloženého jadra, musí byť jeho excitačná energia minimálne rovná separačnej energii neutrónu S_N, ktorá je jeho väzbová energia v zloženom jadre. Ďalším limitujúcim faktorom je samotná formácia zloženého jadra. Na Obr. 2 je vidieť, že účinný prierez pre $1n$ kanál je až do hodnoty E_S nulový. Táto hodnota zodpovedá excitačnej energii zloženého jadra pri energii projektilu rovnej výške fúznej bariéry, teda minimálnej excitačnej energii s ktorou zložené jadro môže vzniknúť. Zvyšovaním excitačnej energie sa účinný prierez zvyšuje, pretože rastie pravdepodobnosť formácie zloženého jadra. Pri dosiahnutí excitačnej energie dostatočnej na emisiu

*mist1@uniba.sk
†pavol.mosat@fmph.uniba.sk
‡Školiteľ



Obr. 2: Excitačná funkcia pre $1n$, $2n$ a $3n$ kanál fúzno-výparnej reakcie jadra ^{209}Bi s alfa časticou [W. D. Loveland, 2006]

dvoch neutrónov (teda S_{N1}+S_{N2}) sa otvára $2n$ kanál. Ďalším zvyšovaním excitačnej energie sa znižuje pravdepodobnosť emisie len jedného neutrónu a $2n$ kanál sa stane dominantným. Podobne po dosiahnutí excitačnej energie dostatočnej na emisiu troch neutrónov sa otvorí $3n$ kanál, pričom účinný prierez pre $2n$ kanál začne klesať.

Pre spektrum kinetickej energie neutrónov emitovaných zo zloženého jadra platí

$$N(\varepsilon)d\varepsilon = \frac{\varepsilon}{T^2}e^{-\frac{\varepsilon}{T}}d\varepsilon \qquad (3)$$

kde ε je kinetická energia neutrónu a T má úlohu teploty jadra v jednotkách energie (teda prenásobená Bolztmanovou konštantou). Priemerná energia neutrónov je $2T$, takže emisiou neutrónu sa zníži excitačná energia zloženého jadra o hodnotu $S_N + 2T$. Pre väčšinu reakcií je energia potrebná na emisiu nukleónu približne 10 MeV. Pre jednotlivé maximá pre xn kanál môžeme preto očakávať hodnoty $S_{N1} + 2T$, $S_{N1} + S_{N2} + 4T$, $S_{N1} + S_{N2} + S_{N3} + 6T$ atď., pričom zanedbávame prípadné zmeny T [W. D. Loveland, 2006].

1.2 Jadrová izoméria

Jadrové izoméry sú dlho žijúce excitované stavy atómového jadra. Aby mohol byť excitovaný stav považovaný za izomér, musí byť jeho doba života výrazne vyššia ako v prípade ostatných excitovaných stavov tohto jadra. Vo všeobecnosti sa za izoméry považujú excitované stavy s dobou polpremeny vyššou ako 1 ns. Izoméry sa vyskytujú v jadrách vtedy, keď závislosť ich excitačnej energie od deformácie jadra, jeho spinu alebo priemetu spinu vykazuje lokálne minimum (okrem minima základného stavu). Podľa toho, ktorá z týchto charakteristík spôsobuje dlhú dobu života hladiny rozdeľujeme izoméry na tvarové, spinové a K izoméry:

- **Tvarové izoméry** sa vyskytujú v jadrách, ktoré majú druhé energetické minimum pri veľkej deformácii jadra. Ich typickým príkladom sú štiepne izoméry v ťažkých jadrách v oblasti od uránu po berkélium. Do základného stavu sa môžu dostať emisiou γ kvánt, ktorá je ale výrazne potlačená, pretože by si vyžadovala veľkú zmenu deformácie jadra. S veľkou pravdepodobnosťou namiesto toho podliehajú štiepeniu s dobami polpremeny v ráde niekoľkých milisekúnd a menej.
- **Spinové izoméry** vzniknú keď si deexcitácia jadra do nižšieho energetického stavu vyžaduje veľkú zmenu jeho spinu. Takýto prechod si vyžaduje emisiu γ kvanta s vysokou multipolaritou, ktorá je výrazne potlačená. Doba polpremeny spinových izomérov môže dosahovať vyššie hodnoty ako v prípade štiepnych izomérov, napríklad až cez 10^{15} rokov v prípade ^{180m}Ta. Excitačná energia tohto izoméru je 75 keV a rozdiel medzi spinom excitovanej a základnej hladiny je $8\hbar$. Väčšina spinových izomérov sa deexcituje emisiou γ kvanta, prípadne vnútornou konverziou, ale existujú aj prípady priamej alfa a beta premeny, alebo emisie protónu z izomérneho stavu.
- ***K* izoméry** sú typom spinových izomérov. Kvantové číslo K je veľkosť priemetu vektora spinu jadra do jeho osi symetrie. K izoméry vznikajú v prípadoch, kedy si deexcitácia do nižšieho energetického stavu vyžaduje veľkú zmenu K. Multipolarita emitovaného γ žiarenia musí byť na základe výberových pravidiel minimálne rovná zmene K, avšak v skutočnosti je možná aj deexcitácia emisiou γ kvanta s nižšou multipolaritou, ktorá je ale potlačená. Väčšina K izomérov sa nachádza v oblasti jadier s $A = 180$, boli však nájdené aj v oblasti superťažkých jadier, pričom existencia ďalších sa v tejto oblasti očakáva. V tejto oblasti sa nachádza napríklad izomér ^{270m}Ds, ktorého doba polpremeny

$T_{1/2} \approx 6\ ms$ je približne 60 krát vyššia ako pre jeho základný stav. Vďaka takejto zvýšenej stabilite môžu byť superťažké jadrá s príliš krátkou dobou polpremeny skúmané vo forme ich K izoméru [Walker and Dracoulis, 1999].

1.3 Vnútorná konverzia

Vnútorná konverzia je proces, ktorým excitované jadro znižuje svoju excitačnú energiu. Je to konkurenčný proces k emisii γ kvanta. Pri vnútornej konverzii jadro interaguje priamo s jedným elektrónom z atómového obalu a odovzdá mu svoju excitačnú energiu. Elektrón následne uniká z jadra, pričom pre jeho kinetickú energiu platí

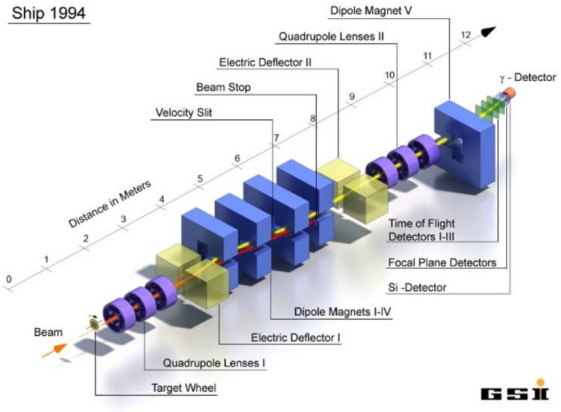
$$T_e = \Delta E - B_e \tag{4}$$

kde ΔE je zmena excitačnej energie jadra a B_e je väzbová energia elektrónu. Vnútorná konverzia môže prebehnúť na ľubovoľnom elektróne z obalu, pričom každý z nich má inú väzbovú energiu. Z tohto dôvodu má energetické spektrum konverzných elektrónov niekoľko diskrétnych hodnôt. Po úniku konverzného elektrónu jeho miesto zaujme elektrón z vyššej vrstvy, pričom sa vyžiari röntgenové žiarenie, alebo dôjde k emisii Auger elektrónu.

Na charakterizovanie pomeru pravdepodobnosti deexcitácie jadra vnútornou konverziou a emisiou γ kvanta pre určitý prechod sa používa koeficient vnútornej konverzie α_{IC}, ktorý definujeme ako pomer počtu deexcitácii prostredníctvom vnútornej konverzie N_{IC} a počtu emitovaných γ kvánt N_γ.

$$\alpha_{IC} = \frac{N_{IC}}{N_\gamma} \tag{5}$$

Koeficient vnútornej konverzie narastá pri zvyšovaní protónového čísla jadra Z (ako Z^3) a zmeny spinu jadra L a pri prechodoch s nízkou energiou. V prípade, že sa jadro deexcituje medzi dvomi hladinami, pričom sa nemení parita ani spin jadra, nie je možná emisia γ kvanta. Takéto prechody prebiehajú väčšinou vnútornou konverziou. Okrem nej je možná súčasná emisia dvoch γ kvánt, prípadne pri dostatočnej zmene excitačnej energie ($\Delta E \geq 2m_e c^2$) tvorba páru elektrónu a pozitrónu. Pravdepodobnosť týchto procesov je ale oproti vnútornej konverzii veľmi nízka [Krane, 1988].



Obr. 3: Schéma rýchlostného filtra SHIP [GSI,].

2 Experiment

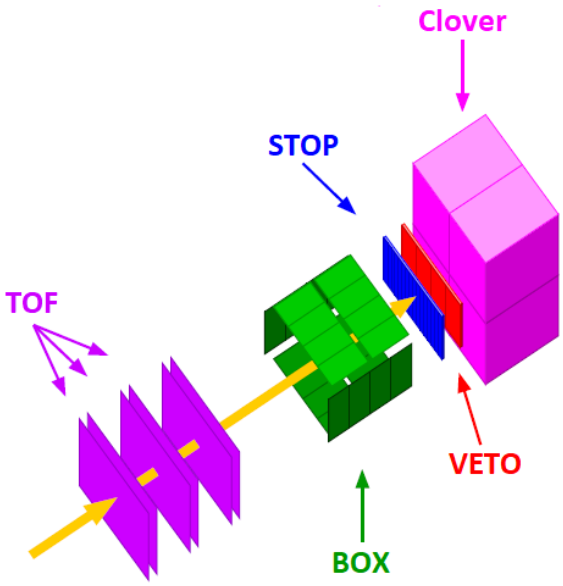
2.1 Zariadenie SHIP

Rýchlostný filter SHIP je separátor produktov reakcií ťažkých iónov v komplexe GSI v Darmstadte v Nemecku. Jeho schéma sa nachádza na Obr. 3. Na jeho začiatku sa nachádza rotačný terč, na ktorý je nasmerovaný pulzný zväzok projektilov z urýchľovača UNILAC. Dĺžka pulzu je zvyčajne 5 ms nasledovaná 15 ms pauzou. Samotný terč pozostáva z 8 sektorov umiestnených po obvode disku s polomerom 155 mm. Jeho otáčanie je synchronizované s pulzmi urýchľovača, čím sa zabraňuje jeho roztaveniu pri vysokých intenzitách zväzku.

Projektily interagujú s jadrami terča za vzniku produktov, ktoré terč opúšťajú. V dôsledku rozptylov v terči je ich nutné pred separácoiu fokusovať. K tomuto účelu slúžia tri kvadrupólové magnety umiestnené za terčom. Rýchlosť produktov reakcií úplnej fúzie je menšia ako rýchlosť pôvodných projektilov, čo sa využíva na ich separáciu pomocou elektrických a magnetických polí. Pre rýchlosť zloženého jadra v_{CN} platí:

$$v_{CN} = \frac{m_P}{m_P + m_T} v_P \tag{6}$$

kde v_P je rýchlosť projektilov. Za kvadrupólovými magnetmi sa nachádza elektrický deflektor nasledovaný štvoricou dipólových magnetov a druhým elektrickým deflektorom. Na častice prechádzajúce cez separátor pôsobí proti sebe elektrická ($F_e = qE$) a magnetická ($F_m = qvB$) sila. Aby sa častice nevychýlili, musia byť obe tieto sily rovnaké. Z toho vyplýva,



Obr. 4: Schéma detekčného systému zariadenia SHIP [Kalaninová, 2014].

že cez separátor prejdú len častice s rýchlosťou

$$v = \frac{E}{B} \tag{7}$$

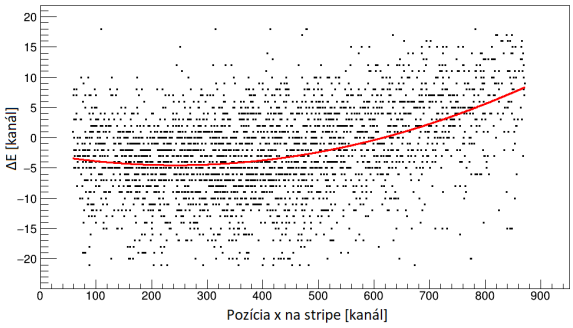
Projektily sú od produktov odseparované a sú nasmerované na Faradayov valec, kde sa meria ich náboj. Na konci separátora sa nachádza ďalšia trojica kvadrupólových magnetov a piaty dipólový magnet, ktorý vychyľuje produkty o 7,5°, čím ich nasmeruje do detekčného systému, a zároveň znižuje pozadie od projektilov s nízkou energiou, ktoré spĺňajú podmienku 7 [Hofmann and Münzenberg, 2000].

Transmisia separátora závisí od pomeru hmotností projektilu a terčového jadra. Najvyššie hodnoty dosahuje pre symetrické reakcie, avšak pre tieto reakcie je potlačenie pozadia od projektilov nižšie ako v prípade asymetrických reakcií. Pre reakcie projektilu ^{54}Cr s izotopmi olova dosahuje hodnotu približne 40% [Mazzocco et al., 2008].

2.2 Detekčný systém

Detekčný systém umiestnený za separátorom SHIP pozostáva z týchto častí Obr. 4:

- **TOF detektory.** Na začiatku detekčného systému sa nachádza systém troch preletových TOF detektorov. Každý z nich pozostáva z dvoch uhlíkových fólií s hrúbkou približne 30 $\mu g/cm^2$. Pri prelete častice sú z nich emitované elektróny, ktoré sú elektrickým a magnetickým poľom nasmerované na mikrokanálové doštičky, kde dôjde k ich zosilneniu a vzniku signálu. TOF systém umožňuje meranie času preletu častíc s rozlíšením 700 ps, pričom jeho detekčná účinnosť je 99,8%. Jeho dôležitosť spočíva v koincidenčnom zapojení so STOP detektorom, na základe ktorého je možné rozlíšiť signály, ktoré pochádzajú z implantácie produktov do detektora od signálov z ich rádioaktívnych premien [Š. Šaro et al., 1996].
- **STOP detektor** je polohovo citlivý kremíkový detektor (PSSD) do ktorého je zväzok produktov implantovaný. Je rozdelený na 16 vertikálnych stripov, ktoré zaznamenávajú energiu implantovaných jadier, energiu ich alfa premeny alebo štiepenia a aj konverzných elektrónov [Andreyev et al., 2004]. Detektor zaznamenáva aj polohu vzniku jednotlivých signálov v rámci stripu s rozlíšením 150 μm, pričom jeho energetické rozlíšenie je približne 20 keV (oboje FWHM). Pre reakcie analyzované v tejto práci je jeho detekčná účinnosť približne 54%.
- **BOX detektor.** Dolet alfa častíc a štiepnych fragmentov v kremíku je väčší ako implantačná hĺbka jadier v STOP detektore. Z tohto dôvodu alfa častice alebo štiepne fragmenty emitované do spätného smeru z detektora uniknú. Na ich detekciu slúži BOX detektor, ktorý pozostáva zo šiestich stripových kremíkových detektorov umiestnených pred STOP detektorom. Signál z BOX detektora je možné zosumovať so signálom zo STOP detektora pre častice, ktoré z neho unikli, a tak zaznamenať ich celú energiu. V dôsledku prechodu častíc cez mŕtve vrstvy oboch detektorov je energetické rozlíšenie pre alfa častice zaznamenané v oboch detektoroch zhoršené na hodnotu približne 40 keV (FWHM).
- **VETO detektor** je kremíkový detektor umiestnený za STOP detektorom. Slúži na potlačenie pozadia od vysoko energetických častíc, ktoré preleteli cez STOP detektor a neboli zaregistrované v TOF systéme.
- **Clover detektor** pozostáva zo štyroch germániových kryštálov na konci detekčného systému, ktoré merajú energiu γ kvánt a röntgenového žiarenia. Vďaka koincidenčnému zapojeniu so



Obr. 5: Balistická kalibrácia. Červená čiara je fit kvadratickou funkciou.

STOP detektorom umožňuje identifikáciu alfa prechodov vedúcich na excitovaný stav dcérskeho jadra, ktoré sú nasledované emisiou γ kvanta [Hofmann and Münzenberg, 2000].

2.3 Kalibrácia detektorov

Kalibrácia detekčného systému pozostáva z nasledovných krokov:.

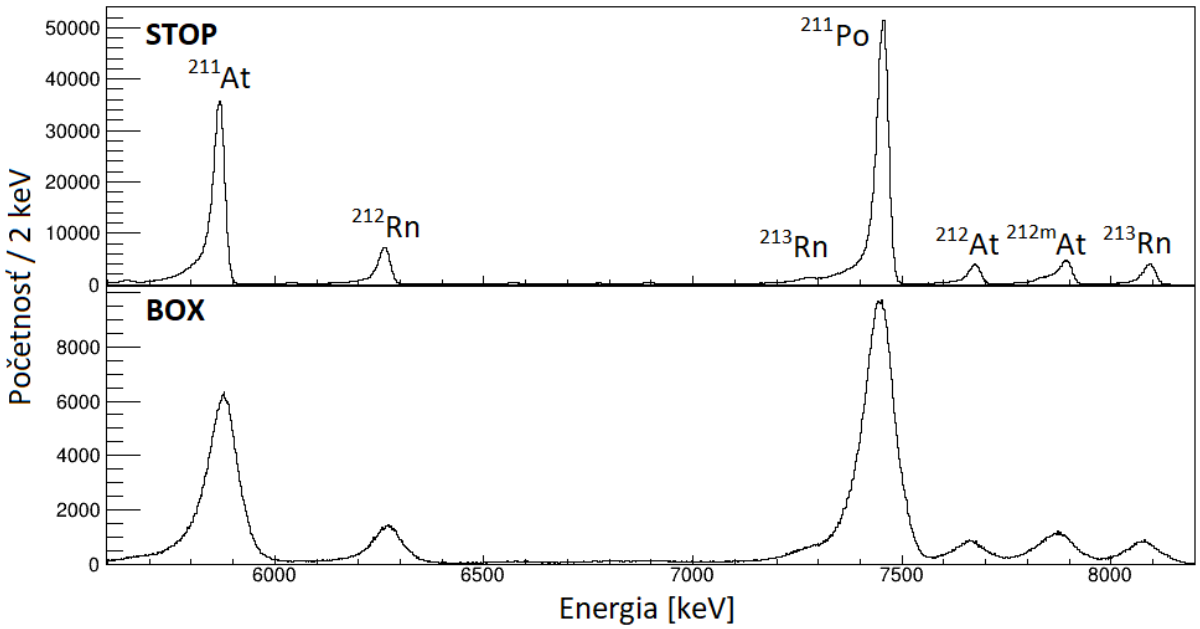
- **Balistická kalibrácia.** Veľkosť signálu zo STOP detektora závisí od polohy miesta jeho vzniku, čo spôsobuje, že odozva na rovnakú časticu v rámci stripu tohto detektora nie je rovnaká. Tento jav zhoršuje energetické rozlíšenie, takže je potrebné ho kompenzovať tzv. balistickou kalibráciou. Príslušné kalibračné koeficienty získame kvadratickým fitom závislosti rozdielu nameranej a referenčnej energie od pozície vzniku signálu (Obr. 5).

- **Nízkoenergetická kalibrácia STOP detektora.** Úlohou energetickej kalibrácie ja nájsť vzťah medzi výškou signálu z detektora a energiou častice, ktorá signál vyvolala. Na kalibráciu je možné použiť externé alfa žiariče. Alfa častice z externého žiariča vytvárajú v detektore nižší signál ako v prípade alfa premeny rovnakého jadra implantovaného do detektora, pretože v prípade implantovaných jadier sa zaznamenáva aj časť kinetickej energie dcérskeho jadra. Z tohto dôvodu je pri tomto spôsobe nutné aplikovať korekcie. Druhý spôsob je kalibrovať pomocou alfa čiar implantovaných izotopov, napríklad z testovacej reakcie. K tomuto je nutné správne identifikovať príslušné izotopy a priradiť píkom ich referenčnú energiu. Energetickú kalibráciu pre analyzované reakcie sme uskutočnili pomocou testovacích reakcií s terčami ^{154}Dy, ^{144}Sm a ^{160}Gd. Energetické rozlíšenie STOP detektora sa približne pohybovalo v rozsahu $25 - 30$ keV.

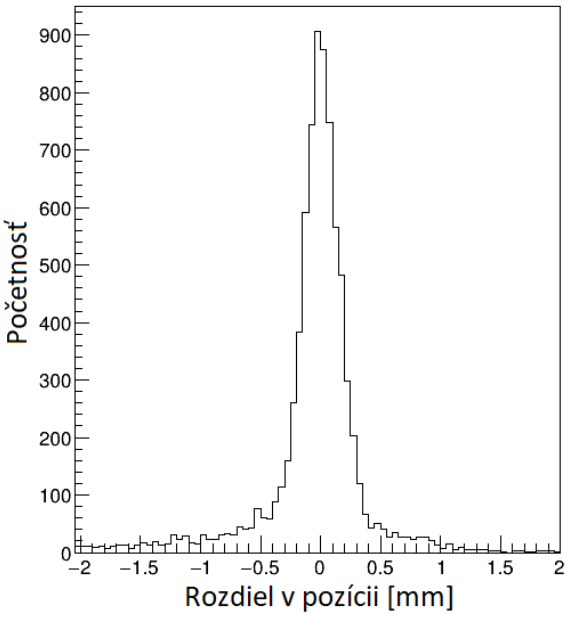
- **Nízkoenergetická kalibrácia BOX detektora.** BOX detektor slúži na detekciu častíc, ktoré unikli zo STOP detektora. Výsledný signál ktorý takáto častica vytvorila sa získa sumovaním signálov z oboch detektorov v koincidencii. Rovnaká koincidencia sa používa aj na kalibráciu BOX detektora, z ktorého nízkoenergetického spektra vyberieme jeden separovaný pík, ktorému priradíme jeho energiu. Energia zaznamenaná v BOX detektore je rozdielom referenčnej energie a zbytkovej energie zazanamenanej v STOP detektore. Z tohto dôvodu sa kalibrácia BOX detektora vykonáva až po kalibrácii STOP detektora.

- **Pozičná kalibrácia.** Signály zo STOP a BOX detektora sú spracovávané dvomi vetvami elektroniky: nízkoenergetickou a vysokoenergetickou. Prvá z nich pokrýva signály do energie 16 MeV, čo sú primárne signály alfa častíc. Vysokoenergetická vetva pokrýva signály v rozsahu od 4 MeV do niekoľkých stoviek MeV. Slúži na zaznamenávanie signálov z implantácie jadier a ich štiepenia. Pozičná kalibrácia slúži na zosúladenie pozičného signálu z oboch vetiev elektroniky. Využíva korelácie medzi signálom z implantácie jadra do detektora (vysokoenergetická vetva) a signálom z jeho alfa premeny (nízkoenergetická vetva), ktorých poloha je v rámci rozlíšenia detektora rovnaká. Aby sa zamedzilo náhodným koreláciám, používa sa izotop s krátkou dobou polpremeny a definuje sa maximálny časový rozdiel medzi signálmi, aby boli akceptované.

- **Vysokoenergetická kalibrácia.** Vysokoenergetická kalibrácia STOP detektora prebieha podobne ako nízkoenergetická. Okrem píkov od alfa častíc implantovaných jadier je možné do kalibrácie pridať aj pík od projektilov, pre ktoré je potrebné určiť ich energiu po prechode terčom a TOF systémom. Na vysokoenergetickú kalibráciu BOX detektora sa rovnako ako v prípade nízkoenergetickej kalibrácie, používajú alfa častice z referenčného píku, ktoré zanechali signál v oboch vetvách elektroniky.



Obr. 6: Porovnanie nízkoenergetického spektra STOP a BOX detektora.



Obr. 7: Rozdiel v pozícii z nízkoenergetickej a vysokoenergetickej vetvy elektroniky po pozičnej kalibrácii.

- **Energetická kalibrácia CLOVER detektora.** Kalibrácia germániového Clover detektora sa vykonáva pomocou externých žiaričov ^{152}Eu a ^{133}Ba. Princíp kalibrácie je rovnaký ako v prípade energetickej kalibrácie STOP detektora, hľadáme závislosť medzi referenčnou energiou jednotlivých píkov od ich polohy v spektre.

3 Metóda časovo-pozičných korelácií

Polohovo citlivý kremíkový STOP detektor zariadenia SHIP umožňuje použitie časovo-pozičnej korelačnej metódy na identifikáciu produktov implantovaných do detektora. V tejto práci sme na identifikáciu a určenie početnosti izotopov seaborgia použili túto metódu. Jej princíp spočíva v selektovaní signálov, ktoré vznikli v rámci priestorového rozlíšenia detektora na rovnakom mieste. Dolet alfa častíc a dcérskych jadier v kremíku je menší ako priestorové rozlíšenie detektora, takže všetky alfa premeny tvoriace rozpadovú reťaz jedného konkrétneho jadra zaznamenáme približne na pozícii implantácie jadra do detektora. Aby sa znížila pravdepodobnosť náhodnej korelácie, aplikuje sa podmienka na maximálny časový rozdiel medzi každou dvojicou signálov. Jej veľkosť závisí od doby polpremeny príslušných izotopov [Hofmann et al., 1979].

4 Výpočet účinného prierezu

Účinný prierez reakcie sa experimentálne určuje podľa vzťahu 2 a vyžaduje si určenie počtu produktov N, projektilov N_P a terčových jadier n_T. Počet alfa premien alebo aktov štiepenia N_i nepredstavuje priamo hľadaný počet produktov, je naň potrebné aplikovať korekcie, a to vetviaci pomer daného izotopu b_i, detekčnú účinnosť detektora ε_i, transmisiu separátora ε a korekciu τ na konečný korelačný čas. Aplikovaním týchto korekcií dostaneme pre celkový počet produktov reakcie vzťah:

$$N = \frac{N_i}{\varepsilon\varepsilon_i b_i \tau} \tag{8}$$

Transmisia separátora je približne $\varepsilon = 0,4$, detekčná účinnosť pre alfa častice je približne $\varepsilon_\alpha = 0,54$. Pri štiepení sa v STOP detektore zaznamená väčšina energie aj v prípade úniku jedného z fragmentov, preto v tomto prípade uvažujeme účinnosť $\varepsilon = 1$. Korekciu τ na konečný korelačný čas t na základe doby polpremeny skúmaného izotopu $T_{1/2}$ určíme podľa vzťahu

$$\tau = 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T_{1/2}} \tag{9}$$

Pre počet terčových jadier na jednotku plochy platí:

$$n_T = f\frac{N_A}{M_m}d \tag{10}$$

kde f je izotopická čistota terča, N_A je Avogadrova konštanta, M_m je molová hmotnosť materiálu terča a d je jeho plošná hustota.

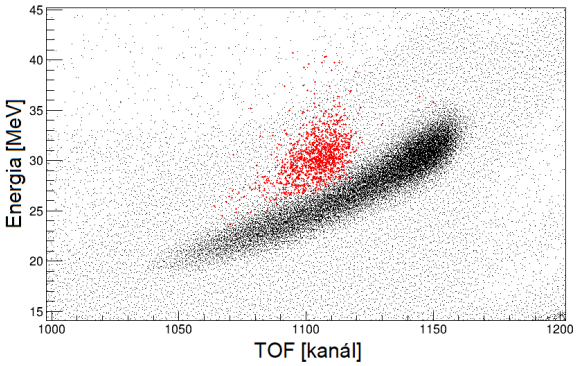
Intenzita zväzku častíc z urýchľovača sa označuje ako elektrický prúd I, ktorý projektily vytvárajú. Jej hodnota môže počas experimentu kolísať, preto nepoužívame skutočný čas merania, ale čas nanormovaný na konštantnú intenzitu zväzku. Získame ho podielom hodnoty C [SCC], ktorá sa meria Faradayovým valcom a hodnoty R [$kHz\,SCC$], ktorá vyjadruje rýchlosť nárastu hodnoty C pri určitej hodnote intenzity. Pre počet projektilo N_P potom platí:

$$N_P = \frac{I}{qe}D\frac{C}{R} \tag{11}$$

kde qe je celkový naboj projektilov a D je pomer času pulzu a celého makropulzu.

Výsledný vťah pre výpočet účinného prierezu, ktorý sme použili v tejto práci je

$$\sigma = \frac{N_i}{\varepsilon\varepsilon_i b_i \tau}\frac{M_m}{fdN_A}\frac{eqR}{IDC} \tag{12}$$



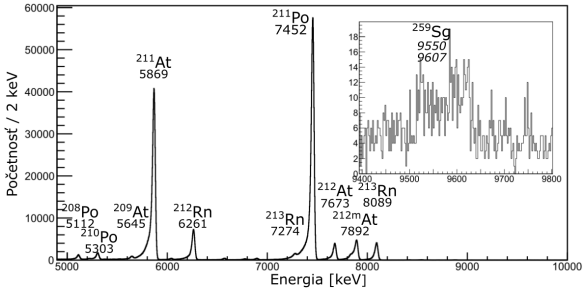
Obr. 8: Závislosť energie implantovaných produktov od veľkosti signálu z TOF detektorov z experimentu R238. V oblasi vyznačenej čiernou farbou sa nachádzajú produkty transfer reakcií. Červenou farbou sú vyznačené implantované jadrá, ku ktorým existuje korelovný signál alfa premeny ^{261}Sg.

5 Analýza experimentálnych dát

Analyzovali sme dáta z piatich experimentov z reakcií ^{54}Cr+$^{206-208}$Pb$\rightarrow^{260-262}$Sg* uskutočnených v zariadení SHIP. Konkrétne sme sa zamerali na štyri najľahšie známe izotopy seaborgia, $^{258-261}$Sg. Na analýzu sme použili programy Go4 a ROOT [Go4,] [Rene and Rademakers, 1997]. Pre každý z experimentov sme vykonali kalibráciu na základe testovacích reakcií a pomocou korelačnej metódy sme určili početnosť skúmaných izotopov a vypočítali účinné prierezy pre ich produkciu. Referenčné hodnoty energie α častíc a doby polpremeny skúmaných izotopov, ako aj použité korelačné nastavenia sú v Tab. 1. Podmienku na energiu implantovaných projektilov (ER) sme pre každý experiment nastavili na základe závislosti ich energie od veľkosti signálu z TOF systému pomocou polygonálneho okna nad oblasťou implantovaných produktov transfer reakcií, ktoré sú konkurenčným procesom k fúzno-výparným reakciám (Obr. 8). Podmienku na pozíciu korelovaných signálov sme nastavili na 1 mm pre ER-α, α-SF a ER-SF korelácie.

5.1 Excitačné funkcie izotopov seaborgia

Prvým analyzovaným experimentom bol experiment R273 s terčom ^{206}Pb vo forme PbS. Energia zväzku dosahovala počas experimentu niekoľko hodnôt v intervale od 257 do 268 MeV. V tomto experimente sme sa zamerali na izotopy ^{259}Sg ($1n$ kanál) a ^{258}Sg

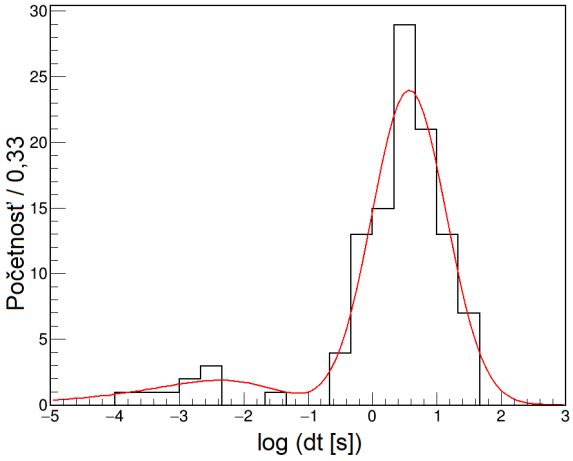


Obr. 9: Nízkoenergetické spektrum experimentu R273.

(2n kanál). Nízkoenergetické spektrum z tohto experimentu sa nachádza na Obr. 9. Všetky vyznačené izotopy okrem ^{259}Sg sú produktmi transfer reakcií. Sumárne pre všetky energie projektilov sme zaregistrovali približne 450 alfa premien izotopu ^{259}Sg v STOP detektore a približne 770 alfa premien pri zarátaní signálov z BOX detektora. Pri najvyššej energii zväzku sme zaregistrovali 8 štiepnych eventov, ktoré vyhovovali podmienkam stanoveným pre izotop ^{258}Sg. Aby sme vylúčili možnosť, že medzi týmito štiepeniami sa nachádza štiepenie izotopu ^{255}Rf, ktorý vzniká alfa premenou ^{259}Sg, hľadali sme ER-α-SF korelácie so štiepením do 12 ms. Raz sme pre energiu alfa častice použili podmienku z Tab. 1 a druhý raz sme použili interval od 0,7 do 3 MeV, aby sme zahrnuli alfa častice, ktoré unikli zo STOP detektora a neboli zaregistrované ani v BOX detektore. Nenašli sme žiadnu trojicu takýchto eventov, teda týchto 8 štiepení nepochádza z izotopu ^{255}Rf. Považujeme ich za štiepenie ^{258}Sg a určili sme pre ne dobu polpremeny. Použili sme metódu z práce [Schmidt et al., 1984], ktorá sa používa v prípadoch s nízkou početnosťou (Obr. 10). Získali sme hodnotu $T_{1/2} = 3,0^{+17}_{-8} ms$, ktorá je v súlade s hodnotou z práce [Folden III et al., 2009] (Tab. 1).

Ďalším experimentom bol experiment R228 s terčom z izotopu ^{207}Pb a produkciou izotopov ^{260}Sg a ^{259}Sg. Pre tento experiment sa energia projektilov menila v intervale od 252 do 273 MeV. Našli sme 36 alfa premien izotopu ^{260}Sg a 48 alfa premien izotopu ^{259}Sg. Po započítaní signálov z BOX detektora sme zaznamenali 46 a 64 alfa premien týchto izotopov.

Najťažší terč z izotopu ^{208}Pb bol použitý v experimentoch R238, R231, R212 a v časti experimentu R228. Energia zväzku v týchto experimentoch dosahovala hodnoty v rozmedzí od 254 do 279 MeV. Identifikovali sme približne 2200 alfa premien izo-



Obr. 10: Závislosť početnosti štiepnych eventov od času medzi implantáciou jadra do detektora a zaregistrovaním štiepenia. Oddelená skupinka 8 eventov sú štiepenia ^{258}Sg, zvyšok predstavujú štiepenia ^{255}Rf a náhodné korelácie.

topu ^{261}Sg (2400 s BOX detektorom) a približne 100 (130 s BOX detektorom) alfa premien izotopu ^{260}Sg.

Po vyhodnotení početnosti sme vypočítali jednotlivé účinné prierezy, samostatne pre každú energiu zväzku podľa vzťahu 12. V experimente R238 sme zaregistrovali výrazne menej signálov v BOX detektore ako sme očakávali na základe početností z ostatných experimentov. Môže to byť spôsobené problémami s týmto detektorom počas experimentu, preto sme na výpočty účinných prierezov použili len početnosti zo STOP detektora. Následne sme zostavili pre každú reakciu excitačnú funkciu pre 1n a 2n kanál. Excitačnú energiu zloženého jadra sme určili podľa vzťahu 1, v ktorom sme použili kinetickú energiu projektilov v polovičnej hrúbke terča, ktorú sme vypočítali v programe LISE++ [Tarasov and Bazin, 2008]. Výsledné excitačné funkcie sú na Obr. 12, 13 a 14. Pre každú z nich sme body fitovali gaussovou funkciou. Excitačná funkcia pre izotop ^{258}Sg obsahuje len 1 nenulový bod, preto si jej úplné vyhodnotenie vyžaduje merania pri ďalších energiách projektilov.

5.2 Izomérny stav v izotope ^{255}Rf

Izotop ^{259}Sg sa alfa premenou premieňa na izotop ^{255}Rf, v ktorom bol objavený izomérny stav s dobou polpremeny $T_{1/2} = 50(17)\,\mu s$ a excitačnou energiou $E^* \approx 135\,keV$. Bol identifikavaný cez jeho de-

Tabuľka 1: Referenčné charakteristiky skúmaných izotopov a príslušné korelačné nastavenia.

Izotop	E_α [keV]	$T_{1/2}$	b_α	Korelačné nastavenia		Referencia
				E [MeV]	t	
^{258}Sg	-	$2,6^{+6}_{-4}$ ms[1]	$b_{SF} = 0,9(1)$[2]	SF: 100-250	12 ms	[Folden III et al., 2009][1] [Heßberger et al., 1997][2]
^{259}Sg	9607[1,2] 9550 9000-9500	0,29(5) s[1,3]	0,97(1)[2]	α: 9-9,7	1,3 s	[Heßberger et al., 2009][1] [Antalic et al., 2015][2] [Folden III et al., 2009][3]
^{260}Sg	9750[1] 9720	4,95(33) ms[1]	0,23(9)[2]	α: 9,67-9,82	25 ms	[Singh, 2017][1] [Štreicher, 2006][2]
^{261}Sg	9620 9550 9470 9420	0,18(1) s	0,981(4)	α: 9,37-9,67	1,0 s	[Štreicher, 2006]
^{255}Rf	8716	1,68(9) s	0,42(9)	α: 8,675-8,755 SF: 100-250	7,0 s	[Heßberger et al., 2006]

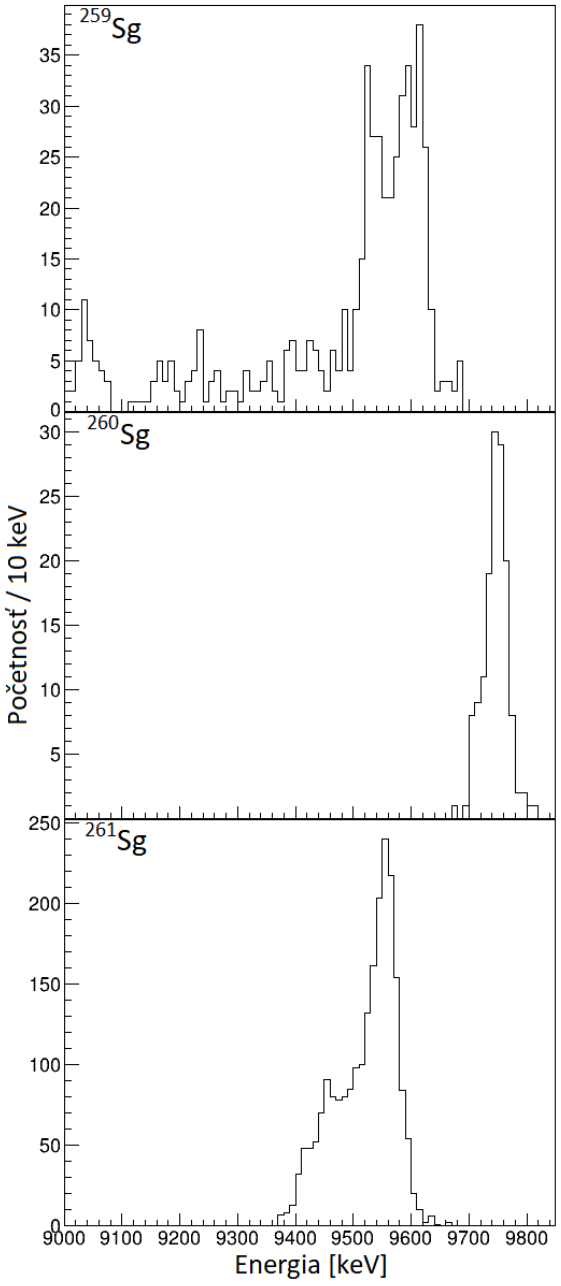
excitáciu vnútornou konverziou so strednou energiou elektrónov $E = 105\ keV$ v dátach z experimentu R273 [Antalic et al., 2015]. V tejto práci sme tento izomér identifikovali štvoritou ER-α-e^--SF/α koreláciou, čím sme zosilnili podmienku z citovanej práce. Prvá alfa premena patrí izotopu ^{259}Sg a posledný člen je alfa premena alebo štiepenie izotopu ^{255}Rf. Elektróny sme hľadali ako signály s energiou do 1 MeV a do 1 ms po alfa premene. Pozičné rozlíšenie STOP detektora je pre elektróny horšie ako v prípade alfa častíc, preto sme pre ne nepoužili podmienku na polohu signálu. Zaregistrovali sme 13 takýchto korelácií, 4 z nich končili alfa premenou a 9 štiepením. Spektrum energií konverzných elektrónov a času medzi registráciou alfa premeny ^{259}Sg a konverzného elektrónu sa nachádza na Obr. 15. Stredná energia zaznamenaných konverzných elektrónov je približne $E \approx 110\ keV$. Kalibrácia STOP detektora bola uskutočnená pomocou alfa čiar v oblasti energie 6 – 7 MeV, preto je určenie energie elektrónov ďaleko od tejto oblasti len približné. Na základe časového rozdielu medzi alfa premenou a emisiou konverzného elektrónu sme pre dobu polpremeny tohto izomérneho stavu získali hodnotu $T_{1/2} = 49^{+17}_{-12}\,\mu s$, ktorá súhlasí s hodnotou z práce [Antalic et al., 2015].

5.3 Izomérny stav v izotope ^{258}Sg

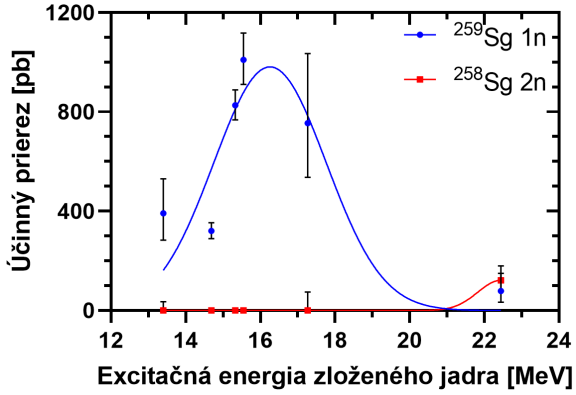
Podobne ako v prípade izotopu ^{255}Rf sme hľadali korelácie s konverzným elektrónom aj pre izotop ^{258}Sg. Hľadali sme ER-e^--SF korelácie, pričom podmienky na signál elektrónu sme požadovali rovnaké ako v predošlej podkapitole. Našli sme jednu takúto koreláciu, v ktorej mal elektrón energiou $E \approx 160\ keV$ a nasledoval po čase $t = 173\ \mu s$ po implantácii jadra. Tento elektrón môže naznačovať prítomnosť izomérneho stavu v izotope ^{258}Sg. Podľa práce [Schmidt et al., 1984] sme vypočítali pravdepodobnosť, že sa jedná o náhodnú koreláciu, ktorá je na úrovni 10^{-7}. Na základe časového rozdielu medzi implantáciou jadra a emisiou konverzného elektrónu sme pre dobu polpremeny tohto izomérneho stavu získali hodnotu $T_{1/2} = 120^{+573}_{-55}\mu s$. Keďže sa jedná len o jeden event, má táto hodnota vysokú neistotu a jej spresnenie a potvrdenie existencie izoméru v izotope ^{258}Sg si vyžaduje ďalšie meranie s vyššou štatistikou.

6 Záver

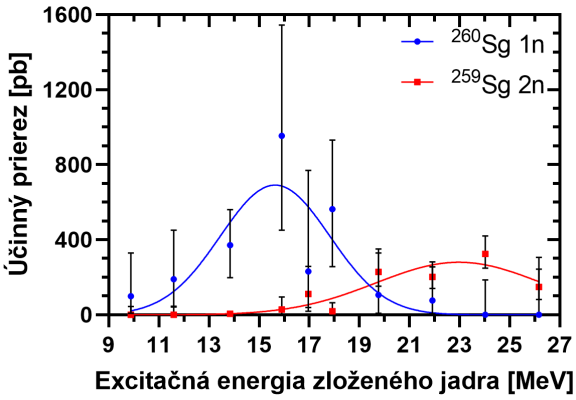
V tejto práci sme prezentovali výsledky získané analýzou piatich experimentov uskutočnených v zariadení SHIP. Pre každý z nich sme vykonali kalibráciu detektorov a identifikovali produkty reakcie. Použitím korelačnej metódy sme v týchto experimentoch určili početnosť produkovaných izotopov seaborgia a zostavili excitačné funkcie. Okrem nich sme identifikovali izomérny stav v izotope ^{255}Rf. Jeho excitačná energia aj doba polpremeny sú v súlade s predošlým meraním. Nakoniec sme identifikovali možný izomérny stav v izotope ^{258}Sg. V dôsledku nízkej štatistiky si presnejšie určenie jeho vlastností vyžaduje



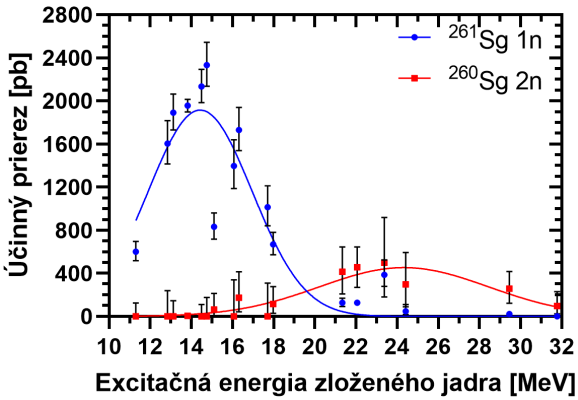
Obr. 11: Súhrnné alfa spektrum izotopov seaborgia zo všetkých analyzovaných experimentov



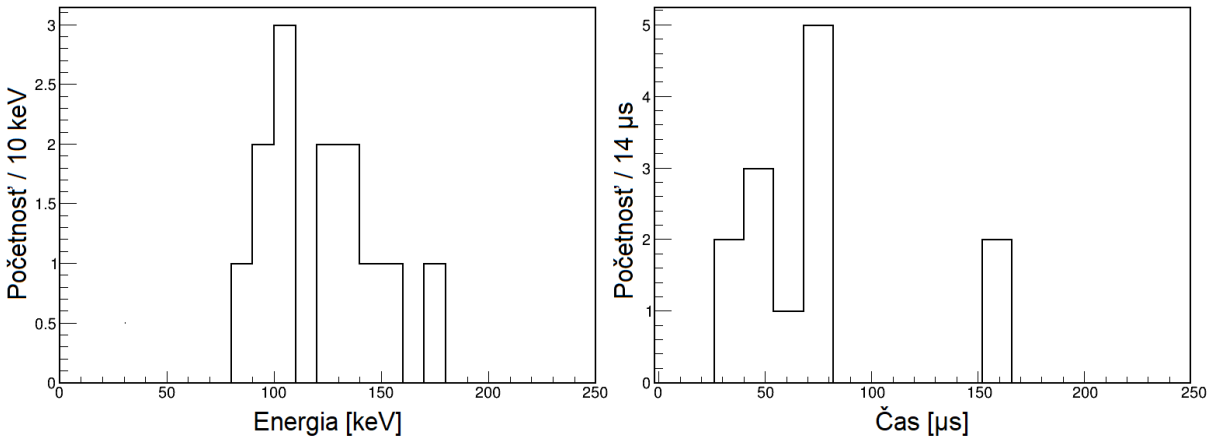
Obr. 12: Excitačná funkcia reakcie ^{206}Pb(^{54}Cr,xn)^{260}Sg*.



Obr. 13: Excitačná funkcia reakcie ^{207}Pb(^{54}Cr,xn)^{261}Sg*.



Obr. 14: Excitačná funkcia reakcie ^{208}Pb(^{54}Cr,xn)^{262}Sg*.



Obr. 15: Spektrum konverzných elektrónov merané v štvoritej korelácii ER-α-e^--SF/α Vľavo: Spektrum energie konverzných elektrónov. Vpravo: Časový rozdiel medzi alfa premenou ^{259}Sg a emisiou konverzného elektrónu.

ďalšie meranie.

Poďakovanie

Chcel by som poďakovať svojmu školiteľovi Mgr. Pavlovi Mošťovi, PhD. za odborné vedenie a pomoc pri analýze dát.

Literatúra

[Andreyev et al., 2004] Andreyev, A., Ackermann, D., Heßberger, F., Hofmann, S., Huyse, M., Münzenberg, G., Page, R., Van de Vel, K., and Van Duppen, P. (2004). Conversion electron and beta decay spectroscopy at ship. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, 533:409–421.

[Antalic et al., 2015] Antalic, S., Heßberger, F., Ackermann, D., Heinz, S., Hofmann, S., Kindler, B., Khuyagbaatar, J., Lommel, B., and Mann, R. (2015). Nuclear isomers in ^{259}sg and ^{255}rf. *The European Physical Journal A*, 51:41.

[Folden III et al., 2009] Folden III, C. M., Dragojević, I., Düllmann, C. E., Eichler, R., Garcia, M. A., Gates, J. M., Nelson, S. L., Sudowe, R., Gregorich, K. E., Hoffman, D. C., and Nitsche, H. (2009). Measurement of the $^{208}pb(^{52}cr,n)^{259}sg$ excitation function. *Phys. Rev. C*, 79:027602.

[Go4,] Go4. Gsi object oriented online off-line system. `https://www.gsi.de/en/work/research/experiment_electronics/data_processing/data_analysis/the_go4_home_page.htm`.

[GSI,] GSI. Helmholtzzentrum für schwerionenforschung. `https://www.gsi.de/work/forschung/nustarenna/nustarenna_divisions/she_physik/experimental_setup/ship`.

[Heßberger et al., 2009] Heßberger, F., Hofmann, S., Streicher, B., Sulignano, B., Antalic, S., Ackermann, D., Heinz, S., Kindler, B., Kojouharov, I., Kuusiniemi, P., Leino, M., Lommel, B., Mann, R., Popeko, A. G., Šáro, ., Uusitalo, J., and Yeremin, A. V. (2009). Decay properties of neutron-deficient isotopes of elements from Z = 101 to Z = 108. *The European physical journal A*, 41:145 – 153.

[Heßberger et al., 2006] Heßberger, F. P., Hofmann, S., Ackermann, D., Antalic, S., Kindler, B., Kojouharov, I., Kuusiniemi, P., Leino, M., Lommel, B., Mann, R., Nishio, K., Popeko, A. G., Sulignano, B., Saro, S., Streicher, B., Venhart, M., and Yeremin, A. V. (2006). Alpha-gamma decay studies of ^{255}rf, ^{251}no and ^{247}fm. *The European Physical Journal A*, 30:561–569.

[Heßberger et al., 1997] Heßberger, F. P., Hofmann, S., Ninov, V., Armbruster, P., Folger, H., Münzenberg, G., Schött, H. J., Popeko, A. G., Yeremin, A. V., Andreyev, A. N., and Saro, S. (1997). Spontaneous fission and alpha-decay properties of neutron deficient isotopes $^{257-253}$104 and ^{258}106. *Zeitschrift fur Physik A Hadrons and Nuclei*, 359:415–425.

[Hofmann et al., 1979] Hofmann, S., Faust, W., Münzenberg, G., Reisdorf, W., Armbruster, P., Guettner, K., and Ewald, H. (1979). Alpha decay studies of very neutron deficient isotopes of hf, ta, w, and re. *Zeitschrift für Physik A Atoms and Nuclei*, 291:53–70.

[Hofmann and Münzenberg, 2000] Hofmann, S. and Münzenberg, G. (2000). The discovery of the heaviest elements. *Rev. Mod. Phys.*, 72:733–767.

[Kalaninová, 2014] Kalaninová, Z. (2014). *Alpha decay of neutron-deficient radium and francium isotopes*. PhD thesis, FMFI UK, Bratislava.

[Krane, 1988] Krane, K. S. (1988). *Introductory Nuclear Physics*. John Willey & Sons, Hoboken, New Jersey.

[Mazzocco et al., 2008] Mazzocco, M., Ackermann, D., Block, M., Geissel, H., Herfurth, F., Heßberger, F., Hofmann, S., Iwasa, N., Nishio, K., Plaß, W., Scheidenberger, C., Weick, H., and Winkler, M. (2008). Mocadi_fusion: Extension of the monte-carlo code mocadi to heavy-ion fusion-evaporation reactions. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 266:3467–3480.

[Rene and Rademakers, 1997] Rene, B. and Rademakers, F. (1997). Root — an object oriented data analysis framework. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 389:81–86. `https://root.cern.ch/`.

[Schmidt et al., 1984] Schmidt, K., Sahm, C. C., Pielenz, K., and Clerc, H. (1984). Some remarks on the error analysis in the case of poor statistics. *Zeitschrift für Physik A Atoms and Nuclei*, 316:19–26.

[Singh, 2017] Singh, B. (2017). Nuclear data sheets for a=256. *Nuclear Data Sheets*, 141:327–364.

[Tarasov and Bazin, 2008] Tarasov, O. B. and Bazin, D. (2008). Lise++: Radioactive beam production with in-flight separators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 266:4657–4664. `http://lise.nscl.msu.edu/lise.html`.

[Štreicher, 2006] Štreicher, B. (2006). *Synthesis and spectroscopic properties of transfermium isotopes with Z = 105, 106 and 107*. PhD thesis, FMFI UK, Bratislava.

[Š. Šaro et al., 1996] Š. Šaro, Janik, R., Hofmann, S., Folger, H., Heßberger, F., Ninov, V., Schött, H., Kabachenko, A., Popeko, A., and Yeremin, A. (1996). Large size foil-microchannel plate timing detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 381:520–526.

[W. D. Loveland, 2006] W. D. Loveland, D. J. Morrissey, G. T. S. (2006). *Modern Nuclear Chemistry*. John Willey & Sons, Hoboken, New Jersey.

[Walker and Dracoulis, 1999] Walker, P. and Dracoulis, G. (1999). Energy traps in atomic nuclei. *Nature*, 399:35–40.

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 87–98
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Adriana Dohnalová

Study of the reference distributions for measurement of Bose-Einstein correlations in high energy proton-proton collisions in the ATLAS experiment

Adriana Dohnalová[*†]

Department of nuclear physics and biophysics, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstract: When identical pions are produced in proton-proton collisions in the ATLAS experiment, they are correlated. The correlations between two bosons are called Bose-Einstein correlations and they are described by correlation function $C_2(Q)$. Q is the two boson four-momentum difference modulus, which represents their closeness in the phase space. The Bose-Einstein correlations effect manifests itself as an increase of $C_2(Q)$ function in the region of small Q values. For experimental evaluation, the $C_2(Q)$ correlation function is calculated as a ratio of Q distribution for pairs of identical particles in signal sample and Q distribution for pairs in reference sample. Good reference sample should be identical to the signal sample except for the Bose-Einstein correlations. The goal of this work is an analysis of various reference distributions, focusing on the *event mixing* reference sample creating techniques. In *event mixing* techniques, the Q distribution is obtained from combinations of particles from different events so there are no Bose-Einstein correlations between them.

Keywords: Bose-Einstein correlations, ATLAS experiment, boson, reference distribution, event mixing

1 Bose-Einstein correlations

In the 1950's, a method of measurement of stellar dimensions based on the photon intensity correlations was introduced by Hanbury-Brown and Twiss. It is often referred to as the HBT method or the HBT interferometry [18] [15][17][16]. In 1959-1960, G. Goldhaber, S. Goldhaber, W. Lee and A. Pais observed correlations between identical charged pions produced in $p-\bar{p}$ annihilation (the GGLP effect). Both the HBT and the GGLP effects are based on Bose-Einstein correlations (BEC). Fermi-Dirac correlations between nucleons have been observed afterwards [18] [16]. Both of these correlation effects can be regarded as a consequence of the symmetry (antisymmetry) of the bosonic (fermionic) two-particle wave function [18]. There are different approaches used to describe the idea of Bose-Einstein correlations, namely the wave function approach, the quantum optical approach and the τ model approach [18][16]. We are going to use the wave function approach to describe the physics behind BEC because it allows an intuitive understanding and its output in form of a correlation function is used as a fit function in most of the experiments. We will follow the interpretation given in [18][15][16].

1.1 The wave function approach

1.1.1 Particle source

Let us begin with quantum mechanical description of a particle source. In case of a particle source which consists of discrete emission points we have a probability amplitude for each one of them

$$F_i(\mathbf{r}) = F_i\delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_i). \tag{1}$$

It describes the probability to produce a particle at space point $\mathbf{r}$. Let $\psi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ be the wave function of an emitted particle with momentum $\mathbf{k}$. Then we get the total probability *P(k)* of the emission of one particle with the momentum $\mathbf{k}$ from the whole source by summing the contributions $F_i\psi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}_i)$ from all discrete emission points i. Depending on the source type, the summation can be done in two different ways:

1) *coherent way* - this corresponds to the case when the phases of the discrete production amplitudes act coherently. It requires taking the phase into account, thus the summation of amplitudes. The coherent one-particle emission probability will be:

$$P_C(\mathbf{k}) = \left|\sum_i F_i\psi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}_i)\right|^2. \tag{2}$$

2) *incoherent way* - this corresponds to the case when the amplitudes of the discrete production amplitudes fluctuate. It allows to set the phase to zero,

[*] dohnalova9@uniba.sk
[†] Mgr. Róbert Astaloš, PhD.

thus the summation of probabilities. The incoherent one-particle emission probability will be:

$$P_I(\mathbf{k}) = \sum_i |F_i \psi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}_i)|^2. \quad (3)$$

Instead of a source with discrete emission points, let us consider a source with continuously distributed emission points. For simplicity we will assume plane wave functions $\psi_k(\mathbf{r}) \sim e^{i\mathbf{kr}}$ and the sums in the previous equations will be replaced by integrals. The one-particle emission probabilities will become

$$P_C(\mathbf{k}) = \left| \int F(\mathbf{r}) \psi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) d^3r \right|^2 \quad (4)$$

and

$$P_I(\mathbf{k}) = \int |F(\mathbf{r}) \psi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})|^2 d^3r = \int |F(\mathbf{r})|^2 d^3r. \quad (5)$$

Introducing a two-particle wave function $\psi_{\mathbf{k}_1,\mathbf{k}_2}(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_2)$ and the source emission probability function $f(\mathbf{r}) = |F(\mathbf{r})|^2$, the coherent and incoherent probabilities of emission of two particles with momenta $\mathbf{k}_1$ and $\mathbf{k}_2$ will be

$$P_C(\mathbf{k}_1,\mathbf{k}_2) = \left| \int F(\mathbf{r}_1) F(\mathbf{r}_2) \psi_{\mathbf{k}_1,\mathbf{k}_2}(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_2) d^3r_1 d^3r_2 \right|^2 \quad (6)$$

and

$$\begin{aligned} P_I(\mathbf{k}_1,\mathbf{k}_2) &= \int |F(\mathbf{r}_1) F(\mathbf{r}_2) \psi_{\mathbf{k}_1,\mathbf{k}_2}(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_2)|^2 d^3r_1 d^3r_2 \\ &= \int |\psi_{\mathbf{k}_1,\mathbf{k}_2}(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_2)|^2 f(\mathbf{r}_1) f(\mathbf{r}_2) d^3r_1 d^3r_2 \end{aligned} \quad (7)$$

1.1.2 Two-boson wave function

If there are two identical bosons emitted from two source points $\mathbf{r}_1$ and $\mathbf{r}_2$, which are subsequently detected, there is no way for us to assign the correct emission point to each particle with certainty (Figure 1).

As a result, the two boson wave function has to be symmetrical under particle exchange which leads to this form:

$$\psi_{\mathbf{k}_1,\mathbf{k}_2}(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[e^{i(\mathbf{k}_1\mathbf{r}_1+\mathbf{k}_2\mathbf{r}_2)} + e^{i(\mathbf{k}_1\mathbf{r}_2+\mathbf{k}_2\mathbf{r}_1)} \right] \quad (8)$$

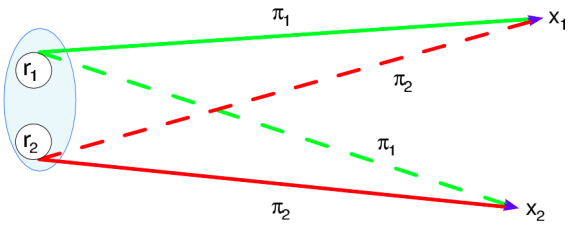


Figure 1: The two indistinguishable diagrams that describe the emission of two identical bosons, π_1 and π_2, emerging from two points, r_1 and r_2, which lie within an emitter volume, and are detected at the positions x_1 and x_2 [15].

so that

$$\begin{aligned} |\psi_{\mathbf{k}_1\mathbf{k}_2}(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_2)|^2 &= \frac{1}{2}\left[e^{i(\mathbf{k}_1\mathbf{r}_1+\mathbf{k}_2\mathbf{r}_2)} + e^{i(\mathbf{k}_1\mathbf{r}_2+\mathbf{k}_2\mathbf{r}_1)} \right] \\ &\quad \left[e^{-i(\mathbf{k}_1\mathbf{r}_1+\mathbf{k}_2\mathbf{r}_2)} + e^{-i(\mathbf{k}_1\mathbf{r}_2+\mathbf{k}_2\mathbf{r}_1)} \right] \\ &= 1 + \frac{1}{2}\left[e^{i\mathbf{q}\mathbf{r}_1} e^{-i\mathbf{q}\mathbf{r}_2} + e^{-i\mathbf{q}\mathbf{r}_1} e^{i\mathbf{q}\mathbf{r}_2} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

where $\mathbf{q}$ is the momentum difference $\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$.

After integration (Fourier transformation) of the coherent and incoherent probabilities (Eq. 6 and 7) with the two-boson wave function one obtains

$$P_C(\mathbf{k}_1,\mathbf{k}_2) = \left| \tilde{F}(\mathbf{k}_1) \tilde{F}(\mathbf{k}_2) \right|^2 = \left| \tilde{F}(\mathbf{k}_1) \right|^2 \left| \tilde{F}(\mathbf{k}_2) \right|^2 \quad (10)$$

and

$$P_I(\mathbf{k}_1,\mathbf{k}_2) = \left| \tilde{f}(0) \right|^2 + \left| \tilde{f}(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \right|^2, \quad (11)$$

where $\tilde{F}(\mathbf{k})$ and $\tilde{f}(\mathbf{k})$ are the Fourier transforms of $F(\mathbf{r})$ and $f(\mathbf{r})$ respectively.

1.1.3 Correlation function

The coherent two-boson probability (Eq.10) is equal to a simple product of two single-particle probabilities, meanwhile the incoherent two-boson probability (Eq. 11) is not factorizable and depends on the momentum difference $\mathbf{q} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$. This is where we introduce a correlation function of two identical bosons as a ratio of the two-boson probability and the product of two single-particle probabilities:

$$C_2(\mathbf{k}_1,\mathbf{k}_2) = \frac{P(\mathbf{k}_1,\mathbf{k}_2)}{P(\mathbf{k}_1)P(\mathbf{k}_2)}. \quad (12)$$

From the above mentioned, the C_2 correlation function is always equal to 1 for the coherent source and greater than 1 for the incoherent source.

Assuming the Cauchy-Lorentzian source model with spherical shape and with the emission probability in form of a Cauchy-Lorentz distribution

$$f(r) = \frac{1}{\pi} \frac{\frac{R}{2}}{r^2 + (\frac{R}{2})^2}, \tag{13}$$

the correlation function will become

$$C_2(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2) = 1 + e^{\mathbf{q}R}, \tag{14}$$

where R is the full width at half maximum (FWHM) of the distribution and it characterizes the source radius.

The Eq. 14 can be rewritten as

$$C_2(Q) = 1 + e^{-QR}, \tag{15}$$

replacing the three-momentum $\mathbf{q}$ by four-momentum Q as the energy difference of two identical bosons in their center-of-mass frame is zero.

The extrapolation of experimental correlation function to $\mathbf{q} = 0$ almost never led to the maximum value $C_2(Q) = 2$ permitted by Eq. 14. To take this into account, a correction factor λ was introduced to the function, giving it the form

$$C_2(Q) = 1 + \lambda e^{-QR}. \tag{16}$$

The Cauchy-Lorentzian source model was chosen because in some experiments it gave a better description of $C_2(Q)$ function than the formerly used Gaussian source model. The source emission probability in form of the Gaussian distribution leads to the following form of the correlation function

$$C_2(Q) = 1 + \lambda e^{(QR)^2}. \tag{17}$$

Both the Gaussian and the Cauchy-Lorentz distributions are special cases of the symmetric Lévy distribution. The Lévy distribution of emission probability leads to

$$C_2(Q) = 1 + \lambda e^{(QR)^\alpha}. \tag{18}$$

1.1.4 $C_2(Q)$ fit function

Two additional factors are introduced in the correlation function for experimental data evaluation:

- C_0 - normalization constant
- $(1+\varepsilon Q)$ - takes into consideration long-distance correlations which are present in the single-particle probability densities

The resulting fit function is

$$C_2(Q) = C_0\left[1 + \lambda e^{-QR}\right](1 + \varepsilon Q). \tag{19}$$

1.2 Experimental correlation function

The experimental correlation function is given by the ratio of the $N(Q)$ distribution of like-sign charged track pairs in the measured data (signal sample) to the $N^{ref}(Q)$ distribution of track pairs in reference sample

$$C_2(Q) = \frac{N(Q)}{N^{ref}(Q)}. \tag{20}$$

A good reference sample is meant to be identical to the signal sample except for the Bose-Einstein correlations.

1.2.1 Reference distributions

There are several types of reference distributions commonly used:

1. **Unlike-sign** (ULS) distribution - This distribution is constructed of tracks pairs with unlike-sign charge. Particles with different charge are not identical so there is no BEC among them. Its big disadvantage is the contribution of decay products of resonances to the distribution. Usually, the region of their biggest contribution is excluded from the fit, but not all the contributions can be excluded as the resonance region partially overlaps with the region of the BEC peak.
2. **Event mixing** (MIX) distribution - This distribution is constructed with pairs of tracks of the same charge taken from different events. All the events are split up into multiplicity intervals. Each event is then combined with two events from its multiplicity interval - the previous one and the following one, so the tracks

from each event are paired with tracks from two other events (except for the very first and very last event). No correlations will be present in this reference sample, as there are no correlations among particles from two different events. However, this reference sample creating technique produces the dominance of high Q values.

3. **Opposite hemisphere** (OHP) distribution - This distribution is constructed the same way as the signal distribution, except the momentum of one of the two tracks is inverted $(E,\vec{p}) \rightarrow (E,-\vec{p})$ before calculating the momentum difference Q. This reference sample creating technique preserves the energy of the track pair but it also produces the dominance of high Q values.

4. **Rotated track** (ROT) distribution - This distribution is also constructed almost the same way as the signal distribution, but this time the momentum vector of one of the two track is rotated by 180° around the beam direction $(E,p_x,p_y,p_z) \rightarrow (E,-p_x,-p_y,p_z)$ before calculating the momentum difference Q. This reference sample creating technique also preserves the energy of the track pair as well as the polar angle θ but it does not destroy the correlations in the signal sample, thus it is not suitable for the BEC studies.

1.2.2 $C_2^{MC}(Q)$ and $R_2(Q)$ functions

As mentioned before, a good reference sample is supposed to have the same correlations as the signal sample except for BEC. However, this is not always the case, as some of the reference samples do not preserve all the non-BEC correlations occurring in the signal sample. Also there may be additional correlations caused by a reference sample creating technique.

To eliminate (at least partially) the effects caused by a reference sample creating technique from the experimental correlation function, we can use the ratio of $C_2^{data}(Q)$ and $C_2^{MC}(Q)$ functions:

$$R_2(Q) = \frac{C_2^{data}(Q)}{C_2^{MC}(Q)} \tag{21}$$

For the construction of Monte Carlo correlation function $C_2^{MC}(Q)$, data from Monte Carlo simulations are used. In the ratio, all the effects present in both of the correlation functions will be cancelled out. This does not concern BEC, as they are not present in the MC. Thus in most cases the $R_2(Q)$ function is more suitable for BEC studies than the $C_2(Q)$ function.

2 ATLAS experiment

In this work, we will be using data from the ATLAS detector, which is one of the seven detectors at the LHC collider - the last element in the chain of the CERN accelerator complex, situated near Geneva on the Franco-Swiss border.

2.1 CERN accelerator complex

CERN (European Organization for Nuclear Research) accelerator complex is a sequence of particle accelerators.

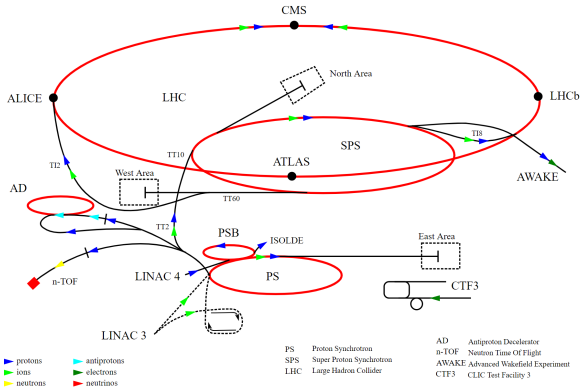


Figure 2: CERN accelerator complex [1].

At the beginning of the sequence there is a particle source. For example, a bottle of hydrogen gas is used as a proton source. Protons are then obtained by ionization of the hydrogen gas, which takes place in an electric field. The first accelerator - LINAC2, accelerates the protons to the energy of 50 MeV. The Proton Synchrotron Booster (PSB), the Proton Synchrotron (PS) and the Super Proton Synchrotron (SPS) come after and accelerate the protons to 1.4 GeV, 25 GeV and 450 GeV respectively. Finally, the protons are injected into the Large Hadron Collider (LHC) [2].

2.2 LHC collider

The Large Hadron Collider is the world's largest as well as the most powerful particle accelerator. It remains the latest addition to CERN accelerator complex, althought it is currently in shutdown since late

2018 undergoing planned upgrades. It lies in a 3.8 m wide and 27 km long circular tunnel, up to 175 m deep. The LHC is mainly used to collide proton beams, but other collisions such as lead-lead collisions and proton-lead collisions are done for limited periods of time as well.

The particles are injected into LHC entering two separate beam pipes kept at ultrahigh vacuum, where they travel in opposite directions at about 0.999 999 990 c. It takes 260 seconds to fill each LHC ring and 20 minutes for the protons to reach the maximum energy 6.5 TeV. The resulting total collision energy is 13 TeV - the world record up to date.

The collisions take place at four crossing points with seven detectors around them: ATLAS, CMS, ALICE, LHCb and much smaller TOTEM, MoEDAL and LHCf.

To keep the particles at their circular paths, 1232 bending dipole magnets are used and another 392 quadrupole magnets are used to keep the beams focused. Additional stronger quadrupole magnets are used near crossing points to maximize the chances of collision. Sextupole and octupole magnets are used to correct imperfections in the field geometry. In total, there are around 10,000 superconducting magnets in operation with their operating temperature of -271.25° achieved with approximately 96 tonnes of superfluid helium. [3][4][5]

2.3 ATLAS detector

ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) is the largest volume particle detector ever constructed, weighing 7,000 tonnes. It is cylindrical in shape, 25 m in diameter and 46 m long.

The ATLAS detector consists of six subdetectors designed to observe specific types of particles. They are arranged concentrically in layers around the collision point, where the beams of particles accelerated in the LHC collide, producing new particles escaping in all directions. Every second, over a billion particle interactions occur in the detector, from which only around a thousand are identified as potentially interesting and recorded for further analysis. [6][7]

2.3.1 Inner Detector

It is the common name for Pixel Detector, Semi-Conductor Tracker and Transition Radiation Tracker. Its function is to measure the direction, momentum and electrical charge of charged particles. It operates under the influence of a magnetic field parallel to the beam axis.

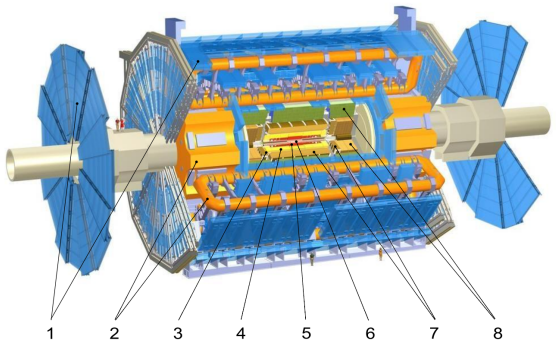


Figure 3: Computer generated cut-away view of the ATLAS detector showing its various components:(1) Muon Detectors, (2) Toroid Magnets, (3) Solenoid Magnet, (4) Transition Radiation Tracker, (5) Semi-Conductor Tracker, (6) Pixel Detector, (7) Liquid Argon Calorimeter, (8) Tile Calorimeter [8].

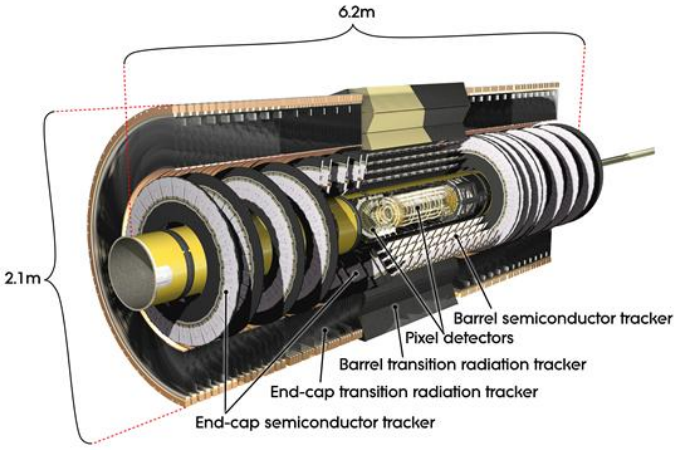


Figure 4: Computer generated image of the ATLAS Inner Detector and its components [9].

- **Pixel Detector**
  The Pixel Detector is the innermost part of the detector with silicon as the detecting material, consisting of a total of 92 million pixels (50 μm by 400 μm or 50 μm by 250 μm in the innermost layer). The pixels are divided between modules with readout chips and other electronic components, roughly 47,000 pixels per module (2 cm by 6 cm). There are 1736 sensor modules organized into four concentric layers and 288 mod-

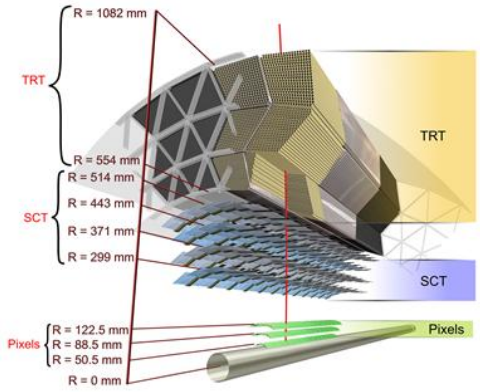


Figure 5: Computer generated image of the ATLAS Inner Detector - cross section [9].

ules on three discs in each end-cap. This allows very precise tracking in the very vicinity of the collision point.

- **Semi-Conductor Tracker**
  The Semi-Conductor Tracker is similar to the Pixel Detector, but it uses long silicon microstrips (80 μm by 12 cm) with over 6 million implanted readout strips ($>$ 6 million channels) instead of pixels for tracking in the plane perpendicular to the beam. In total there is 61 m^2 of silicon distributed over four concentric layers and 18 end-cap discs.

- **Transition Radiation Tracker**
  The Transition Radiation Tracker is a combination of a straw tracker and a transition radiation detector. The detecting elements are straw tubes (4 mm in diameter) filled with gas and a 0.03 mm diameter gold-plated tungsten wire in the center. There are 50,000 of them in the barrel with the length of 144 cm and 250,000 in the end-caps with the length of 39 cm. Both ends of the longer straws are read out separately resulting in a total of 350,000 readout channels. The gas in the straw becomes ionized when charged particle passes through. As the straws are under approximately -1,500 V, the negative ions travel to the wire and produce a signal. These signals allow the particle path to be reconstructed. Between the straws, materials with different refractive indices are used which causes highly-relativistic particles to emit transition radiation. This results in much stronger signals. Particles with many of these strong signals can be identified as the lightest charged particles - electrons and positrons, as they achieve higher speed at set energy.

[6][10]

2.3.2 Calorimeters

The calorimeters are situated outside the solenoidal magnet around the Inner Detector. They are designed to make the particles to lose all of their energy in interactions within the detector. The only known particles that pass through calorimeters are muons and neutrinos. There are two types of calorimeters in ATLAS due to different types of possible interactions -an inner electromagnetic calorimeter and an outer hadron calorimeter. Both of them are sampling calorimeters, meaning there are layers of passive absorber of high density metal alternating with active detector layer where part of the energy is sampled. Depending on the shape of the resulting particle shower, the energy of the particle can be figured out.

- **Electromagnetic calorimeter**
  The electromagnetic calorimeter absorbs energy from particles that interact via electromagnetic interaction - charged particles and photons. The absorbing materials are lead and stainless steel and the sampling material is liquid argon. A cryostat is needed to keep the electromagnetic calorimeter cool.

- **Hadron calorimeter**
  The hadron calorimeter absorbs energy from particles that interact via strong interactions after they have already passed through the electromagnetic calorimeter. The absorbing material is steel with sampling tiles from plastic scintillator.

[6][11]

2.3.3 Muon Spectrometer

Is an extremely large tracking system with detector area of 12,000 m^2 with about one million readout channels. The large size of the detector is necessary to measure the momentum of muons accurately. Magnetic field is also required for the momentum

measurements. It is provided by three toroidal magnets. Besides that, the spectrometer has 1,200 chambers for high spatial precision track measurements and a set of triggering chambers for accurate time-resolution. [6][12]

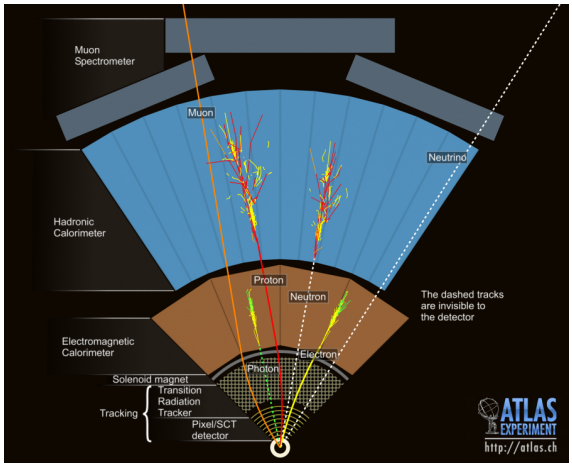


Figure 6: Event cross section in a computer generated image of the ATLAS detector [13].

2.3.4 Magnet system

As mentioned before, a magnetic field is required for momentum measurements. Due to Lorentz force acting on a charged particle moving in a magnetic field, the paths of the particles will curve. There will be significant curvature on the paths of high-momentum particles in contrast with almost no curvature in case of low-momentum particles. Two large superconducting systems are in the ATLAS detector.

- **Solenoid Magnet**
  The central Solenoid Magnet around the Inner Detector produces uniform magnetic field of 2T, which is strong enough for very energetic particles to have their momenta measured. Particles with energy lower than 400 MeV will most likely not be measured but this energy is negligible compared to the total collision energy of 13 TeV.

- **Toroidal Magnets**
  The outer Toroidal magnets are situated outside the calorimeters, within the Muon Spectrometer. There are eight very large air-core superconducting barrel loops and two end-caps air toroidal magnets in operation. Produced magnetic field is not uniform and it varies between 2 Tm an 8 Tm.

[6][14]

3 Results of fits of $R_2(Q)$ function using the MIX reference sample

One can see the effect of Bose-Einstein correlations in the resulting $C_2(Q)$ and $R_2(Q)$ functions (Fig.8 and Fig. 9) as a peak in the region of small Q values. If there were no BEC correlations, those functions would be constant. This is what we expect from the $C_2^{MC}(Q)$ function in the case of ideal reference sample since there are no BEC present in the MC. However that is not the case for the used event mixing reference sample creating technique, as we can see in Fig. 7.

This suggests there are additional correlations caused by the reference sample creating technique that affect the $C_2(Q)$ function. The possible explanation could by in the angular distribution of tracks in an event. The tracks are usually not distributed uniformly in the space after collision but several groups of tracks are created and the nearby tracks from the same group contribute to the standard distribution with low Q values. However, this does not happen when tracks from different event are combined thus

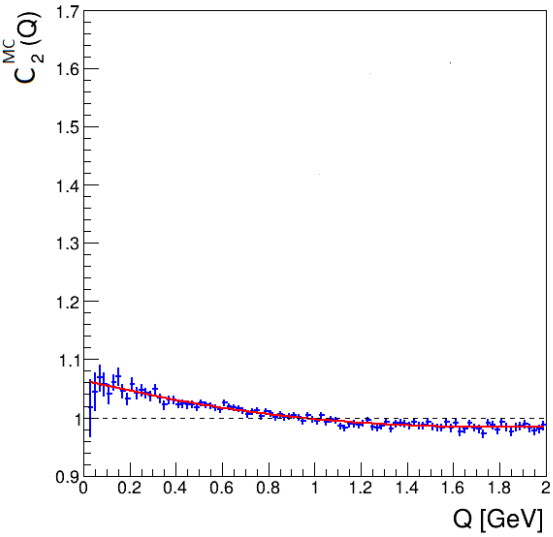


Figure 7: The $C_2^{MC}(Q)$ function for the event mixing reference sample creating technique.

there is a dominance of high Q values in the MIX reference sample distribution in comparison to the standard distribution [16]. This results in a slope in the $C_2(Q)$ function in the BEC region (such as seen in the $C_2^{MC}(Q)$ function in Fig.7), which affects the measurement of BEC and makes the $C_2(Q)$ function not suitable for the BEC studies. This problem can be solved by using the $R_2(Q)$ function. The difference between the $C_2(Q)$ function and $R_2(Q)$ function for different multiplicity and pair transverse momentum intervals is shown in Fig. 8 and Fig. 9.

The $C_2(Q)$ and $R_2(Q)$ functions are fitted by the function corresponding to the Cauchy-Lorentz distribution of the source emission probability in the wave function approach (Eq. 19). The fit parameters of the $R_2(Q)$ function for various multiplicity and pair transverse momentum intervals are in Tab. 1 and Tab. 2 respectively.

The R parameter which reflects the space-time characteristics of the hadronization region is shown as a function of multiplicity in Fig. 10 and as a function of pair transverse momentum in Fig. 11. It clearly increases with multiplicity which is expected from the assumption that more particles come from bigger hadronization region. In addition the R parameter decreases with pair transverse momentum, althought we can not be sure what is the trend for the highest intervals, as the errors are too big.

The λ parameter of the fit is also shown as a function of multiplicity (Fig. 12) and as a function of pair transverse momentum (Fig. 13). It decreases in both cases but again we can not be sure what is the trend for the highest intervals.

These results are dependent on the event mixing technique which can be done in several ways. We are currently working on another event mixing technique in an effort to achieve more constant $C_2^{MC}(Q)$ function. This would mean elimination of the effects caused by the reference sample creating technique. In the new technique, in addition to simply combine tracks from two events within same interval of multiplicity, we rotate the particle tracks so that the thrust axis of the two mixed events have the same orientation. (The thrust axis of an event is an axis for which the sum of momentum projections of all tracks in the event is maximized.)

References

[1] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/ba/Cern-accelerator-complex.svg.

[2] https://home.cern/science/accelerators/accelerator-complex.

[3] https://en.wikipedia.org/wiki/Large_Hadron_Collider.

[4] https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider.

[5] https://home.cern/science/accelerators/accelerator-complex.

[6] https://en.wikipedia.org/wiki/ATLAS_experiment.

[7] https://atlas.cern/discover/detector.

[8] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9c/ATLAS_Drawing_with_Labels.svg.

[9] https://cds.cern.ch/record/1095926.

[10] https://atlas.cern/discover/detector/inner-detector.

[11] https://atlas.cern/discover/detector/calorimeter.

[12] https://atlas.cern/discover/detector/muon-spectrometer.

[13] https://cds.cern.ch/record/1096081?ln=en.

[14] https://atlas.cern/discover/detector/magnet-system.

[15] G. Alexander. Bose-einstein and fermi-dirac interferometry in particle physics. *Reports on Progress in Physics*, 66, 02 2003.

[16] R. Astaloš. Bose-Einstein correlations in 7 TeV proton-proton collisions in the ATLAS experiment. 2015. Presented on 2015-09-30.

[17] G. Baym. The Physics of Hanbury Brown-Twiss intensity interferometry: From stars to nuclear collisions. *Acta Phys. Polon. B*, 29:1839–1884, 1998.

[18] R. Weiner. Boson interferometry in high-energy physics. *Physics Reports*, 327(5):249–346, 2000.

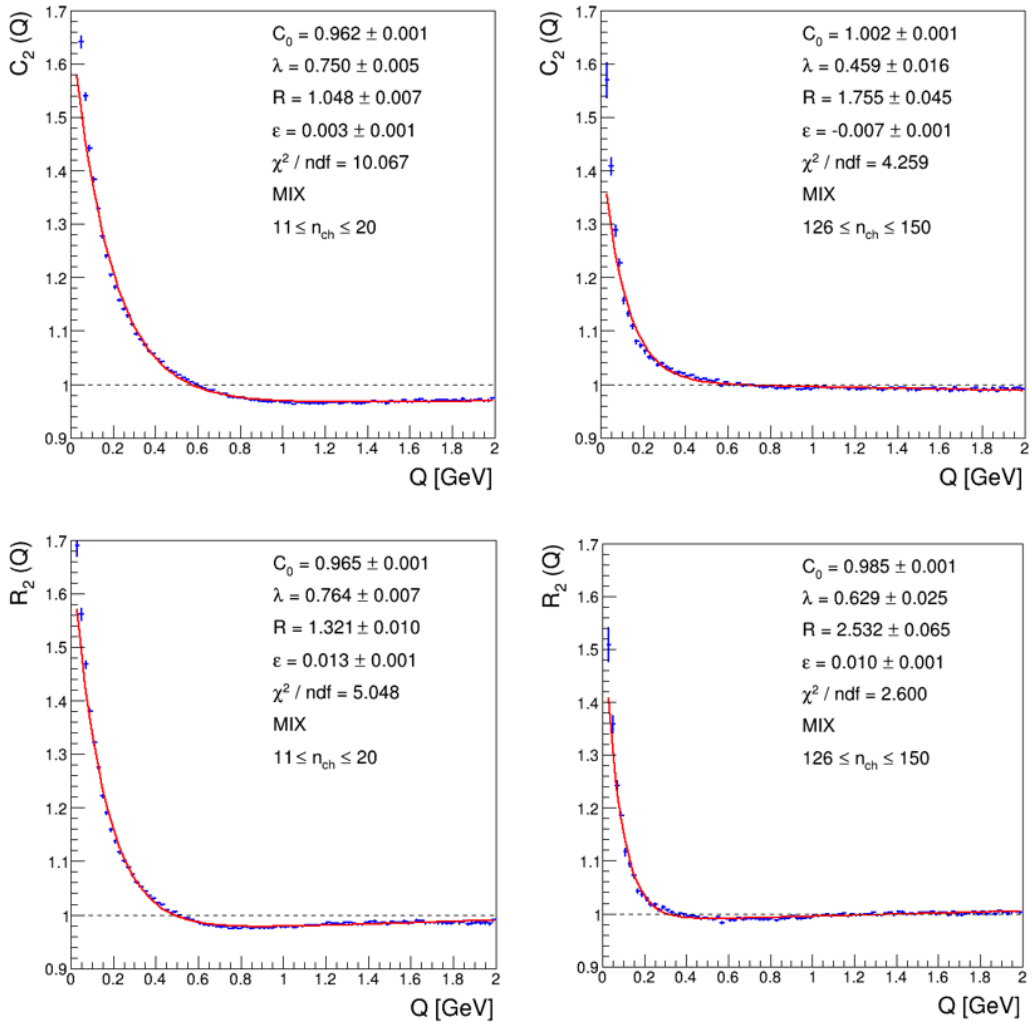


Figure 8: The data $C_2(Q)$ functions (top row) and $R_2(Q)$ functions (bottom row) with the MIX reference sample for an interval of low multiplicity (left column) and high multiplicity (right column) fitted by the exponential fit function (Eq. 19).

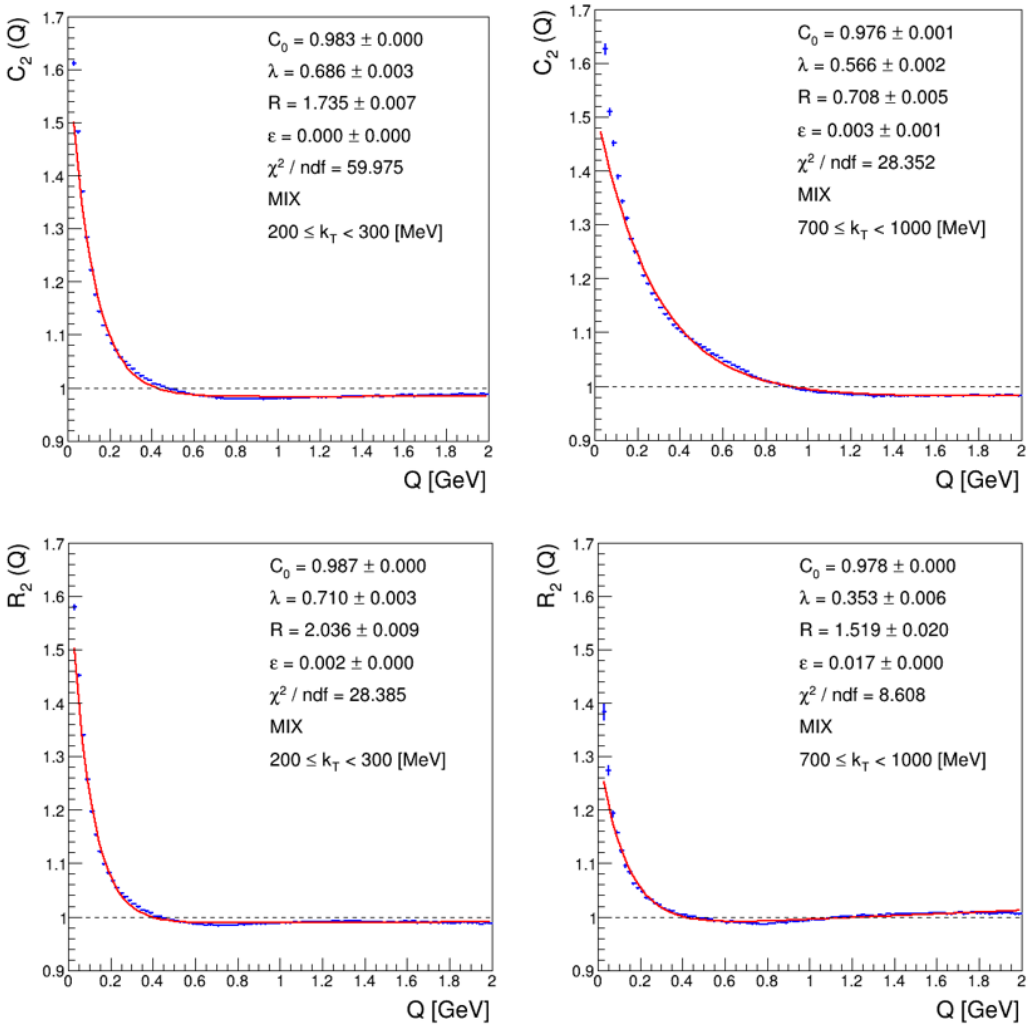


Figure 9: The data $C_2(Q)$ functions (top row) and $R_2(Q)$ functions (bottom row) with the MIX reference sample for an interval of low pair transverse momentum (left column) and high pair transverse momentum (right column) fitted by the exponential fit function (Eq. 19).

n	C_0	λ	R [fm]	ε [GeV^{-1}]	χ^2/ndf
2–10	0.884 ± 0.003	0.890 ± 0.008	0.912 ± 0.012	0.064 ± 0.002	1.647
11–20	0.965 ± 0.001	0.764 ± 0.007	1.321 ± 0.010	0.013 ± 0.001	5.048
21–30	0.964 ± 0.000	0.707 ± 0.007	1.628 ± 0.013	0.023 ± 0.000	9.577
31–40	0.968 ± 0.000	0.660 ± 0.007	1.741 ± 0.014	0.022 ± 0.000	10.577
41–50	0.972 ± 0.000	0.663 ± 0.007	1.886 ± 0.015	0.019 ± 0.000	9.701
51–60	0.976 ± 0.000	0.662 ± 0.008	2.034 ± 0.018	0.016 ± 0.000	10.091
61–70	0.978 ± 0.000	0.661 ± 0.009	2.122 ± 0.020	0.015 ± 0.000	8.713
71–80	0.980 ± 0.000	0.645 ± 0.010	2.173 ± 0.024	0.014 ± 0.000	7.360
81–90	0.981 ± 0.000	0.630 ± 0.012	2.221 ± 0.028	0.013 ± 0.000	5.383
91–100	0.983 ± 0.000	0.639 ± 0.015	2.355 ± 0.036	0.012 ± 0.000	5.018
101–125	0.984 ± 0.000	0.639 ± 0.014	2.432 ± 0.034	0.011 ± 0.000	5.587
126–150	0.985 ± 0.001	0.629 ± 0.025	2.532 ± 0.065	0.010 ± 0.001	2.600
151–200	0.986 ± 0.001	0.593 ± 0.045	2.563 ± 0.128	0.009 ± 0.001	1.790
201–250	0.981 ± 0.006	0.607 ± 0.183	2.172 ± 0.486	0.011 ± 0.005	1.017
2–250	0.983 ± 0.000	0.628 ± 0.003	1.851 ± 0.005	0.009 ± 0.000	63.317

Table 1: The results of exponential fit (Eq.19) of the $R_2(Q)$ correlation function with the MIX reference sample for different multiplicity intervals.

k_{T}	C_0	λ	R [fm]	ε [GeV^{-1}]	χ^2/ndf
100–200	0.979 ± 0.000	0.746 ± 0.006	1.959 ± 0.012	0.007 ± 0.000	9.082
200–300	0.987 ± 0.000	0.710 ± 0.003	2.036 ± 0.009	0.002 ± 0.000	28.385
300–400	0.992 ± 0.000	0.618 ± 0.004	1.895 ± 0.011	0.001 ± 0.000	28.173
400–500	0.995 ± 0.000	0.550 ± 0.005	1.765 ± 0.013	0.001 ± 0.000	17.745
500–600	0.993 ± 0.000	0.505 ± 0.006	1.658 ± 0.016	0.004 ± 0.000	11.242
600–700	0.988 ± 0.001	0.459 ± 0.008	1.595 ± 0.020	0.009 ± 0.000	6.654
700–1000	0.978 ± 0.000	0.353 ± 0.006	1.519 ± 0.020	0.017 ± 0.000	8.608
100–2000	0.983 ± 0.000	0.628 ± 0.003	1.851 ± 0.005	0.009 ± 0.000	63.317

Table 2: The results of exponential fit (Eq.19) of the $R_2(Q)$ correlation function with the MIX reference sample for different pair transverse momentum intervals.

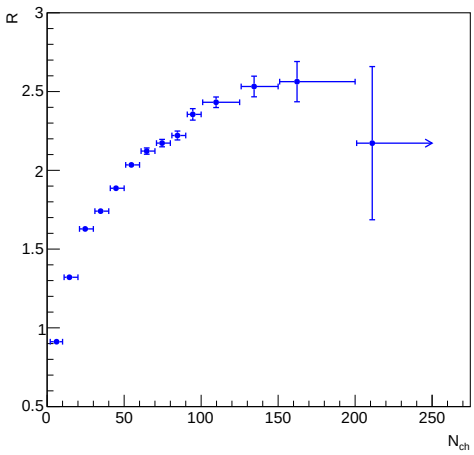


Figure 10: The exponential fit function parameter R as a function of multiplicity.

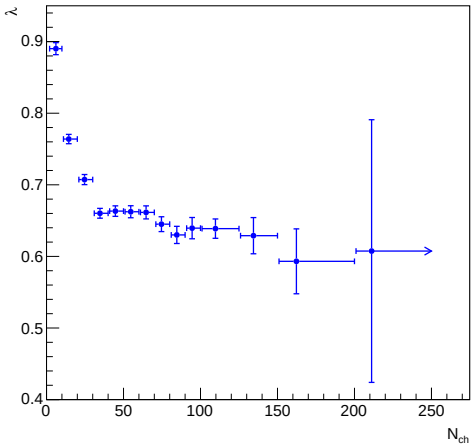


Figure 12: The exponential fit function parameter λ as a function of multiplicity.

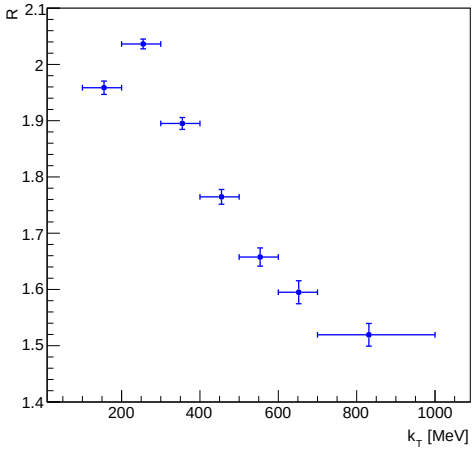


Figure 11: The exponential fit function parameter R as a function of pair transverse momentum.

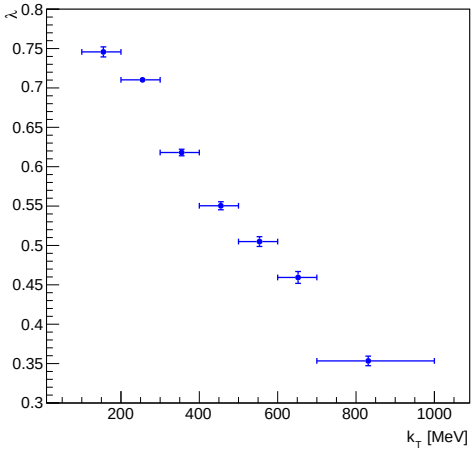


Figure 13: The exponential fit function parameter λ as a function of pair transverse momentum.

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 99–105
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Adam Broniš, Stanislav Antalic

Decay studies of new isomeric states in ^{255}No

Adam Broniš[1*] Stanislav Antalic[1†‡]

[1]Department of nuclear physics and biophysics, FMFI UK, Mlynská dolina 842 48 Bratislava

Abstract: In this project, the excited states of ^{255}No were investigated in two experiments by the conversion-electron correlation (CE-CE) technique. Two previously unobserved isomeric states were identified in ^{255}No. Tentative decay scheme of observed isomeric states in ^{255}No was proposed and their Nilsson configurations were discussed. Energy decrease of the 11/2-[725] Nilsson level in the region of $N=153$ isotones was firmly confirmed.

Keywords: nuclear isomers, conversion electrons, ^{255}No

1 Introduction

The isotope ^{255}No was observed for the first time in 1969 by Ghiorso et al. [A. Ghiorso, 1969]. Since then, its α decay was studied extensively [F. P. Hessberger, 2006], however these studies aimed at investigation of deexcitation scheme of daughter nucleus. No attempt was made to investigate ^{255}No. The problem in using γ-α spectroscopy to examine decay scheme of ^{255}No arose from the similarity of its most intense α decay line (8095 keV) to the α decay line of ^{254}No (8088 keV). Neighbouring isotope ^{254}No is produced with similar or larger cross-sections in all suitable fusion-evaporation reactions where ^{255}No is directly produced - ^{48}Ca+^{208}Pb, ^{22}Ne+^{238}U. Such energy overlap and also the presence of isomeric states in ^{254}No is making decay spectroscopy of ^{255}No challenging. Therefore, even after 50 years since identification of ^{255}No only low-energy states in ^{255}No were identified after α decay of ^{259}Rf [M. Asai, 2009]. These observations were in accord with quasiparticle level systematics of N=153 isotones [S. Cwiok, 1994] [A. Parkhomenko, 2004].

Theoretical calculations of quasiparticle level systematics of N=153 isotones have shown decrease in energy for the 11/2-[725] Nilsson level. This trend was also partially confirmed by the experimental results for $N=153$ isotones with Z=96 – 106, where even in the case of ^{259}Sg its ground state (g.s.) configuration is given by this 11/2-[725] Nilsson level (Fig. 1). In all of these isotopes isomeric state with lifetimes ranging from nanoseconds (^{249}Cm) to seconds (^{257}Rf) was identified.

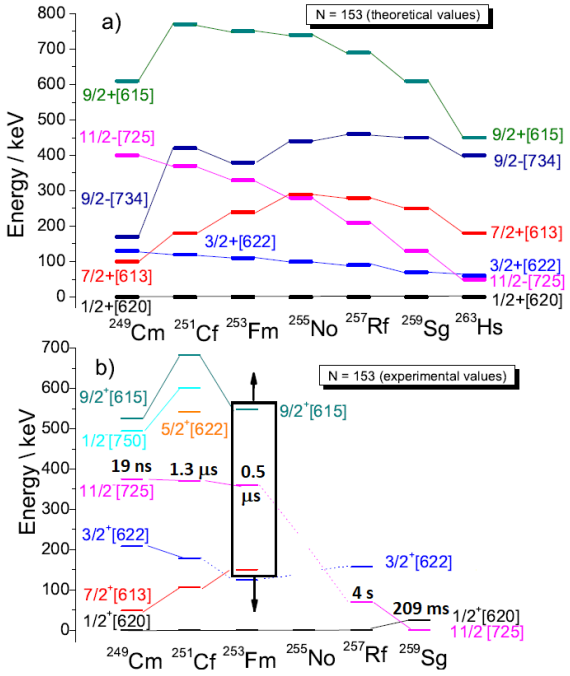


Figure 1 – Quasiparticle level systematics of $N=153$ isotones according to experimental values - a) and theoretical values - b) [S. Cwiok, 1994]. Figure was taken from [S. Antalic, 2013]

Moreover, in each case the existence of these long-lived states was based on the occurence of 11/2- high-spin excited level. The only isotope, which was not studied in regard to its excited levels was ^{255}No. Thus, its investigation can firmly confirm the decrease and position of the 11/2-[725] Nilsson level. Also, we can expect presence of another high-energy isomeric state in ^{255}No, similarly to their closest isotonic neighbours ^{253}Fm [S. Antalic, 2011] and ^{257}Rf [J. S. Berryman, 2010].

*adam.bronis@gmail.com
†stanislav.antalic@fmph.uniba.sk
‡Supervisor

2 Experiment

Data sets from two different experiments were analyzed. In the first one (Exp1), the target material ^{208}PbS with a thickness of $450\,\mu$g/cm^2 was irradiated by ^{48}Ca projectiles with a kinetic energy of 213.6 MeV accelerated by the UNILAC operating in pulse regime. In the second one (Exp2), the same target and projectile combination was used, however the two main experimental characteristics were different. First, the kinetic energy of projectiles ^{48}Ca was 218.4 MeV. Secondly, threshold of PSSD (position sensitive silicon detector) was significantly higher ((50 – 120) keV - Exp1 vs. (130 – 170) keV - Exp2).

The target material was covered by carbon foil with thickness $40\,\mu$g/cm^2 facing the beam of accelerated particles. The velocity filter SHIP was used to separate reaction products from the projectiles. Detector system was placed at the end of the separator. The evaporation residues (ER) were implanted into a position-sensitive 16-strip silicon PIPS detector (STOP). In front of the STOP detector another 6-segment strip silicon detector with box geometry was placed to measure particles escaped from the STOP detector. Behind the silicon detector 4-crystal HPGe detector (CLOVER/VEGA) was arranged to measure γ or X-rays emmited in prompt (Δt(particle-γ) $< 5\,\mu$s) or delayed (Δt(particle-γ) $> 25\,\mu$s) coincidence with signals from the STOP or BOX silicon detectors. In case of VEGA type detector four crystals with diameter 70 mm and 140 mm length were assembled in a block $(124\times 124\times 140)$ mm^3 . Same geometry was used for the SHIP Clover, where in this case each crystal has diameter (50-55) mm and length 140 mm with volume $(102\times 102\times 70)$ mm^3. Calibration of the HPGe detector was performed by using an external source of γ rays - ^{152}Eu and ^{133}Ba.

3 Conversion electron spectroscopy

Registration of conversion electrons (CEs) and γ quanta emitted in the process of deexcitation is a relatively new technique used, for example, in the investigation of high energy high-K isomeric states in ^{254}No [F.P. Hessberger, 2010]. The method using CEs was introduced by Jones at al. [Jones, 2002] as a way of detection of long-lived isomers in super-heavy elements. Main principle is using a position sensitive detector as an internal conversion electrons calorimeter. First use of CE-tagging method for K isomers in the transuranium region was in the study of ^{252}No [B. Sulignano, 2007]

Table 1 – Parameters of experiments in the decay study of the ^{255}No isomers. Excitation energies are calculated for the production in the middle of the target. Ge-det. stands for the type of Clover detector used as described in sect. 2.

Exp.	E /MeV	E^* /MeV	Irr. time	σ /nb	Ge det.
Exp1	213.6	17.3	77 500	$\approx$400	VEGA
Exp2	218.4	21.3	87 300	$\approx$120	SHIP

The condition of CE and γ quantum coincidence results in significant background suppression. Furthermore, with the additional condition of coincidence with X rays, it is possible to selectively assign deexcitation cascades to a given element. Technique of coincidences between conversion electrons and γ or K X-rays was successfully used for the identification of isomeric states in ^{253}Fm and ^{253}No by Antalic et. al. [S. Antalic, 2011] Furthermore, electron capture decay of ^{258}Db was studied by using the delayed coincidences between K X-rays and/or conversion electrons by Hessberger et al. [F.P. Hessberger, 2016]. Nevertheless, the main disadvantage of this method is, that for 80 % of CEs the position signal is missing and therefore all information from such correlation chain is lost.

3.1 Conversion electron correlation search

Our method is based on the registration of subsequent CEs. Its main advantage is that probability of registration of CEs is much higher than in the case of γ quanta (>50 % for CEs versus <10 % γ for quanta). Search for the correlations (Δt>25 μs) between implantation of the nucleus, and cascades of conversion electrons is performed. The number of possible positions was reduced to 16 - number of STOP detector

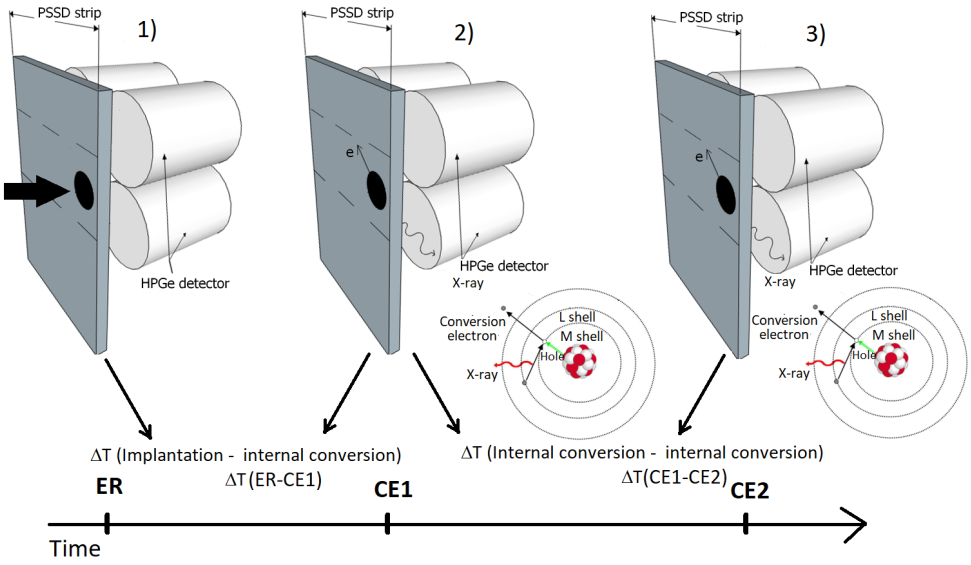


Figure 2 – Schematic of CE-CE correlation technique used in our work. 1) Implantation of reaction products into the position sensitive silicon detector - recoil signal ER. 2) Delayed deexcitation via internal conversion, emission of characteristic X-ray and CE - first conversion electron signal CE1. 3) Delayed deexcitation via internal conversion, emission of characteristic X-ray and CE - second conversion electron signal CE2.

strips, enabling to accept also events where the y-position signal of conversion electrons in individual strip is missing completely. Moreover, same strip condition of evaporation residue (ER) and subsequent CEs was required. This approach allows us to significantly increase the statistics of observed ER-CE-CE correlation chains (up to 25 times), therefore allow us to study also correlations which were not registered before. At the same time, the background suppression effect of conversion electron registration was not compromised, although for long correlation times, we can expect an increased number of random correlations.

Schematically, conversion electron spectroscopy in our study can be described in the following steps (Fig. 2):

1. Reaction products (black circle) in excited states are implanted into the position sensitive silicon detector.
2. Consequently, isomeric state in excited nuclei are deexcited via delayed cascades of converted transitions.
3. Additional delayed deexcitation of the energetically lower state via internal conversion.

We can summarize key characteristics of conversion electron spectroscopy into:

- As a very selective method, its application usually leads to considerable background suppression.
- Silicon detector works as a CE calorimeter. However, the discrimination level of the silicon detector has to be set as low as possible to register these CEs.
- Very high efficiency of this method in the region of heavy elements, since the internal conversion coefficient depends on the proton number as $\sim Z^3$, especially for low energy transitions.
- Conversion electrons can be used as a indicators of isomeric state decay, discriminating these decays from background and random coincidences.
- Calculator BrIcc [T. Kibédi, 2008] (Band-Raman Internal conversion coefficient) can be used to obtain internal conversion coefficient for given multipolarities.

The conversion electron correlation technique

was also successfully used in the recent investigation of isomeric states in ^{255}Rf [P. Mosat, 2020].

4 Data analysis

The main goal of the data analysis was to identify possible candidates for isomeric states in ^{255}No. Equally important was to find a reliable method, able to distinguish deexcitation of these states from the deexcitation of already identified isomeric states in ^{254}No. Three main approaches were used for this purpose. First, different distributions of CEs, secondly different lifetimes and finally partial cross-sections.

In the complete fusion reaction ^{48}Ca+^{208}Pb compound nuclei ^{256}No* were produced. In the case of Exp1 when the projectile energy was optimized for maximum yield of ^{255}No, its cross-section was slightly lower in comparison with ^{254}No. In Exp2 focused on the study of ^{254}No, cross-section for the 1n evaporation channel (^{255}No) was approximately 15 times lower in comparison with the 2n channel (Tab. 2).

Table 2 – Cross sections of ^{255}No, and ^{254}No in Exp1 and Exp2 .

	E_{exc}/MeV	σ_{exp}/nb
^{255}No	17.3	398 ± 50
	21.3	117 ± 30
^{254}No	17.3	619 ± 60
	21.3	1778 ± 200

An important characteristic of ^{255}No, observed in its α decay in both cases, was the coincidence summing of energies of conversion electrons and corresponding α particles which can be seen in the Fig. 3. As a result of this summation, energies of observed ^{255}No α decays were shifted to higher energies (Fig. 3). Moreover, for summation peaks, their energy distribution (FWHM) was wider (e.g. 8220 – 8320 keV - ^{255}No) in comparison with peaks where coincidence summing effect was not present (e.g. 7430 keV - ^{250}Fm).

4.1 Conversion-electron correlations

We searched for ER-CE correlations in both experiments. Time-difference window (Δt (ER-

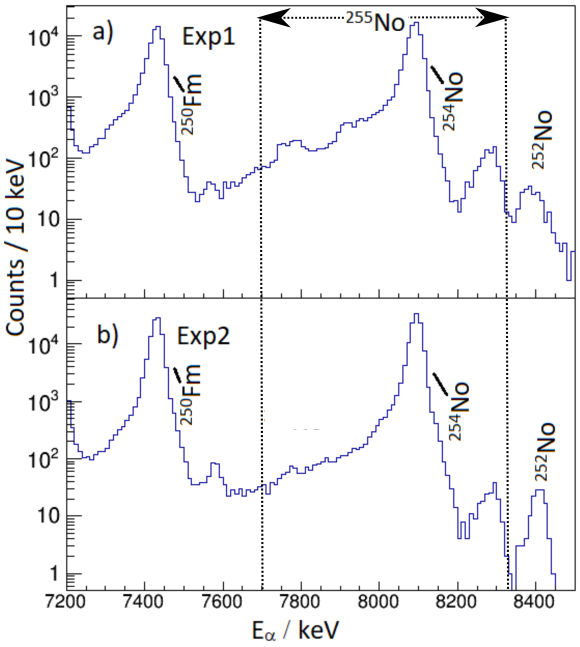


Figure 3 – Spectrum of α decays observed during beam pause in logarithmic scale from Exp1 - a) and Exp2 - b). Energies of ^{255}No α decays are partially overlapped by ^{254}No in the range 7700 – 8150 keV.

CE)) was set to 0 – 0.5 ms, to minimize random coincidences. Energy window for CEs was $E_{CE} = 0 - 900$ keV. Strong K X-rays of nobelium and 606 keV γ transitions were observed in coincidence with CEs in both experiments due to the deexcitation of the ^{254m2}No isomeric state ([F. P. Hessberger, 2006]). Furthermore, L X-rays of nobelium were present. In Exp1 657, 741 and 839 keV γ transitions were found in coincidence with first CEs. The latter two transitions together with 355 and 700 keV transitions were also observed in coincidence with the implanted ERs in Exp1. None of them were found either in coincidence with CEs or ERs in the Exp2. As a next step in our analysis we search for ER-CE1-CE2 correlations. Time-difference windows (Δt (ER-CE1), Δt (CE1-CE2)) were set to 0 – 1 ms. Energy windows were same for both CEs - $E_{CE} = 0 - 900$ keV. Same detector strip for registration of CEs and recoils was required. Thus, number of possible positions was reduced to sixteen. In these ER-CE1-CE2 correlations, same transitions as in ER-CE were observed in coincidence with the CE1 in Exp1 - 741 and 839 keV.

Moreover, also 657, 73 and 85 keV transitions with presumable L X-rays of nobelium were also identified.

We calculated the probability of registration of random coincidences. The method of K. H. Schmidt [K. H. Schmidt, 1984] was used in these calculations and the results were compared to the number of observed ER-CE or ER-CE-CE chains (Tab. 3).

Table 3 – Comparison of observed ER-CE or ER-CE-CE correlation chains to the calculated number of random correlation chains

Exp.	ER-CE exp./random	ER-CE-CE exp./random
Exp1	7387/88	465/0.08
Exp2	5378/95	155/0.07

Mean values of CE energies from deexcitation of isomeric states of ^{254}No and ^{255}No were compared in Exp2 (Fig. 4).

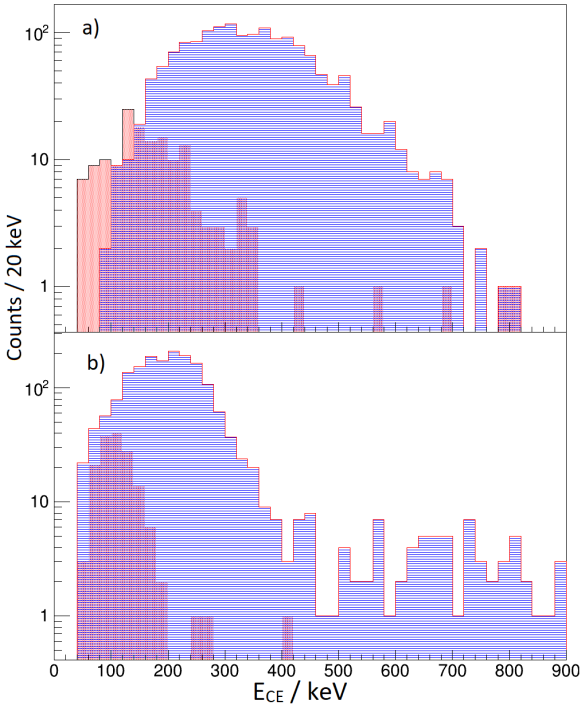


Figure 4 – a) Energy distributions of CEs in log scale from the deexcitation of ^{255m2}No - red and ^{254m2}No - blue. b) same as a), however from the deexcitation of ^{255m1}No and ^{254m1}No.

Significant differences in CE energy distributions were observed. Its mean value - $\bar{E}_{CE}$ - was more than 130 keV higher in the case of ^{254m2}No deexcitation - $\bar{E}_{CE} = 350 \pm 10$ keV - in comparison with ^{255m2}No - $\bar{E}_{CE} = 220 \pm 10$ keV (Fig. 4a)). Time-difference (ER-CE1, CE1-CE2) distributions were obtained from ER-CE1-CE2 correlation search in both experiments. Fitting of obtained time-differences (ER-CE1, CE1-CE2) using the exponential function lead to equal lifetimes within the uncertainties. These results were compared to the lifetimes of isomeric states in ^{254}No [F.P. Hessberger, 2010]. The half-lives of isomeric states in ^{254}No clearly differs from the ones attributed to ^{255}No . In the case of ^{255m1}No its life span is more than three orders shorter in comparison to ^{254m1}No.

Partial cross sections and their ratios were evaluated based on the number of observed correlation chains. Small differences in observed isomeric ratios (^{255m2}No, ^{254m2}No) reflect average spin population in the reaction [G. Henning, 2014]. In other words the probability of populating high-spin states increases with the energy of the reaction. For both isotopes ^{255m2}No and ^{254m2}No it has a compensating effect in the region of higher energies, therefore lowering their ratios.

It is possible to firmly assign observed ER-CE-CE correlations to the ^{255m2}No. Ratios of observed correlation chains follow the trend of ^{255}No in contrast with ^{254}No.

5 Discussion

5.1 Decay of ^{255m1}No

Spectra of γ rays in coincidence with second CEs from ER-CE-CE correlation chains was analysed. Only L X rays of nobelium are present, indicating that this low-energy isomeric states deexcites via low-energy (≤ 149.3 keV - K-shell binding energy of nobelium [F. T. Porter, 1978] [C. Thierfelder, 2008]) highly-converted transition/s to the ground state. Based on the neighbouring nuclei ^{253}Fm and ^{257}Rf, where the 11/2-[725] level is isomeric, and theoretical calculations [S. Cwiok, 1994], we attribute the same configuration to the low-energy isomeric state in ^{255}No.

Narrow distribution of energies of second CEs from ER-CE-CE correlations indicates a relatively simple decay path. The energy of the 11/2-[725] level can be estimated as a sum of maximum CE energy and binding energies of the electron on the *L*-shell (29.2 keV [F. T. Porter, 1978]). This excitation energy is in accord with theoretical quasiparticle level systematics in the region of $N = 153$ isotones ([S. Cwiok, 1994]), and confirms the decrease of its energy from ^{253}Fm to ^{259}Sg.

5.2 Decay of ^{255m2}No

Summed spectra of γ rays in coincidence with first CEs from ER-CE-CE correlation chains were investigated. Transitions with energies 657, 741 and 839 keV are present in Exp1. All of these transitions were observed also in coincidence with CEs from ER-CE correlations with approximately twofold intensities. Latter two transitions were previously tentatively assigned to ^{255}No [F.P. Hessberger, 2010].

We observed 741, 839 and 701 keV γ-rays also in coincidence with the implanted ERs. This observation indicates that the first two transitions are not stemming directly from the high-energy isomer. Therefore, at least one another level must be present. The wide distribution of first CEs from ER-CE-CE suggests cascade/s of highly converted transitions as a part of the high-isomeric state deexcitation path. We tentatively interpret these transitions as members of the 11/2-[725] band similar to the levels in ^{257}Rf [J. S. Berryman, 2010].

Based on the observed γ transitions in coincidence with ERs or CEs from ER-CE-CE correlation chains, we can propose a tentative decay scheme (Fig. 5). We denoted the high-energy isomeric state as *K* isomer, and the low-energy as spin isomer (Fig. 5).

6 Conclusions

A technique of CEs correlation was introduced and data sets from two experiments were analysed. Two isomeric states in ^{255}No were identified for the first time. Moreover, a tentative scheme

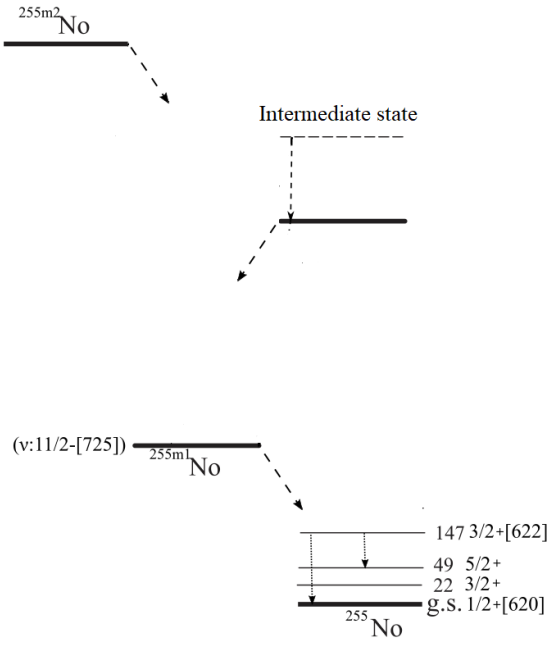


Figure 5 – Tentative decay scheme of isomeric states in ^{255}No. Dotted lines represent depopulation of levels identified after α decay of ^{259}Rf [M. Asai, 2009]. Placement of dashed lines is only tentative.

of isomeric states in ^{255}No was proposed and possible Nillson configurations of populated levels were assigned. The conversion-electron correlation technique has proven to be an invaluable tool in the study of ^{255}No. Further details of this study regarding the isomeric states in ^{255}No will be published.

Acknowledgements

I would like to thank my supervisor, doc. Mgr. Stanislav Antalic, PhD. for many insightful discussions, and Mgr. Dušan Štefánik, PhD. for his patience with my questions.

References

[A. Ghiorso, 1969] A. Ghiorso, e. a. (1969). Positive identification of two alpha-particle-emitting isotopes of element 104. Phys. Rev. Lett., 22:1317–1320.

[A. Parkhomenko, 2004] A. Parkhomenko, e. a. (2004). Neutron oone-quasiparticle states of heaviest nuclei. Acta. Phys. Pol. B, 35:356–394.

[B. Sulignano, 2007] B. Sulignano, e. a. (2007). Identification of a k isomer in ^{252}No. Eur. Phys. J. A, 33:327–331.

[C. Thierfelder, 2008] C. Thierfelder, e. a. (2008). Dirac-hartree-fock studies of x-ray transitions in meitnerium. Eur. Phys. J. A, 36:227–231.

[F. P. Hessberger, 2006] F. P. Hessberger, e. a. (2006). Alpha-gamma decay studies of 255no. Eur. Phys. J. A, 29:165–173.

[F. T. Porter, 1978] F. T. Porter, e. a. (1978). Recommended atomic electron binding energies, 1s to 6p3/2, for the heavy elements, z=84 to 103. J. of Phys. and Chem. Data, 7:1267–1284.

[F.P. Hessberger, 2010] F.P. Hessberger, e. a. (2010). Decay studies of K isomers in ^{254}No. Eur. Phys. J. A, 43:55–66.

[F.P. Hessberger, 2016] F.P. Hessberger, e. a. (2016). Investigation of electron capture decay of ^{258}Db and α decay of ^{258}Rf. Eur. Phys. J. A, 52:328–340.

[G. Henning, 2014] G. Henning, e. a. (2014). Fission barrier of superheavy nuclei and persistence of shell effects at high spin: Cases of ^{254}No and ^{220}Th. Phys. Rev. Lett., 113:0343101–12.

[J. S. Berryman, 2010] J. S. Berryman, e. a. (2010). Electromagnetic decays of excited states in ^{261}Sg (Z=106) and ^{257}Rf (Z=104. Phys. Rev. C, 81:0643251–6.

[Jones, 2002] Jones, G. (2002). Detection of long-lived isomers in super-heavy elements. Nucl. Instr. and Meth. A, 488:471–472.

[K. H. Schmidt, 1984] K. H. Schmidt, e. a. (1984). Some remarks on the error analysis in the case of poor statistics. Z. Phys. A, 316:19–26.

[Lobner, 1968] Lobner, K. E. G. (1968). Systematics of absolute transition probabilities of k-forbidden gamma-ray transitions. Phys. Lett., 26:369–370.

[M. Asai, 2009] M. Asai, e. a. (2009). Alpha-gamma spectroscopy of 259rf produced by using a mixed cf target. JAEA review 2009, 36:37–38.

[P. Mosat, 2020] P. Mosat, e. a. (2020). K isomerism in ^{255}Rf and total kinetic energy measurements for spontaneous fission of ^{255,256,258}Rf. Phys. Rev. C, 101:0343101–12.

[S. Antalic, 2011] S. Antalic, e. a. (2011). Isomeric states in ^{253}No and ^{253}Fm. Eur. Phys. J. A, 47:62–75.

[S. Antalic, 2013] S. Antalic, e. a. (2013). Nuclear structure of heavy N=153 isotones. Acta Phys. Pol. B, 44:387–390.

[S. Cwiok, 1994] S. Cwiok, e. a. (1994). Shell structure of the heaviest elements. Nucl. Phys. A, 573:356–394.

[T. Kibédi, 2008] T. Kibédi, e. a. (2008). Evaluation of theoretical conversion coefficients using BrIcc. Nucl. Instr. and Meth. A, 589:202–229.

[W. Reisdorf, 1992] W. Reisdorf, e. a. (1992). How well do we understand the synthesis of heavy elements by heavy-ion induced fusion? Z. Phys. A, 347:47–57.

[Weisskopf, 1951] Weisskopf, V. F. (1951). Radiative transition probabilities in nuclei. Phys. Rev., 83:1073–1073.

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 106–114
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Adam Sitarčík, Stanislav Antalic

Origin of the high-energy signals in the reaction ^{40}Ar+^{197}Au→^{237}Bk*

Adam Sitarčík[1*] Stanislav Antalic[1†‡]

Katedra jadrovej a subjadrovej fyziky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstract: In the presented work, origin of four high-energy signals observed in data acquired from the reaction ^{40}Ar+^{197}Au→^{237}Bk* is discussed. All four high-energy signals were registered in prompt coincidence with γ quanta, which preliminary suggested their fission-like character. Several processes are potentially able to yield such high-energy signals, the most interesting one is beta-delayed fission (βDF) of ^{234}Bk. βDF of ^{234}Bk is expected to occur with very high probability. Investigation and potential confirmation of βDF in ^{234}Bk would help to extend data for βDF in the neutron-deficient isotopes.

Detailed analysis of the data excluded some possible sources of high-energy signals. However, no clear evidence for the presence of ^{234}Bk was found. The limits for the detection of ^{234}Bk were estimated using statistical approach and known properties of the related nuclei. An upper limit for the production cross section of ^{234}Bk was determined to be around 20 pb.

Keywords: beta-delayed fission, nuclear fission, alpha decay,

1 Introduction

Delayed fission after β decay (βDF) is an exotic type of nuclear disintegration. It couples β decay - either β^{+}, β^{-} or electron capture (EC) - with fission into one process. It occurs mainly in the neutron-deficient and neutron-rich region, where nuclei tend to have rather high Q_{β} values and low fission barriers. Delayed fission represents a powerful tool for studies of low-energy fission, which provides useful information about microscopic shell effects and fission barriers. Another importance of βDF lies in its role in the termination of rapid neutron capture process in the neutron-rich region during nucleosynthesis. However, βDF is a very rare process, which was studied only in around 30 nuclei so far, therefore additional data are much needed.

*adam.sitarcik@fmph.uniba.sk
†stanislav.antalic@fmph.uniba.sk
‡Supervisor

2 Theoretical background

2.1 Alpha decay

Unstable nuclei heavier than lead ($Z > 82$), tend to gain additional stability through several decay processes, most commonly by an alpha decay. During an α decay, decaying nucleus emits an α particle - 2 protons and 2 neutrons bound together as a nucleus of helium $^{4}_{2}$He:

$$ {}^{A}_{Z}X_{N} \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y_{N-2} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \tag{1} $$

According to the quantum-mechanical theory [Gamow, 1928, Gurney and Condon, 1928], α particle is preformed within the nucleus, prior to the decay. Since the potential barrier of nucleus is significantly higher than the energy of an α particle, particle's energy should not be high enough to escape the nucleus. However, quantum tunneling of α particles through the potential barrier makes α decay possible.

The energy released during an α decay, Q value, can be calculated from the nuclear masses of mother and daughter nuclei as

$$ Q_{\alpha} = [m({}^{A}_{Z}X_{N}) - m({}^{A-4}_{Z-2}Y_{N-2}) - m(\alpha)]c^{2} = \\ = E_{\alpha} + E_{D} \tag{2} $$

where E_{α} and E_{D} are kinetic energies of emitted α particle and daughter nucleus, respectively. Using the laws of conservation of energy and momentum, we can further express Q value of the decay as:

$$ Q_{\alpha} = E_{\alpha}\frac{m({}^{A-4}_{Z-2}Y_{N-2}) + m(\alpha)}{m({}^{A-4}_{Z-2}Y_{N-2})} \approx E_{\alpha}\frac{A}{A-4} \tag{3} $$

As we can see, majority of an α decay energy is carried away by an α particle, and only small amount is carried as a recoil energy of a daughter nucleus.

Strong dependence of α decay half-life to its Q value was shown in [Geiger and Nuttall, 1911], now known as Geiger-Nuttall law:

$$ \log T_{1/2} = \frac{a(Z)}{\sqrt{Q_{\alpha}}} + b(Z) \tag{4} $$

where $a(Z)$ and $b(Z)$ are variables for each of the isotopic series. Several theoretical approaches

for calculation of the α decay half-lives were developed, for example Semi-empirical relationship based on fission theory of α decay - SemFIS model [Poenaru et al., 1980, Poenaru et al., 2006]. This model also includes effects of the closed nuclear shells, which provide additional stability.

2.2 Beta decay

During β^+ (β^-) decay, unstable nuclei are able to reach more stable states by transforming one proton (neutron) into a neutron (proton) accompanied with an emission of positron (electron) and electron (anti)neutrino. Similar process to β^+ decay is electron capture (EC), where proton captures electron and converts itself into neutron while emitting a neutrino. Energy spectrum of emitted electrons from β decay is continuous, due to difficult detection of neutrinos. Q value of β decay can be calculated from atomic masses of parent and daughter nuclei as:

$$\begin{aligned} \beta^-: &\quad Q_{\beta^-} = [m_a({}^A_Z X_N) - m_a({}^A_{Z+1} Y_{N-1})]c^2 \\ \beta^+: &\quad Q_{\beta^+} = [m_a({}^A_Z X_N) - m_a({}^A_{Z-1} Y_{N+1}) - 2m_e]c^2 \\ \mathrm{EC}: &\quad Q_{\mathrm{EC}} = [m_a({}^A_Z X_N) - m_a({}^A_{Z-1} Y_{N+1})]c^2 \end{aligned} \tag{5}$$

After β decay, nucleus is usually left in an excited energetic state. De-excitation can occur either as an emission of γ rays, emission of an electron through the process of internal conversion or in some cases, it de-excites through fission.

2.3 Fission

The most violent way a nucleus can gain additional stability is by nuclear fission. Here, unstable nucleus splits usually into two lighter fission fragments (FF). Difference between binding energies is converted into a total kinetic energy of fragments (TKE) as well as emitted in the form of γ rays or particles (α particles, nucleons). Liquid-drop model, describing atomic nucleus as a drop of nuclear liquid, was developed shortly after the discovery of fission, [Bohr and Wheeler, 1939]. The force preventing nuclei from instantaneous fission is represented by the fission barrier. According to the liquid-drop model, fission barrier decreases with increasing mass and atomic numbers. Heavy nuclei should instantaneously decompose by fission. Microscopic nuclear shell effects prevent an instant decomposition and provide additional stability. Effect of microscopic nuclear shells on fission barrier in the regions of fully closed shells ($N = 8, 20, 28, 50, 82, 126, 184$ and $Z = 8, 20, 28, 50, 82$) is shown in figure 1.

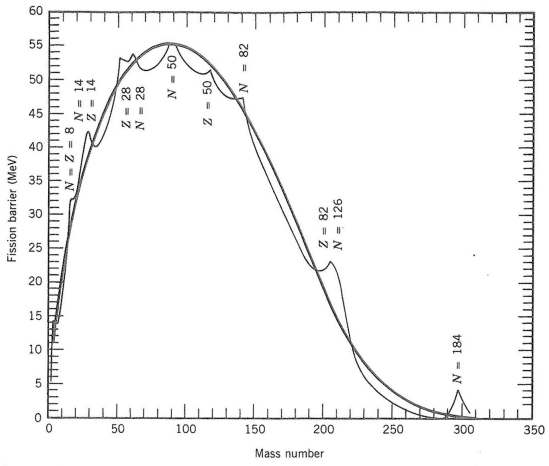


Figure 1: Schematic comparison of fission barriers according to liquid-drop model (thick line) and its shell correction (thin line). Closed nuclear shells are depicted. Figure taken from [Myers and Swiatecki, 1966].

Shell effects become negligible in the states with high excitation energy. Therefore, fission from low energy levels is a great tool for the study of microscopic shell corrections. Elements in the middle of valley of the stability from around thorium to rutherfordium are greatly accessible by spontaneous (SF) or particle-induced fission. Electromagnetically induced fission extended our studies into the region of neutron-deficient astatine-radon isotopes. Delayed fission after β decay makes neutron-deficient isotopes in the berkelium and lead region accessible for studies of low-energy fission.

2.4 β-delayed fission

In this rare type of nuclear disintegration, nucleus firstly undergoes beta decay, either β^+, β^- or EC, which populates excited states in the daughter nucleus. This excessive energy can be emitted in the form of γ-rays or particles (α, nucleons). If the excitation energy is comparable or higher than the fission barrier of a daughter nucleus, it can undergo fission (figure 2). This process happens instantly after the β decay with the same half-life, hence the name β-delayed fission.

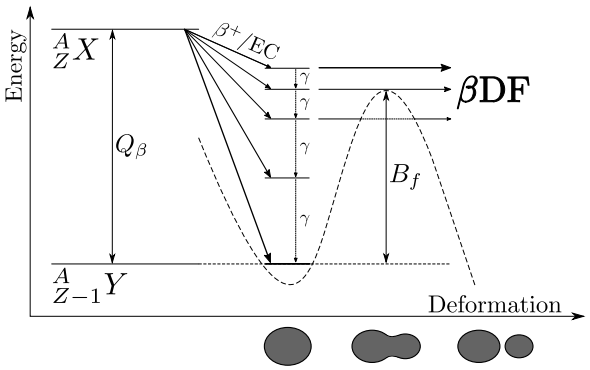


Figure 2: Schematic representation of β^+/EC DF. Curved line represents potential energy and also fission barrier of the daughter nucleus with respect to the deformation of the nucleus.

Since an excitation energy of the daughter nucleus is limited by the Q_β value, optimal region is further from the line of β-stability, to reach sufficiently high values. However, branching ratio for β decay decreases for more neutron deficient nuclei. Typically, sufficient β branching ratio should be $b_\beta > 1\%$. Furthermore, fission barrier has to be low enough, which is fulfilled in the region of heavy elements (such as francium and berkelium), see figure 3.

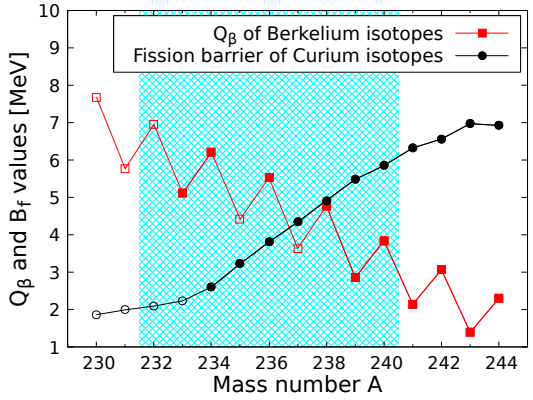


Figure 3: Q_β values of berkelium isotopes in comparison to fission barriers of curium isotopes (taken from [Möller et al., 1997] and [Möller et al., 2009], respectively). Blue region denotes possible ECDF, filled symbols are for experimentally observed isotopes.

So far, βDF was observed exclusively in the nuclei with odd number of protons and nucleons (odd-odd nuclei). Odd-odd nuclei has higher Q_β value than other nuclei. This difference is caused by the unpaired proton and neutron within the nucleus and therefore increased instability. Higher Q value enables population of the excited states with higher energy and thus the FFs overcome the fission barrier with higher probability.

Secondly, after the β decay, one nucleon transforms into the another, which changes an odd-odd nucleus into an even-even one. In the even-even nuclei, fission probability increases rapidly (in nuclei with unpaired nucleon, fission probability is hindered by several orders of magnitude).

An important feature of the βDF is its low-energy character, which allows us to study most exotic cases of low-energy fission. Another significance of the β^-DF is its role in the termination of a rapid neutron-capture process (r-process). r-process is taking place in supernovae and is a dominant way of the production of elements heavier than iron (up to the super-heavy region). Here, due to the extremely high neutron densities and high temperatures, nucleus captures neutrons to become a neutron-rich one, prone mainly to the β^- decay. The β^- decay "moves" neutron-rich nuclei towards the line of β-stability. Significant role of the β^-DF comes into play here, when nucleus splits by fission after β^- decay rather than gaining mass limitlessly (expected region is in the super-heavy elements, $A \geq 280$). This is referred to as the termination of the r-process or fission recycling process. This process has an influence on the abundance of elements, which allows to determine the age of the galaxy by actinide chronometers [Thielemann et al., 1983]. However, βDF in neutron-rich nuclei decaying by β^- decay is not studied well due to the production limitations and is mainly a subject to the theoretical predictions. Systematics obtained from the studies of the β^+/EC-delayed fission in neutron-deficient region can be similar to those in neutron-rich region (where β^-DF occurs) and bring a new insight into the r-process termination and nucleosynthesis in stars.

Important characteristic of βDF is its probability. Probability of βDF can be derived from theoretical considerations [Hall and Hoffman, 1992] as

$$P_{\beta\mathrm{DF}} = \frac{\int_0^{Q_\beta} W_\beta(Q_\beta - E)\frac{\Gamma_f}{\Gamma_{tot}}(E)\mathrm{d}E}{\int_0^{Q_\beta} W_\beta(Q_\beta - E)\mathrm{d}E} \qquad (6)$$

where $W_\beta(Q_\beta - E)$ is the transition probability function for β decay, $(\Gamma_f/\Gamma_{tot})(E)$ is the ratio of the fission width to the total width of depopulation of excited levels within the daughter nucleus and E is the excitation energy of the daughter nucleus.

Experimentally, $P_{\beta\mathrm{DF}}$ can be expressed as a ratio between number of βDFs to the total number of β decays:

$$P_{\beta\mathrm{DF}} = \frac{N_{\beta\mathrm{DF}}}{N_\beta} \tag{7}$$

Another important feature of βDF is the partial half-life:

$$T_{1/2,\beta\mathrm{DF}} = \frac{T_{1/2}}{b_\beta P_{\beta\mathrm{DF}}} \tag{8}$$

The probability and partial half-life of βDF show logarithmic dependence on the difference $Q_\beta - B_f$. However, $P_{\beta\mathrm{DF}}$ can reach up to the saturated levels ($\sim$ 100%), therefore, half-life dependence is more suitable especially in the very neutron-defficient region.

3 Experimental background

3.1 SHIP

Separator for Heavy Ion reaction Products (SHIP) located in GSI Darmstadt, Germany, is used for a velocity separation of the reaction products produced by the fusion-evaporation reactions. Beam of projectiles is provided by the UNILAC (Universal Linear Accelerator), which can deliver beam of stable elements up to uranium ($Z = 92$) with energies up to 20 MeV per nucleon. Accelerated projectiles are then focused onto a target material usually $(150 - 450)$ μg/cm^2 thick. Target consists of 8 foils arranged in a circle (evaporated on a carbon foil, around 35 μg/cm^2 thick), to spread the energy of the beam. Another carbon foil with thickness of $(30 - 60)$ μg/cm^2 is placed behind the target. Target wheel is rotating synchronously to the beam macrostructure at a frequency of 18.75 Hz, with $\sim$ 5 ms of beam-on and $\sim$ 15 ms beam-off period.

Reaction products are separated by the SHIP, placed behind the target wheel. Magnetic quadrupoles arranged into triplets serve as focusing lenses for scattered reaction products. The reaction products have velocities smaller than the projectiles - resulting from the conservation of momentum. The system of electric deflectors and magnetic dipoles can be adjusted to specific E/B ratio, permitting particles with particular velocity to pass the filter. Behind the velocity filter is another quadrupole triplet, for focusation of the products into the detector setup. Another magnetic dipole is placed behind the second quadrupole triplet, to provide 7.5° deflection for further background reduction. Separator is schematically shown in figure 4.

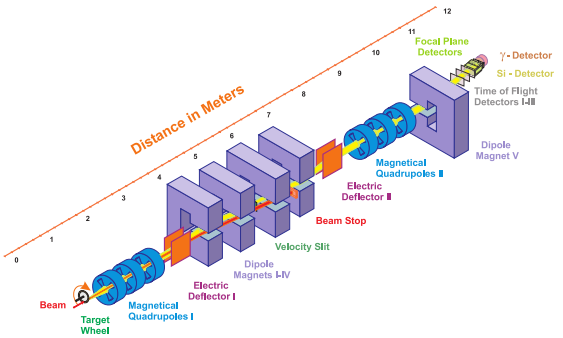


Figure 4: Velocity filter SHIP in GSI (Darmstadt, Germany).

3.2 Detector setup

Reaction products are focused into the detector area (figure 5). First set of detectors are two or three pairs of thin carbon foils (30 μg/cm^2 thick), serving as time-of-flight (TOF) system. It provides start and stop signal for passing particles (stop signal can be obtained also from the PSSD). Time resolution of the TOF system is $\sim$ 700 ps and the transparency is 100%. TOF system in anti-coincidence with STOP detector provides very efficient background reduction.

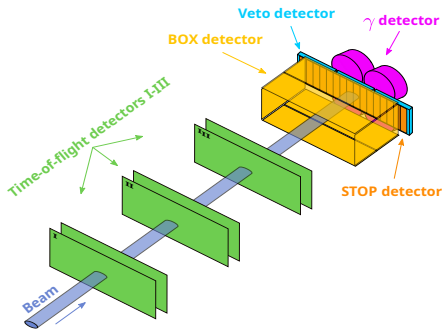


Figure 5: Detector setup behind the SHIP.

Main part of the detector system is position sensitive silicon detector (PSSD), placed in the focal plane

of the beam. Since reaction products are stopped in the PSSD, it is also called STOP detector. STOP detector consists of 16 strips, 300 μm thick, each with dimension of 5×35 mm^2. Resistive layer enables measurement of the charge distribution along the strip and accurate position identification. Vertical position resolution of STOP detector is around 150 μm (FWHM), due to the pulse height defect it should be considered at least 0.5 mm. Energy resolution of PSSDs is 20 – 30 keV. An implantation depth of evaporation residues ($4-7$ μm) is shorter than the range of α particles in the silicon (~ 40 μm). Therefore, α particles can escape the STOP detector in backward direction, which leads to a geometric efficiency of $\sim 54\%$ for detection of full energy of α particles. To increase geometric efficiency, another six PPSDs are arranged in a box-like shape in front of the STOP detector (BOX detectors). Geometrical efficiency of STOP+BOX setup is around $\sim 80\%$ of 2π with an energy resolution of ~ 70 keV.

Further behind the STOP detector is another silicon detector (VETO detector) to detect particles that passed through STOP detector and were not registered by the TOF system.

The last part of the detector array is a germanium clover detector for γ and X ray registration. Clover detector provides useful spectroscopy information in case of higher production yields.

Calibration of the detection system

Several calibrations are necessary in order to obtain useful information from the measured reaction. The most important one is the STOP detector calibration - especially low-energy and position calibration. Low-energy calibration is needed for an accurate determination of energies up to 16 MeV (mainly α decays). Position calibration synchronizes position determination between low-energy and high-energy branches of the electronics, used in the signal processing.

Products of the transfer reactions in ^{40}Ar+^{209}Bi (measured before the main reaction) were used as the reference signals for low-energy calibration. High-energy branch of the STOP detector was calibrated using full energy projectiles (adjusted by losses in TOF system and carbon layers within the target) and 0^{th} channel. Position calibration was done with the use of recoil-α correlation technique. For γ detector calibration, ^{152}Eu source was used.

4 Results and discussion

4.1 Properties of the reaction

Reaction ^{40}Ar+^{197}Au was measured at SHIP in GSI, Darmstadt. Gold target with thickness of 360 μg/cm^2 was irradiated by ^{40}Ar^{10+} ions, with an average intensity of 1.3 pμA. Total irradiation time for this reaction was ~ 68 hours. Energy losses of the beam and the reaction products were calculated by LISE++ [Tarasov and Bazin, 2008].

The projectile energy used in the reaction was 196.2 MeV in the middle of the target. Corresponding excitation energy of ^{237}Bk* is around 45 MeV. This excitation energy indicates evaporation of around 3-4 nucleons.

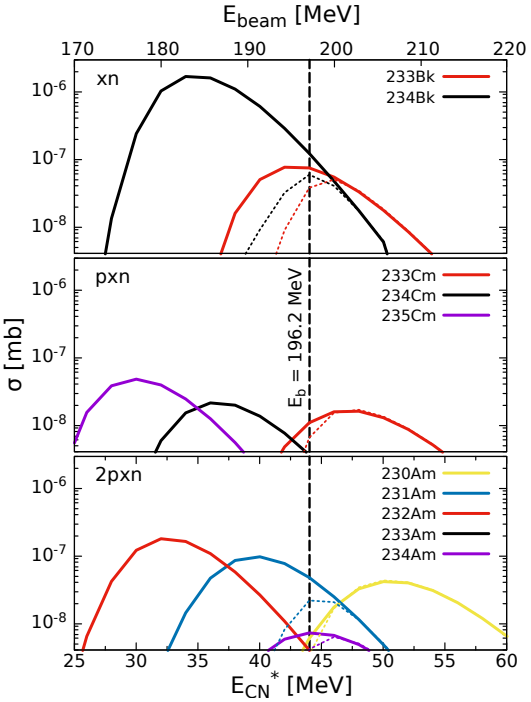


Figure 6: Excitation functions calculated by HIVAP. Dotted lines represent calculations without possible sub-barrier fusion, dashed line is used beam energy.

Theoretical calculations by the statistical code HIVAP [Reisdorf, 1981, Reisdorf and Schädel, 1992] predict ^{234}Bk as the most probable reaction product (figure 6). Expected production cross section is around 90 pb. Several other reaction products with cross sections significant enough to be considered are listed in the table 1.

Table 1: Cross section values calculated by the HIVAP in the middle of the target at 196.2 MeV beam energy.

ER	σ [pb]	ER	σ [pb]
^{234}Bk	90	^{234}Am	7
^{233}Bk	70	^{231}Am	40
^{233}Cm	10	^{230}Am	7

4.2 High-energy signals

The beam-off spectrum of high-energy signals (figure 7) contains 10 signals. Four signals over 100 MeV are candidates for fission events. These four signals were followed with γ quanta within 5 μs, which strongly suggests their fission-like character [Hofmann et al., 2007]. Four signals around 20 MeV can be explained as pile-ups of α particles. Two signals (energies of around 37 and 70 MeV) were unassigned.

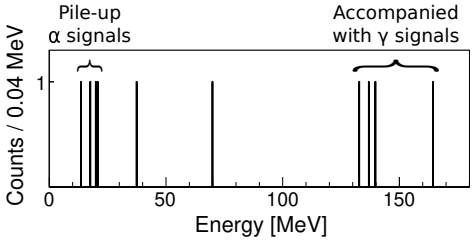


Figure 7: The beam-off spectrum of high-energy signals.

4.2.1 Potential sources of high-energy signals

Several sources of high-energy signals in the reaction can be considered:

- ECDF or SF of ^{230}Am - discussed in the section 4.4.1.
- SF of ^{234}Cm - discussed in the section 4.4.2.
- ECDF of ^{234}Bk - discussed in the section 4.4.3.

Known properties of the potential sources

^{230}Am Probability for ECDF of ^{230}Am was reported to be larger than 30% [Wilson et al., 2017]. The same study estimated partial half-life of the SF - $T_{1/2,SF} \approx 10^9$ s. Half-life $T = 32^{+22}_{-13}$ s was measured by D. Kaji and colleagues [Kaji et al., 2016]. No α decay activity was observed in the previous studies, therefore b_{EC} of ^{230}Am is estimated to be close to 100%.

^{234}Cm Half-life and alpha decay energy of ^{234}Cm were reported to be $T_{1/2} = 51 \pm 12$ s and $E_\alpha = 7239 \pm 10$ keV by P. Cagarda in [Cagarda et al., 2002]. Alpha decay branching ratio was determined to be 15 times higher than branching ratio of the spontaneous fission. Branching ratio $b_{EC} \approx 50\%$ of EC was determined from the theoretical EC partial half-life.

^{234}Bk Previous studies of ^{234}Bk were presented in [Kaji et al., 2016] and [Morita et al., 2003]. The reaction ^{40}Ar(^{197}Au, $3n$)^{234}Bk was measured at GARIS separator in RIKEN (Japan) at beam energies 188.4 and 196.9 MeV. Eleven α decays were assigned to the ^{234}Bk, with energies ranging from 7.62 to 7.96 MeV. Corresponding half-life was determined to be 19^{+6}_{-4} s. Six α-fission correlation pairs were assigned to ECDF of ^{230}Am. Another 37 high-energy signals were not assigned. Branching ratios were determined to be $b_\alpha \geq 80\%$ and $b_{EC} \leq 20\%$. Both α decay and EC of ^{234}Bk lead to ^{230}Pu - one through the subsequent EC of ^{230}Am, other by the subsequent α decay of ^{234}Cm.

4.3 Low-energy spectra

Low-energy beam-off spectrum is shown in figure 8. All major peaks are related to the transfer reaction products, which were focused by the previous measurement. No apparent peaks were found in the range of 7.62 to 7.96 MeV.

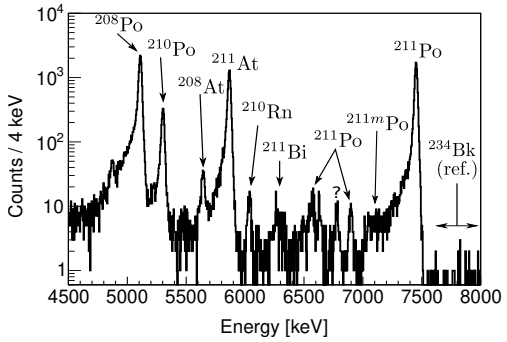


Figure 8: Beam-off low-energy spectrum in the range from 4500 to 8000 keV. Major peaks are identified. Depicted range for ^{234}Bk is from the reference [Kaji et al., 2016].

Figure 9 shows 2D correlation plot of $\alpha-\alpha$ pairs, searched for within 1000 s time and 1 mm position windows. No correlation pairs which could have been assigned to the reaction products were found.

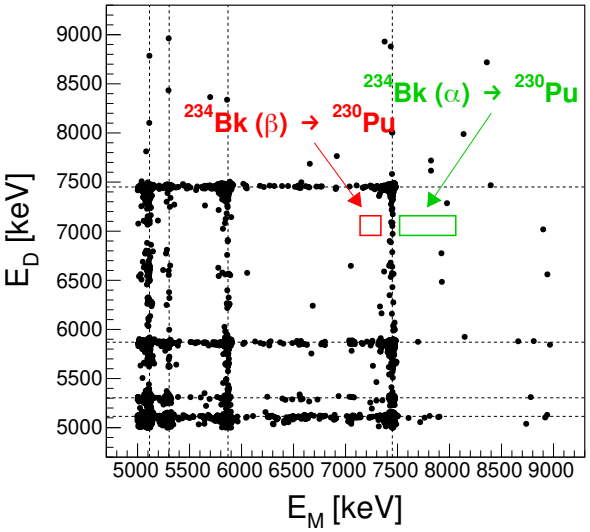


Figure 9: Two dimensional plot of $\alpha-\alpha$ correlation search within 1000 s . Dashed lines denoted random correlations of the major α lines. Red and green rectangle represent regions where correlation pairs of (^{234}Bk $\xrightarrow{EC}$) ^{234}Cm $\xrightarrow{\alpha}$ ^{230}Pu and ^{234}Bk $\xrightarrow{\alpha}$ (^{230}Am $\xrightarrow{EC}$) ^{230}Pu are expected to be found, respectively.

4.4 Origin of the high-energy signals

4.4.1 ECDF or SF of ^{230}Am

SF of ^{230}Am can be excluded due to its very long partial half-life ($T_{1/2,SF} \approx 10^9$ s). Production of ^{230}Am is possible through the α decay of ^{234}Bk or directly in the reaction through an $\alpha 3n$ evaporation channel. Calculated cross section of the $\alpha 3n$ channel is around 7 pb. One high-energy signal from ECDF of the directly produced ^{230}Am would correspond to around 35 nuclei of ^{234}Bk. Around 9 another high-energy signals would originate from 35 ^{234}Bk nuclei through its α decay and subsequent ECDF of ^{230}Am. Alpha-fission correlation search should therefore yield around 4 pairs correlated with full energy α particles originating from the decay of ^{234}Bk.

In total, 23 α-fission correlation pairs were found (figure 10). Five pairs (region 1) were correlated with α signals from supposed pile-up α particles. Another 15 signals (region 2) were correlated with α particles originating in the most intense peaks from the

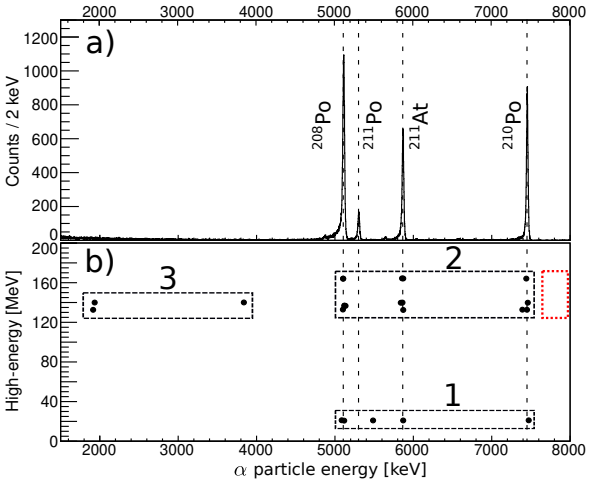


Figure 10: a) Beam-off low-energy spectrum for better interpretation of the bottom part. b) Two dimensional spectrum of α-fission correlation pairs, searched within 2500 s time and 1 mm position window. Red rectangle denotes expected region of α-fission correlations originating from ^{234}Bk.

single low-energy spectrum. Remaining three signals (region 3) were correlated with low-energy signals ($2-4$ MeV), which may suggest those are escaped α particles. However, in all three correlations, time differences $|t_\alpha - t_{Fiss}|$ were higher than 200 s, which is significantly larger than half life of ^{234}Am ($T_{1/2} = 32^{+22}_{-13}$ s).

These arguments therefore exclude ^{230}Am as the source of high-energy signals.

4.4.2 SF of ^{234}Cm

Since $b_\alpha/b_{SF}(^{234}\text{Cm}) \approx 15$, one SF of ^{234}Cm would correspond to 15 α decays. Correlation search should therefore yield around four $\alpha-\alpha$ pairs. None were observed, as seen in figure 9. From Poisson distribution, probability of zero observed events while four are expected is only around 2%. Therefore, ^{234}Cm is excluded as a source of high-energy signals.

4.4.3 ECDF of ^{234}Bk

Search for recoil-fission correlated pairs did not provide any evidence for ECDF of ^{234}Bk. With time window set to 2500 s, several mother ER events were found for each high-energy signal. Moreover, time differences $|t_{ER} - t_{\text{Fiss}}|$ were evenly increasing which suggests random character of correlated pairs. More-

over, none of the found pairs had time difference $|t_{ER} - t_{\mathrm{Fiss}}|$ comparable to any of the possible high-energy sources.

4.5 Production limit for ^{234}Bk

An estimation of the upper limit for production of ^{234}Bk can be calculated based on the properties of its decay products, geometric efficiency of the STOP detector (around 54%) and separation transmission of the SHIP (around 20% [Mazzocco et al., 2008]). As K.-H. Schmidt derived in [Schmidt et al., 1984], 1.84 signals is a standard deviation of zero events, within 68% confidence level. The upper limit for the production of ^{234}Bk in the reaction ^{40}Ar+^{197}Au can be therefore calculated to be around 20 pb.

5 Conclusion

Analysis of the reaction ^{40}Ar+^{197}Au→^{237}Bk*, measured at SHIP in GSI (Darmstadt, Germany) was performed. Four fission-like signals were present in high-energy beam-off spectrum. Three most probable sources of such events were discussed - ECDF/SF of ^{230}Am, SF of ^{234}Cm and ECDF of ^{234}Bk. ECDF/SF of ^{230}Am and SF of ^{234}Cm were unambiguously excluded as possible sources. However, no clear evidence of ^{234}Bk was found. Based on the statistical approach, decay properties of daughter nuclei of ^{234}Bk and properties of the experimental setup, upper limit of the production cross section was estimated to be 20 pb.

Acknowledgements

I would like to thank my supervisor dr. Stanislav Antalic, for his guidance, enthusiastic encouragement, valuable advices and patience.

References

[Andreyev and Van Duppen, 2013] Andreyev, A. N .and Huyse, M. and Van Duppen, P. (2013). *Reviews of Modern Physics*, 85(4):1541.

[Antalic, 2020] Antalic, S. (2020). *Private Communication*.

[Bjørnholm and Lynn, 1980] Bjørnholm, S. and Lynn, J. E. (1980). *Reviews of Modern Physics*, 52(4):725.

[Bohr and Wheeler, 1939] Bohr, N. and Wheeler, J. A. (1939). *Physical Review*, 56(5):426.

[Cagarda, 2002] Cagarda, P. (2002). PhD thesis, FMFI UK.

[Cagarda et al., 2002] Cagarda, P., Antalic, S., Šáro, Š., Hofmann, S., Heßberger, F. P., Ackermann, D.and Kindler, B., Lommel, B., Kojouharova, J., Mann, R., et al. (2002). *Proceedings of Dynamical Aspects Of Nuclear Fission*, pages 398–407.

[Flerov and Petrzhak, 1940] Flerov, G. N. and Petrzhak, K. A. (1940). *Phys. Rev*, 58(89):275–279.

[Flynn et al., 1972] Flynn, K. F., Horwitz, E. P., Bloomquist, C. A. A., Barnes, R. F., Sjoblom, R. K., Fields, P. R., and Glendenin, L. E. (1972). *Physical Review C*, 5(5):1725.

[Gamow, 1928] Gamow, G. (1928). *Zeitschrift für Physik*, 51(3-4):204–212.

[Geiger and Nuttall, 1911] Geiger, H. and Nuttall, J. M. (1911). *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 22(130):613–621.

[Ghoshal, 1950] Ghoshal, S. N. (1950). *Physical Review*, 80(6):939.

[Ghys, 2015] Ghys, L. (2015). PhD thesis, KU Leuven.

[Ghys et al., 2015] Ghys, L., Andreyev, A. N., Antalic, S., Huyse, M., and Van Duppen, P. (2015). *Physical Review C*, 91(4).

[Gurney and Condon, 1928] Gurney, R. W. and Condon, E. U. (1928). *Nature*, 122(3073):439–439.

[Hahn and Strassmann, 1939] Hahn, O. and Strassmann, F. (1939). *Naturwissenschaften*, 27(1):11–15.

[Hall and Hoffman, 1992] Hall, H. L. and Hoffman, D. C. (1992). *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 42(1):147–175.

[Hofmann, 2020] Hofmann, S. (2020). *Private Communication*.

[Hofmann et al., 2007] Hofmann, S., Ackermann, D., Antalic, S., Burkhard, H. G., Comas, V. F., Dressler, R., Gan, Z., Heinz, S., Heredia, J. A., Heßberger, F. P., et al. (2007). *The European Physical Journal A*, 32(3):251–260.

[Hofmann and Münzenberg, 2000] Hofmann, S. and Münzenberg, G. (2000). *Reviews of Modern Physics*, 72(3):733.

[Kaji et al., 2016] Kaji, D., Morimoto, K., Haba, H., Ideguchi, E., Koura, H., and Morita, K. (2016). *Journal of the Physical Society of Japan*, 85(1).

[Konki et al., 2017] Konki, J., Khuyagbaatar, J., Uusitalo, J., Greenlees, P. T., Auranen, K., Badran, H., Block, M., Briselet, R., Cox, D. M., Dasgupta, M., et al. (2017). *Physics Letters B*, 764:265–270.

[Lommel et al., 2002] Lommel, B., Gembalies-Datz, D., Hartmann, W., Hofmann, S., Kindler, B., Klemm, J., Kojouharova, J., and Steiner, J. (2002). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated*

Equipment, 480(1):16–21.

[Loveland et al., 2006] Loveland, W. D., Morrissey, D. J., and Seaborg, G. T. (2006). John Wiley & Sons.

[Mazzocco et al., 2008] Mazzocco, M., Ackermann, D., Block, M., Geissel, H., Herfurth, F., Heßberger, F. P., Hofmann, S., Iwasa, N., Nishio, K., Plaß, W. R., et al. (2008). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 266(15):3467–3480.

[Möller et al., 1997] Möller, P., Nix, J. R., and Kratz, K.-L. (1997). *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 66(2):131–343.

[Möller et al., 1993] Möller, P., Nix, J. R., Myers, W. D., and Swiatecki, W. J. (1993). *arXiv preprint nucl-th/9308022*.

[Möller et al., 2009] Möller, P., Sierk, A. J., Ichikawa, T., Iwamoto, A., Bengtsson, R., Uhrenholt, H., and Åberg, S. (2009). *Physical Review C*, 79(6).

[Möller et al., 2016] Möller, P., Sierk, A. J., Ichikawa, T., and Sagawa, H. (2016). *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 109:1–204.

[Morita et al., 2003] Morita, K., Morimoto, K., Kaji, D., Chihara, T., Haba, H., Hasebe, H., Higurashi, Y., Ideguchi, E., Iwasa, N., Kamigaito, T., et al. (2003). *Frontiers Of Collective Motions*, pages 140–145.

[Myers and Swiatecki, 1966] Myers, W. D. and Swiatecki, W. J. (1966). *Nuclear Physics*, 81(1):1–60.

[Myers and Swiatecki, 1994] Myers, W. D. and Swiatecki, W. J. (1994).

[Myers and Światecki, 1999] Myers, W. D. and Światecki, W. J. (1999). *Physical Review C*.

[Nagame and Nakahara, 2012] Nagame, Y. and Nakahara, H. (2012). *Radiochimica Acta*, 100(8-9):605–614.

[Poenaru et al., 1980] Poenaru, D. N., Ivascu, M., and Mazilu, D. (1980). *Journal de Physique Lettres*, 41(24):589–590.

[Poenaru et al., 2006] Poenaru, D. N., Plonski, I.-H., and Greiner, W. (2006). *Physical Review C*, 74(1):014312.

[Qi et al., 2009] Qi, C., Xu, F. R., Liotta, R. J., Wyss, R., Zhang, M. Y., Asawatangtrakuldee, C., and Hu, D. (2009). *Physical Review C*, 80(4).

[Reisdorf, 1981] Reisdorf, W. (1981). *Zeitschrift für Physik A Atoms and Nuclei*, 300(2-3):227–238.

[Reisdorf and Schädel, 1992] Reisdorf, W. and Schädel, M. (1992). *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei*, 343(1):47–57.

[Sakama et al., 2004] Sakama, M., Asai, M., Tsukada, K., Ichikawa, S., Nishinaka, I., Nagame, Y., Haba, H., Goto, S., Shibata, M., Kawade, K., et al. (2004). *Physical Review C*, 69(1):014308.

[Schmidt et al., 1984] Schmidt, K.-H., Sahm, C.-C., Pielenz, K., and Clerc, H.-G. (1984). *Zeitschrift für Physik A Atoms and Nuclei*, 316(1):19–26.

[Schmidt et al., 2000] Schmidt, K.-H., Steinhäuser, S., Böckstiegel, C., Grewe, A., Heinz, A., Junghans, A. R., Benlliure, J., Clerc, H.-G., De Jong, M., Müller, J., et al. (2000). *Nuclear Physics A*, 665(3-4):221–267.

[Tarasov and Bazin, 2008] Tarasov, O. B. and Bazin, D. (2008). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 266(19-20):4657–4664.

[Thielemann et al., 1983] Thielemann, F.-K., Metzinger, J., and Klapdor, H. V. (1983). *Zeitschrift für Physik A Atoms and Nuclei*, 309(4):301–317.

[Tsukada et al., 2000] Tsukada, K., Sakama, M., Asai, M., Ichikawa, S., Haba, H., Nishinaka, I., Nagame, Y., Goto, S., Kojima, Y., Oura, Y., et al. (2000). *Jaeri tandem annual report 1999 April 1, 1999 March 31*, page 13.

[Wang et al., 2017] Wang, M., Audi, G., Kondev, F. G., Huang, W. J., Naimi, S., and Xu, X. (2017). *Chinese Physics C*, 41(3).

[Weissenberger et al., 1986] Weissenberger, E., Geltenbort, P., Oed, A., Gönnenwein, F., and Faust, H. (1986). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 248(2-3):506–515.

[Weizsäcker, 1935] Weizsäcker, C. F. v. (1935). *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei*, 96(7):431–458.

[Wilson et al., 2017] Wilson, G. L., Takeyama, M., Andreyev, A. N., Andel, B., Antalic, S., Catford, W. N., Ghys, L., Haba, H., Heßberger, F. P., Huang, M., et al. (2017). *Physical Review C*, 96(4).

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 115–126
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Andrej Ďurica, Róbert Astaloš

Effect of electron-positron pairs on the measurement of the Bose-Einstein correlations in high energy proton-proton collisions in the ATLAS experiment

Andrej Ďurica* Róbert Astaloš†‡

Department of Nuclear Physics and Biophysics, Faculty of Mathematics, Physics and Informatics, Comenius University in Bratislava, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava,

Abstract: The aim of this contribution is to analyse the effect of electron-positron pairs on the measurement of the Bose-Einstein correlations using Monte Carlo simulation sample and data collected by the ATLAS detector at the Large Hadron Collider. The effect was studied in proton-proton collisions at the centre of mass energy of 13 TeV.

In order to reduce the effect of electron-positron pairs in the final experimental evaluation of the Bose-Einstein correlations among identical pions, the optimization of the phase space quantified by the invariant momentum difference modulus Q is provided. The aim is to separate electron-positron pairs from pion pairs and subsequently compare their significance in experimental data and simulation. For this purpose a selection of criteria including several quantities is tested and optimized.

Keywords: ATLAS, Bose-Einstein correlations, electron-positron pairs

Introduction

The study of the Bose-Einstein correlations plays a significant role in the determination of space-time characteristics of particle emitting sources. The observation of this phenomenon provides information about the dynamics of strong interactions occurring in atomic nuclei.

In 1954, Robert Hanbury-Brown and Richard Twiss invented the theory of photon intensity interferometry (the HBT effect), which determines angular diameter of the stellar objects. In 1959 in Berkeley, Gerson Goldhaber et al. discovered correlation between identically charged pions (the GGLP effect), produced in $\overline{p}-p$ annihilation. The origin of both theories is based on the Bose-Einstein correlations. This correlation effect is a consequence of the symmetry of wave function of the system of two identical bosons, and thus is exclusively an attribute of quantum mechanics. For the cases of identical pions ($\pi^{\pm}\pi^{\pm}$), the correlation between two particles is occurred in their hadronization region and it is demonstrated by decrease of Lorentz invariant four-momentum difference modulus Q.

In this contribution, the data obtained from proton-proton collisions at the centre of mass energy of $\sqrt{s} = 13$ TeV using the ATLAS detector are analysed. The reference sample used for the experimental evaluation is affected by resonance decays: ρ^0, ω, K^* η, η', ϕ, and occurrence of e^-e^+ pairs. The aim of this work is to localise e^-e^+ pairs and subsequently separate them from pion pairs, with the purpose to increase fit accuracy in the region of the correlation peak.

1 Bose-Einstein Correlations

In this section, the theoretical concept of the Bose-Einstein correlations is introduced. First, the emission of two identical bosons in terms of quantum wave mechanics approach is investigated. Further, the experimental construction of the correlation function and the properties of reference distribution used in the analysis are mentioned. The discussion of effect of the Coulomb repulsive force between identical charged particles is also briefly presented.

1.1 The wave function approach

The Bose-Einstein correlations (BEC) function for a system of the two identical bosons (Fig.1) with three-momenta: p_1, p_2, is defined as:

$$C_2(p_1,p_2) = \frac{P(p_1,p_2)}{P(p_1)P(p_2)} \tag{1}$$

where $P(p_1,p_2)$ represents two-particle boson probability (momenta p_1 and p_2 are measured simultaneously) and $P(p_1)$, $P(p_2)$ are the probabilities to ob-

*a.durica2@gmail.com
†robert.astalos@cern.ch
‡Supervisor

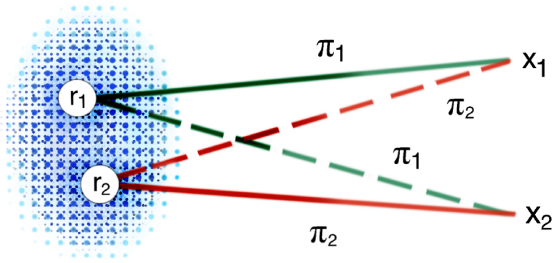


Figure 1: The emission of two like-signed pions ($\pi_1^{\pm}\pi_2^{\pm}$) emerging from points: r_1 and r_2, which are located within the hadronization area, and are detected at the positions x_1 and x_2.

serve particles separately. In the instance that correlations between particles are not observed, the correlation function is equal to one.

In general, the state of the system of two identical bosons is described by wave function in the form symmetrical under particle exchange[Pišút et al., 1983]:

$$\Psi_{p_1,p_2}(r_1,r_2) = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[e^{i(p_1r_1+p_2r_2)} + e^{i(p_1r_2+p_2r_1)}\right] \quad (2)$$

The probability density of the system is defined as follows:

$$|\Psi_{p_1,p_2}(r_1,r_2)|^2 = 1 + \frac{1}{2}\left[e^{iq(r_1-r_2)} + e^{-iq(r_1-r_2)}\right] \quad (3)$$

where $q = p_1 - p_2$ is the three-momentum difference.

Let us assume that the particle sources are discretely distributed in the three-dimension space and are characterised by a probability amplitude. The amplitude is expressed by the delta function:

$$F_i(r) = \rho_i \delta^3(r - r_i) \quad (4)$$

The total probability to observe emission of the particle described by a complex wave function: $\Psi_p \propto e^{i(pr+\phi)}$, is defined as:

$$P(p) = \sum_i |\rho_i \Psi(r_i)|^2 \quad (5)$$

where we assume incoherent[1] case: $\phi = 0$. If we further consider that sources are continuously distributed, a summing over all discrete points i can be replaced by an integral and total probability is defined as:

$$P(p) = \int |\rho(r)\Psi_p(r)|^2 d^3r = \int |\rho(r)|^2 d^3r \quad (6)$$

Using same method to the system of two identical bosons, one obtains probabilities of observing particles which momenta are measured simultaneously. For the incoherence limit the probability is defined as:

$$P(p_1,p_2) = \int |\Psi_{p_1,p_2}(r_1,r_2)|^2 f(r_1) f(r_2) d^3r_1 d^3r_2 \quad (7)$$

where $f(r_i) = |\rho(r_i)|^2$ is the source density distribution function. [Weiner, 2000]

Applying the wave function (Eq.2) to the integration of Eq.7, one obtains modified form of the two-particle boson probability:

$$P(p_1,p_2) = |\tilde{f}(0)|^2 + |\tilde{f}(q)|^2 \quad (8)$$

Finally, the $C_2(q)$ correlation function can be rewritten as follows:

$$C_2(q) = 1 + \frac{|\tilde{f}(q)|^2}{|\tilde{f}(0)|^2} \quad (9)$$

This form of the correlation function provides the time-space characteristics of particle source; when $C_2(q)$ is equal to one particles are emitted coherently, when $C_2(q)$ is greater than one particles are emitted incoherently.

1.2 Invariant momentum difference

The previous analysis of the $C_2(q)$ correlation function suggested a form, which depends on the three-space momentum difference q. In this contribution, the BEC effects are studied in the phase space, which is quantified by a Lorentz-invariant variable Q; four-momentum difference modulus. Let us demonstrate the coherence between variables.

Suppose that a particle has an invariant mass m and four-velocity, which is composed of temporal and spatial components:

$$V^\mu = \gamma(v)(c,\vec{v}) \quad (10)$$

where $\gamma(v)$ is the Lorentz term. The four-momentum of the particle is defined as:

$$P^\mu = mV^\mu = (\frac{E}{c},\vec{p}) \quad (11)$$

[1] Incoherence limit corresponds to the situation, where the phases of the production amplitudes wildly fluctuate in every point of space. In this limit, all the phases can be set to zero.[Alexander, 2003]

The Lorentzian inner product[2] of these four-vectors, defines relativistic invariant identities:

$$V^{\mu}V_{\mu} = \gamma^2(v)(c^2 - |v|^2) = c^2 \tag{12}$$

and

$$P^{\mu}P_{\mu} = \frac{E^2}{c^2} - |p|^2 = (mc)^2 \tag{13}$$

Similarly, relativistic invariant of four-momentum difference Q is:

$$\begin{aligned} Q^2 &= (E_1 - E_2)^2 - (\vec{p}_1 - \vec{p}_2)^2 \\ &= (E_1 + E_2)^2 - 4E_1E_2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 + 4\vec{p}_1\vec{p}_2 \end{aligned} \tag{14}$$

The invariant mass of two particle system is defined by:

$$M^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 \tag{15}$$

If we further consider Lorentz boost into the inertial frame, in which two identical particles have the same momentum, Eq.14 can be rewritten as:

$$\begin{aligned} Q^2 &= M^2 - 4(E_1^2 - |p_1|^2) \\ &= M^2 - 4m^2 \end{aligned} \tag{16}$$

In the center of the mass frame of a particle pair, with identical masses, the energy difference is equal to zero. Therefore the three-momentum difference q can be replaced by the four-momentum difference. The Lorentzian inner product of this variable is: $q^2 = -(\vec{p}_1 - \vec{p}_2)^2$. Using these two relativistic invariants, we obtain:

$$q^2 = -(\vec{p}_1 - \vec{p}_2)^2 = (E_1 - E_2)^2 - (\vec{p}_1 - \vec{p}_2)^2 = Q^2 \tag{17}$$

1.3 Source models

Let us proceed to the investigation of the correlation function for the system, which source model of the hadronization is described by the Gaussian and the Cauchy-Lorentzian distribution. In both cases, we assume the spherical symmetric shape of the source, which leads us to the distribution function depending on a single parameter; radius.

First, the Gaussian distribution function in the variable r is analyzed. The function is given by:

$$f(r) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}R)^3} e^{-\frac{r^2}{2R^2}} \tag{18}$$

[2]We consider the metric tensor with signature (1,-1,-1,-1)

where R is a standard deviation of the distribution. According to Eq.9, where the Fourier transform is applied, one obtains $C_2(Q)$ correlation function:

$$C_2(Q) = 1 + e^{-(QR)^2} \tag{19}$$

The parameter R in this expression is related to the space-time structure of the source.

The BEC experiments uncover the limitation of the correlation function $C_2(Q)$ in the cases, where particle momentum difference is equal to zero. Theoretical prediction ($C_2(0) = 2$) does not correspond with the experimental data evaluation. For this purpose, the incoherence factor λ defined empirically, limited by interval $\langle 0, 1\rangle$, is added to the Eq.19. The adapted function is given as:

$$C_2(Q) = 1 + \lambda e^{-(QR)^2} \tag{20}$$

where $\lambda = 0$ signifies a totally coherent source, while $\lambda = 1$ signifies a totally chaotic source. [Weiner, 2000]

For the fitting procedure, the correlation function is modified by two additional parameters:

$$C_2(Q) = C_0(1 + \lambda e^{-(QR)^2})(1 + \varepsilon Q) \tag{21}$$

where the first one C_0 represents the normalization constant, while the second factor $(1 + \varepsilon Q)$ corresponds to the long-distance correlations. [Alexander, 2003]

Another approach to the analysis of BEC has been suggested by the Cauchy-Lorentzian source model. This method is selected for the reason that in many experiments the $C_2(Q)$ function decreases more steeply than the Gaussian model predicted. The Cauchy-Lorentz distribution function is given by:

$$f(r) = \frac{1}{\pi} \frac{\frac{R}{2}}{r^2 + \frac{R^2}{4}} \tag{22}$$

where R is the scale parameter that specifies the half-width at half-maximum (HWHM). Using this distribution, $C_2(Q)$ correlation function with the incoherence factor λ assumes an exponential form:

$$C_2(Q) = 1 + \lambda e^{-QR} \tag{23}$$

where R represents the space-time structure of the source. Analogously to the Eq.21, exponential parametrization of the fitting function was obtained as:

$$C_2(Q) = C_0(1 + \lambda e^{-(QR)})(1 + \varepsilon Q) \tag{24}$$

1.4 Experimental construction of $C_2(Q)$ correlation function

In general, the $C_2(Q)$ correlation function (Eq.1) can be reformulated by the following relation:

$$C_2(Q) = \frac{\{\langle n_{\vec{p}_1} n_{\vec{p}_2} \rangle\}}{\{\langle n_{\vec{p}_1} \rangle \langle n_{\vec{p}_2} \rangle\}} \tag{25}$$

where $n_{\vec{p}_i}$ is the number of particles measured in a single event, and the averages denoted by $\langle ... \rangle$ are over an ensemble of events.[Baym, 1998] The ensemble in the numerator contains the BEC effect, while the ensemble in the denominator is without the BEC.

For experimental evaluation, the $C_2(Q)$ function is determined by the ratio of signal distribution $N(Q)$ to the reference distribution $N^{ref}(Q)$:

$$C_2(Q) = \frac{N(Q)}{N^{ref}(Q)} \tag{26}$$

where the number of like-sign charged pairs in the signal distribution $N^{\pm\pm}(Q)$ is normalized to the number of pairs in a reference distribution $N^{ref}(Q)$. The construction of the reference distribution supposes identical composition of correlations as the signal distribution, excluding the BEC effect.

In this work the Unlike-sign pairs (ULS) reference distribution was used. The distribution is composed of unlike-sign pairs, which are collected from the same event. Because the sample contains non-identical particles, the BEC effect is not observable in the distribution. The issue of the reference sample is the pairs that are produced by the resonance decays, which add supplementary correlations; these correlations are not a part of the signal sample. To correct unwanted features, the fitting procedure excludes the region with the largest occurrence of the resonances.

In order to reduce supplementary correlations which are part of the reference distribution, the $R_2(Q)$ correlation function is used. The function is defined as the double ratio of data and Monte Carlo $C_2(Q)$ functions:

$$R_2(Q) = \frac{C_2^{data}(Q)}{C_2^{MC}(Q)} = \frac{N_{data}(Q)}{N_{data}^{ref}(Q)\frac{N_{MC}(Q)}{N_{MC}^{ref}(Q)}} \tag{27}$$

The simulated data generated by the MC method are without any BEC effect.

1.5 Coulomb correction

Hitherto, the investigation of the correlation between two identical bosons has not taken account of a long-range Coulomb interaction, which acts between charged particles of the pairs. To determine the effect of Coulomb interaction, authors of article [Gyulassy et al., 1979] have proposed to solve the scattering problem with the *Schrödinger* equation in the form:

$$(\Delta + k^2)\Psi(r) = U(r)\Psi(r) \tag{28}$$

where $U(r) = \frac{2m}{\hbar^2}V(r)$, $k^2 = \frac{2m}{\hbar}E$, with scattering wave function with the asymptotic boundary condition defined as[Pišút et al., 1983]:

$$\Psi(r) \to e^{ikz} + f(\phi,\theta)\frac{e^{ikr}}{r} \quad , \quad r \to \infty \tag{29}$$

where $f(\phi,\theta)$ is a complex function called scattering amplitude[3].

To correct the impact of Coulomb interaction on a momentum shift, the Gamow penetration factor $G(\eta)$ is introduced. It is defined as modulus squared of the wave function obtained from the solution of Eq.28 with the Coulomb potential $V(r)$ [Weiner, 2000]:

$$|\Psi(0)|^2 = \frac{2\pi\eta}{e^{2\pi\eta} - 1} = G(\eta) \tag{30}$$

where the Sommerfeld parameter η is defined as:

$$\eta == \pm\frac{\alpha m}{|Q|} \tag{31}$$

where m is the particle mass and $\alpha = \frac{1}{137}$ is the fine-structure constant. The plus sign in Eq.31 represents repulsion of the like-signed pairs, while the minus represents attraction of the unlike-signed pairs.

Finally, the distribution without the Coulomb correlations $N(Q)$ is defined as:

$$N(Q) = \frac{N^{meas}(Q)}{G(\eta)} \tag{32}$$

where $N^{meas}(Q)$ is the measured distribution.

2 ATLAS experiment

In this section, the infrastructure and technical parameters of the Large Hadron Collider and the experimental setup of the ATLAS experiment [ATLAS, 2008] are briefly described.

[3] The modulus squared of $f(\phi,\theta)$ defines differential scattering cross section: $\frac{d\sigma}{d\Omega} = |f(\phi,\theta)|^2$.

2.1 Large Hadron Collider

The Large Hadron Collider (LHC) is a hadron collider situated at CERN[4] (European Organization for Nuclear Research), near the city of Geneva, Switzerland. The LHC is a synchrotron type of a collider; the synchrotron principle combines ideas of three previous accelerators: accelerating between the gaps of resonators, varying the frequency, and pulsing the magnet. A series of discrete pulses (bunches) is injected at a low field and then the field rises in proportion to the momentum of particles, which ensures, that the radius of the orbit remains constant. [Myers and Schopper, 2020] It was constructed in order to provide proton-proton (pp) collision energy of $\sqrt{s} = 14$ TeV and heavy ions (AA) collisions of $\sqrt{s} = 5.5$ TeV. For the effective usage of existing infrastructure, the LHC has been installed in the tunnel, built for the previous collider the LEP (The Large Electron-Positron Collider). The approximately 27 km long tunnel consists of eight 2.45 km long arched parts, where particles are guided in the trajectory by the system of bending-dipole magnets. The rest of the circumference consists of eight 545 m long straight parts, where detectors, injection, and collimation systems are located.

The protons are injected into the vacuum chambers as two separate contra-rotating beams. The beam pipes are immersed in the magnetic field of 8.4 T, which is produced by the series of superconducting magnets, based on the alloy of niobium-titanium. The operation in this condition requires a temperature of 1.9 K. For this purpose, the LHC uses super-fluid helium as a coolant. One beam consists of 2808 bunches, each of them encloses roughly 10^{11} protons. The bunches are spaced in time by 25 ns.

The parameters mentioned above define the luminosity, an important quantity for the collider efficiency, which is given by the formula[O. Brüning, 2007]:

$$\mathscr{L} = f_{rev} \frac{n_b N^2}{\sigma_x \sigma_y} F(\Phi, \sigma_{xy}) \tag{33}$$

where f_{rev} is the revolution frequency of the bunches, n_b represents the number of bunches, N is the number of particles within each bunch, σ_x and σ_y are beam sizes at the interaction points, $F(\Phi, \sigma_{xy})$ is the geometric luminosity reduction factor. The peak of the number of events per second and per cm^2, generated at the current design for the pp collisions, has been set to: $\mathscr{L} = 10^{34}$ cm^{-2}s^{-1}.

[4] Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire.

2.2 ATLAS detector

The ATLAS (Fig.2) is constructed as the general-purpose detector, composed of particular sub-detectors with a different approach to the measurement. The system is sensitive to various particles of the Standard Model, except the neutrinos. Its cylindrical shape reaching the length of 46 m, diameter of 25 m, and weight of approximately 7000 tons, makes it the largest constructed volume detector.

The ATLAS uses the right-handed coordinate system, where the interaction point defines the origin, the z-axis lies along the beam direction, the x-axis directs from the interaction point to the center of the LHC ring, and the y-axis points upwards. In cylindrical coordinates, ϕ is defined as the azimuth angle in the x-y plane and θ as the polar angle with respect to the z-axis. The polar angle θ can also be represented by the pseudorapidity [ATLAS, 2008]:

$$\eta = -\ln\tan(\theta/2) \tag{34}$$

For the ultra-relativistic cases, where $pc \gg mc^2$, η is an effective approximation of rapidity [ATLAS, 2008]:

$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_z}{E - p_z} \tag{35}$$

where E is energy and p_z is the component of momentum along the beam axis. It is a very practical approximation in cases, where the mass and momentum of a particle are hardly measurable.

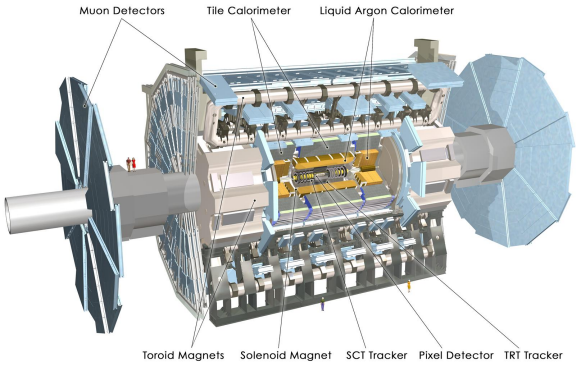


Figure 2: The cross-section of the ATLAS detector. © CERN

The Inner Detector

The Inner Detector (ID) is the first detector surrounding the interaction point, which consists of three separate components. The ID provides particle momentum and vertex measurements of charged particles and electron identification. For this reason, the ID is immersed in the magnetic field of 2 T produced by a solenoid magnet, which covers the whole hermetic sub-detector; the solenoid magnet is situated parallel to the z-axis. The ID covers the range of the pseudorapidity of $|\eta| < 2.5$. The ID is structured with barrel region in the middle which reaches 80 cm and with two identical end-caps on the edges. For the purpose of the analysis provided in this contribution, the ID represents the most important component of the ATLAS's sub-detectors.

The Pixel Detector is a semiconductor detector, located closest to the beam axis. It was designed to probe short lived particles such as b-quarks and τ-leptons. Due to its position: R $\leq$ 122.5 mm, detector requires high granularity, which is provided by roughly 80 million readout channels of the pixel size: 50×400 μm^2, located on four cylindrical silicon-layers in the middle, and six end-cap disks perpendicular to the z-axis. For Run 2 the Pixel Detector was upgraded with the insertable B-layer (IBL) located in the closest position to the beam axis.

The Semiconductor Tracker (SCT) has a similar structure as the Pixel Detector, but instead of pixels it uses a set of silicon microstrip detectors, each with a size of 80 μm×6-12 cm. The SCT surrounds the cylindrical area of 61 m^2, by four barrel layers in the center and by eighteen planar discs on the edges.

The Transition Radiation Tracker covers outer part of the ID. It is composed of 300 000 straw tube detectors, filled with a gas-mixture of: 70% Xe, 27% CO_2 3% O_2. Each has a length of 144 cm and a diameter of 4 mm. In the straw-core the gold-plated W-Re wire is located; it detects ionized electrons and products of interaction of charged particles.

Calorimeters

The calorimeter system provides a precise measurement of the energy of charged particles, neutral particles and photons. To achieve this aim, they have to be built as massive structures from the high-density material. The system covers a range of $|\eta| < 4.9$ and is segmented into two sampling calorimeters: The Electromagnetic Calorimeter (ECAL), The Hadronic End-Cap Calorimeter (HEC). Measurement is based on the principle, where particles interact with the absorber. Secondary particles induce electromagnetic and hadronic showers, which subsequently interact with an active medium and generate signals collected by scintillator tiles or readout channels.

The Electromagnetic Calorimeter is a lead-LAr (liquid-argon) detector, segmented into the barrel part and two end-caps. The LAr is used as an active medium and the lead-plates covering the detector are passive medium or absorbers.

The Hadronic Calorimeter is located immediately after the ECAL. The detector consists of three parts, each with a goal to detect and absorb neutrals and charged hadrons and photons. First in order is the Tile calorimeter using 500 000 plastic scintillator tiles as an active material and a steel as an absorber. The HEC is closed by two LAr-detectors using copper plates as an absorber.

Muon spectrometer

The muon spectrometer is formed by a system of toroidal barrel magnets. The magnetic field of 4 T is used for a momentum measurement of muons, single charged particles, which pass through the system of the calorimeters. The muon spectrometer consist of four subsections: the Resistive Plate Chambers, the Thin Gap Chambers, the Monitored Drift Tubes and the Cathode Strip Chambers.

3 Analysis

3.1 Dataset

For the purpose of the analysis, minimum-bias (MB) events collected at the center of mass energy of $\sqrt{s}$ = 13 TeV were used. The selection of the events was provided by the Minimum Bias Trigger Scintillators (MBTS), using the ATLAS detector trigger system Level 1 (L1). The number of 9.3×10^6 events with total number of 2.4×10^8 tracks were collected by the MBTS during RUN 2. The MBTS operates on a pseudorapidity range of: $2.09 < |\eta| < 3.84$ and covers full range of azimuthal angle ϕ. The integrated luminosities corresponding to this data selection attain 151 μb^{-1}.

The MC simulation sample has been obtained by Pythia8 generator [Sjöstrand et al., 2008]. These generated events were reviewed by the ATLAS simu-

lation programme and the reconstruction chain; identical process was used for the data from the experiment. The generated data correspond to condition of RUN 2. The MC sample contains number of 2.5×10^7 events with total number of 5.9×10^8 tracks.

3.2 Identification of e^-e^+ pairs

In spite of the fact that electrons and positrons comprise only $\sim$ 0.6 % of all the tracks in the sample probed in the analysis, they represent an important aspect of the BEC study. It is because the Q distribution of e^-e^+ pairs is almost exclusively in the region which corresponds to the peak of the correlation function. To eliminate the effect of e^-e^+ pairs on the correlation function peak, some criteria for their identification were developed. These criteria were subsequently used for their separation from pion pairs ($\pi^\pm\pi^\pm$), with the aim to increase fit accuracy in the region of the lowest Q bins.

To localise the Q phase space where e^-e^+ pairs have the main impact on the correlation function, the comparison of the signal and the reference distribution created from the MC is provided (Fig.3). First, the distribution of like-sign pairs, where each track has the pion mass (m_π) is divided by the distribution, where each track tagged as an electron has the electron mass (m_e), and remaining tracks have the pion mass. The same procedure is provided for the ULS sample. The $C_2(Q)$ function obtained as the ratio of these two distributions has shown that the procedure had excluded major part of the effect of e^-e^+ pairs from the area of the lowest Q bins. Although, the effect of e^-e^+ pairs is still present in the first bin considered in the analysis ($20-40$ MeV), where it constitutes $\sim$ 1.8 %.

The determination of identification criteria is based on comparison of Q and s values, which are obtained with electron mass assumed for each particle in the pair. The distribution of Q and s values for e^-e^+ pairs obtained from the MC simulation is presented in Fig.4.

One can see that both distributions reach a peak in the region of $1-2$ MeV and subsequently decrease exponentially. This characteristic is used for the selection of seven cuts differing in their tightness (see Tab.1), which are further used as conditions for pairs with electron mass assumed (Fig.4). Two attributes of pairs enclosed by the cuts are probed: the efficiency (EFF) and the purity (PUR).

The efficiency is defined as the ratio of e^-e^+ pairs enclosed by particular cut to all e^-e^+ pairs in the sample.

The purity is defined as the ratio of e^-e^+ pairs to all pairs enclosed by the particular cut.

The total efficiency over all cuts in Tab.1 is $\sim$ 74 %. The Q distribution of these pairs when assuming pion mass is shown in Fig.4. One can see that 85 % of these pairs are in the region $Q > 20$ MeV, which is used in the evaluation of BEC. The region $Q < 20$ MeV is excluded from all fits to avoid incorrectly reconstructed track pairs with low Q values because of the detector resolution.

The correction procedure is based on the principle of assigning a weight to each pair from a particular selected interval. **The weight** is calculated as: weight = 1 - PUR; thus the interval with the highest occurrence of e^-e^+ pairs is affected the most significantly. The results of the efficiency and the purity for the cuts are summarized in Tab.1.

3.3 Fit procedure

The BEC parameters of interest are obtained by fit of the experimental $C_2(Q)$ (Eq.26) and $R_2(Q)$ (Eq.27) functions by the prediction of the plane wave approach with Cauchy-Lorentz source emission probability distribution (Eq.24).

For better demonstration of the fit accuracy, the fit residuum is used. It is defined as:

$$\varepsilon = \frac{fit - data}{\sigma_{data}} \tag{36}$$

where data is the measured value in a particular bin, σ_{data} is the uncertainty of that data point and the fit represents the value of the fit function in the corresponding bin.

Results of fits of $C_2(Q)$ correlation functions

In the first part of the analysis, the impact of the correction for e^-e^+ pairs on the $C_2(Q)$ correlation function fit is examined. The main emphasis in Fig.5 is placed on the region, which corresponds to the interval: 20 MeV $< Q <$ 200 MeV, and thus is affected by e^-e^+ pairs the most. The region $Q < 20$ MeV is excluded from the fit in order to avoid incorrectly reconstructed track pairs with low Q value. As the reference distribution in the analysis, the ULS sample was used. Grey areas are excluded from the fit with the purpose to exclude or at least reduce the effect of

resonance decays, which occur in the ULS sample. One can see that the correction for e^-e^+ pairs improves very significantly the fit accuracy in the region of the BEC peak. This tendency is also presented in the changes of the χ^2 values on the global and the local[5] level, for each interval of multiplicity; the results of χ^2 are summarised in Tab.2. The impact of the correction is better demonstrated by the comparison of the histograms of the $C_2(Q)$ function fit residuals (Eq.36) depicted in the bottom plots of Fig.5.

Results of fits of $R_2(Q)$ correlation functions

In this section the effect of e^-e^+ pairs on the determination of the $R_2(Q)$ correlation function is investigated. In comparison to $C_2(Q)$ function, the impact of this correction is less significant. It is a consequence of the correction provided by the MC $C_2(Q)$ function in the denominator of the $R_2(Q)$ function. However, the investigation has shown that the correction have improved the fit accuracy in the region of the BEC peak, for eight intervals of multiplicity.

As can be seen from the residuals in Fig.6, the main impact of the correction is localised in the region: 20 MeV $< Q <$ 200 MeV. It means that correction of the $C_2(Q)$ obtained from the MC does not cancel all of e^-e^+ pairs, and still provides a valuable contribution to the precision of the BEC measurement.

In contradiction to the fit of the $C_2(Q)$ correlation function, the correction have not improved χ^2 in each interval of multiplicity; see Tab.3. On the other hand, the most significant role in determination of the fit parameters plays the region of the BEC peak; thus the improvement of the χ^2_{peak} is still relevant. One can see that behavior of the parameters: λ and R, is affected by the correction in both cases within the fit uncertainties.

Conclusions

The purpose of the current study was to investigate the effects of e^-e^+ pairs on the measurement of the BEC. Despite the rare occurrence of e^-e^+ pairs in the experimental data and the MC simulation, it can be concluded that they play an important role in study of the BEC.

First, the fit of the $C_2(Q)$ function was provided. The results of this investigation have shown that both methods had clearly improved the fit accuracy in the region of the BEC peak as well as globally.

In the case of the $R_2(Q)$ functions, the difference in fit results is only within the fit uncertainties. It signifies that the correction of the MC $C_2(Q)$ function reduces most of the effect of e^-e^+ pairs. Although, it was observed that in eight intervals of multiplicty the fit accuracy has improved, so this correction is still useful.

[5] Corresponding to the first nine bins, which cover the BEC peak and the whole Q range below the region excluded from the fit.

References

[Alexander, 2003] Alexander, G. (2003). Bose-Einstein and Fermi-Dirac interferometry in particle physics. *Rept. Prog. Phys.*, 66:481–522.

[ATLAS, 2008] ATLAS (2008). The ATLAS experiment at the CERN large hadron collider. *Journal of Instrumentation*, 3(08):S08003–S08003.

[Baym, 1998] Baym, G. (1998). The Physics of Hanbury Brown-Twiss intensity interferometry: From stars to nuclear collisions. *Acta Phys. Polon. B*, 29:1839–1884.

[Gyulassy et al., 1979] Gyulassy, M., Kauffmann, S. K., and Wilson, L. W. (1979). Pion interferometry of nuclear collisions. i. theory. *Phys. Rev. C*, 20:2267–2292.

[Myers and Schopper, 2020] Myers, S. and Schopper, H. (2020). *Particle Physics Reference Library Volume 3: Accelerators and Colliders: Volume 3: Accelerators and Colliders*.

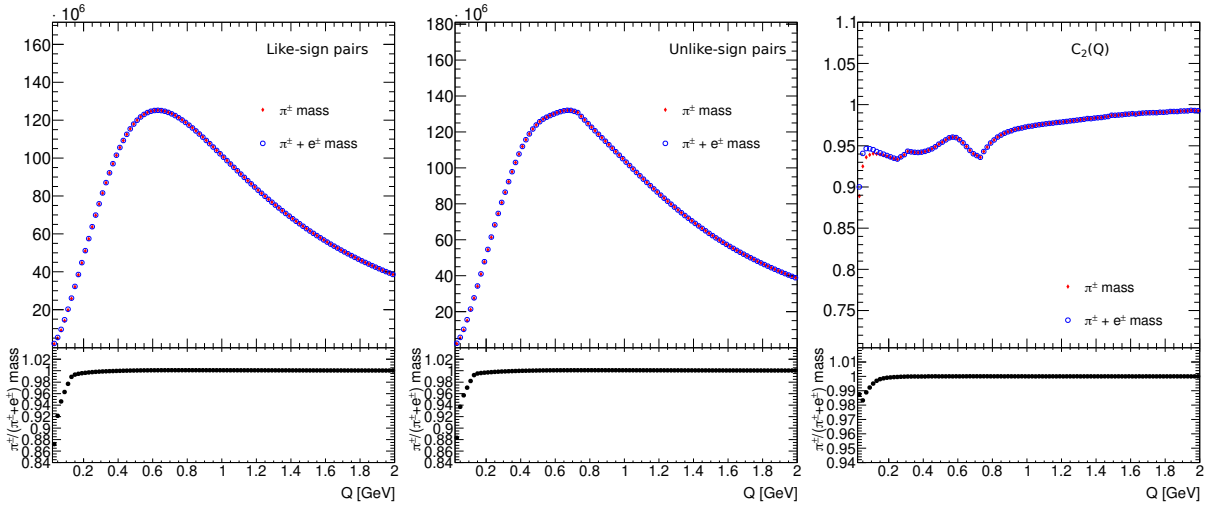
[O. Brüning, 2007] O. Brüning, P. C. (2007). Building a behemoth. *Nature*, 448:285–289.

[Pišút et al., 1983] Pišút, J., Gomolčák, L., and Černý, V. (1983). *Úvod do kvatovej mechaniky*.

[Sidoti, 2014] Sidoti, A. (2014). Minimum Bias Trigger Scintillators in ATLAS Run II. *JINST*, 9(10):C10020.

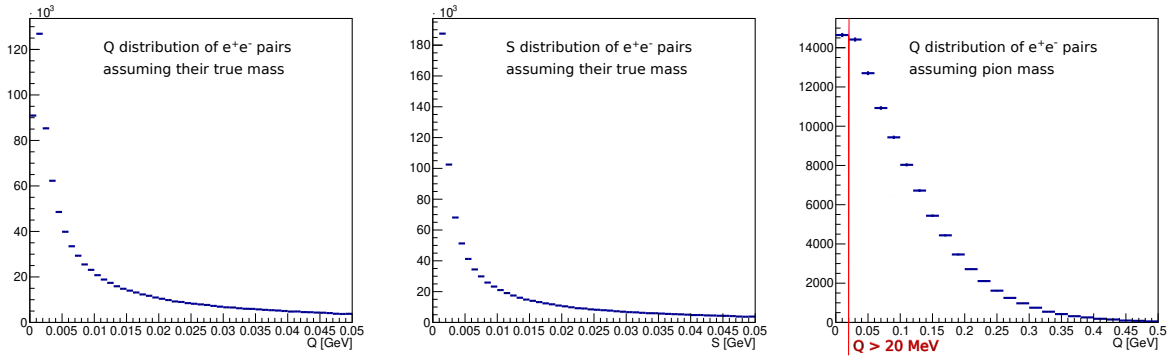
[Sjöstrand et al., 2008] Sjöstrand, T., Mrenna, S., and Skands, P. (2008). A brief introduction to pythia 8.1. *Computer Physics Communications*, 178(11):852–867.

[Weiner, 2000] Weiner, R. M. (2000). Boson interferometry in high-energy physics. *Phys. Rept.*, 327:249–346.



(a) (b) (c)

Figure 3: The ratio of the Q distribution of tracks with m_π assumed to tracks with m_π and m_e assumed, for the like-signed pairs (a) and the ULS (b) from the MC sample, with final $C_2(Q)$ function. One can see that e^-e^+ pairs affect mostly values: $Q < 150$ MeV; thus the occurrence is almost exclusively in the region which corresponds to the peak of the correlation function.



(a) (b) (c)

Figure 4: The Q (a) and the s (b) distribution of e^-e^+ pairs assuming their true mass and the Q distribution of e^-e^+ pairs assuming m_π (c). Red line in subfigure (c) corresponds to region: $Q < 20$ MeV, which is excluded from the fit procedure.

Table 1: The values of efficiency, purity and assigned weights

s and Q cut [MeV]	EFF. [%]	PUR. [%]	EFF.×PUR. [%]	weight
(1 ; 2)	7.94	86.11	6.84	0.139
(0 ; 1) & (2 ; 3)	15.91	80.19	12.76	0.198
(3 ; 5)	9.82	47.76	4.69	0.522
(5 ; 9)	10.81	22.23	2.40	0.778
(9 ; 16)	10.35	8.07	0.84	0.919
(16 ; 28)	9.82	2.7	0.27	0.973
(28 ; 50)	9.49	0.8	0.08	0.992
Total	74.14		27.88	

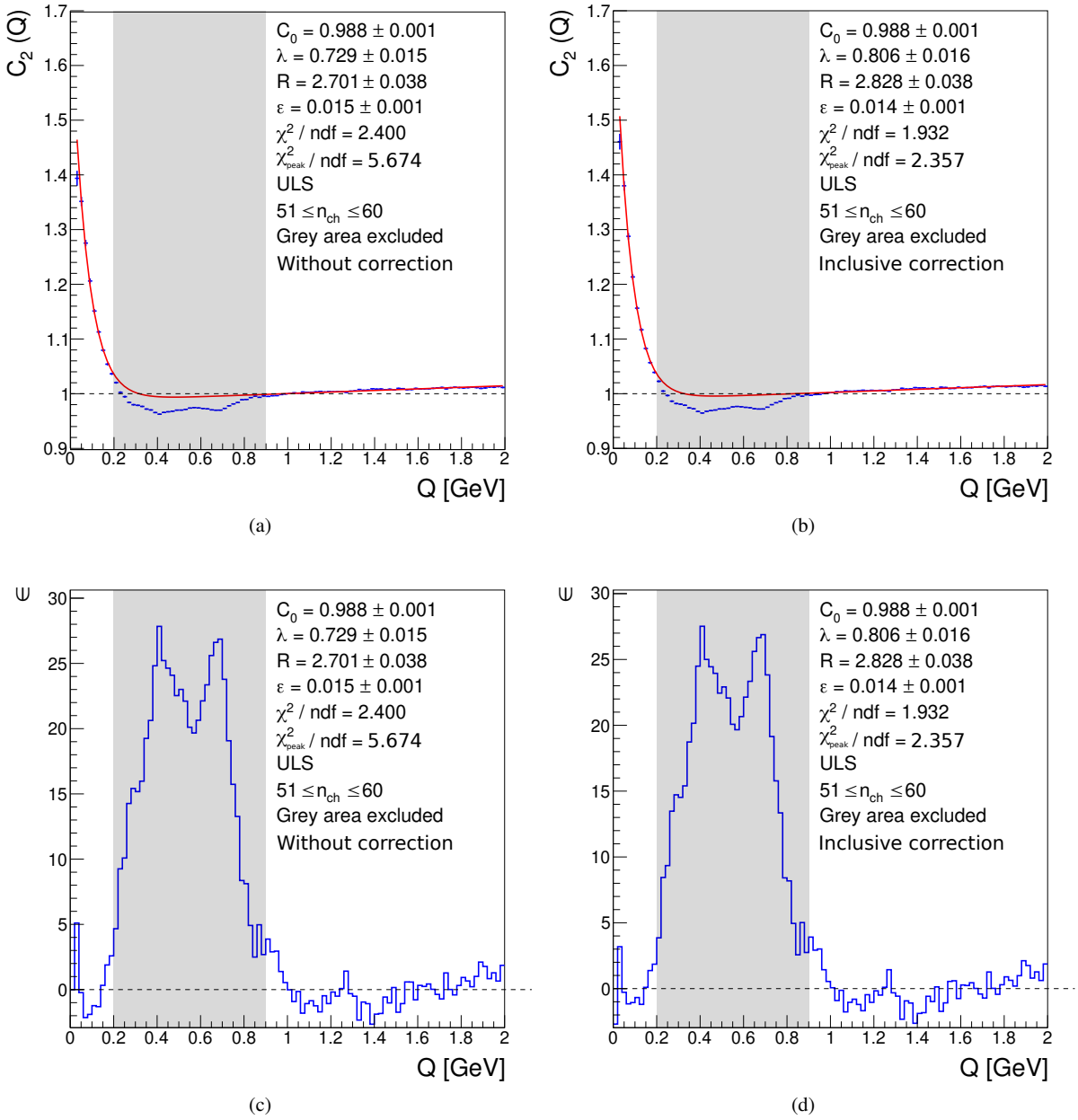


Figure 5: The fit of the $C_2(Q)$ correlation function, using the ULS reference sample, without (a) and with (b) the application of the correction for e^-e^+ pairs. The residuum (c) corresponding to the fit without the correction and the residuum (d) corresponding to the correction. The region $Q < 20$ MeV is excluded from the evaluation.

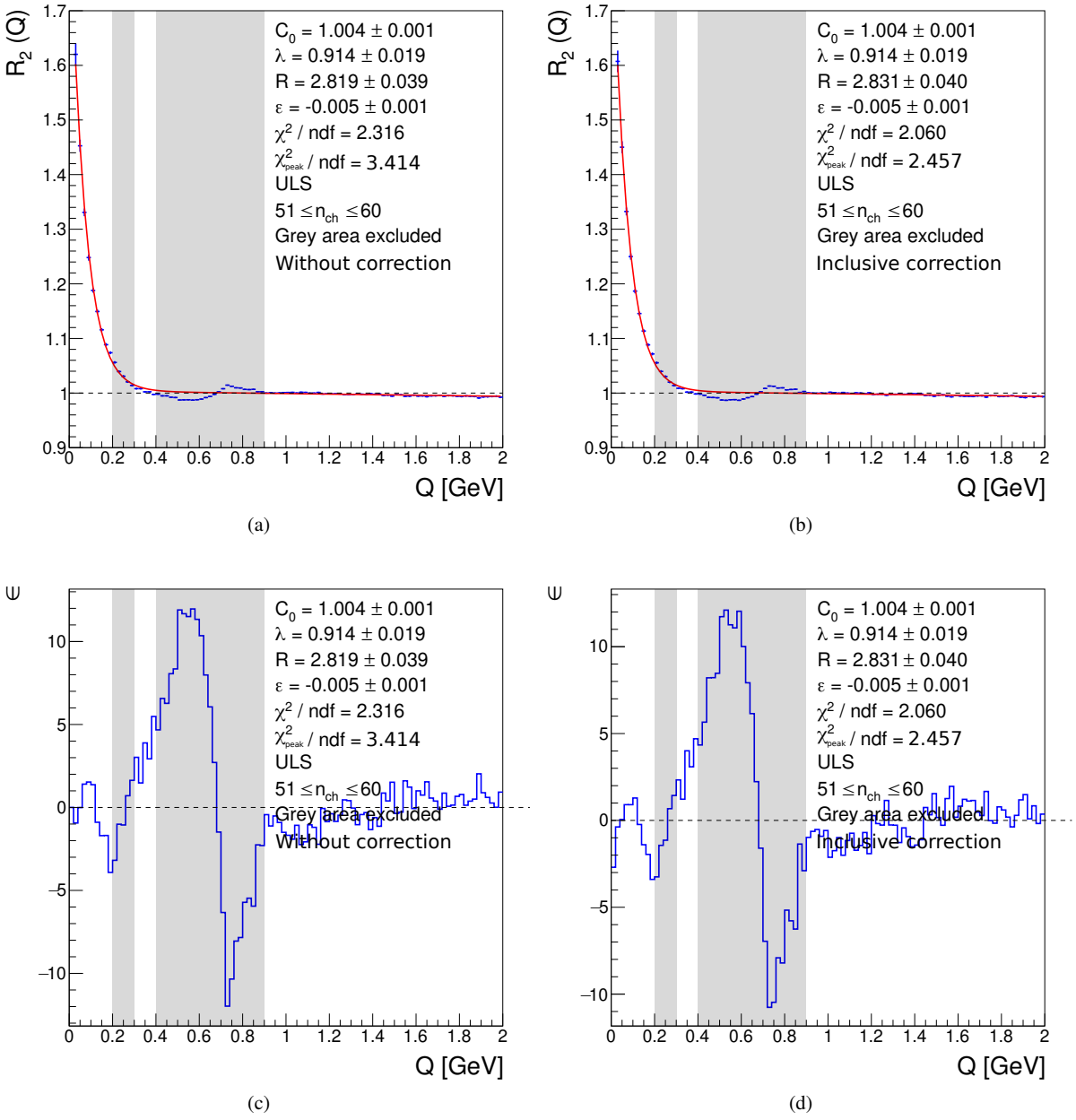


Figure 6: The fit of the $R_2(Q)$ correlation function, using the ULS reference sample, without (a) and with (b) the application of the correction. The residuum (c) corresponding to the fit without the correction and the residuum (d) corresponding to the correction for e^-e^+ pairs. The region $Q < 20$ MeV is excluded from the evaluation.

Table 2: The fit parameters of the $C_2(Q)$ correlation function, fitted by the exponential parametrization (Eq.24), for thirteen intervals of multiplicity. As the reference distribution, the ULS sample was used. The results of the correction are presented with the gray background. One can see that behavior of the parameters R and λ is affected by the correction significantly. The hadronization radius R increases with multiplicity which corresponds to theoretical prediction.

n_{ch}	C_0	λ	R [fm]	ε [GeV^{-1}]	χ^2/ndf	χ^2_{peak}/ndf
2–10	0.858 ± 0.004	0.777 ± 0.024	1.084 ± 0.050	0.170 ± 0.004	4.306	7.039
	0.860 ± 0.004	0.830 ± 0.027	1.170 ± 0.051	0.168 ± 0.004	3.950	4.737
11–20	0.935 ± 0.002	0.725 ± 0.015	1.578 ± 0.033	0.076 ± 0.001	6.704	9.845
	0.935 ± 0.002	0.784 ± 0.016	1.673 ± 0.033	0.076 ± 0.001	6.028	5.314
21–30	0.965 ± 0.001	0.704 ± 0.015	2.029 ± 0.035	0.041 ± 0.001	5.135	6.147
	0.965 ± 0.001	0.768 ± 0.016	2.136 ± 0.035	0.041 ± 0.001	4.666	2.922
31–40	0.976 ± 0.001	0.710 ± 0.015	2.326 ± 0.037	0.027 ± 0.001	4.000	5.396
	0.976 ± 0.001	0.780 ± 0.016	2.442 ± 0.037	0.027 ± 0.001	3.530	2.098
41–50	0.983 ± 0.001	0.704 ± 0.014	2.512 ± 0.037	0.020 ± 0.001	3.528	7.838
	0.983 ± 0.001	0.778 ± 0.015	2.638 ± 0.037	0.020 ± 0.001	2.942	3.713
51–60	0.988 ± 0.001	0.729 ± 0.015	2.701 ± 0.038	0.015 ± 0.001	2.400	5.674
	0.988 ± 0.001	0.806 ± 0.016	2.828 ± 0.038	0.014 ± 0.001	1.932	2.357
61–70	0.990 ± 0.001	0.762 ± 0.017	2.859 ± 0.042	0.012 ± 0.001	1.631	2.927
	0.990 ± 0.001	0.841 ± 0.018	2.982 ± 0.042	0.012 ± 0.001	1.361	1.038
71–80	0.991 ± 0.001	0.786 ± 0.017	3.004 ± 0.043	0.010 ± 0.001	1.649	2.502
	0.991 ± 0.001	0.867 ± 0.018	3.127 ± 0.043	0.010 ± 0.001	1.417	0.837
81–90	0.992 ± 0.001	0.797 ± 0.019	3.080 ± 0.047	0.009 ± 0.001	1.568	3.171
	0.992 ± 0.001	0.874 ± 0.020	3.194 ± 0.047	0.009 ± 0.001	1.377	1.839
91–100	0.993 ± 0.001	0.791 ± 0.020	3.122 ± 0.051	0.008 ± 0.001	1.099	2.324
	0.993 ± 0.001	0.871 ± 0.022	3.242 ± 0.051	0.008 ± 0.001	0.934	1.148
101–125	0.995 ± 0.001	0.780 ± 0.015	3.224 ± 0.040	0.005 ± 0.000	1.687	2.285
	0.995 ± 0.001	0.867 ± 0.016	3.358 ± 0.040	0.005 ± 0.000	1.462	0.688
126–150	0.996 ± 0.001	0.794 ± 0.023	3.341 ± 0.060	0.004 ± 0.001	1.444	1.385
	0.997 ± 0.001	0.879 ± 0.024	3.470 ± 0.060	0.004 ± 0.001	1.363	0.713
151–200	0.998 ± 0.001	0.833 ± 0.032	3.509 ± 0.082	0.003 ± 0.001	1.087	0.413
	0.998 ± 0.001	0.924 ± 0.035	3.635 ± 0.081	0.002 ± 0.001	1.070	0.273

Table 3: The fit parameters of the $R_2(Q)$ correlation function, fitted by the exponential parametrization (Eq.24), for thirteen intervals of multiplicity. As the reference distribution, the ULS sample was used. The results of the correction are presented with the gray background. One can see that behavior of the parameters R and λ is affected by the correction in both cases within the fit uncertainties.

n_{ch}	C_0	λ	R [fm]	ε [GeV^{-1}]	χ^2/ndf	χ^2_{peak}/ndf
2–10	0.961 ± 0.004	0.911 ± 0.030	1.730 ± 0.057	0.036 ± 0.003	2.366	2.797
	0.959 ± 0.004	0.894 ± 0.032	1.707 ± 0.059	0.038 ± 0.003	2.459	2.075
11–20	0.988 ± 0.002	0.994 ± 0.019	2.096 ± 0.035	0.007 ± 0.001	4.049	4.999
	0.986 ± 0.002	0.985 ± 0.019	2.086 ± 0.035	0.008 ± 0.001	3.821	5.850
21–30	0.994 ± 0.001	0.939 ± 0.018	2.348 ± 0.037	0.002 ± 0.001	3.482	5.613
	0.994 ± 0.001	0.939 ± 0.019	2.354 ± 0.037	0.002 ± 0.001	3.614	5.046
31–40	0.997 ± 0.001	0.921 ± 0.019	2.531 ± 0.038	-0.000 ± 0.001	2.783	4.516
	0.997 ± 0.001	0.923 ± 0.019	2.543 ± 0.038	-0.001 ± 0.001	3.248	4.777
41–50	1.001 ± 0.001	0.920 ± 0.018	2.707 ± 0.037	-0.003 ± 0.001	2.460	3.281
	1.001 ± 0.001	0.900 ± 0.018	2.689 ± 0.037	-0.003 ± 0.001	2.716	3.181
51–60	1.004 ± 0.001	0.914 ± 0.019	2.819 ± 0.039	-0.005 ± 0.001	2.316	3.414
	1.004 ± 0.001	0.914 ± 0.019	2.831 ± 0.040	-0.005 ± 0.001	2.060	2.457
61–70	1.004 ± 0.001	0.904 ± 0.020	2.872 ± 0.042	-0.005 ± 0.000	1.794	5.166
	1.004 ± 0.001	0.917 ± 0.021	2.912 ± 0.043	-0.005 ± 0.000	1.691	3.565
71–80	1.005 ± 0.001	0.924 ± 0.021	3.012 ± 0.046	-0.006 ± 0.000	1.249	3.331
	1.004 ± 0.001	0.927 ± 0.022	3.021 ± 0.046	-0.005 ± 0.000	1.044	2.028
81–90	1.005 ± 0.001	0.920 ± 0.023	3.056 ± 0.050	-0.006 ± 0.001	0.856	2.065
	1.004 ± 0.001	0.906 ± 0.023	3.036 ± 0.050	-0.005 ± 0.001	0.829	2.006
91–100	1.005 ± 0.001	0.917 ± 0.025	3.100 ± 0.055	-0.005 ± 0.001	0.678	1.299
	1.005 ± 0.001	0.887 ± 0.025	3.073 ± 0.057	-0.006 ± 0.001	0.635	1.635
101–125	1.006 ± 0.001	0.916 ± 0.020	3.246 ± 0.046	-0.006 ± 0.000	1.123	2.735
	1.006 ± 0.001	0.895 ± 0.020	3.212 ± 0.046	-0.006 ± 0.000	1.142	3.085
126–150	1.006 ± 0.001	0.905 ± 0.031	3.334 ± 0.071	-0.006 ± 0.001	1.190	1.141
	1.006 ± 0.001	0.887 ± 0.030	3.317 ± 0.071	-0.006 ± 0.001	1.044	1.317
151–200	1.007 ± 0.001	0.991 ± 0.072	3.643 ± 0.114	-0.007 ± 0.001	0.992	1.822
	1.006 ± 0.001	0.932 ± 0.050	3.563 ± 0.115	-0.006 ± 0.001	0.876	1.138

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 127
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Zdenko Híveš, Michal Kovaľ

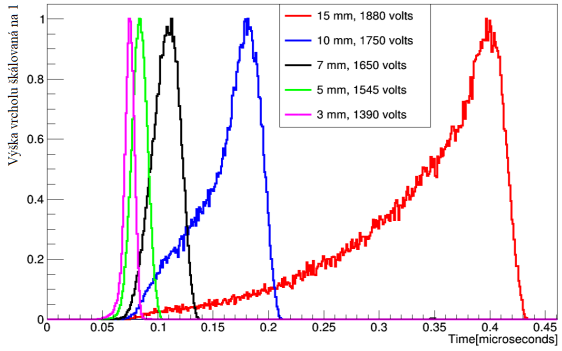
Štúdium časového rozlíšenia slamky Straw spektrometra v experimente NA62

Zdenko Híveš[1*] Michal Kovaľ[2†‡]

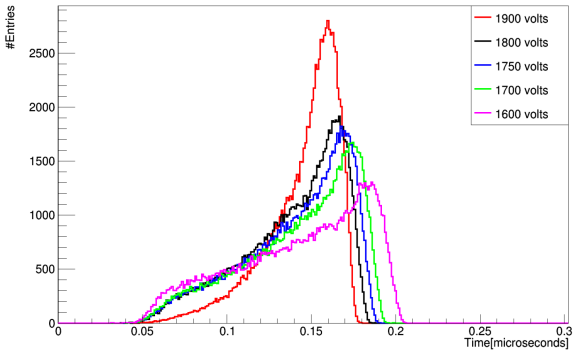
[1] Katedra jadrovej fyziky a biofyziky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava
[2] Ústav časticové a jaderné fyziky, Matematicko-fyzikálna fakulta, Karlova Univerzita, Ke Karlovu 2027, 121 16 Praha

NA62 je experiment sídliaci v CERNe ktorého hlavným cieľom je odmerať pravdepodobnosť veľmi zriedkavého rozpadu nabitého kaónu $K^+ \to \pi^+ \nu\overline{\nu}$. Jedným z najdôležitejších detektorov experimentu je Straw spektrometer (STRAW), ktorého úlohou je čo najpresnejšie zmerať hybnosti nabitých častíc, ktoré cez neho prechádzajú.

Základnou súčiastkou detektora STRAW je slamka vyrobená z plastu (mylar) s priemerom 9.82mm a dĺžkou 2.1m. Vnútorná stena slamky je pokovovaná vrstvou medi a zlata a jej stredom je vedený volfrámový drôt. Na kovovú vrstvu a drôt je aplikované vysoké napätie, ktoré vytvára silné elektrické pole vo vnútri slamky. V slamke prúdi plyn, ktorý je ionizovaný prechodom nabitých častíc, pričom pohybujúce sa ióny vytvárajú signál, ktorý je zaznamenaný špeciálnou elektronikou a následne použitý na zrekonštruovanie miesta prechodu častice slamkou. Časové rozlíšenie slamky je preto ovplyvnené intenzitou elektrického poľa, zložením plynu, koncentráciou jednotlivých zložiek plynu, celkovým tlakom plynu, použitou čítaciou elektronikou a tiež geometriou slamky. V aktuálnom nastavení detektora: plyn Ar (70%) CO2 (30%), tlak 1000mbar, napätie 1750V, priemer 9.82mm, sa v časovom rozlíšení zbehovej hrany nachádza nepravidelnosť vo forme hrbu. V minulých prácach boli efekty týchto parametrov na hrb skúmané pomocou Monte-Carlo simulácií a prišlo sa na fakt, že najefektívnejším zlepšením je zmenšenie polomeru slamky. Na Obr. 1 je prezentované časové rozdelenie zbiehavej hrany signálov získaných pomocou simulácií pre rozdielne polomery slamiek. Vidíme, že zúženie slamky nielen spresnilo časové rozlíšenie, ale najmä výrazne vylepšilo celkový tvar rozdelenia. Takýto markantný pokrok nebol pozorovaný pri variáciach ostatných parametrov, napríklad na zmene napätia (Obr. 2), čo vzbudilo záujem študovať príčiny vzniku tohto hrbu a spustilo vývoj nového detektora.



Obr. 1: Rozdelenie zbiehavej hrany signálu pre: Ar-70% CO2-30%, 1000 mbar, časová konštanta elektroniky: 15 ns, a rôzne priemery slamiek.



Obr. 2: Rozdelenie zbiehavej hrany signálu pre: Ar-70% CO2-30%, 1000 mbar, časová konštanta elektroniky: 10 ns, a rôzne napätia.

V tomto príspevku budú zhrnuté výsledky simulácií, pozrieme sa na fyzikálne procesy ktoré ich ovplyvnili a kvantitatívne ich ohodnotíme. Na simulácie boli použité programy HEED, Garfield, Ngspice a výsledky boli porovnané s meraniami na prototype STRAW detektora. Cieľom príspevku je porozumenie nepravidelnosti časového rozlíšenia a pokus o vysvetlenie z čoho táto nepravidelnosť vychádza.

*hives4@uniba.sk
†michal.koval@cern.ch
‡Školiteľ

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 128
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Daniel Suchý, Rastislav Hodák, Fedor Šimkovic

Search for Double Beta Decay Transitions of ^{116}Cd into the Excited States of ^{116}Sn in COBRA Experiment

Daniel Suchý[1*] Supervisor: Rastislav Hodák[†] Consultant: Fedor Šimkovic

Katedra jadrovej fyziky a biofyziky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Neutrinoless Double Beta Decay

Neutrinos are especially interesting particles, because they are very difficult to detect and the basic nature of neutrinos is still poorly understood. The Standard Model does not provide answers to all the questions related to neutrinos, for example what is their mass. Another unanswered question is, whether neutrino could be its own antiparticle (Majorana particle).

Neutrinoless double beta decay process [Furry, 1939] can effectively answer the second question, if it is observed. Double beta decay process typically involves decay of the even-even nuclei into more stable even-even isobar effectively converting two neutrons/protons inside the atom into two protons/neutrons + two beta particles and two neutrinos at once. Theoretically if neutrinos are not created in this process, all of the energy is distributed between decay fragments, mostly carried away by beta particles. The result would be a peak in the energy spectrum at the end of the spectra consisting of the sum of energy of the created beta particles. Such observation would indicate neutrino could be its own antiparticle and a pair of neutrinos could couple through various mechanisms. Thus neutrinos does not have to be produced in the double beta decay process at all. [Bilenky and Giunti, 2015]

COBRA experiment

In order to effectively reduce the background radiation, The COBRA experiment is located in the underground laboratory - Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) in Italy. The COBRA experiment investigates several $\beta\beta$ isotopes, but also transitions of the ^{116}Cd into various states of the ^{116}Sn [Zuber, 2001]. The COBRA Demonstrator currently uses 64×1 cm^3 semi-conductor crystal detectors made of the CdZnTe, which also serve as the source of totally nine $\beta\beta$ isotopes. More crystal detectors provide the ability to study events in coincidences, which can be very helpful for the analysis of the desired decays and distinguishing from the background events.

Data analysis

The essential aims were the performance and study of the Monte Carlo (MC) simulations of the neutrinoless and two-neutrino double beta decay transitions of the ^{116}Cd into the ground state and first two excited states of the ^{116}Sn. Such simulations were accomplished with the use of the $\beta\beta$ event generator **Decay0** and a simulation framework **VENOM** for the passage of particles through the matter. For each of the decay modes 10^7 events were simulated and various energy distributions were obtained.

Further, the energy distributions of the deposited particles in the individual crystal detectors and coincident events were analyzed. Several peaks in such distributions were distinguished and their origin was suggested. With the help of coincident events dependencies between the two and three detectors were plotted. In addition, geometric views of such dependencies were acquired.

Experimental data of the COBRA experiment were briefly analysed too. Different cuts on experimental data were applied in order to reduce the background events [Volkmer, 2018]. Z-cut and A/E-cut were implemented and the cleaned experimental data were obtained. Moreover, half-life sensitivities of the $0\nu\beta\beta$ decay were calculated in relation to the life time of the experiment.

References

[Bilenky and Giunti, 2015] Bilenky, S. M. and Giunti, C. (2015). *International Journal of Modern Physics A*, 30:1530001.

[Furry, 1939] Furry, W. H. (1939). *Physical Review*, 56:1184.

[Volkmer, 2018] Volkmer, J. (2018). Master's thesis.

[Zuber, 2001] Zuber, K. (2001). *Physics Letters B*, 519:1–7.

*suchy.daniel@gmail.com
†rastislav.hodak@utef.cvut.cz

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 129–136
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Veronika Turiničová, Maroš Gregor

Nová metóda merania elektrického náboja dielektrických biomateriálov pomocou 'Pendant Drop' tenziometrie

Veronika Turiničová[1*] Maroš Gregor[1†‡]

[1] Katedra experimentálnej fyziky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstrakt: Vďaka schopnosti dlhodobo a stabilne uchovávať elektrický náboj sú dielektrické materiály predmetom rôznych výskumov. Elektrický náboj môžeme v materiáli vytvárať rozličnými spôsobmi. Jedným z nich je priame ožarovanie povrchu vzorky voľnými elektrónmi generovanými v elektrónovom dele skenovacieho elektrónového mikroskopu. Aj napriek tomu, že pri tomto procese vopred poznáme celkový náboj, ktorým vzorku ožarujeme, v skutočnosti sa vo vnútri materiálu zachytí iba neznáma časť tohto náboja, a tá musí byť dodatočne zmeraná. Poznáme niekoľko konvenčných metód, na základe ktorých by sme vedeli určiť náboj obsiahnutý vo vzorke. Tieto metódy sú však časovo náročné, prípadne pri meraní vzorku vybíjajú, čo je pre naše potreby nežiadúcim efektom. Preto sme sa v tejto práci zamerali na novú metódu merania náboja obsiahnutého vo vzorke, ktorá spočíva v 'Pendant Drop' tenziometrii. Nabitá vzorka vytvára elektrické pole, ktoré pôsobí na molekuly vody, výsledkom čoho je deformácia pôvodného tvaru kvapky. Miera deformácie sa prejaví na viacerých parametroch vrátane povrchového napätia kvapky, ktoré sa dá určiť pomocou bežných 'Pendant Drop' softvérov. Vrámci tejto štúdie sme zdokumentovali povrchové napätie kvapky deionizovanej vody ako funkciu vzdialenosti medzi ňou a nabitou hydroxylapatitovou vzorkou obsahujúcou elektrický náboj rádovo 10^{-9}nC.

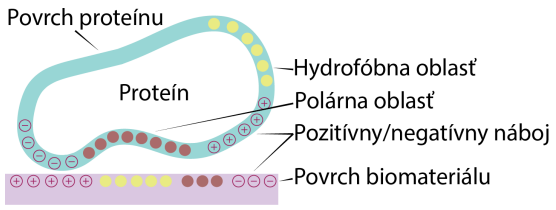
Kľúčové slová: povrchové napätie, 'Pendant Drop' tenziometria, elektrický náboj, hydroxylapatit

1 Úvod

Výskum biomateriálov v sebe spája fyziku, chémiu, biológiu, medicínu, farmakológiu a mnohé ďalšie vedné a medzivedné disciplíny, ktorých cieľom je vytvoriť čo najvhodnejší telesný implantát. Vhodnosť implantátu sa vyjadruje mierou biokompatibility materiálu, predstavujúcou netoxicitu, neimunogénnosť a bioreaktivitu tohto materiálu [Ratner et al., 2004]. Hydroxylapatit (HA) je učebnicovým príkladom takéhoto materiálu. Vďaka jeho prirodzenému výskytu v ľudskom tvrdom tkanive [Bejinaru Mihoc and Mitu, 2017] a relatívne jednoduchému procesu syntézy (napr. sol-gel metóda [Anuar et al., 2013]) sa tento materiál študuje z hľadiska mnohých aplikácií, spomedzi ktorých sú kostné náhrady a náhrady zubov najvýznamnejšie [Ratner et al., 2004, Lin and Chang, 2015, Pokhrel et al., 2018]. Po vložení HA do tela okolité prostredie obsahujúce bunky, proteíny, molekuly atď., okamžite reaguje s povrchovou vrstvou implantovaného telesa a vytvorí 1-10nm proteínovú vrstvičku [Tofail and Bauer, 2016]. Ako je vyobrazené na obrázku 1, adsorpcia buniek a proteínov nastáva prevažne tromi spôsobmi: elektrostatickými, hydrofóbnymi a donor-akceptorovými (polárnymi) interakciami [Tofail, 2011]. Pre urýchlenie, prípadne zamedzenie adsorpcie buniek, proteínov či iných štruktúr na povrch implantátu potrebujeme vedieť regulovať spomínané interakcie. Najjednoduchší spôsob, ako to dosiahnuť, je úprava povrchových vlastností implantátu rôznymi fyzikálnymi či chemickými metódami. Elektrická modifikácia je relatívne mladou a sľubnou metódou, ktorá umožňuje povrchové úpravy bez toho, aby došlo k zmene chemického zloženia. Niektoré výskumy už dokonca preukázali preferenčné prichytávanie proteínov na negatívne nabité hydroxylapatitové domény [Plecenik et al., 2012] ako aj reguláciu tvorby kostnej vrstvičky na hydroxylapatitovom implantáte [Yamashita et al., 1996]. Takéto výsledky predznamenávajú významné pokroky a skrátenie rekonvalescencie pacientov pri liečbe porúch tvrdých tkanív.

Polarizované dielektrikum uchovávajúce náboj, teda také, ktoré má na svojom povrchu permanentné makroskopické elektrické pole, sa nazýva elektrét [Tofail, 2011]. Rozlišujeme medzi dipolárnym elektrétom a elektrétom s pridaným nábojom. Dipolárne elektréty sú tie, ktorých celkový náboj je nulový, no dipóly obsiahnuté v materiáli sú natočené v súhlasných smeroch, a teda celkový dipolárny moment je nenulový. Náboj na povrchu dipolárneho elektrétu sa rovnako nazýva dipolárny náboj a môžeme ho získať

*turinicova8@uniba.sk
†maros.gregor@fmph.uniba.sk
‡Školiteľ



Obr. 1: Schematická ilustrácia proteínu s rôznymi povrchovými doménami interagujúceho s povrchovou vrstvou biomateriálu pomocou elektrostatických, hydrofóbnych a donor-akceptorových (polárnych) interakcií.

napr. kontaktným polarizovaním [Tofail, 2011].

Elektréty s pridaným nábojom sú tie, ktorých hodnota celkového náboja je nenulová kvôli vzniknutému alebo pridanému náboju z externého zdroja v povrchovej vrstve alebo v celom objeme. Takýto náboj môžeme získať napríklad ožarovaním vzorky elektrónovým lúčom [Tofail, 2011].

Polarizácia oboch typov elektrétov môže byť zmeraná rôznymi spôsobmi. Bežné sú Kelvin Probe silová mikroskopia, elektrická silová mikroskopia, meranie teplotne stimulovaného depolarizačného prúdu alebo vybíjanie náboja nanocoulombmetrom (použiteľné iba pri pridanom náboji). Prvé tri spomenuté metódy sú časovo náročné a nie vždy dostupné (hlavne ak je potrebné získať štatistickú vzorku meraní) a posledná metóda odvádza zachytený náboj preč zo vzorky, teda znemožňuje ďalšie experimenty s daným nábojom (pri istých metódach môže byť reprodukovateľnosť rozloženia aj hodnoty náboja problematická). Pre potreby vyššie popísaných typov štúdií, ktoré vyžadujú štatistický počet meraní, je potrebné predstaviť novú metódu, ktorá neovplyvní zachytený náboj, dáva spoľahlivé výsledky a jej prevedenie je jednoduché z časového aj materiálneho hľadiska.

V tomto článku sa teda pokúsime ponúknuť nový spôsob merania elektrického náboja, ktorý je založený na jednoduchom experimente s visiacou kvapkou - 'Pendant Drop' a taktiež predstavíme prvé výsledky meraní so vzorkami obsahujúcimi pridaný náboj získaný ožarovaním povrchu vzorky elektrónovým lúčom.

1.1 Elektrét s pridaným nábojom

Ako bolo spomenuté v úvode, elektréty s pridaným nábojom môžeme získať priamym ožarovaním dielektrických materiálov elektrónovým lúčom. Pri tomto procese sa voľné elektróny generované v elektrónovom dele priamo strieľajú na povrch materiálu a vytvárajú negatívne nabité domény s pridaným nábojom [Tofail, 2011]. Elektróny s dostatočnou energiu vnikajú do povrchovej vrstvy, kde interagujú s okolitou hmotou cez elastické (odrazené elektróny) a neelastické zrážky (emisia sekundárnych elektrónov, následné vyžiarenie charakteristického röntgenového fotónu alebo emisia Augerovského elektrónu, brzdné röntgenové žiarenie, excitácia fonónov a katódoluminescencia) [Goldstein et al., 1981]. Kým elektrón odovzdá všetku prebytočnú energiu, podstúpi množstvo takýchto interakcií, a tie spolu vytvoria tzv. interakčný objem, ktorého rozmery sú dané energiou primárneho elektrónového lúča E_0, atómovým číslom Z a hustotou prostredia ρ [Goldstein et al., 1981, Potts, 1987]. Interakčný objem tiež uzatvára oblasť s vniknutými elektrónmi, ktoré sú zachytené prevažne na rôznych kryštalografických defektoch [Tofail, 2011].

Ožarovanie elektrónovým lúčom môžeme vykonať pomocou elektrónového dela v skenovacom elektrónovom mikroskope (Scanning Electron Microscope - SEM) [Gregor et al., 2015]. Vďaka veľmi malej vlnovej dĺžke elektrónov (rádovo 10^{-11}m) predstavuje SEM veľmi efektívnu metódu na mikroštruktúrnu analýzu. Kľúčové časti zariadenia SEM sú umiestnené vo vákuovej komore s tlakom na úrovni 10^{-3}Pa. Princíp elektrónového dela je založený na termoemisii z wolfrámového vlákna vyhriateho na 2700K. Elektróny, ktoré získajú tepelnú energiu väčšiu ako je výstupná práca materiálu, sú uvoľnené a prechádzajú do elektrónového oblaku, ktorý sa tvorí v blízkosti rozžeraveného vlákna. Následne sú tieto elektróny urýchlené anódou cez elektrónovú optiku až na vzorku [Goldstein et al., 1981].

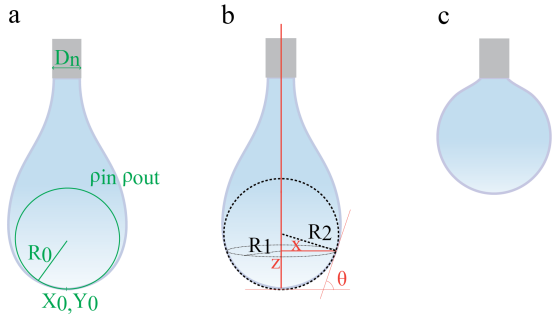
Zvyčajne sa SEM využíva ako zobrazovacia metóda, pričom vzorky z vodivých materiálov, odvádzajúcich preč zachytený náboj do uzemneného kovového držiaka, sú preferované. V našom prípade, kedy sa SEM nepoužíva na zobrazovanie, je práve efekt nabíjania želaným. Preto izolujúci charakter vzorky hrá kľúčovú rolu pri zachytávaní čo najväčšieho náboja v povrchovej vrstve a pri odizolovaní tohto zachyteného náboja od uzemneného držiaka.

Aby sme zvýšili presnosť ožiarenej plochy a mohli dôkladne kontrolovať elektrónovú dávku uvádzanú v C/m^2, používame SEM kombinovaný s elektrónovým litografom, ktorý umožňuje ožarovať rôzne štruktúry

s vysokým rozlíšením a zároveň detailne kontrolovať parametre elektrónového lúča. Je veľmi dôležité pripomenúť, že nie celá elektrónová dávka sa naozaj zachytí v materiáli a skutočná zachytená hodnota musí byť dodatočne zistená.

1.2 Povrchové napätie a 'Pendant Drop' tenziometria

Povrchové napätie (Surface Free Tension - SFT) predstavuje plošnú hustotu Helmholtzovej voľnej energie povrchu a zvyčajne sa vyjadruje v mJ/m^2 alebo mN/m [Shuttleworth, 1950]. SFT konkrétnej kvapaliny si môžeme predstaviť ako prácu potrebnú na zväčšenie povrchu danej kvapaliny v inej tekutine (napr. voda vo vzduchu) [Shuttleworth, 1950]. Metóda 'Pendant Drop' je jeden z najjednoduchších, no zato veľmi presných spôsobov merania SFT. Jej princíp je založený na analýze tvaru kvapky visiacej z ihly so známym polomerom D_n (obr. 2a) [Berry et al., 2015]. Stav visiacej kvapky, a teda aj jej SFT σ, je daný pomerom gravitačnej a kohéznej sily, objemom kvapky V, priemerom ihly D_n a rozdielom hustôt kvapky a okolitého prostredia $\Delta\rho$ [Berry et al., 2015, Saad et al., 2011].



Obr. 2: Schéma geometrie systému visiacej kvapky a) na jej vrchole z=0, b) vo vnútri z≠0 a c) ilustrácia nevhodnej kvapky s malým pomerom gravitačnej sily ku kohéznej sile.

Vplyvom gravitačnej sily a snahy znížiť potenciálnu energiu majú kvapky tendenciu odtŕhať sa z ihly [Berry et al., 2015, Saad et al., 2011]. Pokiaľ však objem kvapky nie je príliš veľký, vďaka kohéznej sile dokáže kvapka odolať gravitačnej sile a udržuje sa uchytená na konci ihly v tvare sférického telesa minimalizujúc povrchové napätie. S nárastom objemu narastá aj vplyv gravitačnej sily, čo spôsobuje zmenu tvaru kvapky zo sférickej na typickú hruškovitú a pri istej hraničnej hodnote, tzv. kritický objem V_c, sa kvapka z ihly uvoľní a spadne [Berry et al., 2015].

Podľa Young-Laplaceovej teórie môžeme rozhranie medzi dvomi tekutinami (spomínaná voda vo vzduchu) interpretovať ako povrch s malou hrúbkou a priradiť mu hodnotu SFT σ. Tvar kvapky je potom zároveň tvarom tohto rozhrania [Daerr and Mogne, 2016a]. Takáto myšlienka nás privádza k Young-Laplaceovej rovnici

$$\Delta p = \sigma\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right), \tag{1}$$

ktorá vyjadruje tzv. Laplaceov rozdiel tlakov medzi dvomi tekutinami Δp ako závislosť na SFT rozhrania σ a parametroch tvaru kvapky, ktorými sú hlavné polomery krivosti R_1, R_2 (viď obr. 2b).

V rovnováhe musí platiť rovnosť medzi Laplaceovým a hydrostatickým tlakom (spôsobeným gravitačnou silou) [Berry et al., 2015], teda

$$\sigma\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right) = \Delta p_o - \Delta\rho g z, \tag{2}$$

kde Δp_0 je rozdiel hydrostatických tlakov vo vnútri kvapky a mimo nej na vrchole kvapky $z = 0$, g je gravitačné zrýchlenie, z je zvislá súradnica a $\Delta\rho$ je rozdiel hustôt tekutín v kvapke a mimo nej. Podľa geometrie vyobrazenej na obr. 2b môžeme R_2 vyjadriť ako $R_2 = x sin\theta$. Vďaka axisymetrii kvapky sa dá potom celý problém prepísať do cylindrických súradníc x, z a θ, čo po predelení polomerom krivosti na vrchole kvapky R_0 vedie k trom bezrozmerným diferenciálnym rovniciam zrátateľným vhodným softvérom [Daerr and Mogne, 2016a, Berry et al., 2015]. Pokiaľ zadáme $\Delta\rho$, g, dĺžkovú škálu a označíme rozhranie medzi ihlou a kvapku, takýto softvér zanalyzuje a vyrieši stanovený problém na základe obrázku visiacej kvapky. Numerické riešenie obsahuje okrem hodnoty SFT σ aj objem kvapky V a jej povrch A [Daerr and Mogne, 2016a].

Napriek jednoduchosti tejto metódy existujú fyzikálne limity, ktoré môžu viesť k nepresnostiam. Prirodzené a ťažko ovplyvniteľné sú odparovanie kvapaliny, difúzia alebo vplyv vlhkosti na počiatočné hodnoty [Berry et al., 2015]. Ovplyvniteľný limit je samotná kvapka, presnejšie jej polomer krivosti na vrchole R_0, ktorý závisí od objemu, SFT kvapaliny a má veľký vplyv na presnosť merania. Z tohto dôvodu existuje parameter 'Bond number' B_0, ktorý vyjadruje vhodnosť kvapky pre merania založené na prin-

cípe 'Pendant Drop' [Berry et al., 2015]

$$B_0 = \frac{\Delta\rho g R_0^2}{\sigma}. \quad (3)$$

Pokiaľ máme kvapku malého objemu a kohézna sila dokáže aj popri gravitačnej udržať kvapku v tvare podobnom sférickému telesu, obr. 2c, menšie zmeny SFT sa nepremietnu do zmeny tvaru kvapky a nie sú preto zmerateľné. Teda ak $B_0 << 1$, kohézna sila dominuje nad gravitačnou, kvapka je takmer sférická a presnosť je malá [Saad et al., 2011]. Naopak, pokiaľ máme kvapku s dostatočne veľkým objemom (veľké R_0), dokážeme zachytiť a zanalyzovať aj menšie zmeny SFT, teda presnosť narastá [Berry et al., 2015].

1.3 Experimentálne prevedenie

V našej štúdii sme použili cylindrické pelety z hydroxylapatitu s priemerom 10,00±0,05mm a výškou 2,0±0,1mm, ktorých detailnejšiu charakteristiku môžeme nájsť v štúdii Gandhi *et al.*[Gandhi et al., 2010]. Chemický vzorec HA je $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ a štandardná kryštalická fáza je buď hexagonálna $P6_3/m$ (náš prípad) alebo monoklinická $P2_1/b$ [Bejinaru Mihoc and Mitu, 2017]. HA je dielektrikum [Takeda, 2000], a teda je vhodný pre uchovávanie pridaného náboja v povrchovej vrstve ako aj v celom jeho objeme.

Vrámci našich experimentov sme v SEM nastavili pracovnú vzdialenosť na $WD = 32$mm, urýchľujúce napätie na 30kV (najvyššie, aké naše zariadenie umožňuje) a používali sme tri hodnoty elektrónovej dávky - 0,01μC/cm^2, 0,1μC/cm^2 a 1μC/cm^2. Aby sme zvýšili presnosť a/alebo znížili časovú náročnosť procesu ožarovania, pre jednotlivé dávky sme opitmalizovali hodnoty pôsobiaceho prúdu. Pri každej dávke sa zmenil aj priemer lúča (priemer skenovacieho bodu), pričom susedné body sa dotýkali, no neprekrývali. Nastavenia systému pre jednotlivé dávky sú uvedené v tabuľke 1. Bez ohľadu na hodnotu dávky bola ožarovaná plocha pri všetkých experimentoch v tvare štvorca so stranou 4,5mm. Takto pripravené vzorky sme následne použili na merania 'Pendant Drop' metódou.

Tekutina použitá na vytvorenie 'Pendant Drop' kvapiek bola deionizovaná voda, ktorej SFT je 72,8mJ/m^2 [Vargaftik et al., 1983]. Použitá ihla, ktorá bola z jednej strany napojená na prívod kvapaliny a z jej druhej strany visela kvapka,

Tabuľka 1: Nastavenia SEM použité pre rôzne elektrónové dávky. Hodnota prúdu bola nastavená na Faradyho cupe.

Dávka [μ**C/cm**^{2}]	**Prúd** [**pA**]	**Čas expozície**	**Polomer lúča** [**nm**]
0,01	10	3min 13s	37
0,1	100	3min 13s	130
1	1000	3min 13s	410

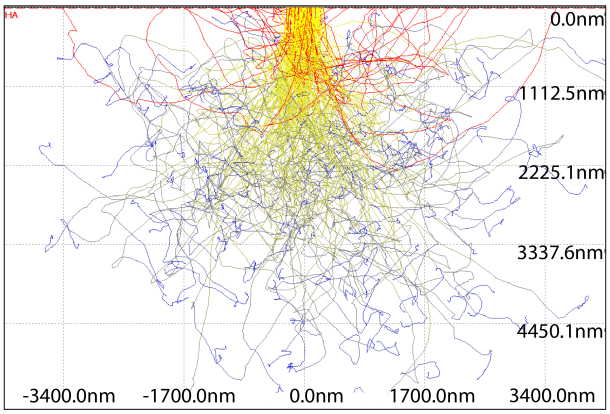
mala priemer $D_n = 0,591$mm. Merania prebiehali pri izbových podmienkach, a teda $\Delta\rho g$ z rovnice 2 bolo 9,8gmm^{-2}s^{-2} pre vodu na vzduchu. Ožiarenú vzorku sme umiestnili priamo pod visiacu kvapku s konštantným objemom a postupne zmenšovali ich vzájomnú vzdialenosť. Počas približovania vzorky ku kvapke sme pravidelne náš systém fotografovali a analyzovali rôzne parametre kvapky v programe ImageJ pomcou Pendant Drop pluginu[Daerr and Mogne, 2016b]. Meranie pomocou 'Pendant Drop' metódy sme ukončili v momente, keď sa kvapka vplyvom gravitácie a narastajúcej Coulombovej sily odtrhla a dopadla na povrch vzorky. Následne sme sa presunuli k meraniu zachyteného náboja. Pre tento účel sme sondu na meranie voľného náboja s vodivým hrotom vložili do odpadnutej kvapky, cez ktorú sme vytiahli zachytený náboj a odviedli ho do nanocoulombmetra (ets, Model 230 - NanoCoulomb Meter).

2 Výsledky

2.1 Ožarovanie hydroxylapatitu

Ako bolo popísané v sekcii 1.3, HA vzorky sme ožiarili elektrónovým lúčom v SEM. Podľa Monte Carlo simulácií [Hovington et al., 1997] (obr. 3) má interakčný objem hydroxylapatitu ožarovaného lúčom s 30keV a priemerom 410nm hĺbku približne 5μm. Ožarovaný štvorec má stranu 4,5mm, a teda celkový objem je 1x10^{-10}m^3.

Okrem cieľového efektu nabíjania materiálu sa môžu vplyvom výdatného ožarovania vzorky takmer po celej jej ploche vysokoenergetickým elektrónovým lúčom objavovať dva neželané fenomény - implantácia uhlíka a prehrievanie materiálu, čo môže mať vplyv na prerozdelenie chemických väzieb [Gregor et al., 2015]. Aby sme dokázali zhodnotiť prítomnosť týchto efektov a ich závažnosť, podrobili sme vzorku röntgenovej fotoelektrónovej spek-



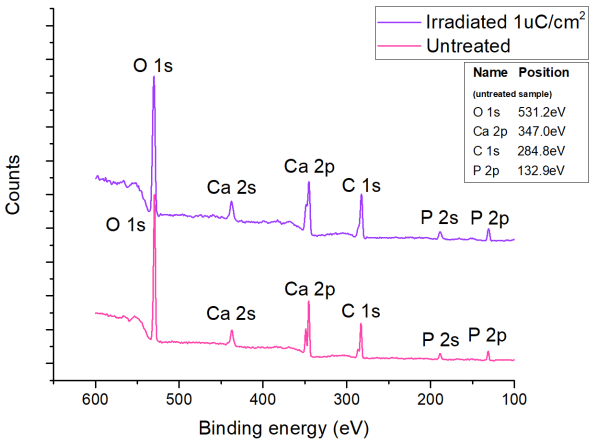
Obr. 3: Monte Carlo simulácia interakčného objemu HA vzorky ožarovanej elektrónovým lúčom v SEM s energiou 30keV a priemerom 410nm.

troskopii (X-ray Photoelectron Spectroscopy - XPS) pred, aj po ožarovaní v SEM. Na obrázku 4 môžeme vidieť porovnanie XPS spektier ožiarenej aj neožiarenej hydroxylapatitovej vzorky a v tabuľke 2 koncentrácie (v atómových percentách) štyroch detekovaných prvkov - kyslík, uhlík, vápnik a fosfor pre neožiarenú vzorku a dve ožiarené dávkami 0,1μC/cm^2 a 10μC/cm^2. Z dát v tabuľke 2 môžeme vidieť, že po ožiarení oboma dávkami mierne narastie percento uhlíka, prirodzene, na úkor ostatných prvkov. Čo sa týka redistribúcie chemických väzieb, jediné zmeny nastali v pomeroch C-C, C-O a C=O väzieb, ktoré sú však len povrchovou kontamináciou. Samotná hydroxylapatitová štruktúra je nepoškodená.

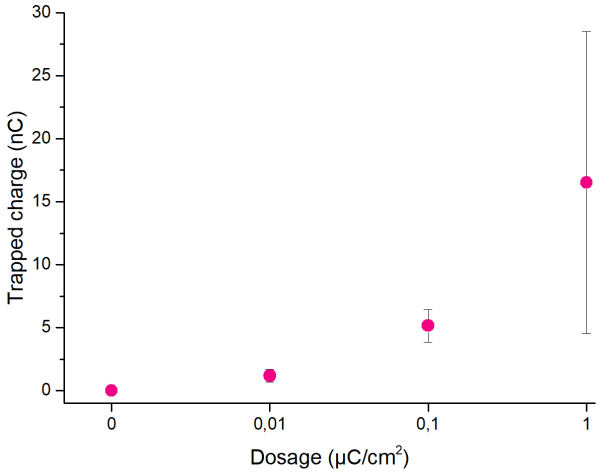
Tabuľka 2: Porovnanie chemického zloženia na základe XPS analýzy neožiarenej hydroxyapatitovej vzorky a dvoch ožiarených v SEM.

Dávka μC/cm^2	**O 1s at.%**	**C 1s at.%**	**Ca 2p at.%**	**P 2p at.%**
0	47,6	35,4	11,5	5,5
0,1	45,6	43,4	6,8	4,2
10	43,5	43,8	7,9	4,9

Vrámci našich meraní sme zistili, že hodnota zachyteného náboja nie je konštantná a mení sa aj pri rovnakých parametroch lúča. V grafe 5 môžeme vidieť priemernú hodnotu 10 meraní zachyteného náboja a štandardnú odchýlku od tejto priemernej hodnoty. Pri dávke 0,01μC/cm^2 ožarujúcej plochu 4,5mmx4,5mm je priemerný náboj 1,2±0,5nC a celkový náboj, ktorý ožiari vzorku je 2nC. Pri dávke 0,1μC/cm^2 je priemerná hodnota 5,2±1,3nC a celkový náboj 20nC. Pri najvyššej dávke 1,0μC/cm^2 je priemerná hodnota 16,5±12,0nC a celkový náboj ožarujúci vzorku 200nC. Aj z dôvodu rastúceho rozptylu hodnôt s rastúcou dávkou je veľmi dôležité dodatočne zmerať skutočnú hodnotu zachyteného náboja.



Obr. 4: XPS spektrum neožiarenej hydroxylapatitovej vzorky (ružová) a ožiarenej pri dávke 1μC/cm^2 (fialová). Obe spektrá obsahujú prvky tvoriace HA a uhlíkovú povrchovú kontamináciu.



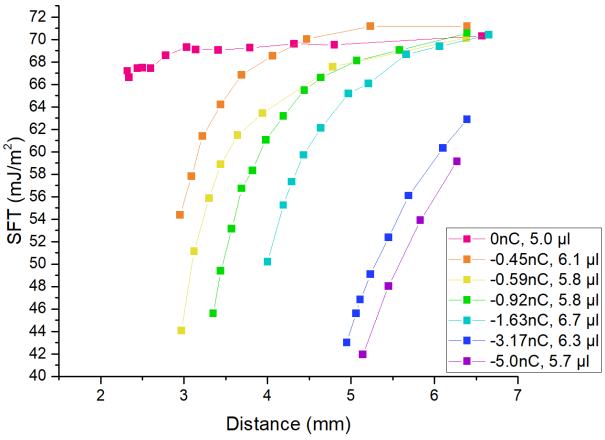
Obr. 5: Priemerná hodnota zachyteného náboja v hydroxylapatitových vzorkách ožarovaných v SEM pre dávky 0μC/cm^2, 0,01μC/cm^2, 0,1μC/cm^2 a 1μC/cm^2 s nastavenými parametrami podľa tabuľky 1.

2.2 'Pendant Drop' tenziometria

Princíp novej študovanej metódy merania elektrického náboja spočíva v závislosti SFT na vzdialenosti medzi ihlou a vzorkou obsahujúcou zachytený náboj. Výsledky experimentov so siedmymi vzorkami s rôznou hodnotou zachyteného náboja sú vykreslené v grafe na obrázku 6. Ružová krivka reprezentuje SFT kvapky s objemom 5,0μl, ktorá visí nad nenabitou vzorkou. Ostatné krivky predstavujú kvapky visice nad nabitými vzorkami: oranžová = -0,45nC a 6,1μl; žltá = -0,59nC a 5,8μl; zelená = -0,92nC a 5,8μl; tyrkysová = -1,63nC a 6,7μl; modrá = -3,17nC a 6,3μl; fialová = -5,0nC a 5,7μl. Zo zobrazených závislostí môžeme jednoznačne usúdiť, že vplyvom rastúceho poľa približujúcej sa nabitej vzorky sa výrazne mení aj SFT visiacich kvapiek. Naopak, kvapka visiaca nad nenabitou vzorkou neprechádza žiadnymi zachytiteľnými tvarovými zmenami a hodnota SFT sa mení tiež len minimálne. Tiež je vidieť, že s rastúcim nábojom zachyteným vo vzorke sú tieto zmeny výraznejšie. Pre všetky vzorky sme zmerali aj SFT pri vzdialenosti medzi vzorkou a ihlou približne 100mm, kde očakávame malé alebo nulové účinky poľa od zachyteného náboja. Pre všetkých 7 vzoriek bola táto hodnota v intervale od 70,3mJ/m^2 do 71,8mJ/m^2, čo je pre naše potreby v dobrej zhode s tabuľkovou hodnotou SFT kvapky deionizovanej vody, ktoré je podľa Vargaftik et al. rovné 72,8mJ/m^2 [Vargaftik et al., 1983]. Z dôvodu nemožnosti zmerať presnú vzdialenosť sme tieto hodnoty neuvažovali pri kalkuláciách, ani pri vykresľovaní grafov a slúžili len na overenie počiatočných podmienok.

Keďže kvôli technickým obmedzeniam sme neboli schopní vytvárať kvapky s konštantným objemom, bolo potrebné pred každým meraním vyhodnotiť vhodnosť kvapky. Ako bolo spomenuté v teoretickom úvode tejto práce, vhodnosť kvapky určujeme pomocou 'Bond number' B_0. Výsledné hodnoty spolu s polomerom krivosti pri vrchole kvapky R_0 (potrebný pre výpočet B_0) môžeme nájsť v tabuľke 3. Všetky merania boli vykonané s kvapkami, ktorých hodnota B_0 bola v intervale od 0,14 do 0,16, čo je pre naše podmienky (priemer ihly $D_n = 0,591mm$) postačujúce [Berry et al., 2015].

Jav popísaný experimentálnymi závislosťami v grafe 6 je ešte zjavnejší, keď porovnáme priamo fotografie visiacich kvapiek tak, ako je to urobené na obrázku 7. Horný rad fotografií, obr. 7a, je dokumentácia merania s kvapkou s objemom 5,7μl a vzorkou s



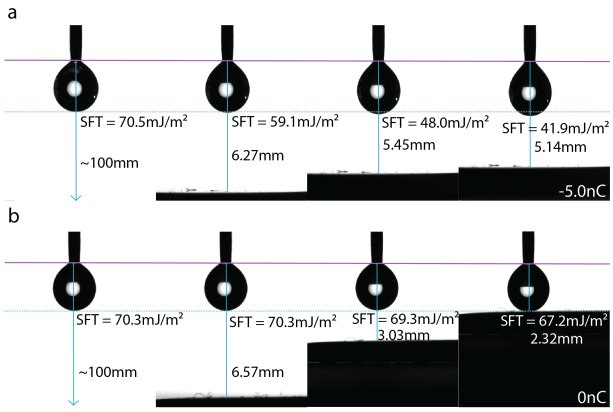
Obr. 6: SFT ako funkcia vzdialenosti medzi ihlou a vzorkou pre 7 vzoriek s rôznou hodnotou naexponovaného náboja.

Tabuľka 3: Polomer krivosti pri vrchole kvapky R_0 a 'Bond number' B_0, obe pre kvapku, ktorá visí vo výške 100mm nad nabitou vzorkou.

Meranie	**R$_0$ [mm]**	**B$_0$**
0nC, 5,0ul	1,02	0,14
-0,45nC a 6,1ul	1,08	0,16
-0,59nC a 5,8ul	1,07	0,15
-0,92nC a 5,8ul	1,07	0,15
-1,63nC a 6,7ul	1,09	0,16
-3,17nC a 6,3ul	1,09	0,16
-5,0nC a 5,7ul	1,06	0,15

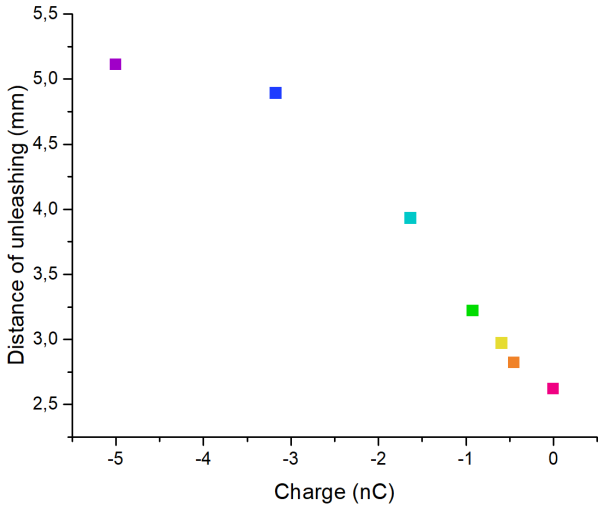
nábojom -5,0nC (fialová krivka na predchádzajúcom grafe). Dolný rad fotografií, obr. 7b, je dokumentácia merania s kvapkou s objemom 5,0μl a nenabitou vzorkou (ružová krivka na predchádzajúcom grafe). Prvá fotografia obrázku 7a aj 7b predstavuje hodnotu SFT pri vzdialenosti 100mm a štvrtá fotografia predstavuje posledný dátový bod tesne pred odtrhnutím kvapky od ihly. V oboch obrázkoch fialová čiara označuje nemennú pozíciu rozhrania medzi kvapkou a ihlou a modrá čiara značí vrchol kvapky na prvej fotografii. Zreteľne vidíme, že kvapka visiaca nad vzorkou s -5,0nC postupne mení tvar, predlžuje sa a hodnota SFT sa výrazne znižuje. Na druhej strane, kvapka visiaca nad nenabitou vzorkou neprechádza žiadnou viditeľnou transformáciou tvaru a pozorujeme len minimálnu zmenu SFT.

Taktiež sme študovali vzdialenosť, pri ktorej kvapky odpadávajú, ako funkciu hodnoty náboja ob-



Obr. 7: a) Vývoj profilu kvapky s objemom 5,7μl pri približovaní HA vzorky obsahujúcej -5,0nC a b) vývoj profilu kvapky s objemom 5,0μl pri približovaní nenabitej HA vzorky.

siahnutého v približujúcej sa vzorke. Výsledok môžeme vidieť na obrázku 8. Vidíme, že s rastúcim nábojom sa kvapky odtŕhajú skôr.



Obr. 8: Závislosť vzdialenosti odpadávania kvapiek z ihly od náboja obsiahnutého v približujúcej sa HA vzorke.

3 Záver

Vrámci tejto práce sa nám podarilo potvrdiť makroskopický vplyv náboja s rádovou hodnotou 10^{-9}C na kvapku deionizovanej vody s objemom niekoľkých mikrolitrov. Jednoznačné zmeny tvaru kvapky a významný pokles hodnoty povrchového napätia pri približovaní nabitej vzorky pridávajú našej štúdii veľkú váhu potrebnú pre pokračovanie vývoja tejto novej meracej metódy. Momentálny výskum sa zameriava na interpretáciu získaných výsledkov na základe vznikajúceho teoretického modelu, ktorý by mal popisovať systém visiacej kvapky v nehomogénnom elektrickom poli náboja zachyteného vo vzorke.

Poďakovanie

Chcela by som poďakovať môjmu školitelovi za jeho nekonečnú trpezlivosť a pomoc. Tiež by som sa chcela poďakovať všetkým členom Katedry experimentálnej fyziky, FMFI UK za ich pomoc pri príprave a dizajnovaní experimentov, ako aj pri ožarovaní vzoriek. Táto práca bola tiež podporená jednorázovým mimoriadnym štipendiom udeleným Fakultou matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského.

Literatúra

[Anuar et al., 2013] Anuar, A., Salimi, M. N. A., Daud, M. Z. M., and Yee, Y. F. (2013). Characterizations of hydroxyapatite (hap) nanoparticles produced by sol-gel method. *Advances in Environmental Biology*, 7(12):3587–3591.

[Bejinaru Mihoc and Mitu, 2017] Bejinaru Mihoc, A. and Mitu, L. (2017). Characteristics of hydroxyapatite: a review.

[Berry et al., 2015] Berry, J. D., Neeson, M. J., Dagastine, R. R., Chan, D. Y., and Tabor, R. F. (2015). Measurement of surface and interfacial tension using pendant drop tensiometry. *Journal of colloid and interface science*, 454:226–237.

[Daerr and Mogne, 2016a] Daerr, A. and Mogne, A. (2016a). Measuring liquid surface tension through the pendent drop method: description of measurement bench and imagej plugin. `https://bit.ly/3sEfmwi`. [Online; dostupné 31.3.2021].

[Daerr and Mogne, 2016b] Daerr, A. and Mogne, A. (2016b). Pendent_drop: an imagej plugin to measure the surface tension from an image of a pendent drop. *Journal of Open Research Software*, 4(1).

[Gandhi et al., 2010] Gandhi, A. A., Gunning, R. D., Ryan, K. M., and Tofail, S. A. (2010). The role of texturing and densification on optical transmittance of hydroxyapatite ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 93(11):3773–3777.

[Goldstein et al., 1981] Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Echlin, P., Joy, D. C., Fiori, C., and Lifshin, E. (1981). Electron-beam-specimen interactions. In *Scanning*

Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis, pages 53–122. Springer.

[Gregor et al., 2015] Gregor, M., Plecenik, T., Tofail, S., Zahoran, M., Truchly, M., Vargova, M., Laffir, F., Plesch, G., Kus, P., and Plecenik, A. (2015). Hydrophobicity of electron beam modified surface of hydroxyapatite films. *Applied Surface Science*, 337:249–253.

[Hovington et al., 1997] Hovington, P., Drouin, D., and Gauvin, R. (1997). Casino: A new monte carlo code in c language for electron beam interaction—part i: Description of the program. *Scanning*, 19(1):1–14.

[Lin and Chang, 2015] Lin, K. and Chang, J. (2015). Structure and properties of hydroxyapatite for biomedical applications. In *Hydroxyapatite (HAp) for biomedical applications*, pages 3–19. Elsevier.

[Plecenik et al., 2012] Plecenik, T., Robin, S., Gregor, M., Truchly, M., Lang, S., Gandhi, A., Zahoran, M., Laffir, F., Soulimane, T., Vargova, M., et al. (2012). Directly created electrostatic micro-domains on hydroxyapatite: probing with a kelvin force probe and a protein. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 23(1):47–50.

[Pokhrel et al., 2018] Pokhrel, S. et al. (2018). Hydroxyapatite: preparation, properties and its biomedical applications. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 8(04):225.

[Potts, 1987] Potts, P. (1987). *A Handbook of Silicate Rock Analysis*. Springer, 1 edition.

[Ratner et al., 2004] Ratner, B. D., Hoffman, A. S., Schoen, F. J., and Lemons, J. E. (2004). *Biomaterials science: an introduction to materials in medicine*. Elsevier.

[Saad et al., 2011] Saad, S. M., Policova, Z., and Neumann, A. W. (2011). Design and accuracy of pendant drop methods for surface tension measurement. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 384(1-3):442–452.

[Shuttleworth, 1950] Shuttleworth, R. (1950). The surface tension of solids. *Proceedings of the physical society. Section A*, 63(5):444.

[Takeda, 2000] Takeda, H. (2000). Dielectric properties of poled hydroxyapatite ceramics. *Key Eng Mater*, 181:35–40.

[Tofail, 2011] Tofail, S. A. (2011). *Biological interactions with surface charge in biomaterials*, volume 21. Royal Society of Chemistry.

[Tofail and Bauer, 2016] Tofail, S. A. and Bauer, J. (2016). Electrically polarized biomaterials. *Advanced Materials*, 28(27):5470–5484.

[Vargaftik et al., 1983] Vargaftik, N., Volkov, B., and Voljak, L. (1983). International tables of the surface tension of water. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 12(3):817–820.

[Yamashita et al., 1996] Yamashita, K., Oikawa, N., and Umegaki, T. (1996). Acceleration and deceleration of bone-like crystal growth on ceramic hydroxyapatite by electric poling. *Chemistry of materials*, 8(12):2697–2700.

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 137
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Martin Baránek, Pavol Neilinger, Daniel Manca, Miroslav Grajcar

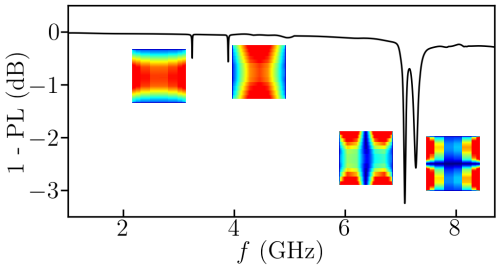
Supravodivé kinetické planárne rezonátory [Rozšírený abstrakt]

Martin Baránek[1*] Pavol Neilinger[1†‡] Daniel Manca[1§] Miroslav Grajcar[1¶]

Katedra experimentálnej fyziky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Silne neusporiadané supravodiče majú množstvo využití, napr. pri jednofotónových detektoroch, parametrických zosilňovačoch, alebo ako pásové vlnovodné rezonátory využívané ako filtre v supravodivých obvodoch. Tieto rezonátory sú mikrofabrikované kvázi-1D štruktúry, ako napríklad koplanárny pásový rezonátor (CWR). Spomínané zariadenia pracujú v GHz frekvenčnom pásme, preto znalosť ich komplexnej vodivosti v tejto oblasti je kľúčová pri ich návrhu a optimalizácii. Na štúdium komplexnej vodivosti sa používajú rôzne spektroskopické metódy, ktoré sú buď úzkopásmové (napr. samotný CWR), alebo širokopásmové (Corbinova sonda, koplanárne vlnovody a pod.). V tejto práci sa venujeme novému typu supravodivých rezonátorov, a to planárnym kinetickým rezonátorom, ktoré sme skúmali širokopásmovou spektroskopiou, za použitia pásového vlnovodu v geometrii flip-chip [Neilinger et al., 2020]. Pri tejto metóde sa skúmaná supravodivá vzorka pripravená na dielektrickej podložke priloží na širokopásmový pásový vlnovod. Komplexná vodivosť supravodivého filmu ovplyvňuje parametre rezonátora, ktorý vplýva na transmisiu vlnovodu, čo umožňuje z teplotnej závislosti transmisných spektier určiť vlastnosti rezonátorov, prípadne vrstiev.

Filtre z vrstiev MoC s hrúbkou 5 nm boli pripravené magnetrónovým naprášením na zafírové podložky ≈5x5 mm^2. Na overenie geometrickej závislosti rezonancií sme vytvorili optickou litografiou 2.25x2.25 mm^2 štvorcové štruktúry. Následne boli prichytené na koplanárny vlnovod, s vrstvou smerom k vlnovodu. Transmisné spektrá boli merané v sorpčnom ^{3}He refrigerátore a chladené na teploty do 300 mK. Transmisné spektrá boli merané vektorovým sieťovým analyzátorom. V týchto spektrách boli po prechode do supravodivého stavu prítomné série rezonancií. Teplotná závislosť týchto rezonancií bola analyzovaná modelom LC rezonančného obvodu $\omega_n = [(L_n + L_k)C_n]^{-1/2}$, kde



Obr. 1: Simulované frekvenčné spektrum faktora disipácie (PL) s jasne viditeľnými rezonanciami a s prislúchajúcimi prúdovými hustotami.

$L_k = \sigma_2/(\omega\sigma^2)$ je kinetická indukčnosť Cooperových párov. Vodivosť v supravodivom stave σ bola numericky vypočítaná z Dynesovho modelu pre silne neusporiadané supravodiče [Žemlička et al., 2015, Herman and Hlubina, 2017]. Analýzou rezonancií sme získali parametre supravodivých vrstiev, ktoré sú v dobrej zhode s DC a STS meraniami [Szabó et al., 2016].

Následne sme modelovali experiment v softvéri Sonnet a výsledné rozloženie prúdových hustôt potvrdzuje pôvod najnižších rezonancií prislúchajúci vlastným módom tenkej vrstvy (obrázok 1), pričom vlastnosti týchto rezonancií sú dominantne určené komplexnou vodivosťou a rozmermi supravodiča. Vlastnosti rezonancií tenkých filmov možno využiť na elimináciu nežiadúcich rezonancií v elektronických obvodoch, prípadne je možné rezonancie využiť na prípravu filtrov alebo napr. detektorov.

Literatúra

[Herman and Hlubina, 2017] Herman, F. and Hlubina, R. (2017). *Phys. Rev. B*, 96:014509.

[Žemlička et al., 2015] Žemlička, M., Neilinger, P., Trgala, M., Rehák, M., Manca, D., Grajcar, M., Szabó, P., Samuely, P., Gaži, i. c. v., Hübner, U., Vinokur, V. M., and Il'ichev, E. (2015). *Phys. Rev. B*, 92:224506.

[Neilinger et al., 2020] Neilinger, P., Baránek, M., Manca, D., and Grajcar, M. (2020). *Acta Physica Polonica A*, 137:797–799.

[Szabó et al., 2016] Szabó, P., Samuely, T., Hašková, V., Kačmarčík, J., Žemlička, M., Grajcar, M., Rodrigo, J. G., and Samuely, P. (2016). *Phys. Rev. B*, 93:014505.

*martin.baranek@fmph.uniba.sk
†pavol.neilinger@fmph.uniba.sk
‡Školiteľ
§daniel.manca@fmph.uniba.sk
¶miroslav.grajcar@fmph.uniba.sk

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 138
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Katarína Viskupová, Branislav Grančič

Vplyv odrazených Ar neutrálov na tvrdé TaB_x vrstvy

Katarína Viskupová[1*] Branislav Grančič[1†‡]

[1]Katedra experimentálnej fyziky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Diboridy prechodových kovov (TMB_2) sú keramické materiály s vynikajúcimi mechanickými vlastnosťami. Kvôli vysokej tvrdosti a chemickej stabilite pri vysokých teplotách sú vo forme tenkých vrstiev aplikovateľné ako ochranné povlaky na rezné nástroje, používané pri obrábaní hliníkových či magnéziových zliatin.

Mechanické vlastnosti takýchto povlakov výrazne závisia od pomeru B/TM a vnútornej štruktúry. Používanou metódou prípravy je magnetrónové naprašovanie z TMB_2 terča, pričom percentuálne zastúpenie prvkov v pripravenej vrstve sa v porovnaní s terčom často líši. Výsledná kompozícia je ovplyvnená viacerými mechanizmami, ako sú rôzna uhlová distribúcia odprášených B a TM atómov, či väčší rozptyl ľahkého bóru pri transporte z terča na substrát [Neidhardt et al., 2008]. Petrov a kol. ukázali, že pomer B/Ti sa dá kontrolovať využitím externého magnetického poľa [Petrov et al., 2017]. Dôležitú úlohu zohrávajú aj vysokoenergetické Ar neutrály odrazené od terča obsahujúceho ťažké prvky, ktoré pri dopade na rastúcu vrstvu spôsobujú spätné odprašovanie bóru [Grančič et al., 2019, Šroba et al., 2020].

V našej práci sa venujeme príprave TaB_x vrstiev jednosmerným magnetrónovým naprašovaním a ukazujeme, že významným parametrom ovplyvňujúcim zloženie a štruktúru je hrúbka TaB_2 terča. Pri jej znižovaní sa zväčšuje magnetické pole a hustota plazmy nad terčom, preto klesá hodnota napätia potrebná na dosiahnutie rovnakého prúdu výboja. S napätím na terči klesá aj energia od neho odrazených Ar neutrálov, čím sa zvyšuje pomer B/Ta vo vrstvách. Zmenu energie neutrálov demonštrujeme pomocou počítačových simulácií v programe SRIM.

Navyše skúmame vplyv externého magnetického poľa v axiálnom smere, vytvoreného dvoma Helmholtzovými cievkami pripevnenými na depozičnú komoru. S využitím plazmových meraní (Langmuirova sonda, prúdová sonda) ukazujeme, že toto pole spôsobuje zvýšenú koncentráciu iónov v blízkosti substrátu. Z dôvodu nižšej ionizačnej energie Ta oproti B (7,5 eV ku 8,3 eV) dochádza k preferenčnej ionizácii atómov Ta, ktoré sú priťahované na substrát, čím sa pomer B/Ta znižuje.

Pokles obsahu bóru je sprevádzaný zmenou kryštalickej štruktúry. V difrakčnom zázname sledujeme postupný prechod od preferenčnej (0001) k $(10\bar{1}1)$ orientácii v hexagonálnej $\alpha-TaB_2$ mriežke. Pri dosiahnutí výraznej podstechiometrie majú vrstvy až amorfný charakter. Všetky pripravené vzorky vykazujú vysokú tvrdosť nad 30 GPa. Na vrstvách s B/Ta$<$1,6 pozorujeme hromadenie materiálu okolo vpichov hrotu nanoindentora, čo naznačuje zvýšenú húževnatosť.

Poďakovanie

Práca bola podporená z grantov: APVV-171-0320, VEGA 1/0381/19 a OPVV (číslo projektu ITMS 26210120010).

Literatúra

[Grančič et al., 2019] Grančič, B., Pleva, M., Mikula, M., Čaplovičová, M., Satrapinskyy, L., Roch, T., Truchlỳ, M., Sahul, M., Gregor, M., Švec Sr, P., et al. (2019). Stoichiometry, structure and mechanical properties of co-sputtered ti1-xtaxb2$\pm\delta$ coatings. *Surface and Coatings Technology*, 367:341–348.

[Neidhardt et al., 2008] Neidhardt, J., Mráz, S., Schneider, J. M., Strub, E., Bohne, W., Liedke, B., Möller, W., and Mitterer, C. (2008). Experiment and simulation of the compositional evolution of ti–b thin films deposited by sputtering of a compound target. *Journal of applied physics*, 104(6):063304.

[Petrov et al., 2017] Petrov, I., Hall, A., Mei, A. B., Nedfors, N., Zhirkov, I., Rosen, J., Reed, A., Howe, B., Greczynski, G., Birch, J., et al. (2017). Controlling the boron-to-titanium ratio in magnetron-sputter-deposited tibx thin films. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 35(5):050601.

[Šroba et al., 2020] Šroba, V., Fiantok, T., Truchlỳ, M., Roch, T., Zahoran, M., Grančič, B., Švec Jr, P., Nagy, Š., Izai, V., Kúš, P., et al. (2020). Structure evolution and mechanical properties of hard tantalum diboride films. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 38(3):033408.

*viskupova12@uniba.sk
†branislav.grancic@fmph.uniba.sk
‡Školiteľ

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 139
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Hryhorii Makarov, Leonid Satrapinskyy

Photoelectrical and gas sensing properties of Mo alloyed TiO_2 nanotube arrays grown by anodization of DC magnetron sputtered films

Hryhorii Makarov * Leonid Satrapinskyy †
Department of Experimental Physics, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstract

Mo-doped TiO_2 nanotube arrays were prepared by the combined method of DC magnetron sputtering and anodic oxidation Were measured their photocatalytic and sensing properties.
Keywords: photocatalysis, gas sensors, TiO_2 nanotubes, TiO_2, Mo doped.

1 Introduction

Titanium dioxide (TiO_2) is a good photocatalyst due to its nontoxicity, chemical stability, and high photocatalytic activity. [Wang, S et al., 2013], [Avilés-García et al., 2017] However, the poor absorbance of visible light due to the wide band gap of TiO_2 limits its application. The incorporation of a secondary electronically active species into the lattice of TiO_2 can be efficient for sensitizing TiO_2 under visible light.

2 Experimental

The precursor Ti-Mo films were deposited by DC-magnetron sputtering on-silicon (100) substrates. The doping amount of Mo can be modified by changing the size of the molybdenum plate on the Ti target. The anodization was performed at room temperature in ethylene glycol based electrolyte containing 0.5 wt.% ammonium fluoride at 40 V for 30 minutes. Then Mo-Ti nanotube arrays were annealed in a tube furnace either in the 5% H_2/Ar atmosphere at 600◦C for 2h and cooled down with furnace. Then samples were tested for sensitivity to hydrogen. Photocatalytic properties were evaluated by studying their efficiency towards Rhodamine B.

3 Results

Mo-alloyed TiO_2 sputtered precursor film (Mo (42%), Ti(58%) thickness 670 nm) were prepared. Ti-Mo-O nanotubes with an average diameter 60 nm and length 350 nm were obtained by anodization. After annealing, a new phase was formed, that is just not a mix of TiO_2 and MO_3 phases (according to XRD). However, at this point Ti-Mo-O phase is responsible for the change in properties.

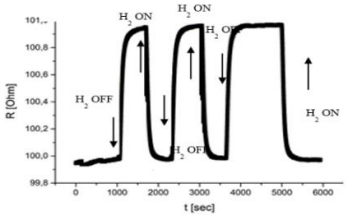


Fig.1 Dependence of resistance change in presence of H_2

Sensor properties of TiMo nanotubes were measured at synthetic air with hydrogen gas (at 10000ppm). The value of the resistance change is moderate in compare with pure TiO_2. Contrary to titanium dioxide Mo-alloyed nanotubes increased their resistance in presence of hydrogen. This probably indicate the p-type of the conductivity caused by Mo alloying. This may be due to the formation of a new intermetallic phase after annealing. The photocatalytic activities were studied under irradiation sources such as simulated solar light Mo-dopped TiO_2 nanotubes have a higher photodegradation rate, than pure Ti oxide nanotubes.

4 Conclusion

We performed the study sensor and of the photocatalytic properties of Mo-dopped TiO_2 nanotubes. This research demonstrated that Mo-Ti-O nanotubes have a higher photodegradation rate, than pure Ti and different behavior of reaction to hydrogen. The increase in light absorption can be associated with a decrease in the band gap, a consequence of doping with molybdenum.

References

[Wang, S.; Bai, L.; Sun, H.; Jiang, Q.; Lian, J.] Structure and photocatalytic property of Mo-doped TiO_2 nanoparticles. Powder Technol.2013,244, 9–15’

[Avilés-García et al.,] W and Mo doped TiO_2: Synthesis, characterization and photocatalytic activity. Fuel 2017,198, 31–41

* makarov1@uniba.sk
† leonid.satrapinskyy@fmph.uniba.sk

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 140
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Magdaléna Poláčková, Maroš Gregor

Vplyv feromagnetických vrstiev na supravodivé transportné vlastnosti supravodičov NbN a MgB_2

Magdaléna Poláčková[1]* Maroš Gregor[1‡§]
[1] KEF, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

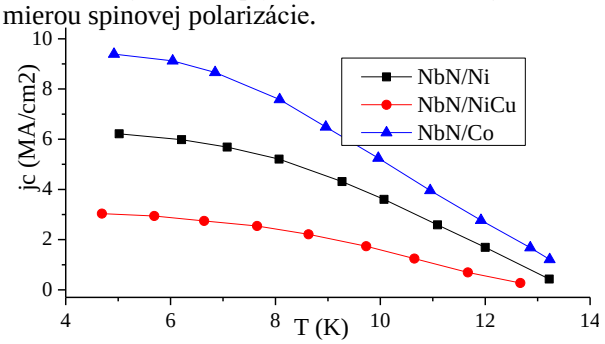
Silnoprúdové aplikácie supravodičov priamo závisia od kritickej prúdovej hustoty j_c. Zvýšenie jej hodnoty v supravodičoch II. typu je možné dosiahnuť ukotvením vírov (tzv. pinningom), ktoré vznikajú prenikaním magnetického poľa do objemu supravodiča v poli väčšom ako je hodnota tzv. dolného kritického poľa H_{c1}. Prúd pretekajúci supravodičom totiž spôsobuje pohyb vírov, čo vedie k nenulovému elektrickému odporu. [Annett, 2004] Ukotvenie môže nastať na rôznych defektoch mriežky. Vytváranie takýchto pinningových centier však zvyčajne vedie k zníženiu teploty prechodu do supravodivého stavu T_c. Efektívnejší spôsob ukotvenia vírov je magnetický pinning, pri ktorom spontánna magnetizácia feromagnetu vedie k vytvoreniu pinningových centier, a to bez poklesu T_c. [Bulaevskii et al., 2000]

V tejto práci bol skúmaný vplyv feromagnetických tenkých vrstiev (NiCu, Ni, Co) na transportné vlastnosti supravodičov II. typu NbN a MgB_2. Tenká vrstva NbN s hrúbkou 50 nm bola pripravená pulznou laserovou depozíciou. Vrstva MgB_2 s hrúbkou 200 nm bola pripravená naparovaním z dvoch nezávislých zdrojov Mg a B a následným žíhaním v argónovej atmosfére v prietokovom režime. Vrstva NbN bola pokrytá dielektrikom AlN s hrúbkou 45 nm a/alebo feromagnetickou vrstvou (NiCu, Ni, Co) s hrúbkou 50 nm.

Meranie R-T a I-V charakteristík pripravených vzoriek bolo vykonané štvorbodovou metódou. Výsledky meraní takto získaných transportných vlastností sú uvedené v Tab.1. Najnižšia hodnota j_c bola zaznamenaná na vzorke NbN pokrytej iba ochrannou dielektrickou vrstvou AlN. Pri použití feromagnetickej vrstvy NiCu kritická prúdová hustota j_c vykazovala takmer dvojnásobnú hodnotu a pri použití feromagnetu Ni až takmer 4-násobnú. Ako môžeme vidieť na Obr. 1, najvýraznejší vplyv na hodnotu j_c bol pozorovaný s feromagnetickou vrstvou Co, pri ktorej bola zaznamenaná j_c = 9,39 MA/cm^2. Merania na pripravenej heteroštruktúre s dielektrikom AlN oddeľujúcim feromagnetickú a supravodivú vrstvu (vzorka NbN/AlN/NiCu) vylúčili, že by tento nárast vo vyššie spomenutých meraniach bol spôsobený interdifúziou častíc feromagnetu do supravodiča.

Následne sme pozorovali nárast kritickej prúdovej hustoty aj v prípade supravodiča MgB_2. Transportné vlastnosti boli v prvom kroku merané na samostatnej vrstve MgB_2. Pokrytím tejto vzorky vrstvami AlN s hrúbkou 45 nm a NiCu s hrúbkou 50 nm došlo k zvýšeniu j_c na takmer dvojnásobnú hodnotu, a to bez zmeny T_c.

Z našich výsledkov vyplýva, že pri použití feromagnetu bol pozorovaný nárast j_c vo všetkých skúmaných prípadoch, a teda feromagnetická vrstva vytvára efektívne magnetické pinningové centrá pre ukotvenie vírov. Ukazuje sa tiež, že sila pinningu závisí od typu použitého feromagnetu. Najväčší vplyv mala vrstva Co, ktorá má z použitých feromagnetov najvyššiu mieru spinovej polarizácie [Busch et al., 1971] a najmenší vplyv mal NiCu s najmenšou mierou spinovej polarizácie.



Obr. 1 – Závislosť j_c(T) vzoriek so supravodivou vrstvou NbN pokrytých rôznymi feromagnetmi.

Vzorka	T_c [K]	j_c [MA/cm^2]
NbN/AlN	12,9	1,68 (4,79 K)
NbN/NiCu	13,5	3,04 (4,69 K)
NbN/AlN/NiCu	15,4	5,96 (4,59 K)
NbN/Ni	13,65	6,21 (5,02 K)
NbN/Co	13,8	9,39 (4,92 K)
MgB_2	29	4,9 (6,46 K)
MgB_2/AlN/NiCu	29	8 (7,1 K)

Tab. 1 – Porovnanie hodnôt T_c a j_c vzoriek.

Literatúra

[Annett, 2004] Annett, J. F. (2004). *Superconductivity, Superfluids, and Condensates.* Oxford University Press

[Bulaevskii et al., 2000] Bulaevskii L. N., Chudonovsky E. M. and Maley M. P. (2000). Magnetic pinning in superconductor-ferromagnet multilayers. In: *Applied physics letters 76*, 2574

[Busch et al., 1971] Busch, G., Campagna M., and Siegmann H. C. (1971). Spin-Polarized Photoelectrons from Fe, Co, and Ni. In: *Phys. Rev. B*, 4(3), 746-750

* polackova70@uniba.sk
‡ maros.gregor@fmph.sk
§ Školiteľ

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 141
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Adam Škrlec, Richard Hlubina

Dynesova supravodivosť za modelom BCS

Adam Škrlec[1*] Richard Hlubina[2†‡]

[1] Katedra teoretickej fyziky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava
[2] Katedra experimentálnej fyziky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

V mnohých supravodičoch je tunelová hustota stavov dobre popísaná fenomenologickou Dynesovou formulou [Dynes et al., 1978]:

$$N(\omega) = N_0 \Re\left[\frac{\omega + i\Gamma}{\sqrt{(\omega+i\Gamma)^2 - \bar{\Delta}^2}}\right], \qquad (1)$$

kde N_0 je hustota stavov na Fermiho hladine v normálnom stave. V práci [Herman and Hlubina, 2018] sa túto formulu podarilo teoreticky odvodiť pre singletné supravodiče obsahujúce magnetické nečistoty v rámci priblíženia koherentného potenciálu (CPA) a za použitia modelu BCS.

V našej práci tento výsledok zovšeobecňujeme nahradením okamžitej príťažlivej interakcie vlastnej modelu BCS realistickejšou príťažlivou interakciou sprostredkovanou výmenou fonónov, popísanou elektrón-fonónovou väzobnou funkciou g_{n-m}. Formálnym objektom skúmania je pre nás vlastná energia elektrónu vo formalizme Nambuho a Gorkova:

$$\Sigma_n = i(1-Z_n)\omega_n\tau_0 + Z_n\Delta_n\tau_1,$$

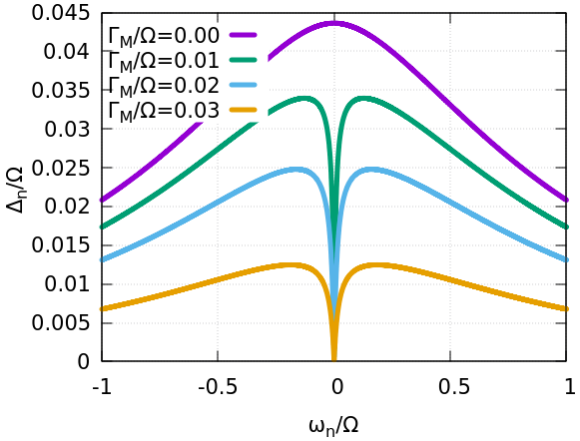
pričom $\tau_{0,1}$ označuje jednotkovú, resp. Pauliho maticu, $\omega_n = \pi T(2n+1)$ sú fermiónové matsubarovské frekvencie zodpovedajúce teplote T. Pre renormalizáciu vlnovej funkcie Z_n a funkciu energetickej medzery Δ_n sa nám podarilo odvodiť sadu rovníc:

$$Z_n^{ph} = 1 + \frac{\Gamma_M}{|\omega_n|} + \frac{\pi T}{\omega_n}\sum_m g_{n-m}\frac{\omega_m}{\sqrt{\omega_m^2+\Delta_m^2}},$$

$$Z_n^{ph}\Delta_n = \pi T\sum_m g_{n-m}\frac{\Delta_m}{\sqrt{\omega_m^2+\Delta_m^2}},$$

$$Z_n = Z_n^{ph} + \frac{\Gamma_S}{\sqrt{\omega_n^2+\Delta_n^2}},$$

v ktorých parametre Γ_M a Γ_S popisujú zrážkové frekvencie pre rozptyl na magnetických, resp. skalárnych nečistotách. Tieto rovnice reprodukujú pri voľbe $\Gamma_M = \Gamma_S = 0$ štandardné Eliašbergove rovnice pre izotrópny singletný supravodič s dokonalou časticovo-dierovou symetriou. Na druhej strane, pre neretardované interakcie naše rovnice reprodukujú známe výsledky pre Dynesove supravodiče [Herman and Hlubina, 2018].



Obr. 1: Závislosť Δ_n od ω_n pre rôzne hodnoty Γ_M. Väzba elektrónov s fonónmi je popísaná Debyeovým modelom s väzobnou konštantou $\lambda = 0.5$ a Debyeovou frekvenciou Ω pri teplote $T = 1\times10^{-4}\Omega$.

Odvodené rovnice riešime numericky iteratívnou metódou. Vplyv nenulovej hodnoty parametra Γ_M na funkciu energetickej medzery ilustruje obr. 1. S rastúcou hodnotou Γ_M pozorujeme jednak pokles Δ_n do nuly pre malé frekvencie, a tiež postupné potláčanie veľkosti Δ_n . Tieto výsledky ukazujú narušenie supravodivého stavu prítomnosťou magnetických nečistôt. Tá spôsobuje tiež pokles kritickej teploty fázového prechodu supravodič-normálny kov.

Po vykonaní plánovaného analytického predĺženia funkcií Z_n a Δ_n do reálnych frekvencií budeme schopní z našich dát extrahovať hodnoty dynesovských parametrov Γ a $\bar{\Delta}$ a skúmať ich teplotnú závislosť.

Literatúra

[Dynes et al., 1978] Dynes, R. C., Narayanamurti, V., and Garno, J. P. (1978). *Phys. Rev. Letters*, 41, 1509.

[Herman and Hlubina, 2018] Herman, F. and Hlubina, R. (2018). *Phys. Rev. B*, 97, 014517.

*skrlec1@uniba.sk
†richard.hlubina@fmph.uniba.sk
‡Školiteľ

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 142–153
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Danica Žilková, Jiří Šilha, Pavol Matlovič, Juraj Tóth

Space debris spectra acquired with the AMOS spectral cameras

Danica Žilková[1*] Jiří Šilha[1†] Pavol Matlovič[1‡] Juraj Tóth[1§¶]

[1] Division of Astronomy and Astrophysics, Comenius University, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstract: Rising threat of space environment pollution can badly affect the evolution of future space activities; therefore, it is essential to study artificial space debris. Among all its physical characteristics, material density is often overlooked, assuming that most of the man-made debris is made of aluminium. However, this is not always the case and rigorous study of debris' materials is required. Reflectance spectroscopy is based on capturing and processing of the incoming sunlight reflected from the object's surface. Techniques adapting reflectance spectroscopy offer great means of debris material characterization. These techniques are already widely used in asteroid classification and hereby presented research proposes its application into space debris domain. The work will be demonstrated on several real cases captured during nominal operation of the All-Sky Meteor Orbit System (AMOS) spectral cameras, originally used for meteor observation. Processing methods will be adapted for AMOS system and three spectral groups will be distinguished in the collected data: aluminium, golden multi-layer insulation and solar panel candidates.

Keywords: Reflectance spectroscopy, Space debris

1 Introduction

Reflectance spectroscopy, a technique used in many fields of astronomy, allows us to categorize objects into groups according to the similarities in the shapes of their spectral functions. The technique identifies specific features in the spectra which relate to different constituents, such as aluminium or multi-layer insulation. AMOS system, operating since 2007, harnessed recordings of space debris in form of specular flashes. The system itself consists of AMOS-Cam and AMOS-Spec, where spectral cameras provide the spectra recorded during a bright specular flash. Such recordings are processed and analysed, debris are identified and divided into categories according to the shape of their spectra and the spectral properties are analysed. The reduction process and its outcomes will be discussed in detail and AMOS' application in space debris domain will be assessed.

1.1 Reflectance Spectroscopy

Photons radiated from the Sun travel towards the Earth and when they stumble upon an obstacle, they are reflected storing the information about the obstacle's material. Hence the incident flux of radiation arriving from an object is divided into two composites; passive solar radiation reflected from the object's material and solar radiation absorbed and transformed into heat and irradiated as thermal radiation. Equation 1 describes the radiation flux recorded by a detector on Earth [Popescu, 2012].

$$Y(\lambda) = [X(\lambda)HA(\lambda) + T(\lambda)]HT(\lambda) \qquad (1)$$

Where $X(\lambda)$ is the radiation flux from the Sun, $HA(\lambda)$ the transfer function of the object, $HT(\lambda)$ includes the transfer function of the Earth's atmosphere and of the optical instrument, and $T(\lambda)$ is the thermal infrared emission of the object. However, this research will be zoomed into the spectral regions (wavelengths of visible light) where the thermal emission is negligible in comparison with the reflected radiation, hence we restrict to the term 'reflectance spectroscopy'. Equation 1 reduces to Equation 2 and the spectrum, i.e. the transfer function of the object, is given by the division of the recorded radiation flux by the radiation flux from the Sun and the transfer function of Earth's atmosphere and optical instrument.

$$HA(\lambda) = \frac{Y(\lambda)}{X(\lambda)HT(\lambda)} \qquad (2)$$

This equation will be followed throughout the entire spectral reduction process.

1.2 Space Debris

Space debris in general stands for all artificial bodies in geocentric orbit which no longer serve a useful purpose. Here belongs upper stages of launch vehicles, non-functional satellites, fragments and debris

*zilkova28@uniba.sk
†jiri.silha@fmph.uniba.sk
‡pavol.matlovic@fmph.uniba.sk
§juraj.toth@fmph.uniba.sk
¶Supervisor: mgr. Jiří Šilha, PhD.

created during in-orbit explosions. Their populations differ according to the shapes of their orbits. Most frequently used, Low Earth Orbits (LEO) are orbits where the period of one revolution is shorter than 2.2 hours. Medium Earth Orbits (MEO), where the period of revolution varies between 2.2 to 24 hours is occupied mostly by navigational satellites. High Earth Orbits (HEO) have one period of revolution 1 stellar day and their eccentricities are above 0.2, these orbits are home to functioning satellites and a great number of rocket bodies. Special types of orbits also exist, however in this research we will focus mostly on bodies located at the Low Earth Orbit - LEO. Current ESA statistical models, in Figure 1, demonstrate the increasing number of space missions, mostly the commercial ones, in LEO regions.

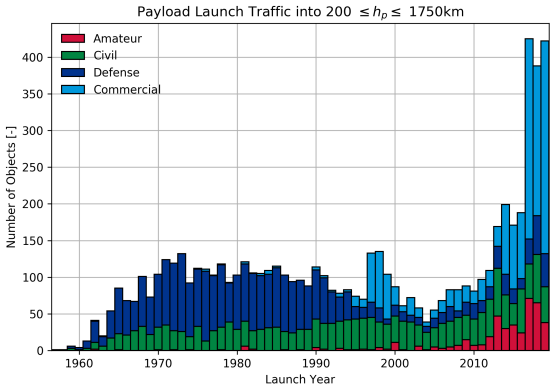


Figure 1: The number of space missions of different types in different time periods, in LEO orbit. Source: ESA

Being said that LEO orbits are the ones most frequently used, increase in traffic causes risks of collisions and demands for precise and promptly updated catalogues. On top of that, objects in LEO are very difficult to observe due to their high velocities. Hence common observational techniques include fast-tracking optical telescopes, such as the AGO70 telescope in Modra [Šilha J. et al., 2020] or via radar telescopes. Bright specular flashes of large-diameter objects in LEO can be detected by all-sky cameras such as the ones in AMOS System. These types of observations offer great way of monitoring random unidentified space debris, which are highly reflective and periodically appearing within the field of view of the all-sky cameras.

2 AMOS System

All-Sky Meteor Orbit System (AMOS) is fully automated and remotely controlled system of cameras for detection and orbit determination of meteors. This system has been developed and is operated by the Faculty of Mathematics, Physics and Informatics of the Comenius University in Bratislava, Slovakia (FMPI CU) and the system currently consists of two major parts, the all-sky AMOS-Cam and AMOS-Spec [Tóth et al., 2015].

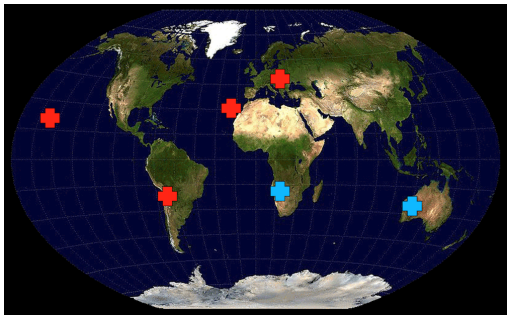


Figure 2: World-wide distribution of AMOS meteor network.

AMOS-Cam the global system of cameras monitors meteor activity around the world. The AMOS-Spec is a video system connected to AMOS-Cam for the systematic spectroscopic observations and detection of meteor spectra. AMOS-Spec as well as AMOS-Cam are both world-wide distributed, locations depicted in Figure 2, namely with stations in Slovakia, Canary Islands, Chile and Hawaii. Further expansion of the network is planned in central and eastern Slovakia as well as in South Africa and Australia. Wide distribution secures large sky coverage, Northern and Southern hemispheres observed simultaneously, and the trigonometry to accurately determine the atmospheric trajectory, which then leads to the pre-atmospheric heliocentric orbit and eventually estimates whether the meteor belonged to a certain meteor shower or to a sporadic background.

2.1 AMOS-Cam

AMOS-Cam camera consists of a fish-eye lens, image intensifier, projected lens and digital camera, operating computer with hard-drive, weatherproof enclosure, temperature, humidity and light sensors. Its primary focus is to capture meteors however during the nominal operation detection of other objects oc-

curs on regular basis. Purpose of AMOS-Cam in the space debris domain was studied in the bachelor thesis [Zilkova, 2019], where it was concluded that the best candidates for analysis are bright repetitive specular flashes which are favourably recorded by AMOS-Spec spectral cameras along with their first order spectra.

2.2 AMOS-Spec and AMOS-Spec-HR

The AMOS-Spec is a video system for the systematic spectroscopic observations and detection of meteor spectra [Matlovič et al., 2020]. Within the video system two types of spectral cameras are installed in AMOS network, AMOS-Spec and AMOS-Spec-HR. AMOS-Spec is only installed at the Astronomical and Geophysical Observatory in Modra, Slovakia (AGO), while AMOS-Spec-HR is installed in Canary Islands; La Palma and Tenerife, in Chile and Hawaii.

2.2.1 AMOS-Spec

The main display of AMOS-Spec components consists of 30 mm f/3.5 fish-eye lens, image intensifier, projection lens and digital camera (DMK 51AU02). This setup yields a 100 degrees circular field of view (FOV) with a resolution of 5 arc-min/pixel and frame rate of 12 fps. The spectral resolution of the system varies due to the geometry of the all-sky lens with a mean value of 1.3 nm/px. The system covers the visual spectrum range of approximately 370–900 nm. The typical limiting magnitude of the system for meteors is approx. +4 mag and -1.0 for meteor spectra.

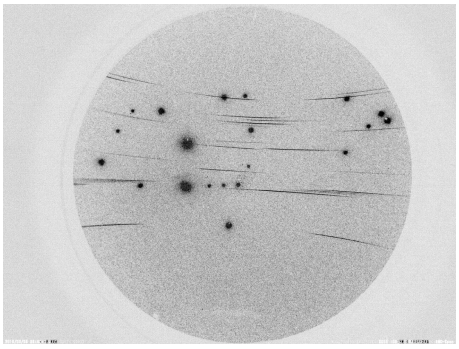


Figure 3: Composite image containing 23 samples of the spectra of space debris from image frames acquired by AMOS-Spec system.

First attempt to perform spectroscopic reduction of space debris recordings was evaluated on AMOS-Spec data. Composite of the spectra detected by AMOS-Spec, their zero and first order, are plotted in Figure 3. Initial AMOS-Spec recordings were of two satellites ERS 1 and ERS 2, ESA's former environmental European Remote Sensing satellites. Two events were recorded by the AMOS-Spec, one on 15th of April 2018 and one on 3rd of February 2018 respectively at AGO Modra. Both ERS satellites were made mainly of bright materials with good reflectivity, such as gold-copper multi-layer insulation. Recorded spectra fulfilled our expectations peaking in the red area of wavelengths. All the extraction processes and results were presented at The 1st International Orbital Debris Conference, at NASA, Houston, USA; [Žilková D. et al., 2019]. However, the initial data were mostly experimental and were vastly improved since. Mainly the research had shifted from AMOS-Spec to world-wide distributed AMOS-Spec-HR.

2.2.2 AMOS-Spec-HR

AMOS-Spec-HR has a new higher resolution spectrograph with display component of these spectrographs based on a 6 mm f/3.5 lens, high-definition digital Point Grey camera providing 60 × 45 degrees FOV with a resolution of 1.76 arc-min/pixel and frame of 15 fps. The applied 1000 grooves/mm holographic diffraction grating results in spectral resolution of 0.5 nm/pixel. The typical limiting magnitude of the system is approx. +3 for meteors and -1.5 for meteor spectra.

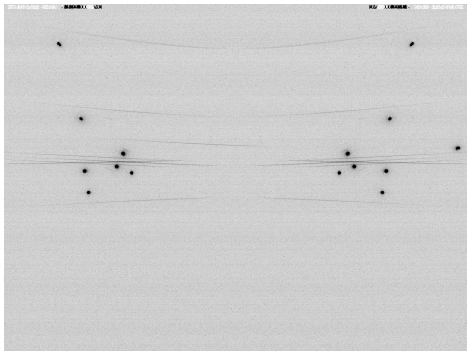


Figure 4: Composite image containing two-sided spectra of space debris from image frames acquired by AMOS-Spec-HR system.

Shifting the focus from AMOS-Spec to AMOS-Spec-HR allowed us to extend our database to three other locations on Earth: La Palma and Tenerife in

Canary Islands, and San Pedro in Chile. High resolution spectrograph provides recordings with high quality and makes our processing method, mainly the conversion from pixels to wavelengths, more accessible.

3 Data Reduction

Data reduction process will be demonstrated on real AMOS-Spec-HR space debris data, to be precise on the recording of SPOT 3 (22823) satellite which appeared as a bright specular flash on 25th of August 2018 05:34:29.00 UTC and was recorded by a camera in Tenerife, Canary Islands. Image reduction will be explained and spectral reduction; various spectral transformations necessary to obtain reflectance spectra, will be presented in detail. All together 46 samples were collected. In this research we aim to recognize in AMOS data the main spectral material types, compare them to laboratory samples and define functional categories for future evaluation of vast majority of data. Hence in this paper only the top candidates, with best quality spectra, will be considered and analysed.

3.1 AMOS: Spectral Data Acquisition

First, let us concentrate on acquiring the data. 25 months of AMOS nominal operation data were revised to collect space debris specular flashes. However, much more data archived in the past six years is waiting to be inspected. Data was collected from three AMOS-Spec-HR stations; Tenerife, La Palma in Canary Islands and San Pedro in Chile. Recordings date from November 2016 to August 2020. Collecting the data, attentive catalogue was created to note down all the spectral properties to distinguish the best candidates which will be selected to represent the different material types.

3.2 Object Identification

Astrometric reduction which leads to object identification is performed using the tool UFOAnalyzer [SonotaCo, 2019]. Astrometry from AMOS yields a standard astrometric uncertainty of 0.03–0.05° which translates to the accuracy of several tens or hundreds of meters for a meteor atmospheric trajectory, when the detailed all-sky reduction is performed. For space debris the uncertainties vary depending on the type of recorded event. Majority of records are of bright flashes in short-span videos, these objects can be identified but it is difficult to predict their trajectory. The offset between measured and observed positions can be up to one degree. Therefore, the system works for good quality object identification, but not so well for trajectory prediction, as it was concluded in [Zilkova, 2019].

Object identification itself is performed by astrometric measurements. These are compared with the ephemerides calculated with the FMPI's internal tool SatEph [Šilha et al., 2019] which is built based on the SGP4 model [Vallado et al., 2006]. The software uses the Two-Line Elements (TLE) set obtained from the public catalogue [SAIC, 2021] to calculate the exact position of the object for given location of the observer and observation epoch. For hereby purposes it will serve as a main identification method.

3.3 Image Reduction

AMOS data are in a form of short videos recording an event, these videos are loaded into ImageJ software [ImageJ, 2021] and processed. To obtain the best quality signal in the most consistent way, image processing must be performed in the following stages:

1. Flip horizontally: make sure that the zero order and first order lay out is from left to right.
2. Background extraction: subtract the medium image created from the frames outside of the recorded event.
3. Zero Order: it is important for future analysis to note down the pixel where the zero order occurs.
4. Scan the spectrum: using ImageJ segmented-line tool, starting from the zero order towards the first order.
5. Plot the spectrum: ImageJ software has a function which plots the profile of the spectrum. The satellite's spectrum measured from a recording is then plotted by ImageJ.
6. Save the spectrum: the Gray Value - on y-axis and the Distances in pixels - on x-axis are saved in form of two columns in a text file table. This information will be loaded into a processing software as the raw spectrum which needs to be transformed into the reflectance spectrum.

3.4 Spectroscopic Reduction

Spectroscopic reduction consists of all the transformations the spectrum must subdue to output the reflectance spectra. For hereby research SatSpec.py program was developed by the author in python programming language to perform all the necessary spectral transformations.

3.4.1 Signal to Noise Ratio

To assess the quality of the recording, signal to noise ratio (SNR) was computed. In general, to receive a reasonable signal quality SNR must be greater than 3. To ensure good quality data *SNR* must be greater than 5, however if it is too high, signal might become over-saturated and in such a case, information about the signal might become distorted. However, the appropriate SNR for this type of spectroscopic observation will be estimated in the future. *SNR* is computed using Equation 3, according to [Raab, 2002], where S is the total integrated signal from the object's measurement, n is the number of pixels within the aperture (when measuring spectra pixel per pixel $n = 1$), B is the mean measure of the background, T is the thermal signal collected by the pixel, respectively, and $(\sigma_R)^2$ is the readout noise for one pixel. The mean background noise is measured with ImageJ and it is the sum of all of three components B, T and $(\sigma_R)^2$.

$$SNR = \frac{S}{\sqrt{S + n(B + T + (\sigma_R)^2)}} \tag{3}$$

Furthermore to compute the total noise, Equation 4 is used.

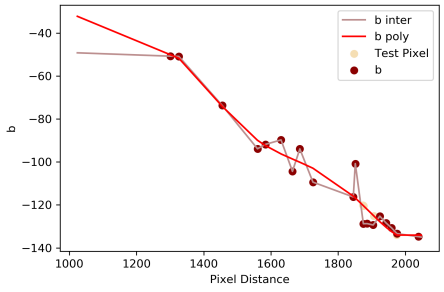
$$\sigma = \frac{S}{SNR} \tag{4}$$

Noise will be computed along every step of the spectroscopic reduction, throughout every transformation of the spectrum.

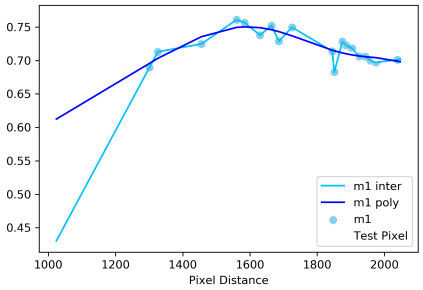
3.4.2 Pixels to Wavelengths Conversion

Essential step is to scale the measured pixel values into wavelengths. For meteor events this is done using known spectral lines. However, those lines are missing for specular reflections of debris objects. Therefore, to perform such scaling, regression coefficients were derived from known meteor spectra emission lines to create a model which will allow us to convert any pixel distance into wavelengths. Since the camera lens is curved a relationship must be derived between the independent variable px and the dependent variable *wavelength* and modelled as an second degree polynomial in px. In this way, for each location of zero order px_0, where the specular flash occurs, set of coefficients is assigned. These coefficients, when input into the Equation 5 convert pixels into wavelengths.

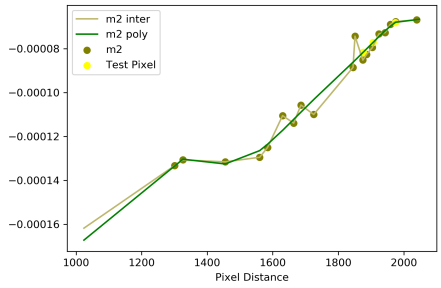
$$wavelength = b + m_1(px_0)px + m_2(px_0)px^2 \tag{5}$$



(a)



(b)



(c)

Figure 5: Estimated coefficients from the equation 5. 5a: b parameter; 5b: m_1 parameter; 5c: m_2 parameter

Different coefficients b, m_1 and m_2 must be interpolated for all positions within the pixel distance,

from 1024 to 2048. This range is selected because the pixel distance ranges from 0 to 1024 and then symmetrically horizontally flipped from 1024 to 2048. So, if we are measuring in the direction from left to right, from zero to first order, we get the range of 1024 to 2048. All three coefficients, derived from meteor spectra, are illustrated in the Figure 5.

To sum it up, the coefficients were interpolated and fitted by a polynomial to cover spectral positions from 1024 - 2048 pixels, where left-to-right specular flash occurs. This conversion method was reversely tested on meteor spectra and compared with standard method of converting pixels to wavelengths by identifying meteor emission lines. New method proved to be reliable with shifts only a few nanometres, as demonstrated on an example spectral plot below, Figure 6. Most importantly, the slight shifts in wavelengths will not influence the shape of the reflectance spectra.

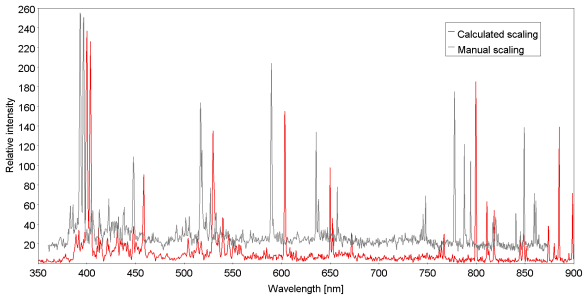


Figure 6: Comparison of a meteor spectrum scaled using our automatic method (red) and accurately manually scaled (grey).

In the SatSpec.py program, firstly, the raw spectrum generated from ImageJ is read from and input file, as shown at the top plot in the Figure 7.

The spectrum's zero order, where the flash occurs, is cut off so we are working only with the first order of the spectrum. In this step the Signal-to-Noise ratio is computed as well, noted at the top left corner of Figure 7. Spectrum is then normalized, the plot in the middle. Meaning it is divided by the highest value within the array. In this way the y-axis range will be from 0 to 1. This is desirable because in the next steps we will need to divide the spectrum by calibration curves which will need to be normalized as well, to ensure that the division yields properly scaled values. Finally, the spectrum is converted into wavelengths, the plot at the bottom of the Figure 7, according to the Equation 5.

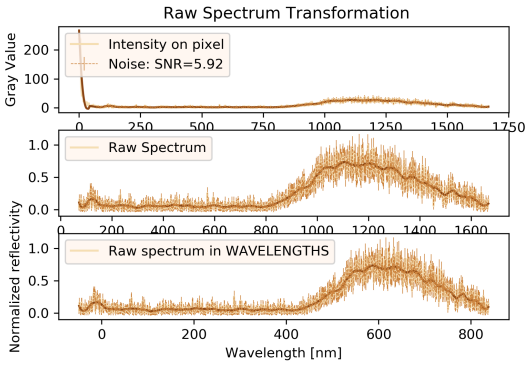


Figure 7: SPOT 3 raw spectrum, zero order cut off at the top, normalized spectrum in the middle and the conversion into wavelengths at the bottom.

3.4.3 Camera Sensitivity

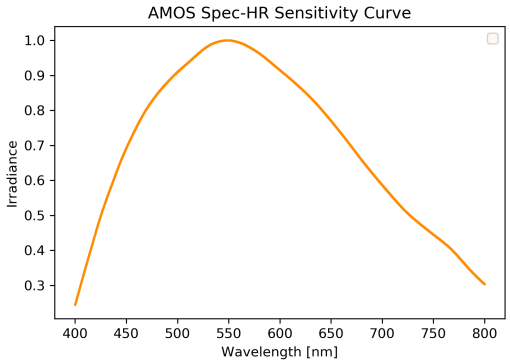


Figure 8: AMOS-Spec-HR spectral response curve.

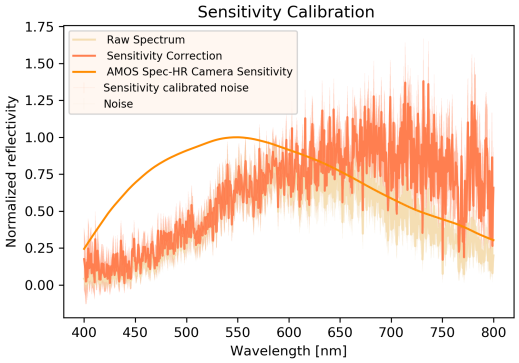


Figure 9: Raw spectrum divided by the sensitivity curve.

Once we have the spectrum in wavelengths and not in pixels we can proceed with more spectral transfor-

mations. First step would be to correct the spectrum by the camera's spectral response curve, or sensitivity, Figure 8. The spectral sensitivity of the AMOS-Spec-HR system was determined using reference calibration lamps. To correct the spectrum by sensitivity curve each element in the spectrum array must be divided by the sensitivity array, outcome of this process is in Figure 9.

3.4.4 Atmospheric Extinction

When ray of photons travels through Earth's atmosphere some photons collide with atoms, molecules, water droplets, grains of dust, and other objects. These photons may be absorbed by the objects (in which case they cease to exist), or they may be scattered into different directions. Either way, if they no longer reach the observer on the ground, they become extinct. The main contributors to the extinction are Rayleigh extinction, O2, Ozone, H2O, CO2, CH4, N2O. To get the information about atmospheric extinction [AERIS/CNRS, 2020] model was used.

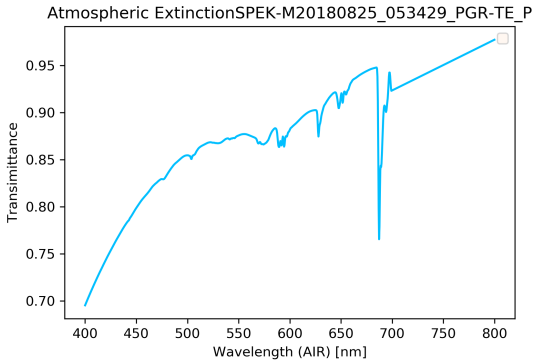


Figure 10: Atmospheric extinction for SPOT3 on 25th of August 2018, Tenerife.

This model is a free on-line service for the astronomical community, allowing the user to access a simulated atmospheric transmission for the specific observing conditions. If date, location and coordinates from the observational campaign are input, the tapas model outputs the atmospheric transmission for given night and location. For the night when SPOT 3 was observed atmospheric transmission model gave us extinction spectrum illustrated in Figure 10. To correct the spectrum by atmospheric extinction each element in the spectrum array must be divided by the atmospheric extinction array, outcome of this process is in Figure 11.

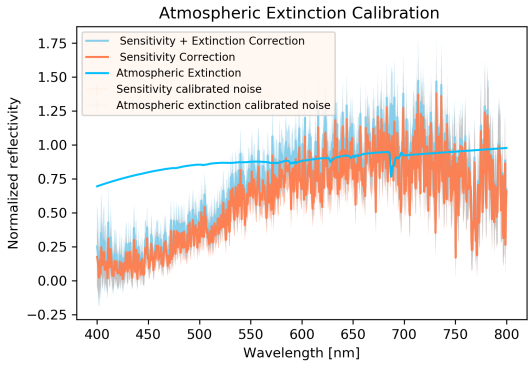


Figure 11: Sensitivity calibrated spectrum divided by the atmospheric extinction.

3.4.5 Solar Spectra Division

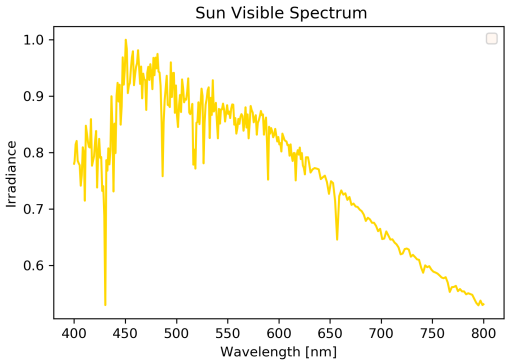


Figure 12: 2000 ASTM Standard Extraterrestrial Solar Spectrum [LLC, 2020].

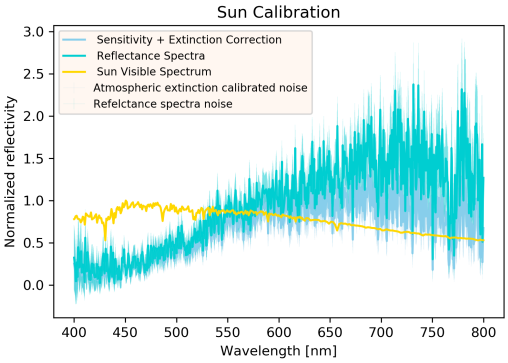


Figure 13: Sensitivity and extinction calibrated spectrum divided by the solar spectrum.

In the next step, it is necessary to divide the spectra by the solar spectrum, Figure 12 to obtain the rel-

ative reflectance spectrum, Figure 13. In this case we have used 2000 ASTM Standard Extra-terrestrial Spectrum E-490 in the wavelengths range of 300 – 1000 nm [LLC, 2020].

3.4.6 Final Reflectance Spectrum

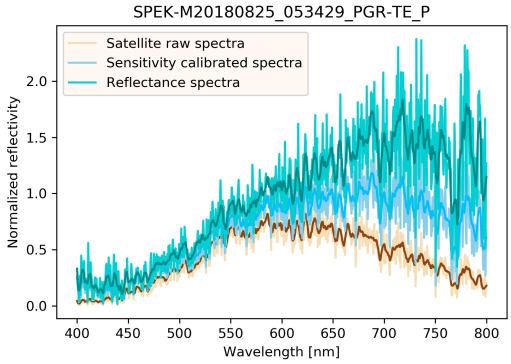


Figure 14: Reflectance spectrum of SPOT 3 in green colour. The brown colour represents the raw spectrum as it was initially measured by ImageJ software and blue colour represents the spectrum after it was calibrated by the sensitivity and atmospheric extinction.

The raw satellite spectra are now corrected by the three aforementioned normalized curves - sensitivity curve, atmospheric extinction and solar spectrum, to obtain final reflectance spectrum. The reflectance spectrum of SPOT 3(22823) is shown in Figure 14.

4 Spectral Analysis

In general, two approaches can be used to analyse the reflectance spectrum. One being man-in-the-loop method, where the spectrum is visually evaluated, and spectral group is assigned by a visual estimate. Second one is more analytic, comparing two functions using some integrated similarity function.

4.1 Laboratory Samples

Reflectance spectrum represents object's ability to reflect specific wavelengths according to the surface material. Since only few known materials are used in space missions, with proper laboratory documentation, comparing spectrum with laboratory data, material type is predicted. Four published laboratory measurements will be used as reference spectra: [Abercromby K., 2013], [Vananti et al., 2017], [Seitzer et al., 2012], [Xiaolong et al., 2014].

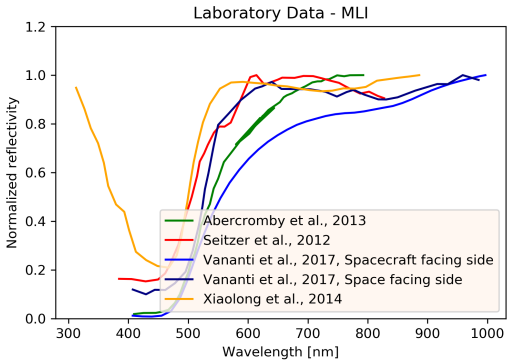


Figure 15: Multi-Layer Insulation (MLI) spectra from five different laboratory tested materials; [Abercromby K., 2013] spectrum (green), [Vananti et al., 2017] spectra (blue, both spacecraft facing and space facing), [Seitzer et al., 2012] spectrum (red), [Xiaolong et al., 2014] spectrum (yellow).

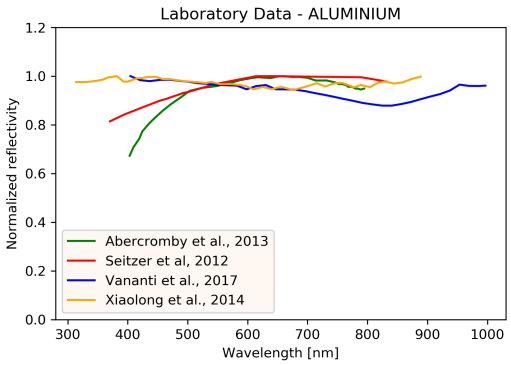


Figure 16: Aluminium Spectra from four different laboratory measurements; [Abercromby K., 2013] spectrum (green), [Vananti et al., 2017] spectra (blue), [Seitzer et al., 2012] spectrum (red), [Xiaolong et al., 2014] spectrum (yellow).

Golden Multi-Layer Insulation (MLI) - Figure 15 is a thermal insulation composed of multiple layers of thin sheets. It is also referred to as super-insulation. MLI is one of the main items of the spacecraft thermal design, primarily intended to reduce heat loss. In this case it is defined by a golden colour, with strong spectral feature peaking in the yellow-red wavelength

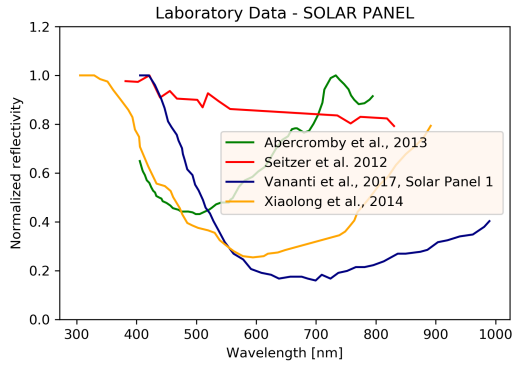


Figure 17: Solar panel spectra from four laboratory measurements; [Abercromby K., 2013] spectrum (green), [Vananti et al., 2017] spectra (blue), [Seitzer et al., 2012] spectrum (red), [Xiaolong et al., 2014] spectrum (yellow).

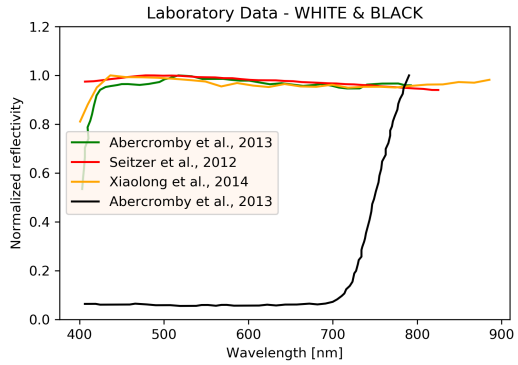


Figure 18: White paint spectra from three laboratory measurements; [Abercromby K., 2013] white spectrum (green) and black spectrum (black), [Seitzer et al., 2012] spectrum (red), [Xiaolong et al., 2014] spectrum (yellow). In the range of visible spectrum are all the curves straight lines.

regions of visible light. Although, MLI exists also in the form of aluminized insulation, such colour will not show the golden spectral features.

Aluminium - Figure 16 - is the most frequently used material in space missions, also in form of different alloys with other metals. Its reflectance spectrum resembles a perfect mirror with the curve almost completely straight.

Solar panel spectra - Figure 17 - this spectra, on the other hand, shows strong features at the beginning of the wavelengths of visible light, in blue region, with dramatic decrease in yellow-red regions.

White and black paint - Figure 18 - is similar to aluminium and reflects light in all wavelengths resulting in a straight curve throughout all wavelengths of visible light.

4.2 AMOS SatSpec Data Analysis and Results

To avoid man-in-the-loop analysis which might be subjective, we focused on finding a similarity function to compare two curves analytically. For this analysis we used Spearman rank-order correlation, a non-parametric measure of the monotonicity of the relationship between two data sets, [Zwillinger and Kokoska, 2000]. Data is correlated with laboratory data [Abercromby K., 2013]. To ensure the correct slope of each spectrum, lowess function is used to implement local linear estimate of the noisy data [Cleveland, 1979]. In this way, the signal noise will be suppressed, and the output function will be smooth.

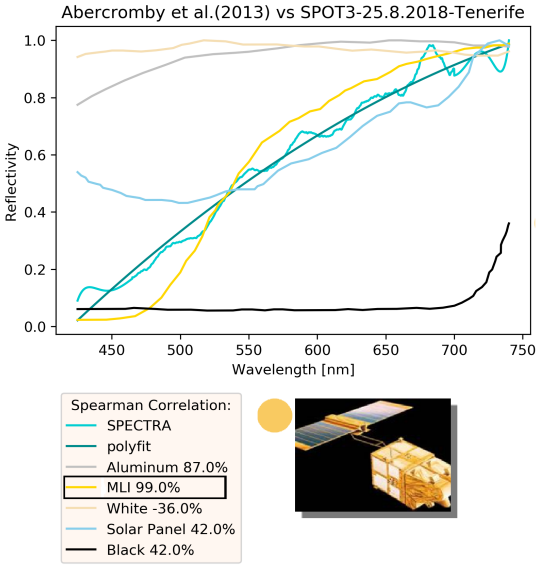


Figure 19: SPOT 3 correlation with laboratory data.

According to Figure 19, AMOS-Spec recording from 25th of August 2018, identified as the satellite SPOT 3 (93061A.22823), and in the plot indicated by the green curve, has a coincidence of 99% with the laboratory spectrum of multi-layer insulation, in this case it corresponds to gold-copper colour.

On the other hand, recording from 17th of May 2020, Figure 20, identified as Iridium 44 (97077B.

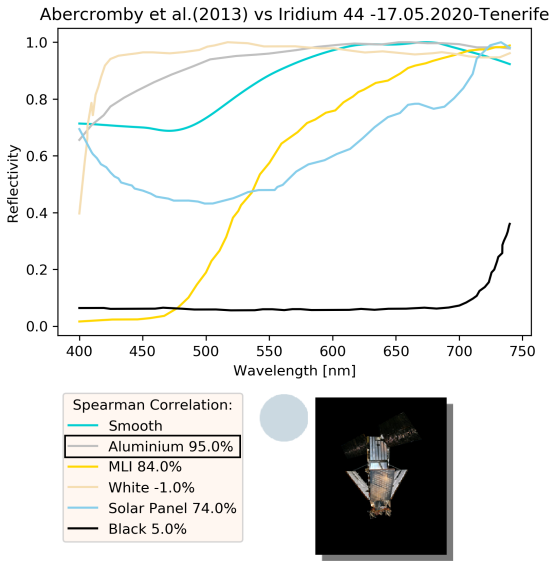


Figure 20: Iridium 44 correlation with laboratory data.

25078), corresponds to reflectance spectrum of aluminium by 95%. Last type of space debris spectra we encountered, Telkom 3(12044A.38744), Figure 21, occurred on 18th of July 2017 and resembles solar panel spectra with 64% match.

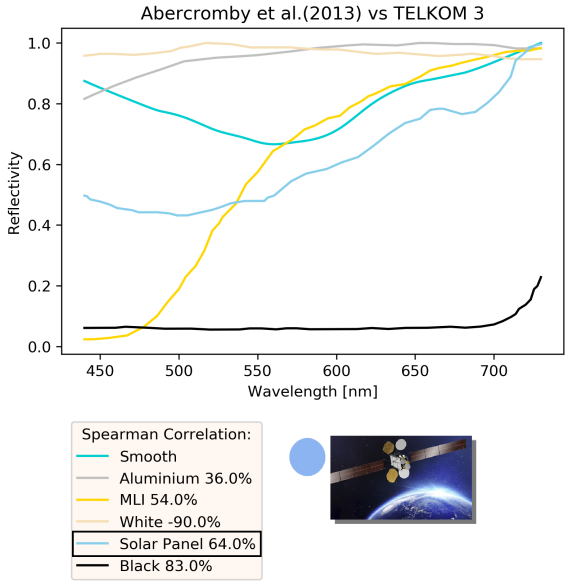


Figure 21: Telkom 3 correlation with laboratory data.

Additional information about the spectral function, such as its minimum, maximum and gradient were saved as well. This information can supplement the analysis and help us decide which material the spectrum corresponds to, even if the similarity percentage is low. However, detailed analysis is still underway, with option to study separate regions of wavelengths instead of the entire spectral function. These three groups conclude the three major categories of spectral data we are looking for. The fact that AMOS spectral cameras can record these three specific types of spectra with distinct precision unravels the capabilities within the AMOS system. In this manner 38 samples of spectra were processed and analysed. Let us present some outstanding samples.

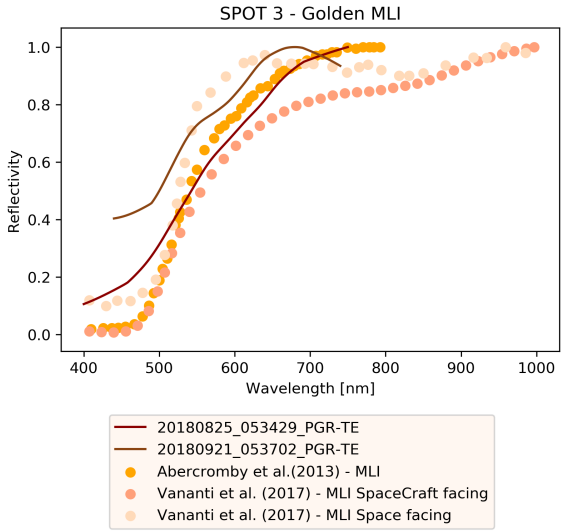


Figure 22: Two reflectance spectra of SPOT 3 satellite in a composite image with the laboratory spectra from [Vananti et al., 2017].

Two recordings of SPOT 3, Figure 22, from Tenerife station occurred on 2018-08-25T05:34:29 UTC and 2018-09-21T05:37:02 UTC. Both spectra show high percentage correlation with laboratory spectra of golden MLI. SPOT3 is a part of SPOT earth observation system designed by CNES, French National Centre for Space Studies. Its operation ended in November 1996 and it has been decaying on its orbit since then.

Next group is represented by three recordings of Iridium 44 satellite, Figure 23. Iridium 44 was part of the Iridium satellite constellation which provided L band voice and data information coverage to satellite phones. Due to the shape and highly reflective mate-

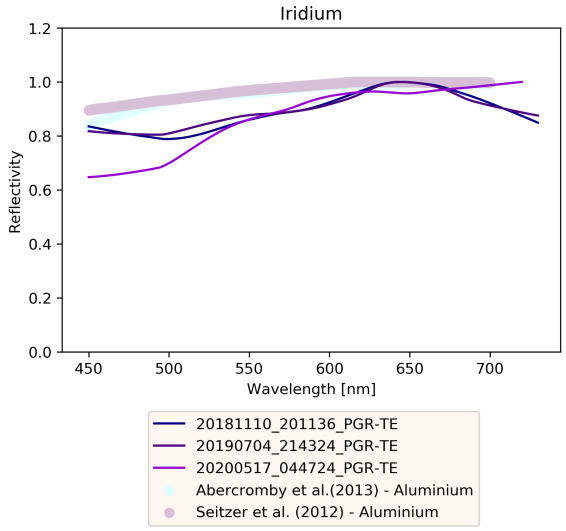


Figure 23: Three spectra of Iridium 44 satellites from 2018-11-10, 2019-07-04 and 2020-05-17. All of the spectra were recorded at the Tenerife station. In this composite the spectra is compared to two laboratory spectra of aluminium from [Abercromby K., 2013] and [Seitzer et al., 2012].

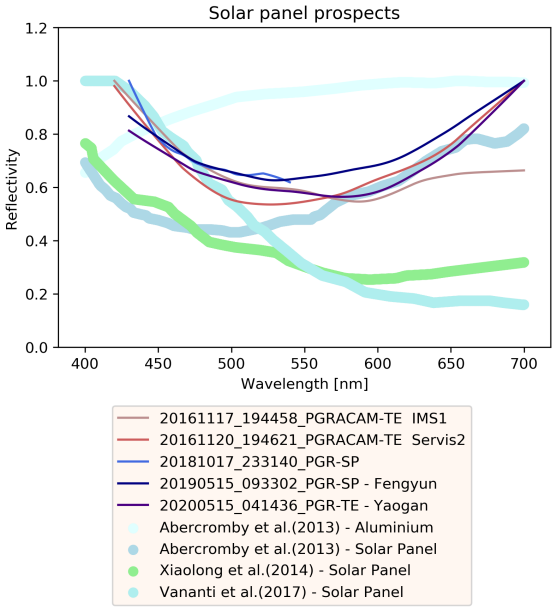


Figure 24: Solar panel prospects from the recordings of satellites IMS 1 (light pink), Servis 2 (red), Fengyun (dark blue), Yaogan (purple) and an unidentified satellite (light blue). Recorded spectra can be compared with the laboratory spectra of three types of solar panels from [Xiaolong et al., 2014] (light green), [Abercromby K., 2013] (gray-blue), [Vananti et al., 2017] (turquoise), and an aluminium spectrum (light blue) from [Abercromby K., 2013].

rial the old generation Iridium satellites focused sunlight on a small area of the Earth's surface, resulting in an effect called Iridium flares. During such flares the satellite appeared as one of the brightest objects in the night sky and could be seen even during the day. Iridium Communications completed disposal of the last of its 65 working legacy satellites on 28 of December 2019.

Last but not least, Figure 24, represents a group of recordings with spectral types that resemble a solar panel spectrum. Resemblance was estimated due to the convex shape of the function and a maximum in blue and red areas of wavelengths. Here belongs for example IMS1; fourteenth satellite in the Indian Remote Sensing satellite series, built, launched and maintained by the Indian Space Research Organisation, or Yaogan; Chinese remote sensing satellite, part of a series of Chinese reconnaissance satellites launched in the early 21st century. The rest of the data was divided into three groups - aluminium, MLI and solar panel candidates. Besides here displayed data, we recovered 14 recordings of Telkom 3 satellite, 12 recordings of Iridium satellites, 7 aluminium and 4 MLI candidates. Because of the long-spanned time period and repetitive appearance ageing and space weathering effects will be studied in detail in the future on Telkom 3 and Iridium samples. However, drawing conclusions and cataloguing such a vast majority of data will require a deeper study which is not within the scope of this paper.

5 Conclusion

We have acquired 38 samples of bright specular flashes which occurred during AMOS-Spec-HR spectral camera's nominal operation. These samples were processed, calibrated and their raw spectra were extracted. Astrometric measurement and object identification followed by spectral transformations were performed and reflectance spectra were extracted. Three spectral type categories were distinguished according to the shape of the spectra and compared with documented laboratory data using the Spearman correlation technique. The categories are: aluminium, MLI and solar panel candidates. In depth

analysis will be performed to study the material properties of different categories in the future. Furthermore, multiple spectra of Telkom 3 satellite and Iridium satellites were recorded in a long time period, this data will be in the future used to study ageing effects and space weathering. To sum it up, spectroscopic techniques offer effective ways to study different material properties of in-orbit bodies. Presented work proves that with fitting spectral cameras, such as the ones within the AMOS system, and rigorous approach, a great deal of information can be extracted from the reflectance spectra of different artificial objects.

Acknowledgments

Special thanks to all the co-authors, my supervisor and consultant, without them this work would not have been manageable.

References

[Abercromby K., 2013] Abercromby K., e. a. (2013). Comparisons of a constrained least squares model versus human-in-the-loop for spectral unmixing to determine material type of geo debris. In *6th European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany*.

[AERIS/CNRS, 2020] AERIS/CNRS (2012-2020). Transmissions atmosphériques personnalisées pour l'astronomie. `http://cds-espri.ipsl.fr/tapas/data?methodName=viewForm`.

[Cleveland, 1979] Cleveland, W. (1979). Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*, 74(368):829–836.

[ImageJ, 2021] ImageJ (2021). Image processing and analysis in java. `https://imagej.nih.gov/ij/index.html`.

[Jorgensen, 2000] Jorgensen, K. (2000). *Using reflectance spectroscopy to determine meterial type of orbital debris*. M.S., University of Colorado, Boulder.

[LLC, 2020] LLC (2020). Nrel transforming energy, 2000 astm standard extraterrestrial spectrum reference e-490-00. `https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-astm-e490.html`.

[Matlovič et al., 2020] Matlovič, P., Kornoš, L., Kováčová, M., Tóth, J., and Licandro, J. (2020). Characterization of the june epsilon ophiuchids meteoroid stream and the comet 300p/catalina. *Astronomy and Astrophysics*, 636(A122).

[Popescu, 2012] Popescu, M. (2012). *Techniques for asteroid spectroscopy*. Earth and Planetary Astrophysics [astroph. EP]. Observatoire de Paris; Universitatea Politehnica din Bucuresti, Facultatea de Ştiinţe Aplicate,.

[Raab, 2002] Raab, H. (2002). Detecting and measuring faint point sources with a ccd. *JOUR*.

[SAIC, 2021] SAIC (2021). United states special operations command. `www.space-track.org`.

[Seitzer et al., 2012] Seitzer, P., Lederer, S. M., Cowardin, H., Cardona, T., Barker, E. S., and Abercromby, K. J. (2012). Visible light spectroscopy of geo debris. In *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, held in Wailea, Maui, Hawaii*.

[SonotaCo, 2019] SonotaCo (2019). Ufoanalyzerv2, v2.48. `http://sonotaco.com/soft/e_index.html`.

[Tóth et al., 2015] Tóth, J., Kornoš, L., Zigo, P., Gajdoš, S., Kalmančok, D., Világi, J., Šimon, J., Vereš, P., Šilha, J., Buček, M., Galád, A., Rusňák, P., Hrábek, P., Ďuriš, F., and Rudawska, R. (2015). All-sky meteor orbit system amos and preliminary analysis of three unusual meteor showers. *Planetary and Space Science*, 118:102–106.

[Vallado et al., 2006] Vallado, D. A., Crawford, P., Hujsak, R., and Kelso, T. S. (2006). *Revisiting spacetrack report 3. The AIAAAAS Astrodynamics Specialist Conference*. M.S., University of Colorado, Boulder, American Institute of Aeronautics and Astronautics.

[Vananti et al., 2017] Vananti, A., T., S., and H., K. (2017). Reflectance spectroscopy characterization of space debris. *Advances in Space Research*, 59:2488–2500.

[Xiaolong et al., 2014] Xiaolong, J., T., Y., and S., C. (2014). Reflectance spectroscopy characterization of space debris. *Journal of Space Exploration*.

[Zilkova, 2019] Zilkova, D. (2019). *Processing of space debris observations acquired by the AMOS cameras network*. Department of Mathematics, Physics and Informatics, Comenius University in Bratislava.

[Zwillinger and Kokoska, 2000] Zwillinger, D. and Kokoska, S. (2000). *CRC Standard Probability and Statistics Tables and Formulae*. Chapman and Hall: New York.

[Šilha et al., 2019] Šilha et al. (2019). Ago70 telescope, slovak optical system for space debris research, surveillance and slr tracking support. In *Proceedings of the 1st Orbital Debris Conference, Houston*.

[Šilha J. et al., 2020] Šilha J. et al. (2020). Space debris observations with the slovak AGO70 telescope: Astrometry and light curves. *Advances in Space Research*, 65(8):2018–2035.

[Žilková D. et al., 2019] Žilková D. et al. (2019). Applications of AMOS meteor all-sky detection system for space debris research. In *1st international orbital debris conference, Houston, USA*.

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 154–165
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Karol Havrila, Juraj Tóth

Analýza dynamiky meteoritov a prachových častíc v priestore atmosféry

Karol Havrila[1*] Juraj Tóth[1†‡]

[1]Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstrakt: Výskum zameraný na medziplanetárnu hmotu v podobe meteoritov a prachových častíc nám dáva odpovede na otázky spojené so vznikom, evolúciou, chemickou distribúciou, štruktúrou Slnečnej sústavy a príspevkom kozmického materiálu na povrch Zeme. Primárnym komponentom celkového toku medziplanetárnej hmoty na Zem sú prachové častice a je im venovaná významná časť planetárneho výskumu. Analýza dynamiky meteoritov a prachových častíc v priestore atmosféry a detailne mapovanie ich dopadových oblastí prispieva k efektívnemu zberu meteorického materiálu a jeho následný výskum v laboratórnych podmienkach. Tento fakt kladie dôraz na priblíženie sa reálnym podmienkam v procese interakcie častice s atmosférou Zeme a lepšie pochopenie ich pohybu pred dopadom na jej povrch.

Cieľom práce je analyzovať meteority a menšie – prachové častice, ktoré priamo interagujú s atmosférou Zeme a dopadajú na jej povrch. Na tieto účely nám slúži program μ(m)-Trajectory s užívateľským rozhraním, ktorý predstavuje komplexný nástroj na simulovanie pohybu častíc v priestore atmosféry až pod dopad na povrch Zeme. Program v sebe zahŕňa aerodynamicky model telesa, atmosféricky model, model veterného poľa, výpočet koncentrácie častíc na jednotku plochy. Taktiež umožňuje simulovať rotáciu telesa, vykresľovať jeho trajektóriu a dopadovú oblasť priamo v aplikácii Google Earth atď. Spojením programu μ(m)-Trajectory a údajov významných svetelných úkazov získaných z celooblohových kamier AMOS, môžeme lepšie popísať trajektórie uvoľnených častíc, a korigovať tak ich prípadný zber ešte v priestore atmosféry alebo na povrchu Zeme.

V našej práci si priblížime celý proces analýzy pohybu meteoritov a prachových častíc, od ich uvoľnenia až po dopad na zem. Zameriame sa na prípad jasného bolidu z apríla roku 2020, ktorý bol zaznamenaný kamerami AMOS nad mestom Bánovce nad Bebravou. Získané výsledky budú slúžiť na chystanú expedíciu hľadania meteoritov a prachových častíc v danej oblasti.

*karol.havrila@fmph.uniba.sk
†juraj.toth@fmph.uniba.sk
‡Školiteľ

Kľúčové slová: Medziplanetárna hmota, meteorit, prachová častica, aerodynamický model, dopadová oblasť

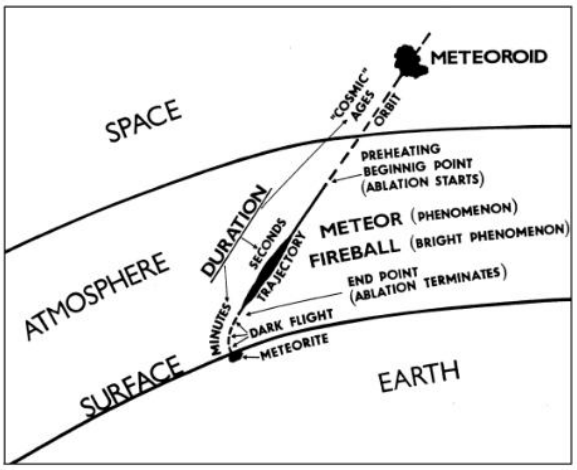
1 Úvod

Interakcia meteoroidu s atmosférou Zeme je spojená s viacerými fenoménmi, ktoré priamo súvisia so štyrmi režimami atmosferického pohybu: zahrievanie, ablácia, tmavá fáza letu a dopad. Významným fenoménom pri zahrievaní a ablácii je ionizácia v spojení s emisiou žiarenia. Tmava fáza letu a dopad je charakteristický ochladením telesa, bez prítomnosti ablácie a žiarenia [Ceplecha et al., 1998]. Na základe týchto charakteristík je popis dynamických, geometrických a fyzikálnych vlastností meteoroidu pri interakcii s atmosférou, založený na inštrumentálnych pozorovaniach. Fyzikálne postupy a modely sú obsiahnuté v článku [Ceplecha, 1987] a popisujú pád meteoritu na základe pozorovania bolidu v priestore atmosféry. Napriek tomu, že aj vďaka pozorovaniam máme katalogizovaných desiatky tisíc meteoritov, do konca roka 2020 má známu heliocentrickú dráhu len 36 objektov (https://www.meteoriteorbits.info/). Snaha o detailne spracovanie aerodynamiky v podobe použitia vhodných veterných polí, reálnych tvarov telies a koncentrácii prispieva k efektívnejšej lokalizácii dopadovej oblasti a zvyšuje pravdepodobnosť nálezu meteorických fragmentov.

Okrem väčších fragmentov sa význam kladie aj na výskum prachových častíc pôvodom z kozmu resp., ako produkt fragmentácie materského meteoroidu. Motivácia výskumu je totožná s meteoritmi a aj keď sú malé a ľahko zameniteľné s pozemskými časticami, predstavujú primárnu zložku celkového toku mimozemského materiálu na povrch Zeme. Zatiaľ čo celkový tok meteoritov na intervale hmotnosti 10 g - 10^6 g je približne 50 t/rok [Bland et al., 1996], celkový tok prachových častíc (< 1 mm) je na úrovni približne 15 x 10^4 t/rok [Rojas et al., 2021]. Po uvoľnení prachových častíc počas fragmentácie dochádza k efektívnemu brzdeniu pričom ich dynamika je primárne ovplyvnená veterným poľom. To ma za násle-

dok postupný rozptyl prachových častíc a je žiadúce vykonávať ich záchyt primárne v priestore atmosféry.

Našim cieľom je komplexná analýza aerodynamiky meteoritov a prachových častíc počas tmavej fázy letu a pri dopade na povrch Zeme. Snahou je priblížiť sa reálnym podmienkam interakcie častice s atmosférou Zeme, použitím aktuálnych modelov atmosféry a veterného poľa, reálnych tvarov telies, simulovaním rotácie telesa a výpočtom ich koncentrácie na jednotku plochy. Práca taktiež poukazuje na prepojenie aerodynamického modelu v podobe programu μ(m)-Trajectory s údajmi získanými z celooblohových kamier AMOS [Tóth et al., 2015], slúžiace na lepšie definovanie trajektórie častíc po ich uvoľnení zo zaznamenaného bolidu.



Obr. 1: Režimy a s nimi súvisiace fenomény počas prechodu meteoroidu atmosférou Zeme. V spodnej časti trajektórie meteoroidu (čiarkovaná čiara) je zobrazená tmavá fáza letu [Ceplecha et al., 1998].

2 Aerodynamický model tmavej fázy letu a dopadovej oblasti

Časť trajektórie meteoroidu pri prechode zemskou atmosférou, bez prítomnosti ablačného procesu a emisie žiarenia, sa nazýva tmavá fáza letu (Obr.1). Dôvodom je významná strata kinetickej energie telesa potrebná na jeho zahrievanie a následnú abláciu. Prítomný je proces ochladenia telesa a stuhnutia povrchovej kôry. Postupný nárast hustoty atmosféry, zmena rýchlosti a smeru vetra v závislosti na výške, tvar telesa a jeho rotácia výrazne ovplyvňuje trajektóriu telesa a predurčuje tak miesto dopadu. Prítomnosť veterného pola a úplná informácia o fyzikálnych vlastnostiach telesa v koncovom bode (bod medzi svetlou a tmavou fázou letu) definuje presnosť určenia miesta dopadu do 100 m na 1 kg meteoritu [Bischoff et al., 2017].

2.1 Tmavá fáza letu

Počas tmavej fázy letu meteoroid neemituje žiarenie a jeho pozíciu v čase a priestore a dynamické vlastnosti je potrebné vypočítať pomocou matematického modelu. Modelom tmavej fázy letu sa zaoberá článok [Ceplecha, 1987] kde sa predpokladá tvarovo symetrické teleso, ktoré nepodlieha ablácii a zachováva hmotnosť skúmaného objektu. Súčasťou aerodynamického modelu tmavej fázy letu sú:

1. Pohybové rovnice pre tri ortogonálne zložky celkovej rýchlosti častice v závislosti so zmenou výšky (pre náš prípad sme rovnice modifikovali na závislosť so zmenou času). Súčasťou pohybových rovníc sú komponenty veterného poľa a vplyv Coriolisovej sily.
2. Výpočet dĺžky trajektórie meteoroidu.
3. Definovanie geografických súradníc v každom čase a pri dopade na povrch Zeme.
4. Výpočet okamžitého azimutu a zenitovej vzdialenosti meteoroidu

2.2 Odporová sila a odporový koeficient Γ

V dynamike tekutín je odpor kvapaliny alebo plynu zadefinovaný pomocou odporovej sily, ktorá pôsobí v proti smere pohybu telesa, rešpektujúc smer toku tekutiny. Je závislá na rýchlosti toku tekutiny resp. rýchlosti pohybujúceho sa telesa priamoúmerné pri laminárnom prúdení alebo so štvorcom rýchlosti pri prúdení turbulentnom [French, 1970, Falkovich, 2018]. Laminárne alebo turbulentné prúdenie je zadefinované bezrozmerným Reynoldsovým číslom *Re*, ktoré dáva do pomeru viskózne a zotrvačné sily pôsobiace počas prúdenia [Clancy, 1975]. Počas tmavej fázy dochádza k významným zmenám rýchlosti meteoroidu a je potrebné poznať interval hodnôt Reynoldsovho čísla. Na základe experimentov, ktoré analyzovali nadzvukové prúdenie vzduchu okolo hladkej gule, sa ukázala hodnota Reynoldsovho čísla na intervale 10^5 - 10^6. Tento vý-

sledok reprezentuje výrazne turbulentné prúdenie [Schlichting, 1955]. Odporovú silu pri turbulentnom prúdení definujeme ako:

$$F_d = \frac{1}{2}\rho u^2 \Gamma S \tag{1}$$

kde F_d je odporová sila ktorej smer je identický s relatívnym smerom toku tekutiny, ρ je hustota prítomnej tekutiny, u popisuje rýchlosť pohybujúceho sa telesa, S je účinný prierez telesa a Γ je odporový koeficient. Odporový koeficient je bezrozmerná veličina, ktorá kvantifikuje odpor telesa v tekutine a jeho veľkosť je závislá od rýchlosti, tvaru resp orientácie telesa, veľkosti telesa, hustoty kvapaliny a jej viskozity [Clancy, 1975]. Rovnicu (1) vieme prepísať pre odporový koeficient na tvar:

$$\Gamma(M) = \frac{2F_d}{\rho u^2 S} \tag{2}$$

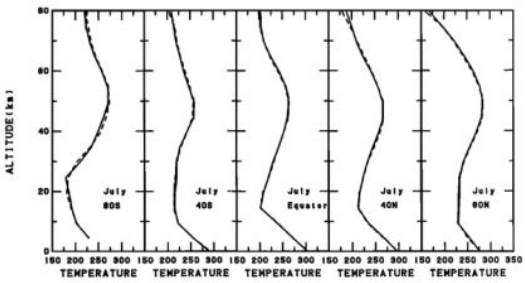
rovnica (2) popisuje odporový koeficient ako funkciu čísla Mach (M). Relatívnu rýchlosť meteoroidu vzhľadom na prúdiaci vzduch uvažujeme v jednotkách Mach.

2.3 Rozšírený model atmosféry MSIS-E-90

Počas tmavej fázy letu meteoroid postupne prechádza jednotlivými vrstvami atmosféry, ktoré vplývajú na zmenu jeho letových vlastností. Na základe toho je potrebné definovať vhodný model atmosféry. V našom prípade používame analyticko - empirický model MSIS-E-90 rozšírený o strednú a nízku atmosféru. Model popisuje termosférickú teplotu a hustotu vzduchu v závislosti od výšky a kombinuje dáta z vesmírnych družíc, atmosferických raketových sond a radarových meraní. Pri definovaní výstupných údajov zohľadňuje prítomnosť atmosferických molekúl (N2, O2, O, He, Ar, H a atómy N), vplyv slnečnej aktivity na atmosféru, planetárny magnetizmus, geografickú polohu v dennej a mesačnej variácii [Hedin, 1991]. Obrázok 2 poukazuje na priemernú modelovú teplotu vzduchu v závislosti od výšky v mesiaci júl a zobrazuje jej zmeny v závislosti od zemepisnej šírky. Namodelované hodnoty porovnáva s reálnymi nameranými teplotami v danom období

2.4 Veterné pole, komponenty vetra U a V, rýchlosť a smer vetra

Pri atmosférickom prúdení vzduchu, ktorý ovplyvňuje pohyb meteoroidu, uvažujeme o dvoch faktoroch: horizontálny smer vetra a jeho rýchlosť. Matematicky definujeme smer a veľkosť rýchlosti vetra pomocou vektora v_H a vyjadrujeme ho pomocou ortogonálnych komponentov rýchlosti U a V (obr. 3) [Pechala, 1991]:



Obr. 2: Priemerná teplota vzduchu v závislosti od piatich zemepisných šírok počas mesiaca júl (plná čiara). Namodelované teploty modelom MSIS-E-90, vypočítané pre rovnaké oblasti (prerušovaná čiara) [Hedin, 1991].

1. komponent U: smerujúci na východ (E) označovaný ako zonálna rýchlosť

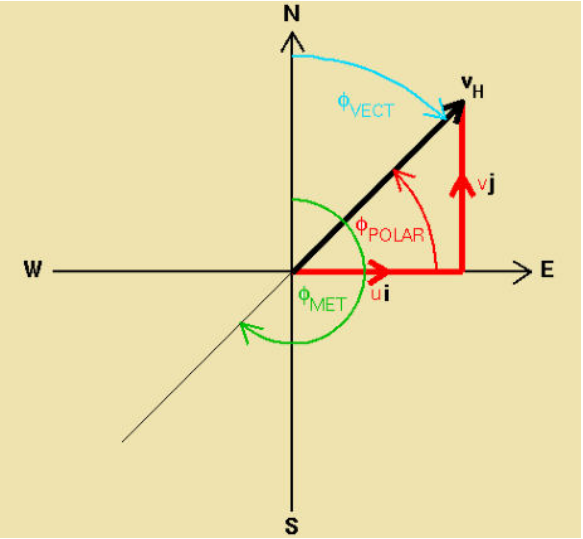
2. komponent V: smerujúci na sever (N) označovaný ako meridionálna rýchlosť

V meteorológii sa pre smer vetra definujú dva opačne orientované uhly:

1. uhol ϕ_{VECT} (obr.3, modrý uhol) predstavuje veterný vektorový azimut a definuje smer KAM fúka vietor. Definuje sa v smere hodinových ručičiek s počiatkom na severe (N).

2. uhol ϕ_{MET} (obr.3, zelený uhol) predstavuje meteorologický smer vetra a zároveň smer ODKIAĽ fúka vietor. Totožné sa určuje zo severu v smere hodinových ručičiek a od veterného vektorového azimutu je posunutý o 180°.

V prípade modelu tmavej fázy letu meteoroidu sa štandardne používa meteorologický smer vetra ϕ_{MET} z dôvodu totožne definovaného geografického azimutu, vystupujúceho v pohybových rovniciach modelu. Štandardne používané meteorologické databázy resp. modely veterného poľa ponúkajú priamo hodnoty veterných komponentov U a V. Pri prevode veterných komponentov na rýchlosť a smer je



Obr. 3: Definovanie smeru a celkovej rýchlosti vetra pomocou ortogonálnych komponentov rýchlosti U a V. Popis veterného polárneho uhla ϕ_{POLAR}, veterného vektorového azimutu ϕ_{VECT} a meteorologického smeru vetra ØMET [Pechala, 1991].

vhodné používať funkciu *atan2(x,y)*, ktorá zabezpečuje správny výber kvandrantu pri určení veterného polárneho uhla ϕ_{POLAR} (obr.3 červený uhol). Následný prevod má tvar [Pechala, 1991]:

$$\phi_{MET} = \frac{180}{\pi} \text{atan2}(-U,-V) \tag{3}$$

Samotná rýchlosť vetra je definovaná pomocou veľkosti vektora v_H a popisuje ju výraz:

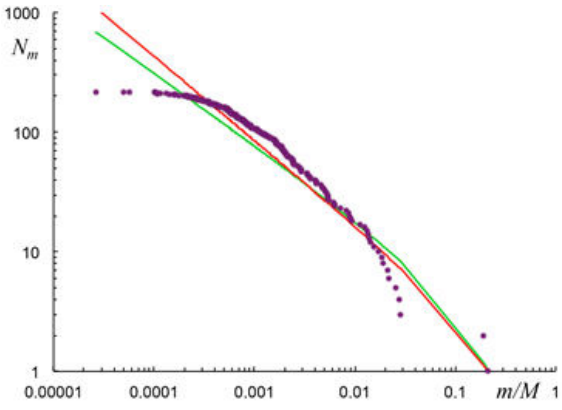
$$|v_H| = \sqrt{U^2+V^2} \tag{4}$$

2.5 Hmotnostná distribúcia, koncentrácia častíc

Súčasťou analýzy je aj vyhodnotenie koncentrácie častíc založenej na hmotnostnej distribúcii. V našom prípade sa zameriavame na definovanie hmotnostnej distribúcie pomocou inverznej kumulatívnej distribučnej funkcie iCDF. Definuje sa ako distribúcia pre nájdené fragmenty a reprezentuje závislosť kumulatívneho počtu fragmentov na vertikálnej osi k ich hmotnosti na horizontálnej osi v logaritmickej škále. Príklad kumulatívnej distribučnej funkcie pre nájdene fragmenty meteoritu Košice (v počte 218 fragmentov) vidíme na obrázku 4 [Gritsevich et al., 2014]. Pre našu analýzu sme si vybrali práve distribučnú funkciu z prípadu meteoritu Košice, ktorý zastupuje štatisticky významnú skupinu meteoritov - obyčajných chondritov. Ich zastúpenie spomedzi všetkých známych meteoritov je na úrovni 86.2% (Meteoritical Bulletin Database, 2021). Pre fitovanie vybranej distribúcie sme zvolili metódu katastrofického rozpadu telesa z článku [Brykina and Egorova, 2020], ktorá je založená na „silovom zákone“ a definuje nám kumulatívny počet pre fragment konkrétnej hmotnosti. Rovnica pre fit nasledujúci odvodený tvar (5) (obr. 4):

$$|N_m| = \frac{1-\beta}{\beta l^{l-\beta}}((\frac{m}{M})^{-\beta} - l^{-\beta}) + 1 \tag{5}$$

kde β predstavuje silový index a jeho hodnota je závislá od typu fragmentácie a zloženia telesa, M je celková hmotnosť všetkých fragmentov, l predstavuje pomer hmotnosti najväčšieho fragmentu a hmotnosti všetkých fragmentov a m je hmotnosť hľadaného fragmentu. Rovnicu (5) môžeme chápať aj ako pravdepodobnosť, s akou nám vznikne fragment s danou hmotnosťou. Pod obrázkom 4 vidíme hodnoty jednotlivých parametrov, ktoré vstupujú do našej analýzy. Taktiež obrázok 4 zobrazuje tvar fitovacej funkcie pre dve vybrané hodnoty silového parametra β (0.6 a 0.7), pričom v našej práci sme zvolili jeho hodnotu na úrovni 0.7.



Obr. 4: Inverzná kumulatívna distribučná funkcia meteoritu Košice pre 218 nájdených fragmentov (fialové body). Fitovanie danej distribúcie pomocou metódy katastrofického rozpadu telesa (rovnica 5). Použité parametre z fitovania: β = 0.7 (červená), 0.6 (zelená), M = 11.285 kg, l = 0.21 pri hmotnosti najväčšieho fragmentu 2.374 kg [Gritsevich et al., 2014, Brykina and Egorova, 2020].

Pre určenie modelovej koncentrácie častíc nám poslúži získaný fit a jeho parametre (obr.4). Postup definovania koncentrácie častíc pri modelovaní tmavej fázy letu je založený na nasledujúcich krokoch:

1. na začiatku modelovania sa vygeneruje častica s konkrétnou hmotnosťou z vopred zadefinovaného intervalu hmotností.
2. použitím hmotnosti vygenerovanej častice, rovnice (5) a zadefinovaných parametrov z fitu vypočítame kumulatívny počet pre danú časticu.
3. v prípade vygenerovania viacerých častíc sa ich kumulatívne počty spočítajú a určí sa tak celkový kumulatívny počet.
4. na základe vopred zadefinovanej celkovej hmotnosti meteoroidu v tmavej fáze letu a celkového kumulatívneho počtu, vypočítame hmotnosť na jeden diel kumulatívneho počtu.
5. vďaka hmotnosti na jeden diel kumulatívneho počtu získame hmotnostné zastúpenie jednotlivých vygenerovaných častíc.
6. pomer hmotnostného zastúpenia vygenerovaných častíc a ich konkrétnych hmotností nám zadefinuje počet reálnych častíc.
7. na základe počtu vygenerovaných častíc v simulácii a počtu reálnych častíc dostávame počet reálnych častíc, ktoré zastupuje jedná časti v simulácii.
8. dopadová oblasť na výstupe má dopredu zadefinovaný počet bin-ov pre jej dĺžku a šírku, a veľkosť plochy, ktorú zastupuje každý bin.
9. počet vygenerovaných častíc a na základe toho počet reálnych častíc vyskytujúci sa pri dopade v danom bin-e, nám na základe jeho plochy definuje koncentráciu častíc na jednotku plochy.

3 Program μ(m)-Trajectory

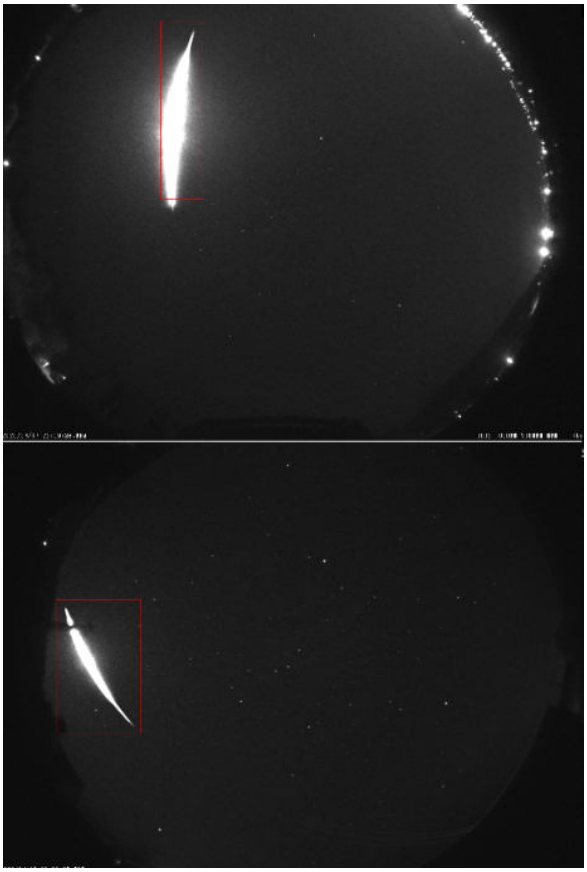
Program μ(m)-Trajectory predstavuje komplexný nástroj s užívateľským rozhraním (Obr. 5), ktorý kombinuje všetky spomenuté modely v sekcii 2. Program je vytvorený v programovacom jazyku python a jeho tvorcom je prvý uvedený autor práce. Slúži na dynamické modelovanie pohybu častíc v priestore atmosféry, vykresľuje tvar trajektórie, dopadové oblasti priamo v aplikácii Google Earth a koncentrácie. Užívateľské rozhranie programu slúži na priame vkladanie vstupných veličin, ktoré definujú fyzikálnu štruktúru meteoroidu, jeho priestorovú polohu v atmosfére s danými odchýlkami a veľkosť integračného kroku. Taktiež je k dispozícii output, v ktorom sa v reálnom čase vypisujú vypočítané hodnoty. Pravá časť užívateľského rozhrania umožňuje výber atmosférického modelu, reálneho alebo modelového veterného poľa, tabuľkovej alebo variabilnej hodnoty odporového koeficientu. Pri výbere variabilnej hodnoty je možné určiť rotáciu alebo orientáciu telesa. Pri zaškrtnutí „regular“ bude dochádzať k postupnému striedaniu jednotlivých natočení telesa a prislúchajúcich kriviek odporového koeficientu v jednoznačnom poradí každú sekundu modelového času. Pri výbere „random“ bude striedanie natočení vyberané náhodné. Ak sa nezaškrtne ani jedna možnosť, program bude čítať konkrétne natočenie z „Orientation“. Nasleduje výber simulovania tmavej fázy letu pre jednu časticu alebo viac častíc pomocou Monte-Carlo simulácie s gausovskou distribúciou generovaných častíc. Pre výber „Monte-Carlo“ môžeme zadefinovať šírku intervalu odchýlok sigma a počet vygenerovaných častíc. Súčasťou programu μ(m)-Trajectory je definovanie polohy jednotlivých častíc v priestore atmosféry po uplynutí zvoleného časového intervalu. Po skončení modelovania máme možnosť generovať 3D ploty polohy častíc v priestore atmosféry po nastavenom časovom úseku resp. 2D ploty polohy častíc pri dopade na zemský povrch. Taktiež sú k dispozícii 2D a 3D ploty pre hmotnostnú distribúciu vygenerovaných častíc, distribúciu vzdialenosti od uvažovaného stredu dopadovej oblasti, hmotnosť častíc vykreslená v dopadovej oblasti a koncentrácia častíc.



Obr. 5: Užívateľské rozhranie programu μ(m)-Trajectory s priamým zadávaním vstupných veličin, Output oknom na vypisovanie modelových výsledkov v reálnom čase, výber jednotlivých modelov, štartovacie tlačidlá a tlačidlá na generovanie výstupných plotov.

4 Modelovanie: bolid "Bánovce", Vstupné parametre

Na modelovanie tmavej fázy letu, dopadovej oblastí a koncentrácii častíc sme sa zamerali na bolid s označením EN170420-223923 (ďalej ozn. "Bánovce"). Bolid "Bánovce"bol zachytený kamerami Európskej bolidovej siete, ktorých súčasťou sú celooblohové kamery AMOS na území Slovenskej republiky. Konkrétne sa jedná o dve kamery AMOS: Arborétum Tesárske Mlyňany (ARBO) a Kysucké Nové Mesto (KNM), pričom zachytená celá svetelná fáza trajektórie bolidu je zobrazená na obrázku č.6. Udalosť bola zaznamenaná 18.apríla 2020 v čase 00:39 CET (22:39:23 UT, 17.4.2020), kedy do zemskej atmosféry vstúpil po relatívnej mierne sklonenej dráhe 34° k zemskému povrchu meteoroid o hmotnosti necelých 10 kg. Dráha bolidu ležala na moravsko-slovenskom území. Začiatočný bod svetelnej fázy letu bol vo výške približne 91.8 km južne od Ostravy a koncový bod dosiahol vo výške približne 31.9 km nad zemou asi 10 km východne od mesta Trenčín. Vstupná rýchlosť telesa bola na úrovni 19 km/s a svetelnú fázu letu preletelo za necelých 7 sekúnd. Bolid dosiahol jasnosti približne porovnateľnej s jasnosťou Mesiaca krátko po prvej štvrti, pričom najjasnejší bol vo výške 49 km. Počas letu fragmentoval a väčšina jeho pôvodnej hmoty sa spotrebovala abláciou. Predpokladaný malý počet fragmentov, ktoré mohli dopadnúť v okolí mestá Bánovce nad Bebravou sa predpokladá na úrovni 1g až 10 g (ojedinele 30 g) [Spurný, 2020].



Obr. 6: Zachytená svetelná fáza bolidu "Bánovce"celooblohovými kamerami AMOS. Bolid zachytený na kamere ARBO (hore) a na kamere KNM (dole). Snímky z kamier AMOS poskytol Juraj Tóth

4.1 Vstupné parametre do modelovania

Vstupné parametre do modelovania tmavej fázy letu, ktoré priamo súvisia s bolidom "Bánovceä boli vyhodnotené zo záchytu svetelného javu kamerami AMOS, mi poskytol školiteľ, Juraj Tóth. Potrebné vstupné údaje, ktoré sú priamo inicializované do programu μ(m)-Trajectory sú uvedené na obrázkoch 8 a 9. Samotné modelovanie bolo rozdelené na dve časti.

Počas prvej časti vstupovali do procesu modelovania hmotnejšie fragmenty na intervale hmotností 1g - 30g so širokým intervalom vstupnej rýchlosti 6000 +/- 3000 m/s (obr. 8). Hodnota odporového koeficientu Γ bude variabilná, závislá na výške, pričom konkrétne hodnoty pochádzajú z práce [Havrila, 2018]. Tieto hodnoty súvisia s odporovými koeficientami pre 23.2 g fragment meteoritu Košice s reálnym tvarom, ktorý je blízky intervalu vstupných hmotností nášho modelovania. Hodnoty odporových koeficientov pre jednotlivé natočenia a výšky sú uvedené na obrázku 7.

Do druhej časti vstupovali do procesu menej hmotné fragmenty resp. uvažované prachové častice na intervale hmotností 10^{-4} - 1g. Na základe efektívneho brzdenia po uvoľnení prachových častíc sa uvažuje o laterálnej rýchlosti približne 100 m/s [Borovička et al., 2013] (Obr. 9). Hodnota odporového koeficientu Γ bola v tomto prípade konštantná na celej výške, pričom jeho hodnota predstavuje priemernú hodnotu odporového koeficientu pre prachovú časticu z práce [Havrila, 2018]. Zároveň, pre prípad prachových častíc, predpokladáme izotropné rozdelenie a generovanie zenitových uhlov a azimutov bude na celom intervale ich hodnôt.

Atmosferický model MSIS-E-90 bol vygenerovaný pre dátum 17.04.2020 23:00UT pre hodnotu zemepisnej šírky 48.87° N a 18.17° E. Maximálna výška bola nastavená na hodnotu 35 km, aby pokryla všetky hladiny, v ktorých sa predpokladá pohyb vygenerovaných častíc.

Model veterného poľa pochádza z meteorologickej databázy ERA5 [ECMWF,], ktorá predstavuje reanalýzu produkovanú modelom ECMWF [ECMWF.,]. Databáza poskytuje údaje od roku 1979 a sú k dispozícii na stiahnutie na stránkach programu európskej únie na satelitné pozorovanie Zeme Copernicus (https://cds.climate.copernicus.eu/). Atmosférické hodnoty sú analyzované na bežnej mriežke zemepisnej šírky a dĺžky s rozlíšením 0.25° x 0.25° s

	Drag coefficient Γ for orientation					
Altitude [km]	X	Y	Z	IX	IY	IZ
15	0.110	0.116	0.113	0.085	0.120	0.167
13	0.149	0.162	0.187	0.140	0.165	0.161
9	0.171	0.274	0.257	0.176	0.195	0.272
5	0.240	0.291	0.442	0.245	0.271	0.401

Obr. 7: Hodnoty odporového koeficientu Γ pre jednotlivé natočenia 23.2g fragmentu meteoritu Košice vo vybraných nadmorských výškach. Údaje pochádzajú z práce [Havrila, 2018].

atmosférickými parametrami na 37 úrovniach tlaku. Najvyššia tlaková hladina s hodnotou 1 hPa je na úrovni približne 32 km. V prípade prachových častíc je potrebné mať na pamäti, že sú významné ovplyvňované prítomnosťou veterného poľa, ich pobyt v atmosfére je rádovo niekoľko hodín, počas ktorých môžu preletieť rádovo stovky kilometrov. Počas ich letu sa dostávajú do oblastí, v ktorých môže dochádzať k zmenám stavu atmosféry, rýchlosti vetra a smeru vetra. S cieľom zohľadniť tento fakt vyhodnocujeme stav atmosféry z väčšej oblasti. V prípade bolidu "Bánovce"je to oblasť v intervale zemepisnej šírky 46° N - 49° N a v intervale zemepisnej dĺžky 17° E - 22° E.

Odporový koef. Γ	Polomer [m]	Hmotnosť [g]	Hustota [kg/m3]	Vst. rýchlosť [m/s]	Geog. šírka [°]	Geog. dĺžka [°]
variable (for 20 g)	0.00847 (+/- 0.00435)	1 g - 30 g	3400	6000 (+/- 3000)	48.8679 (+/-0.002)	18.1669 (+/-0.002)
Výška [m]	**Azimut [°]**	**Zenitový uhol [°]**	**Atm.model**	**Model veterného poľa**	**Simulačná met.**	**počet častíc**
32345 (+/-86)	182.07 (+/-0.08)	57.39 (+/-0.04)	MSIS-E-90 (17.04.2020)	ERA5-23UT-17-apr-2020	Monte-Carlo	200

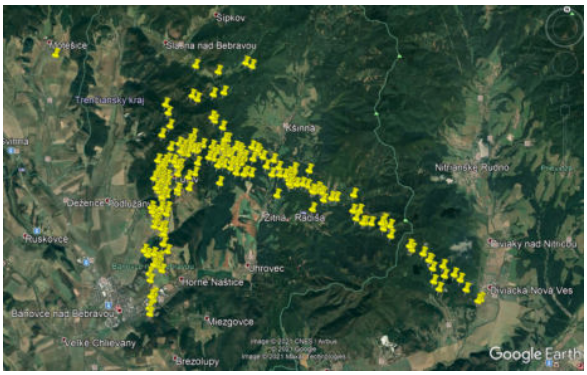
Obr. 8: Vstupné parametre do programu μ(m)-Trajectory na modelovanie tmavej fázy letu. Prvá časť modelovania zameraná na hmotnejšie fragmenty

Odporový koef. Γ	Polomer [m]	Hmotnosť [g]	Hustota [kg/m3]	Vst. rýchlosť [m/s]	Geog. šírka [°]	Geog. dĺžka [°]
0.4102	0.00216 (+/-0.00197)	10^{-4} g - 1 g	3400	100 (+/- 10)	48.8679 (+/-0.002)	18.1669 (+/-0.002)
Výška [m]	**Azimut [°]**	**Zenitový uhol [°]**	**Atm.model**	**Model veterného poľa**	**Simulačná met.**	**počet častíc**
32345 (+/-86)	180.0 (+/- 179)	90 (+/- 89)	MSIS-E-90 (17.04.2020)	ERA5-23UT-17-apr-2020	Monte-Carlo	200

Obr. 9: Vstupné parametre do programu μ(m)-Trajectory na modelovanie tmavej fázy letu. Druhá časť modelovania zameraná na menej hmotné fragmenty - prachové častice

5 Výsledky modelovania, analýza výsledkov

Pri analýze výsledkov modelovania sa zameriame na charakteristiky spojené s dopadovou oblasťou, ktoré súvisia s jej tvarom, veľkosťou a rozložením jednotlivých impaktov. Zároveň sa zameriame na časové charakteristiky letu hmotnejších fragmentov a prachových častíc. Priblížime si hmotnostné distribúciu generovaných častíc a vykonáme analýzu hypotetických koncentrácii dopadnutých častíc v závislosti od vstupnej hmotnosti do tmavej fázy letu. Pri prachových časticiach poukážeme na rozloženie častíc v priestore atmosféry po uplynutí časového intervalu 60 s.



Obr. 10: Tvar dopadovej oblasti, ako priamy výstup v Google Earth aplikácii, pre hmotnejšie fragmenty na intervale hmotnosti 1 g až 30 g. Vľavo dole mesto Bánovce na Bebravou.

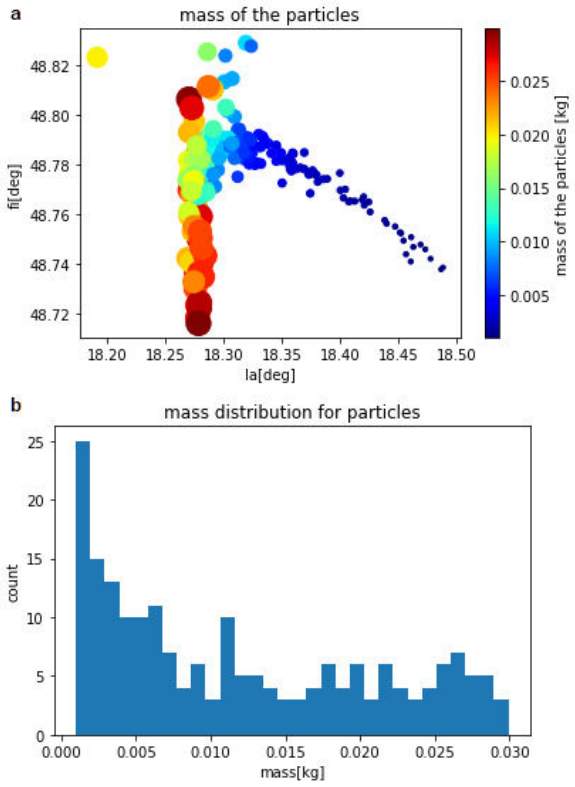
5.1 1.časť modelovania, hmotnejšie fragmenty

Na základe vstupných parametrov do modelovania tmavej fázy letu (Obr. 8), dostávame na výstupe tvar dopadovej oblasti (Obr. 10). Miesta dopadu jednotlivých impaktov tvoria oblúk, kde len malé množstvo častíc sa nachádza mimo neho. Na základe rozdielu polôh okrajových impaktov (impakty s maximálnou-/minimálnou geografickou šírkou/dĺžkou) vieme zadefinovať veľkosť plochy, ktorú tvorí dopadová oblasť. Jej plocha je na úrovni 21.95 km z východu na západ a 12.95 km zo severu na východ. Rozdiel geografických súradníc koncového bodu svetelnej fázy letu v podobe priemetu na povrch Zeme a miesta dopadu vygenerovanej častice nám definuje vzdialenosť, do ktorej meteority doleteli. Najhmotnejšia vygenerovaná častica s hmotnosťou 29.2 g dosiahla vzdialenosť 18.9 km, pričom miesto dopadu sa nachádza juhovýchodne od mesta Bánovce nad Bebravou. Najmenej hmotná častica s hmotnosťou 1.001 g dopadla do vzdialenosti 30.4 km, čo je o 11.5 km ďalej ako v prípade najťažšej častice v rámci daného intervalu. Zároveň poloha menej hmotnej častice je výrazne posunutá na juhovýchod (Obr. 11). Tento posun súvisí s výrazným pôsobením veterného poľa na menej hmotné častice. Tento fakt potvrdzuje dopadová oblasť zobrazená v grafickej podobe na Obr. 12a, ktorá zároveň definuje hmotnosť dopadnutých častíc. Dopadová oblasť je tvorená dvoma líniami. Hmotnejšie častice (nad 10 g) sa nachádzajú prevažne v línii smerujúcej približne zo severu na juh, zatiaľ čo menej hmotné častice tvoria líniu smerujúcu na juhovýchod.

Hmotnostná distribúcia vygenerovaných častíc na Obr. 12b poukazuje na vyššiu pravdepodobnosť a prítomnosť menej hmotných častíc, čo je v súlade so vstupnou hmotnostnou distribúciou na Obr. 4. Môžeme očakávať, že vygenerované menej hmotné



Obr. 11: Priama vzdialenosť dopadu najťažšej/najľahšej častice od koncového bodu svetelnej fázy letu. Vľavo hore koncový bod svetelnej fázy letu ako priemet na povrch Zeme (modrá), v strede dole dopad častice s hmotnosťou 29.92 g (červená), v pravo dole dopad častice s hmotnosťou 1.001 g (zelená). Významný posun častice s hmotnosťou 1.001 g na juhovýchod ako výsledok výraznejšieho pôsobenia veterného poľa na menej hmotné častice.

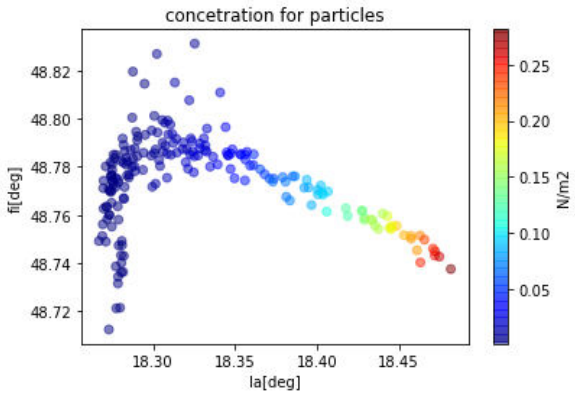


Obr. 12: (a) Dopadová oblasť v grafickej podobe zobrazujúca rozloženie vygenerovaných častíc v závislosti od geografických súradníc a hmotnosti. Rozloženie hmotnejších častíc (nad 10 g) orientované zo severu na juh. Menej hmotné častice, orientované v línii smerujúcej na juhovýchod, primárne ovplyvňované smerom veterného poľa. (b) Hmotnostná distribúcia vygenerovaných častíc na ktorej vidíme vyššiu pravdepodobnosť výskytu menej hmotných častíc. Tento výsledok je v súlade so vstupnou hmotnostnou distribúciou na Obr. 4.

častice budú v skutočnosti (v závislosti od vstupnej hmotnosti do tmavej fázy letu) zastupovať väčšie množstvo reálnych uvoľnených častíc. Výsledkom toho je vyššia koncentrácia pri dopade na povrch Zeme v porovnaní s miestami dopadu hmotnejších častíc.

Na výstupe programu μ(m)-Trajectory dostávame aj informácie ohľadne priebehu letu častice v podobe závislosti výšky, zemepisných súradníc a časového intervalu, ktorý častica prekonala. Na základe týchto informácií vieme povedať dĺžku letu vygenerovaných častíc. Najkratšie trval pád najhmotnejšej častice, pričom čas od koncového bodu svetelnej fázy po dopad na povrch Zeme je na úrovni 7 minút a 4 sekundy. Pád najmenej hmotnej častice je na úrovni 13 minút a 8 sekúnd.

Súčasťou modelovania je definovanie koncentrácii častíc na jednotku plochy pri dopade na povrch Zeme. Pre získanie výsledných koncentrácii je potrebné zadefinovať počiatočnú hmotnosť materiálu, ktorá vstupuje do tmavej fázy letu. V prípade bolidu "Bánovce"poznáme približne zadefinovanú hmotnosť telesa pri vstupe do atmosféry resp. svetelnej fázy letu na úrovni 10 kg. Avšak hmotnosť materiálu, ktorá sa zachovala po prechode svetelnou fázou letu a vstupuje do tmavej fázy letu, je na úrovni odhadou. Z tohto hľadiska sme pristúpili k hypotetickému definovaniu koncentrácii s hmotnosťou materiálu nesúvisiacou s bolidom "Bánovce". Cieľom je na základe ilustračného prípadu určiť hodnoty koncentrácii. Na vstupe do modelovania tmavej fázy letu sme zadefinovali hmotnosť materiálu na úrovni 10 kg. Výsledkom je grafické zobrazenie miesta dopadu vygenerovaných častíc v závislosti od geografických súradníc, s farebným odlíšením koncentrácií (Obr. 13). Výsledná koncentrácia sa pohybuje na úrovni 0.05 až 0.25 častice na m^2. Na Obr. 13 vidíme postupný nárast koncentrácie častíc smerom k menej hmotným časticiam. Tento výsledok opäť súvisí s uvažovanou hmotnostnou distribúciu na vstupe resp. s vyššou pravdepodobnosťou výskytu menej hmot-

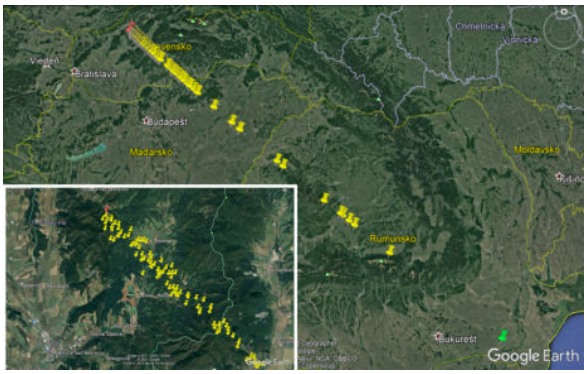


Obr. 13: Hypotetická koncentrácia častíc pre vstupnú hmotnosť do tmavej fázy letu na úrovni 10 kg, so zachovaním zvyšných vstupných parametrov bolidu "Bánovce".

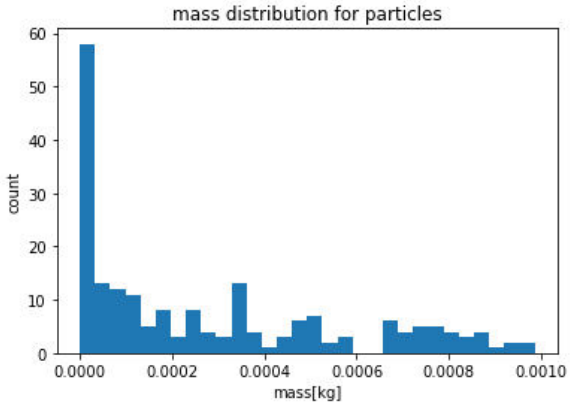
ných častíc. Je potrebné mať na pamäti, že určená koncentrácia nepočíta s rozptylom častíc počas preletu atmosférou. Jej hodnota vychádza z počtu reálnych častíc, ktoré zastupuje vygenerovaná častica a veľkosti plochy, ktorú zastupuje jeden bin na grafe dopadovej oblasti (podkapitola 2.5).

5.2 2.časť modelovania, prachové častice

Po modelovaní tmavej fázy letu menej hmotných fragmentov a prachových častíc dostávame výrazne odlišnú dopadovú oblasť (Obr. 14). Jej tvar predstavuje významné dlhšiu líniu, v porovnaní s hmotnejšími časticami, s malým rozptylom do strán. Častica s najmenšou vygenerovanou hmotnosťou na úrovni 1.757 x 10^{-4} g dopadla do vzdialeností až 908.6 km, pričom táto vzdialenosť predstavuje rozdiel geografických súradníc priemetu koncového bodu svetelnej fázy letu na povrch Zeme a miesta dopadu častice. Miesto dopadu sa nachádza na juhovýchode Rumunska, približne 100 km východne od Bukurešti, pričom jej let trval približne 10 hodín. Najťažšia vygenerovaná častica v rámci daného intervalu, s hmotnosťou 0.986 g dopadla do vzdialenosti 11.97 km. Dĺžka letu bola na úrovni 13 minút a 26 sekúnd, pričom tento čas je blízky 1.001 g častici z prvej časti modelovania hmotnejších častíc. Čo sa týka rozptylu prachových častíc do strán, dopadová línia dosahuje šírku do 2 km. Pozorujeme markantný rozdiel medzi dĺžkou a veľkosťou dopadových oblastí hmotnejších častíc a menších, prachových častíc. Ukazuje sa, že záchyt prachových častíc v atmosfére, s hmotnosťou



Obr. 14: Tvar dopadovej oblasti, ako priamy výstup v aplikácii Google Earth, pre menej hmotné a prachové častice na intervale hmotnosti 10^{-4} g až 1 g. Miesto dopadu najmenej hmotnej prachovej častice s hmotnosťou 1.757 x 10^{-4} g vpravo dole (zelená) a najťažšej častice s hmotnosťou 0.986 g vľavo hore (červená). Vsunutý obrázok vpravo dole poukazuje na detail dopadovej oblasti prachových častíc v okolí mesta Bánovce nad Bebravou.

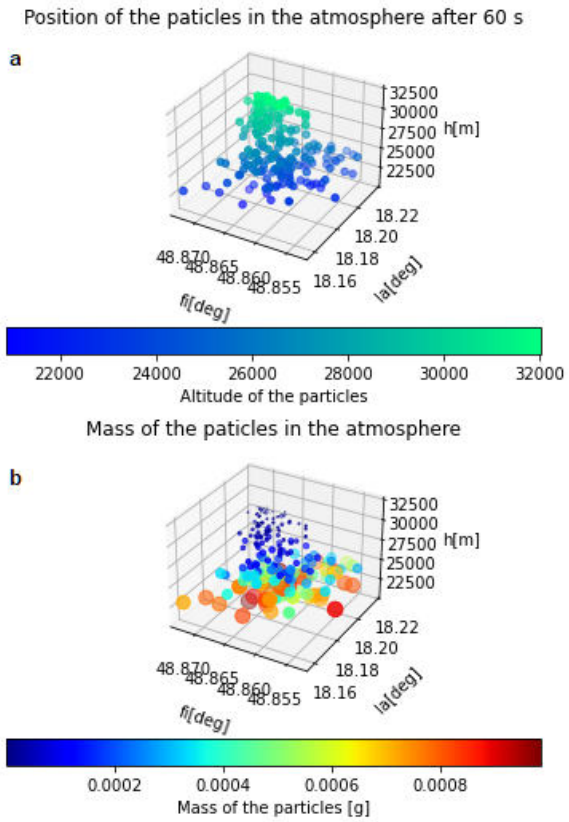


Obr. 15: Hmotnostná distribúcia vygenerovaných menej hmotných a prachových častíc s 53,5 % zastúpením častíc s hmotnosťou pod 0.2 g.

nad 10^{-4} g, je radovo na úrovni niekoľko hodín. Prítomnosťou veterného poľa dokážu tieto častice, od koncového bodu svetelnej fázy letu, prekonať stovky kilometrov.

Hmotnostná distribúcia vygenerovaných prachových častíc na Obr. 15 poukazuje na vysokú pravdepodobnosť vzniku častíc s hmotnosťou pod 0.2 g. Ich zastúpenie pri všetkých vygenerovaných časticiach v druhej časti modelovania je na úrovni 53.5 %.

Súčasťou modelovania tmavej fázy letu pre prachové častice bolo aj zaznamenávanie ich polohy v



Obr. 16: (a) Polohy vygenerovaných menej hmotných a prachových častíc po prekročení časového intervalu 60 sekúnd s farebným odlíšením výšky. (b) Polohy častíc v priestore atmosféry, na základe hmotnosti farebne odlíšené. Významný rozdiel výšky častíc pri porovnaní ich hmotností.

pravidelných časových intervaloch. Časový interval bol nastavený na 60 sekúnd a Obr. 16 poukazuje na polohu vygenerovaných častíc po prekročení daného intervalu. Už 60 sekúnd po uvoľnení častíc je vidieť ich separáciu v závislosti od hmotnosti. Zatiaľ čo hmotnejšie častice sa po prekonaní daného intervalu nachádzajú vo výške okolo 25 km, menej hmotné a prachové častice sú vo výške 30 až 32 km. Definovanie koncentrácie v prípade prachových častíc je irelevantné, keďže už tesne po uvoľnení dochádza k významnému rozptylu, k čomu prispieva ich niekoľko hodinové zotrvanie v atmosfére a prelet na úrovni niekoľko sto kilometrov.

Záver

Modelovanie častíc počas tmavej fázy letu, v dvoch častiach s charakteristicky rozdielnymi intervalmi hmotnosti, poukázalo na významné rozdiely v rámci ich dopadových oblastí. Pre častice v intervale hmotnosti 1 g až 30 g sa vyformovala dopadová oblasť, ktorú je možné rozdeliť na dve línie: (1) línia častíc s hmotnosťou nad 10 g približne totožná so smerom letu bolidu a (2) línia menej hmotných častíc smerujúca pod vplyvom vetra na juhovýchod. Výsledkom vplyvu vetra na menej hmotné častice je zmena ich pôvodného smeru letu a zároveň ich zotrvanie v atmosfére je dlhšie. Tvar dopadovej oblasti je okrem vetra zadefinovaný aj uhlom, pod ktorým teleso padalo, a rýchlosťou v koncovom bode svetelnej fázy letu. Modelovanie menej hmotných a prachových častíc potvrdzujú významný vplyv vetra, avšak významne stúpol čas ich zotrvania v atmosfére a vzdialenosť, ktorú častice prekonali. Modelovanie v oboch prípadoch považujeme za úspešné, avšak treba mať na pamäti nedostatky, či už v podobe veterného modelu, ktorý nemusí zodpovedať skutočnosti, a taktiež v podobe neistôt v počiatočnej polohe, rýchlosti častíc a ich hmotnostného množstva.

Poďakovanie

Poďakovanie patrí v prvom rade školiteľovi mojej dizertačnej práce doc. RNDr. Jurajovi Tóthovi, PhD. za všetok čas, ktorý mi venoval pri konzultáciách, za motiváciu a pomoc pri formulovaní mojich myšlienok. Zároveň moje poďakovanie smerujem kolegovi Mgr. Martinovi Balážovi za usmernenia a postrehy pri tvorbe programu.

Literatúra

[Bischoff et al., 2017] Bischoff, A., Barrat, J., and et al., K. B. (2017). The stubenberg meteorite – an ll6 chondrite fragmental breccia recovered soon after precise prediction of the strewn field. *Meteoritics and Planetary Science*, 52:1757–1779.

[Bland et al., 1996] Bland, P. A., Smith, T. B., Jull, A. J. T., Berry, F. J., Bevan, A. W. R., Cloude, S., and Pillinger, C. T. (1996). The flux of meteorites to the earth over the last 50 000 years. *Mon. Not. R. Astron. Soc*, 283:551–565.

[Borovička et al., 2013] Borovička, J., Tóth, J., and et al., A. I. (2013). The košice meteorite fall: Atmospheric,

trajectory, fragmentation, and orbit. *Meteoritics and Planetary Science*, 48:1757–1779.

[Brykina and Egorova, 2020] Brykina, I. and Egorova, L. (2020). Applying the formula for mass distribution of fragments of disrupted body to meteorite showers. *Europlanet Science Congress 2020, EPSC Abstracts*, 14.

[Ceplecha, 1987] Ceplecha, Z. (1987). Geometric, dynamic, orbital and photometric data on meteoroids from photographic fireball networks. *Astronomical institute of Czechoslovaka. Bulletin*, 38:222–234.

[Ceplecha et al., 1998] Ceplecha, Z., Borovička, J., and Elford, W. G. (1998). Meteor phenomena and bodies. *Astronomical institute of Czechoslovaka. Space Science Review*, 84:471–476.

[Clancy, 1975] Clancy, L. J. (1975). *Aerodynamics*. John Wiley, Ann Arbor, DE.

[ECMWF,] ECMWF. Era5 hourly data on pressure levels from 1979 to present. [online]. *[cit. 21. 4. 2021]. URL: https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=overview*.

[ECMWF.,] ECMWF. Fact sheet: Reanalysis. [online]. *[cit. 21. 4. 2021]. URL: https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/focus/2020/fact-sheet-reanalysis*.

[Falkovich, 2018] Falkovich, G. (2018). *Fluid Mechanics, 2nd edition*. Cambridge University Press., Cambridge University.

[French, 1970] French, A. P. (1970). *Newtonian Mechanics (The M.I.T. Introductory Physics Series), 1st edition*. W. W. Norton and Company Inc., New York, NY.

[Gritsevich et al., 2014] Gritsevich, M., Vinnikov, V., and et al., T. K. (2014). A comprehensive study of distribution laws for the fragments of košice meteorite. *Meteoritics and Planetary Science*, 49:328–345.

[Havrila, 2018] Havrila, K. (2018). Modelovanie interakcie mikrometeoritov a meteoritov v planetárnych atmosférach. *Diplomová práca, Univerzita Komenského v Bratislave*.

[Hedin, 1991] Hedin, A. E. (1991). Extension of the msis thermosphere model into the middle and lower atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 96:1159–1172.

[Pechala, 1991] Pechala, F. (1991). *Příručka dynamické meteorologie*. Academia, Praha, Česká republika.

[Rojas et al., 2021] Rojas, J., Dupratb, J., and et al., C. E. (2021). The micrometeorite flux at dome c (antarctica), monitoring the accretion of extraterrestrial dust on earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 560:1–10.

[Schlichting, 1955] Schlichting, H. (1955). *Boundary Layer Theory*. Pergamon Press, London, UK.

[Spurný, 2020] Spurný, P. (2020). Jasný bolid v noci ze 17. na 18. dubna 2020 nad severní moravou a západním slovenskem podrobně zachyceny přístroji evropské bolidové sítě. *ONLINE: https://www.astro.cz/clanky/slunecni-soustava/jasny-bolid-v-noci-ze-17-na-18-dubna-2020-nad-severni-moravou-a-zapadnim-slovenskem-podrobne-zachyceny-pristroji-evropske-bolidove-site.html*.

[Tóth et al., 2015] Tóth, J., Kornoš, L., and et al., P. Z. (2015). All-sky meteor orbit system amos and preliminary analysis of three unusual meteor showers. *Planetary and Space Science*, 118:102–106.

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 166–171
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Tomáš Hrobár, Jiří Šilha, Martina Verešvarská

Rotation axis estimation of upper stages

Tomáš Hrobár[1*] Jiří Šilha[1†‡] Martina Verešvarská[2§]

[1] Department of Astronomy, Physics of the Earth and Meteorology, FMPH, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava
[2] University of Southampton, University Road, Southampton SO17 1BJ

Abstract: The space debris population is growing and becoming more dangerous. It is important to monitor the entire population as well as individual groups in it. These objects can be divided into the groups according to object's type, its orbital parameters or altitude. The parameters such as rotation period or rotation axis are influenced by physical processes. Knowing these parameters, especially rotation period is necessary for active debris removal. We will present our group of interest-cylindrical rocket bodies, especially the method of rotation axis determination of such objects. We will briefly describe Mini-Mega-TORTORA catalogue (MMT-9), which is source of observations needed for rotation axis determination. We will also present results for rotation axis determination of specific rocket bodies.

Keywords: space debris, rotation axis determination, cylindrical objects

1 Introduction

The term space debris includes all man-made objects orbiting the Earth, which have already finished their missions, or have stopped working because of some failure. We can divide them into groups according to their characteristics: rocket bodies, spacecrafts, debris objects or according to their altitude: low Earth orbit (LEO) up to 2000 km, geostationary orbit (GEO) with mean altitude 35786 km and GEO transfer orbit (GTO) with mean altitude between LEO and GEO. The number of space debris is increasing with more rocket starts, satellite exploration (meteorology, navigation systems, broadcasting,...), countries interested in the space research etc. There are only 2700 [1] operational satellites among more than 34000 [1] orbiting objects greater than 10 cm. It seems not to be big count if we compare space debris object's dimensions and size of near-Earth region. But we have to realize that debris objects have velocities up to 11.2 km/s.

*hrobar2@uniba.sk
†silha1@uniba.sk
‡Supervisor
§mata.veresvarska@gmail.com

1.1 Object's rotation

Every object or body orbiting in space spins because of inertia. There are several types of torques acting on attitude motion of object. Some of them are negligible for GEO objects, but are very important for attitude of objects with lower altitude. Then we have to account gravitational force, not only of the Earth, but of the Moon and the Sun too, aerodynamic drag, eddy current damping, impacts of small particles (meteoroids and debris), magnetic field of the Earth, objects characteristics, like fuel sloshing or modular parts movement [2].

If we account aerodynamic drag, there are several parameters which characterize the atmosphere. The atmosphere has several layers and they are different from each other. In the case of space debris object attitude, the most important parameters are temperature, density, but they are changing during the year because of solar activity [3].

Very complex problem is magnetic field and its effect on spacecraft attitude, not only because of the magnetic field itself, but because of the object surface, which is made of different materials, which can react in different ways, if they are under acting of magnetic force [2].

If the object is not in GEO orbit, it is above different locations with different geophysical characteristic, mainly gravitational potential. The Earth is not perfect homogenous sphere, so in detailed attitude modeling or determination we have to approximate the real shape of the Earth with the highest order of the geoid model.

For GEO objects dominant torque is solar radiation pressure, which varies during the year, also during one spin period of satellite.

1.2 Asteroids

We can observe brightness of artificial objects and asteroids too. Series of measurements of celestial body's brightness as a function of time is light curve. We can get object's parameters by analyzing its light curve. There are used different and special methods for getting the specific parameters.

Rotation axis orientation is also determinated by inverse method in case of asteroids. It is based on comparsion observed and calculated brightness for different pairs of rotation axis coordinates. There can be added more parameters, such as rotation period or albedo, in more sophisticated models. But the essence remains the same: comparsion of observed and calculated data and finding the best fit data using root-mean-square value (RMS) [7].

2 Rotation axis determination

2.1 Mini-Mega-TORTORA database

Mini-Mega-TORTORA[1] is wide-field monitoring system with nine channels for optical observations of the sky, mounted in pairs on five stands. The research and observations are focused on detecting meteor events, satellites tracking and multi-color data of celestial bodies. The system is placed in Caucasus, with ability to detect objects with brightness level up to 10 magnitude. The used exposition time is 0.1 second. After the observation a light curve is constructed, processed and published in online MMT-9 catalogue [4].

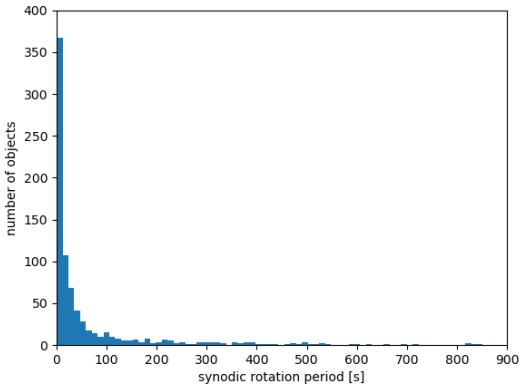


Figure 1: Histogram of synodic rotation period of objects from MMT-9 database.

Every track in the catalogue contains: light curves in standard and apparent magnitudes, distance, phase angle over time, light curve period, whether the object was in penumbra, etc. Only 20% of all tracks are periodical. All objects are divided into type groups: active spacecrafts, non-functioning spacecrafts, spacecrafts without specification of the functional state, rocket bodies, operational fragments of launch, fragments of destruction, fragments without specification of the method of formation of and unknown types [5]. But there are not provided data from observations of Russian objects and measurement errors of all observations are not provided. The MMT-9 database contains 3662 objects with determined period values including 2157 spacecrafts, 754 rocket bodies, 711 debris objects. But 1366 (37.3%) of them are slow rotators and 1388 (37.9%) are stable and only 908 (24.8%) are rotators. Fig. 1 shows histogram of synodic rotation period of objects from MMT-9 database. Most object have rotation period up to 100 seconds.

[1] http://mmt9.ru/

2.2 Coordinate systems

If we want to calculate location of rotation axis, we need coordinate system which will help us to express rotation axis coordinates. V. Williams (1979) introduced useful satellite coordinate system. This system is right-handed with origin in the satellite center of mass. If s is the unit vector pointing from the satellite center of mass towards the Sun and o is the unit vector pointing from the satellite center of mass towards the observer the coordinate axes of the Williams system x, y and z are defined by Eq. 1.

$$x = \frac{s+o}{|s+o|}, \quad y = \frac{s-o}{|s-o|} \quad z = \frac{s\times o}{|s\times o|} \tag{1}$$

To specify the direction of a vector $\vec{v}$ in this coordinate system, we will use a related spherical coordinate system with the polar angle A and the azimuth angle Γ. The polar angle is between the z-axis and $\vec{v}$, taking values from 0 to π, and the azimuth angle is between the x and the projection of $\vec{v}$ onto the x-y-plane, taking values from 0 to 2π. The conversion from a unit vector v to A and Γ is given by Eq. 2, while the backwards conversion is given by Eq. 3 [9]. This is shown in Fig. 2.

$$\Gamma = \arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right), \qquad A = \arccos(v_z) \tag{2}$$

$$\begin{aligned} v_x &= \sin(A)\cos(\Gamma) \\ v_y &= \sin(A)\sin(\Gamma) \\ v_z &= \cos(A) \end{aligned} \tag{3}$$

We will present our results in space coordinate system which has origin in the center of the Earth and the J2000 is used reference frame. This frame has x-axis towards the Sun at the spring equinox, z-axis along the Earth's polar axis and y-axis completing the right-handed set.

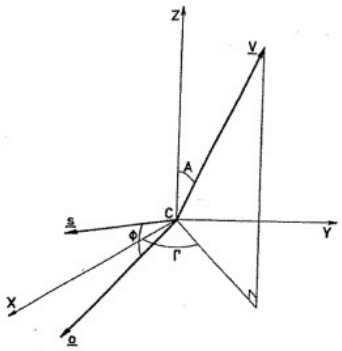


Figure 2: Williams coordinate system [6].

2.3 Brightness ratio

We define brightness ratio as the difference between maximum and minimum apparent magnitude. The apparent magnitude M of a cylindrical satellite with reflecting sides and non-reflecting ends is defined as:

$$M = -2.5\log_{10}\left(\frac{kla\gamma F}{R^2}\right) \tag{4}$$

where l is the cylinder length in meters, a is cylinder radius in meters, γ is the albedo, F is a function of satellite orientation and phase, R is the distance from satellite to observer in meters, k is a constant.

The function F(A_a,Γ_a,ϕ) is given by:

$$F = \frac{1}{4\pi}\left[\left(\pi - \text{function}\frac{F_1}{F_2}\right)F_2 + |F_1|\right] \tag{5}$$

where

$$\text{function}\frac{F_1}{F_2} = \begin{cases} |\arctan\frac{F_1}{F_2}| & \text{if} \quad F_2 > 0 \\ \frac{\pi}{2} & \text{if} \quad F_2 = 0 \\ \pi - |\arctan\frac{F_1}{F_2}| & \text{if} \quad F_2 < 0 \end{cases} \tag{6}$$

$$F_1 = \sin\phi\sin A_a|\sin\Gamma_a| \tag{7}$$

and

$$F_2 = \cos^2\frac{\phi}{2} - \sin^2 A_a.\left(\sin^2\frac{\phi}{2} + \cos^2\frac{\phi}{2}\cos^2\Gamma_a\right) \tag{8}$$

where A_a and Γ_a are polar angle and azimut angle in Williams coordinate system and ϕ is phase angle. So the final expression of the brightness ratio is:

$$M_{max} - M_{min} = -2.5\log_{10}\left(\frac{F_{max}}{F_{min}}\right) \tag{9}$$

Eq. 9 shows that the brightness ratio is determined by only phase agle and coordinates of rotation axis.

2.4 Attitude determination script description

Attitude determination script is Python script for computing location of the rotation axis of a cylindrical objects. The basic input parameters of Attitude determination script are: incident light flux – solar constant = 1371 $W.m^{-2}$, length of observed object, radius of object and object reflectivity. Photometric parameters are also needed, such as: observed brightness ratio, error in the observed brightness ratio and rotation period. The orbital elements are obtained from two-line elements set valid for the closest date to observation dates [8]. Phase angle, vector from the object to the Sun and from the object to observer are computed from observer, object and sun position vector in geocentric celestial reference system. The script iterates through the values of A and Γ and computes brightness ratio for each pair of A and Γ, where A is the polar angle and Γ is the azimuth angle in the object polar coordinate system [6]. Then script generates colormap of brightness ratio. In the next step, coordinates of brightness ratio within +/- sigma of the observed value are extracted and shown in graph with axis A_t and Γ_t, where t means tumble axis. We assume, that tumble axis and rotation axis are the same. Extracted coordinates are possible directions of rotation axis for the phase angle. The brightness ratio is computed for every phase angle that observation was done for. If the observations only from one location are provided, then the observation must be done on three different dates. In the opposite case, observations from one date are enough, if they are done in three different locations with wide range of phase angle. The greater number of the observations, the more accurate the calculation is. If the brightness ratio is computed for every phase angle, then values A

and Γ are calculated in right ascension. Finally, the intersection points of location of possible axis rotation for all observed phase angles are calculated and shown in 2D graph and in 3D graph showing the celestial sphere and location of intersection on it. The intersection points are the most possible directions of the rotation axis.

3 Analysis

In this section we will present results for two rocket bodies. We have selected objects fulfilling following conditions:

- the object must be cylindrical, with dominant side reflection and negligible object's ends reflection
- the moment of inertia of a cylinder about a transverse axis is the largest, then and end-over-end tumbling motion will be stable
- the observation data must be from three different dates with wide spread of phase angle value, but it must be within several days, because rotation axis orientation can be changed with time.

According to this conditions, we have chosen two objects: 2007-060B ATLAS 5 CENTAUR and 2012-018D CZ-3B.

3.1 2007-060B ATLAS 5 CENTAUR

Object 2007-060B ATLAS 5 CENTAUR is rocket body with length 12.68 meters and radius 3.05 meters. Its current rotation period is 48.83 seconds. Presented graphs are solution for location of rotation axis from February 9, 2016 to February 10,2016.

Calculated brightness ratio values for $\phi = 42^\circ$ are shown as colormap in Fig. 3. Then possible directions of tumble axis are shown in Fig. 4. Values are chosen with respect to given σ. In this case σ is 30% of observed amplitude. Both figures shows solutions in Williams coordinate system, where A is polar angle and Γ is azimuth. We used step 1°.

There are two solutions for rotation axis due to the sense of rotation, clockwise rotation and counterclockwise rotation. We extracted for this object two possible solutions of the rotation axis direction assuming two different senses of rotation. First one with RA = 5°, DEC = 95° or opposite direction RA =

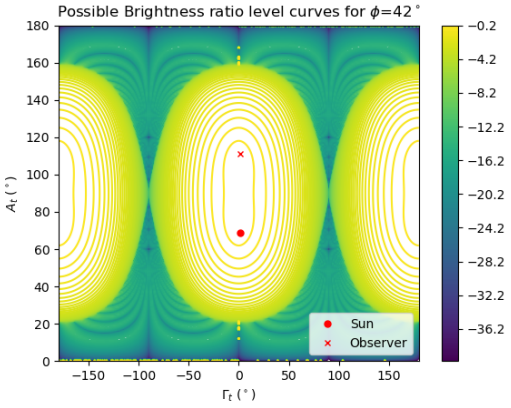


Figure 3: Possible brightness ratio for $\phi = 42^\circ$.

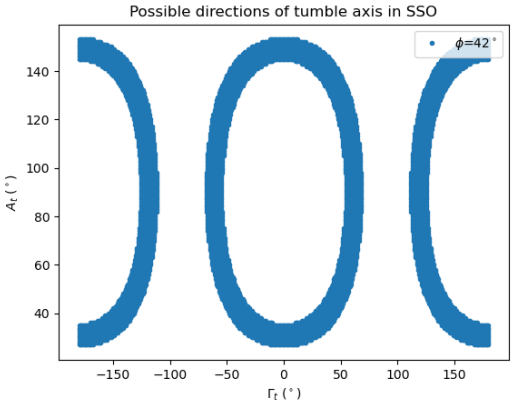


Figure 4: Possible directions of tumble axis for $\phi = 42^\circ$. SSO means Sun-Satellite-Observer (Williams) coordinate system.

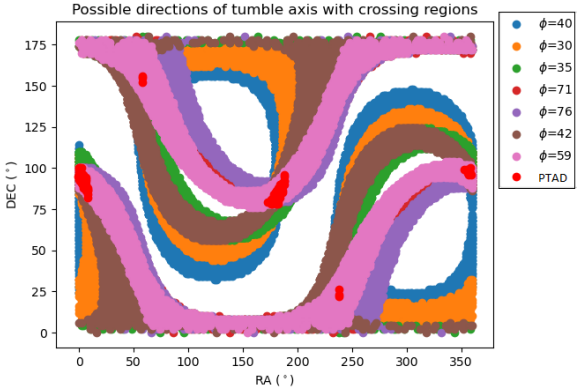


Figure 5: Possible tumble axis directions (PTAD) with crossing points (red).

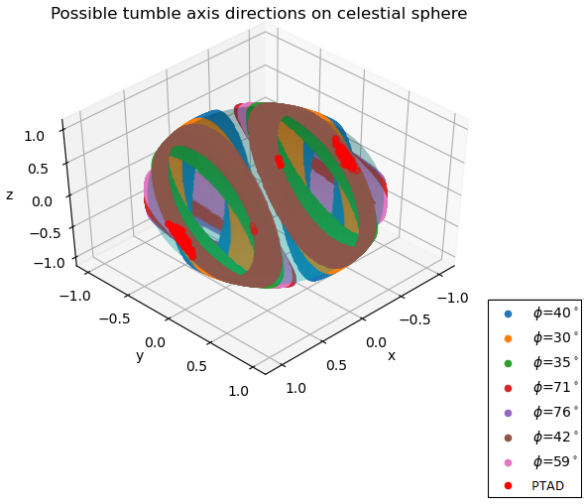


Figure 6: Possible tumble axis directions (PTAD) with crossing points (red).

183°, DEC = 95° and second one has coordinates RA = 58°, DEC = 152° or opposite one RA = 238°, DEC = 23°. We used phase angle range from 35° to 76°. These solutions are shown as red points in Fig. 5 in 2D and in Fig. 6 in 3D projection. Both are in space coordinate system with right ascension in degrees and declination in degrees.

3.2 2012-018D CZ-3B

Object 2012-018D CZ-3B is chinese rocket body with length 12.38 meters and radius 3 meters. It was launched in April, 2012. Presented graphs are solution for location of rotation axis from July 21, 2014 to August 8,2014.

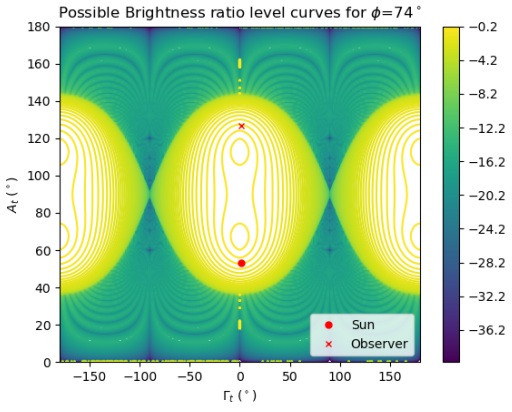


Figure 7: Possible brightness ratio for $\phi = 74°$.

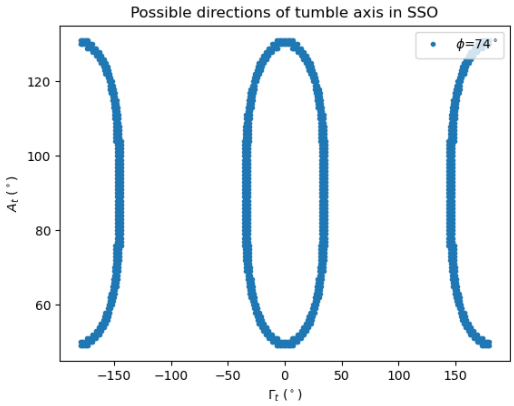


Figure 8: Possible directions of tumble axis for $\phi = 74°$. SSO means Sun-Satellite-Observer (Williams) coordinate system.

Brightness level for possible orientation of rotation axis with each pair of polar angle and azimuth in Williams coordinate system is shown in Fig. 7. Then possible directions of tumble axis are shown in Fig. 8). Ellipses shown in Fig. 8 are narrower than it was in previous case. This difference is made by lower value of σ. In this case σ is only 10% of observed amplitude. The figures show solutions for $\phi = 74°$.

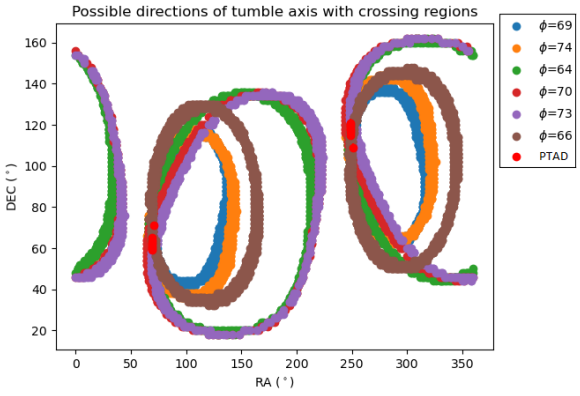


Figure 9: Possible tumble axis directions (PTAD) with crossing points (red).

This specific case has only one possible region with another opposite. We used step 1° as it was in previous case. The coordinates of region are RA = 70°, DEC = 61° or opposite direction RA = 250°, DEC = 120°. Range of phase angle was from 64° to 74°. This solutions are marked as red points in Fig. 9 and Fig. 10 in space coordinate system.

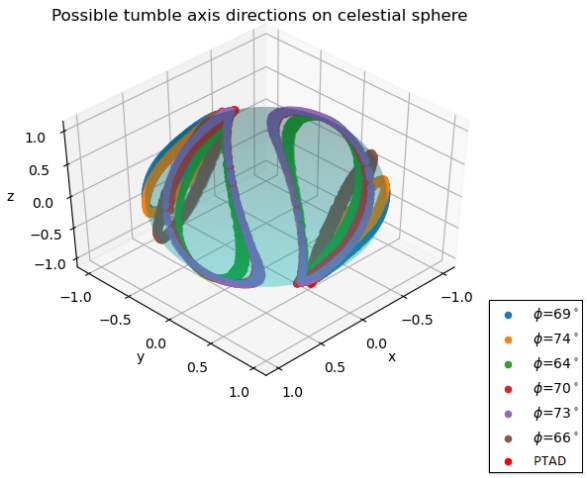


Figure 10: Possible tumble axis directions (PTAD) with crossing points (red).

4 Conclusions

It is necessary to know attitude of space debris objects because they are possible threat to human activities. If we know parameters such as rotation period or rotation axis direction, then we can decide whether the object could be removed from orbit.

Object's attitude is affected by torques according to object's altitude or material. It is possible to calculate rotation axis direction for cylindrical objects as we described in this paper.

There are parameters that we need for the calculation and they can be provide only by observation such as observed brightness ratio and rotation period. We got these information from MMT-9 database.

References

[1] ESA: Space debris by the numbers, cited: May 6, 2020, available at: https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers

[2] Lips, T., et al. "Debris Attitude Motion Measurements and Modeling–Observation vs. Simulation." Proceedings of AMOS Conference. 2017.

[3] Picone J.M., et al., (2002). NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues, J. Geophys. Res., 107 (A12), 1468, doi: 10.1029/2002JA009430

[4] Karpov, S., et al. "Mini-Mega-TORTORA wide-field monitoring system with sub-second temporal resolution: first year of operation." Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica 48 (2016): 91-96.

[5] MMT-9: HIS Database Description, cited: April 30, 2020, available at: http://mmt9.ru/bdsat/

[6] V. Williams, Location of the rotation axis of a tumbling cylindrical earth satellite by using visual observations: Part I: Theory, Planetary and Space Science, Volume 27, Issue 6, 1979, Pages 885-890, ISSN 0032-0633,

[7] Torppa, J., Kaasalainen, M., Michałowski, T., Kwiatkowski, T., Kryszczyńska, A., Denchev, P., Kowalski, R. (2003). Shapes and rotational properties of thirty asteroids from photometric data. Icarus, 164(2), 346–383. doi:10.1016/s0019-1035(03)00146-5 url to share this pape

[8] Vallado, D. A., Crawford, P., Hujsak, R., and Kelso, T. S. (2006). Revisiting spacetrack report 3. The AIAAAAS Astrodynamics Specialist Conference. M.S., University of Colorado, Boulder, American Institute of Aeronautics and Astronautics

[9] P. Koller. Attitude Determination of Cylindrical Rocket Bodies from Optical Light Curves. University of Bern, Faculty of Science, Institute of Astronomy, 2016

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 172–179
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Patrik Čechvala

Simulating propagation of ultra-high energy cosmic rays wih *SimProp* software

Patrik Čechvala[1*]

[1] Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstract: The study of ultra-high energy cosmic rays (UHECRs) represents nowadays one of the quickly developing fields where there are still a lot of unanswered questions. UHECRs consist mainly of nuclei of different elements which can attain energies far exceeding the capabilities of current largest particle accelerators. Some of them can attain energies up to 10^{20} eV which already represents macroscopic energies. There are currently 2 big observatories worldwide studying these particles. One of them is Pierre Auger Observatory (PAO) in Argentina and the other one is Telescope Array located in United States. The sources of these particles are unknown up to these days. The identification of possible sources is more difficult comparing with the detection of electromagnetic radiation because UHECRs undergo several interacting mechanisms. For this purpose, it is necessary to simulate the propagation of UHECRs with specific softwares taking into account different mechanisms to constraint characterstics of possible sources. In our study, we used the Monte Carlo simulating software *SimProp* to simulate the propagation of cosmic-rays particles through the Universe. Afterwards, we have put constraints on the characterstics of possible sources comparing the results of our simulations with the data from PAO. Presented results are part of our diploma thesis.

Keywords: cosmic rays, *SimProp*, enegy spectrum, mass composition

1 Introduction

Nowadays, it is more than 100 years from the direct proof explaining the origin of the natural background ionization in the atmosphere. It is thanks to Victor Hess and his baloon experiments that we currently know that the Earth is permanently bombarded by high energy particles creating this background ionization [Bertolotti, 2013]. This phenomenom was later labelled as cosmic rays. Historically, the study of cosmic rays (CRs) is responsible for the development of the nuclear and subatomic physics in the first half of the 20th century. Several new subatomic particles were discovered in the secondary radiation created by the primary particles colliding with the particles of the Earth's atmosphere. As an example it is possible to mention positron or π-meson [Zavrtanik, 2010]. Later measurements proved that the particles of CRs can attain energies from broad energy interval from MeV region up to 10^{20} eV. This represents hundreds of EeV (10^{18} eV = 1 EeV). First such particle was registered by John Linsley et al. in Volcano Ranch in 1963 [Linsley, 1963]. Particles with energies with 1 EeV and more are denoted as ultra-high energy cosmic rays (UHECRs).

However, even after more than half of the century from the discovery of UHECRs, the sources of these particles remain a big mystery. Latest studies from large ground array observatories like Telescope Array (TA) and mainly Pierre Auger Observatory (PAO) show that most probably the sources are of extragalactic origin [PAO, 2017b]. To correctly understand the possible properties of candidate sources and predict some constraints, it is necessary to simulate the propagation of UHECRs using specific simulation softwares like *SimProp* [Aloisio et al., 2016] or CRPropa [Batista et al., 2016] which incorporate sevaral types of propagation effects influencing these particles on their route to the Earth.

2 Properties of UHECRs

2.1 Energy spectrum

We have already mentioned that the energies of cosmic-ray particles come from a broad interval. Of course the frequency with which these particles hits the atmosphere are not equal for different energy regions. In order to define the number of particles arriving to the atmosphere within some specified energy interval, it is possible to define the differential flux $J(E)$ which represents the number of particles dN per energy interval dE coming from the solid angle dΩ passing through the area dA in time dt [Grieder, 2001]

*patrik.cechvala@fmph.uniba.sk

$$J(E) = \frac{\mathrm{d}N(E)}{\mathrm{d}A\mathrm{d}t\mathrm{d}E\mathrm{d}\Omega}. \quad (1)$$

Classical units are $\mathrm{GeV}^{-1}\mathrm{m}^{-2}\mathrm{sr}^{-1}\mathrm{s}^{-1}$.

The measurements have shown that it is possible to approximate the energy spectrum of CRs with power law in the form [Zavrtanik, 2010]

$$J(E) \approx E^{-\gamma}, \quad (2)$$

with γ representing the spectral index. Spectral index describes the slope of the energy spectrun. Value of this index is not constant over the whole energy region and changes in some energy regions. According to this, we can distinguish 3 spectral features in energy spectrum, see Fig. 1. First is the 'knee' around $10^{15.6}$ eV where the value of index changes from approx. 2.7 to 3.1 [KASCADE, 2005]. Afterwards, there is observed a hardening or decrease of the spectral index in the spectrum around energies $5x10^{18}$ eV [Fenu, 2017].This is called the 'ankle'. At the highest energies, there is a strong suppression of the flux at energies $E_S = (3.9 \pm 0.2 \pm 0.8) \times 10^{19}$ eV [Fenu, 2017]. This might be related to the so called GZK cut-off and was theoretically predicted by Greisen [Greisen, 1966] and by Zatsepin and Kuz'min [Zatsepin and Kuz'min, 1966].

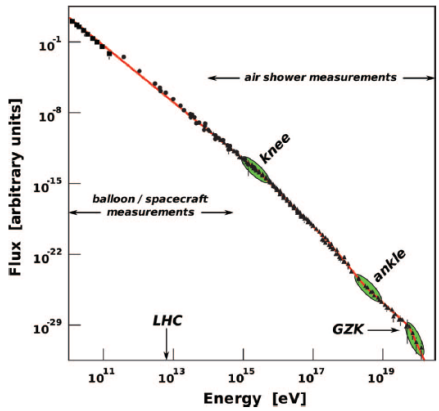


Figure 1: Primary cosmic-ray spectrum. Knee, ankle and GZK cutoff are indicated in green [Zavrtanik, 2010].

2.2 Mass composition

There are many types of particles arriving to the Earth's atmosphere. For the purpose of this work we denote the term cosmic rays to the protons and nuclei of different elements which arrive in the atmosphere. This is mainly comprised also in the worldwide literature. The relative abundance of different nuclei or the mass composition of CRs changes with increasing energy. In this work and in our diploma thesis [Čechvala, 2018] we are focusing predominantly in the UHECR region with EeV energies. In this energy region it is not possible to directly measure the atomic number of each nuclei. It is possible to only statistically determine the trend. For this purpose an indirect method for statistical determination based on the observation of the so called Extensive Air Showers (EAS) generated as the product of the interaction of the primary particle with the molecules of the Earth's atmosphere is used. This method is based on the observation of the atmospheric depth where the the shower reaches its maximum, more specifically its mean value, $<X_{\mathrm{max}}>$ and its second moment $\sigma^2(X_{\mathrm{max}})$. The atmospheric depth is expressed as

$$X = \int_{\infty}^{h} \frac{\rho(l)}{\cos\theta}\mathrm{d}l, \quad (3)$$

where $\rho(l)$ is the density of air at altitude l and θ is the zenith angle of primary particle. Measurements have revealed that values of these variables are linked with the mean logarithm of mass number $<\ln A>$ and its second moment. Recent measurements from PAO, see Fig. 2, revealed the gradual change of the primary composition towards lighter elements up to $\approx 10^{18.3}$ eV. CRs at the ankle energy should be therefore predominantly represented by protons. Above the energy $10^{18.3}$ eV, the trend inverts, and the populations are becoming heavier [Ghia, 2015].

2.3 Propagation effects

The particles of UHECRs are influenced by several propagation effects propagating through the Universe. These include the interactions with the background photon fields and magnetics fields leading to the decay of unstable particles and decreasing their energy. It is also important to take on mind that we are speaking about charged particles whose trajectories are influenced by the Lorentz force. In order to correctly simulate the propagation of UHECR it is necessary to incorporate these interactions in the simulations. Enumerating different propagation effects which particles undergo on their route to the Earth we have to mention

1. Adiabatic energy losses

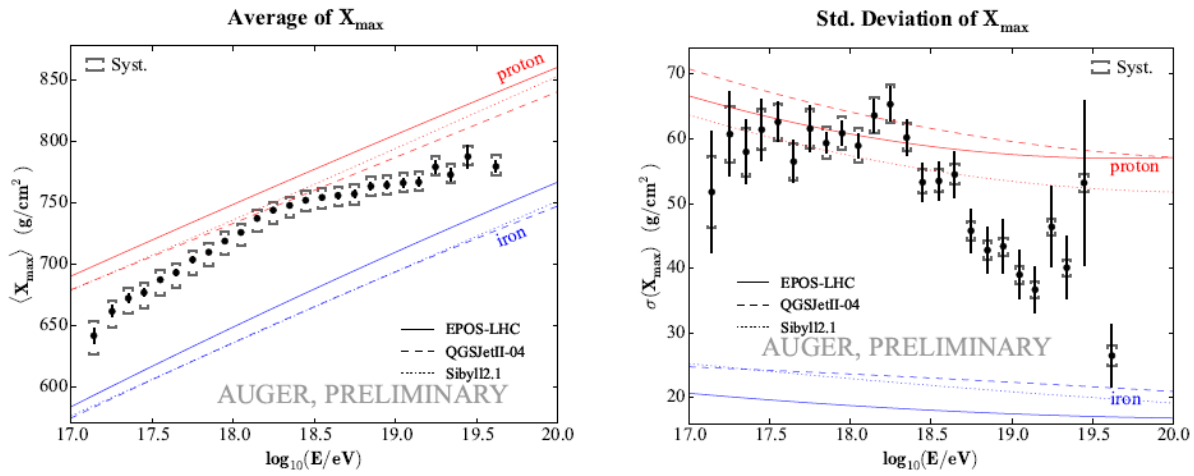


Figure 2: The mean (left panel) and the standard deviation (right panel) of the measured $X_{\max}$ at PAO as a function of energy. The results are compared with the predictions of different hadronic interaction models for protons and iron nuclei [Ghia, 2015].

2. Photonuclear interactions
   (a) pair production
   (b) photo-pion production
   (c) photodisintegration of nuclei
3. Lorentz force

3 *SimProp* simulations

We simulated the propagation of UHECRs with publicly available Monte Carlo simulation software *SimProp* [Aloisio et al., 2016]. *SimProp* is written in C++ and uses features from ROOT software. Simulations were done with the version v2r4 of the software. Software simulates the propagation of protons and nuclei. Mass number of injected particle can be specified by `-A` option in the command-line. Adiabatic energy losses, photonuclear interactions and decay of unstable particles are processes implemented in this code. Photonuclear interactions include pair production, photodisintegration and photohadronic interactions approximated as single-pion production. Nuclei are treated as collection of free nucleons and decays of unstable particles are taken as instantaneous. Propagation is considered as rectilinear. Magnetic fields are not incorporated in *SimProp*.

Program simulates N events. These are characterized by their injection mass number, injection energy $E_{\rm inj}$ and source redshift $z_{\rm inj}$ that is sampled uniformly from $z_{\min}$ to $z_{\max}$. In v2r4, it is possible to define the value of the spectral index γ (-g option). Injection energy is then sampled according to the power law distribution from $E_{\min}$ to $E_{\max}$. $N, E_{\min}, E_{\max}, \gamma, z_{\min}, z_{\max}$ are parameters that can be input in the command-line. *SimProp* v2r4 input options are shown in Tables 3 and 4.

option	description	default
`-h`	prints the help and exits	none
`-s`	seed of the random number generator	65539
`-N`	number of events to be generated	100
`-A`	mass number of primary nuclei, $A_{\rm inj}$ (chosen at random for each event with `-A 0`)	56
`-e`	$\log_{10}(E_{\min}/\text{eV})$, where $E_{\min}$ is the minimum injection energy	17
`-E`	$\log_{10}(E_{\max}/\text{eV})$, where $E_{\max}$ is the maximum injection energy	21
`-g`	injection spectral index, γ	1
`-z`	minimum source redshift, $z_{\min}$	0
`-Z`	maximum source redshift, $z_{\max}$	1
`-r`	distance between sources, L_s, in Mpc	0
`-L`	EBL model, see section	1
`-M`	photodisintegration model, see section	0
`-n`	nucleon ejection scaling factor (only with `-M 3` and `-M 4`)	1
`-a`	alpha-particle ejection scaling factor (only with `-M 3` and `-M 4`)	1
`-D`	beta decay: `0` disabled, all nuclei treated as their respective beta-decay stable isobars; `1` enabled, treated as instantaneous	1

Figure 3: *SimProp* v2r4 command-line options [Aloisio et al., 2016].

3.1 Adopted model

For the purpose of our study, we adopted a single-source scenario of extragalactic cosmic ray source at the highest energies. We wanted to study the possible variations of energy spectra observed on Earth for different parameters of the primary source. In this way we adopted the same reference model for background photon fields as in case of [PAO, 2017a]. The

option	description	default
`-S`	treatment of pion production: `-1` continuous energy loss approximation for protons, neglected for other nuclei (as in *SimProp* v2r0); `0` continuous energy loss for both protons and other nuclei; `1` stochastic, on the CMB only; `2` stochastic, on both the CMB and the EBL	1
`-p`	electrons and positrons: `0` disregarded, `1` individually written to output file (warning: results in very large output files), `2` binned according to production redshift (by default $[10^{-4.0}, 10^{-3.8}), \ldots, [10^{+0.8}, 10^{+1.0})$, but can be changed in the file `src/Output.h` before compiling), `3` only total energy written	0
`-o`	output type (see below): `0` old (`nuc` and `ev` trees); `1` new (`summary` tree); `2` both	0

Figure 4: Remaining *SimProp* v2r4 command-line options [Aloisio et al., 2016].

SimProp parameters incorporated in our simulations are listed in Table 1.

option	
`-s`	65539
`-N`	100000
`-A`	various
`-e`	19.0
`-E`	21.0
`-g`	various
`-z`	various
`-Z`	various
`-r`	0
`-L`	7
`-M`	0
`-n`	1
`-a`	1
`-D`	1
`-S`	2
`-p`	3
`-o`	2

Table 1: Chosen simulation settings for *SimProp* v2r4.

The library of Monte Carlo simulations for different injection particles, spectral indices and distances was generated. Each simulation consists of 10^5 generated primaries of a single type that propagate through the Universe under the conditions implemented in our model. Number of 10^5 events turned out to be statistically large-enough sample.

Injected particles are protons (or hydrogen nuclei, $A_{\mathrm{H}} = 1$) and helium ($A_{\mathrm{He}} = 4$), carbon ($A_{\mathrm{C}} = 12$), oxygen ($A_{\mathrm{O}} = 16$), silicon ($A_{\mathrm{Si}} = 28$) and iron nuclei ($A_{\mathrm{Fe}} = 56$). These attain energies from an interval ($\log(E_{\mathrm{min}}/\mathrm{eV})$,$\log(E_{\mathrm{max}}/\mathrm{eV})$) = (19.0,21.0) with a spectral index γ_{Source} from 1 to 3 incremented by $\Delta\gamma_{\mathrm{Source}} = 0.5$. We simulated the sources located in the distance 5 Mpc, 50 Mpc and 100 Mpc from the Earth. Single source in a specific distance was considered. We also applied additional cutoff function in the form [PAO, 2017a]

$$f_{\mathrm{Cut}}(E, Z_A R_{\mathrm{Cut}}) = 1 \; for \; (E < Z_A R_{\mathrm{Cut}}) \qquad (4)$$

and

$$f_{\mathrm{Cut}}(E, Z_A R_{\mathrm{Cut}}) = \exp\left(1 - \frac{E}{Z_A R_{\mathrm{Cut}}}\right) for \; (E > Z_A R_{\mathrm{Cut}}) \qquad (5)$$

where R represents rigidity in volts calculated as

$$R = \frac{Pc}{Ze}, \qquad (6)$$

with P representing the total momentum of a particular nucleus. Ze is electric charge of nucleus and c the speed of light. This function applies an exponential cutoff on the power law spectrum for energies exceeding $Z_A R_{\mathrm{Cut}}$ and describes the maximum acceleration capabilities of the source. The rigidity is sampled from $\log(R_{\mathrm{Cut,min}}/\mathrm{V}) = 19.0$ up to $\log(R_{\mathrm{Cut,max}}/\mathrm{V}) = 21.0$ incremented by $\Delta\log(R_{\mathrm{cut}}/\mathrm{V}) = 0.1$ in our analysis. The value of the cutoff function is related to the weight applied on the observed quantities on Earth. Source is characterized by 4 parameters: the composition (represented by $<\ln A_{\mathrm{Source}}>$), γ_{Source}, the distance D_{Source} (in Mpc) and the cutoff rigidity R_{Cut}.

3.2 PAO data

We compared resuts of our simulation with direct observations of energy spectrum observed by PAO. Data has been taken from [Fenu, 2017]. This dataset contains CR flux multiplied by corresponding energies for bins of energies in logarithmic scale from $\log(E_{\mathrm{Earth}}/\mathrm{eV}) = 17.55$ up to $\log(E_{\mathrm{Earth}}/\mathrm{eV}) = 20.15$ incremented by $\Delta\log(E_{\mathrm{Earth}}/\mathrm{eV}) = 0.1$ together with lower and upper errors. Multiplying the flux data by E^3, we obtain the Fig. 5 that is in logarithmic scale. This enabled to perform a simple linear fit to points with $\log(E_{\mathrm{Earth}}/\mathrm{eV}) = 19.65$ and higher in the form

$$\mathrm{y} = \mathrm{p0} - (\mathrm{p1} - 3) \times \log(E_{\mathrm{Earth}}/\mathrm{eV}). \qquad (7)$$

The parameter p1 therefore directly represents the spectral index γ of the energy spectrum on Earth. The calculated values of the parameters are p0 = 59 $\pm$ 3 and p1 = 4.78 $\pm$ 0.17. The resulting fit is displayed by red line. We consider that this is the region fully

after the suppression where the value of spectral index does not change anymore.

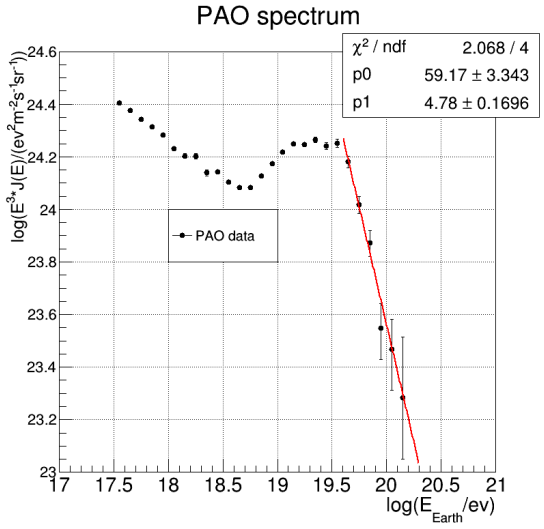


Figure 5: The PAO energy spectrum in logarithmic scale. Red line represents the linear fit to the data. The calculated parameters are listed in a legend. The data are taken from [Fenu, 2017].

4 Results

Our intention was to test the compatibility of PAO data with our simulations. For this purpose we supposed sources composed of hydrogen, helium, oxygen and iron nuclei. In order to consider also mixed composition we varied the primary composition just simply creating different combinations of elements with same relative abundances. This resulted into 15 combinations of primary compositions. These are labeled for example as 'H' and 'He' (for pure compositions) and 'H+He' (uniform contributions of hydrogen (50%) and helium (50%)). The fractions of each type of primaries can be therefore 100% (pure), 50%, 33.3% or 25%. Each combination is represented by $<\ln A_{\mathrm{Source}}>$ (see Table 2).

Considering all free parameters our model consists of 4725 different combinations - $<\ln A_{\mathrm{Source}}>$, γ_{Source}, D_{Source} and R_{Cut}. We introduced a quantity that we label as 'Test value'. This characterizes the measure of the dispersion between the points of our simulations and PAO data and it is calculated as

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{|N_{\mathrm{P},i}-N_{\mathrm{S},i}|}{\sqrt{\sigma_{\mathrm{P},i}^2+\sigma_{\mathrm{S},i}^2}}. \qquad (8)$$

Combination	$<\ln A_{\mathrm{Source}}>$
H	0
He	1.386
O	2.773
Fe	4.025
H+He	0.693
H+O	1.386
H+Fe	2.013
He+O	2.079
He+Fe	2.706
O+Fe	3.399
H+He+O	1.386
H+He+Fe	1.804
H+O+Fe	2.266
He+O+Fe	2.728
H+He+O+Fe	2.046

Table 2: $<\ln A_{\mathrm{Source}}>$ of different combinations of the primary mass composition.

$N_{\mathrm{P},i}$ and $N_{\mathrm{S},i}$ are the values of PAO datapoints and simulated points, respectively. $\sigma_{P,i}$ and $\sigma_{S,i}$ are their uncertainties. The data are, however, in the logarithmic scale. This creates the asymmetric errors. We have to mention that it is not possible directly compare PAO data with our measurements as our simulations do not contain the information about exposure. We therefore normalize our simulations and PAO data in order to compare the slopes of the plots.

The simulations having Test value ≤ 1 and with the number of datapoints in the studied region equal or larger to the number of datapoints in the PAO energy spectrum are further selected as those that correctly describe the observed data. We suppose that the energy spectrum cannot be terminated at energies below $\log(E_{\mathrm{Earth}}/\mathrm{eV}) = 20.15$ because the observed energy spectrum attains at least these energies.

Described adjustments of the simulated energy spectra and the successive selection were performed with the code we wrote in C++. 30 simulated energy spectra from total 4725 satisfy our conditions. This represents 0.64%. In Fig. 6 we can see the 2D histograms representing the parameters of the simulations that survived our constraints. A color corresponds to the number of accepted solutions at the specific bin.

5 Discussion

We assume that relatively small number of simulations satisfy cuts we applied. We can discuss our results for different rigidity cutoffs. In case of lower and intermediate cutoff rigidities ($\log(R_{\mathrm{Cut}}/\mathrm{V}) = 19.3$ up to 19.9), we can see that the closest sources (5 Mpc) are preferred. These are characterized by the light mass composition of pure protons, helium nuclei or the combination of both (see the top-left and bottom-right panels of Fig. 6). For the accepted simulations in this rigidity region we assume that there is no important preference for spectral index. At the lowest rigidity $\log(R_{\mathrm{Cut}}/\mathrm{V}) = 19.3$, the hardest spectral index 1 is preferred. With increasing the rigidity, larger indices are added. At the rigidity $\log(R_{\mathrm{Cut}}/\mathrm{V}) = 19.6$, slightly more preferred index is 3 (see the bottom-left panel of Figure 6) for mixed (helium with hydrogen) or pure hydrogen composition.

For higher rigidities, there is a transition from the closest sources (5 Mpc) with spectral index 3 to the sources with larger distances (50 Mpc) of the same spectral index at the rigidities $\log(R_{\mathrm{Cut}}/\mathrm{V}) = 20.0$ and 20.1 (both types of solutions are accepted). The mass composition of these distant sources is characterized by a mixture of hydrogen and oxygen nuclei. In case of even higher rigidities, we observe only these sources up to the highest values (see top-left and center-right panels of Fig. 6).

We can derive from our results that if the closest sources are considered, these are characterized by lower rigidities and so are not so efficient accelerators of particles. In case of distant sources, the accelerators seem to be more efficient as they are linked with higher rigidities. We have compared our results with the combined fit from [PAO, 2017a]. We obtained higher values of R_{Cut} with respect to the first minimum and slightly smaller values with respect to the second minimum for the spectral indices 1 and 2, respectively. However, it is important to mention that in [PAO, 2017a] the homogeneous distribution of sources, the wider energy interval were considered and the fit was performed assuming energy spectrum and also mass composition. The differences between the two analyses are therefore acceptable. Our analysis was also performed as a sparse scan mainly in the mass composition.

6 Conclusion

The results presented in this study are based on our diploma thesis [Čechvala, 2018] where we simulated the propagation of the cosmic rays from the ultra-high energy region using the Monte Carlo simulation package *SimProp*. We adopted a single-source scenario for different parameters of primary sources. The results of our simulations were compared with the published energy spectrum from the Pierre Auger Observatory. Our analysis indicates the preference of closer sources (5 Mpc) for cutoff rigidities around $10^{19.5}$ V with mass composition of light nuclei: hydrogen, helium and the equal combination of them. For higher rigidities, more distant sources are typical (50 Mpc) which are composed of the mixture of hydrogen and oxygen nuclei with the total mass similar to the helium composition at the closer sources with the spectral index 3.

Acknowledgments

The author thanks to his supervisor Ing. Jakub Vícha, Ph.D. for his guidance and advices during preparation of the diploma thesis.

References

[Aloisio et al., 2016] Aloisio, R., Boncioli, D., di Matteo, A., Grillo, A. F., Petrera, S., and Salamida, F. (2016). SimProp v2r3: Monte Carlo simulation code of UHECR propagation. *arXiv:1602.01239*.

[Batista et al., 2016] Batista, R. A., Dundovic, A., Erdmann, M., Kampert, K., Kuempel, D., Mueller, G., Sigl, G., van Vliet, A., Walz, D., and Winchen, T. (2016). CRPropa 3 - a public astrophysical simulation framework for propagating extraterrestrial ultra-high energy particles. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*.

[Bertolotti, 2013] Bertolotti, M. (2013). *Celestial Messengers: Cosmic Rays, The Story of a Scientific Advanture*. Springer.

[Čechvala, 2018] Čechvala, P. (2018). Sources, mass composition and energy spectrum of ultra-high energy cosmic rays. *Master Thesis, Department of Astronomy, Physics of Earth and Meteorology, Comenius University, Bratislava, SK*.

[Fenu, 2017] Fenu, F. (2017). The cosmic ray energy spectrum measured using the Pierre Auger Observatory. *Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference*.

[Ghia, 2015] Ghia, P. L. (2015). Highlights from the Pierre Auger Observatory. *In The 34th International Cosmic Ray Conference*.

[Greisen, 1966] Greisen, K. (1966). End to the cosmic-ray spectrum? *Physical Review Letters*, 16.

[Grieder, 2001] Grieder, P. K. F. (2001). *Cosmic Rays at Earth: researcher's reference manual and data book 1st ed.* Elsevier Science B. V.

[KASCADE, 2005] KASCADE (2005). KASCADE measurements of energy spectra for elemental groups of cosmic rays: Results and open problems. *Astroparticle physics*, 24.

[Linsley, 1963] Linsley, J. (1963). Evidence for a primary cosmic-ray particle with energy 10^{20} eV. *Physical Review Letters*, 10:146–148.

[PAO, 2017a] PAO, C. (2017a). Combined fit of spectrum and composition data as measured by the Pierre Auger Observatory. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*.

[PAO, 2017b] PAO, C. (2017b). Observation of a large-scale anisotropy in the arrival directions of cosmic rays above $8x10^{18}$ eV. *Science*, 357.

[Zatsepin and Kuz'min, 1966] Zatsepin, G. T. and Kuz'min, V. A. (1966). Upper limit of the spectrum of cosmic rays. *JETP Letters*, 4:78–80.

[Zavrtanik, 2010] Zavrtanik, D. (2010). Ultra high energy cosmic rays. *Contemporary Physics*, 51:513–529.

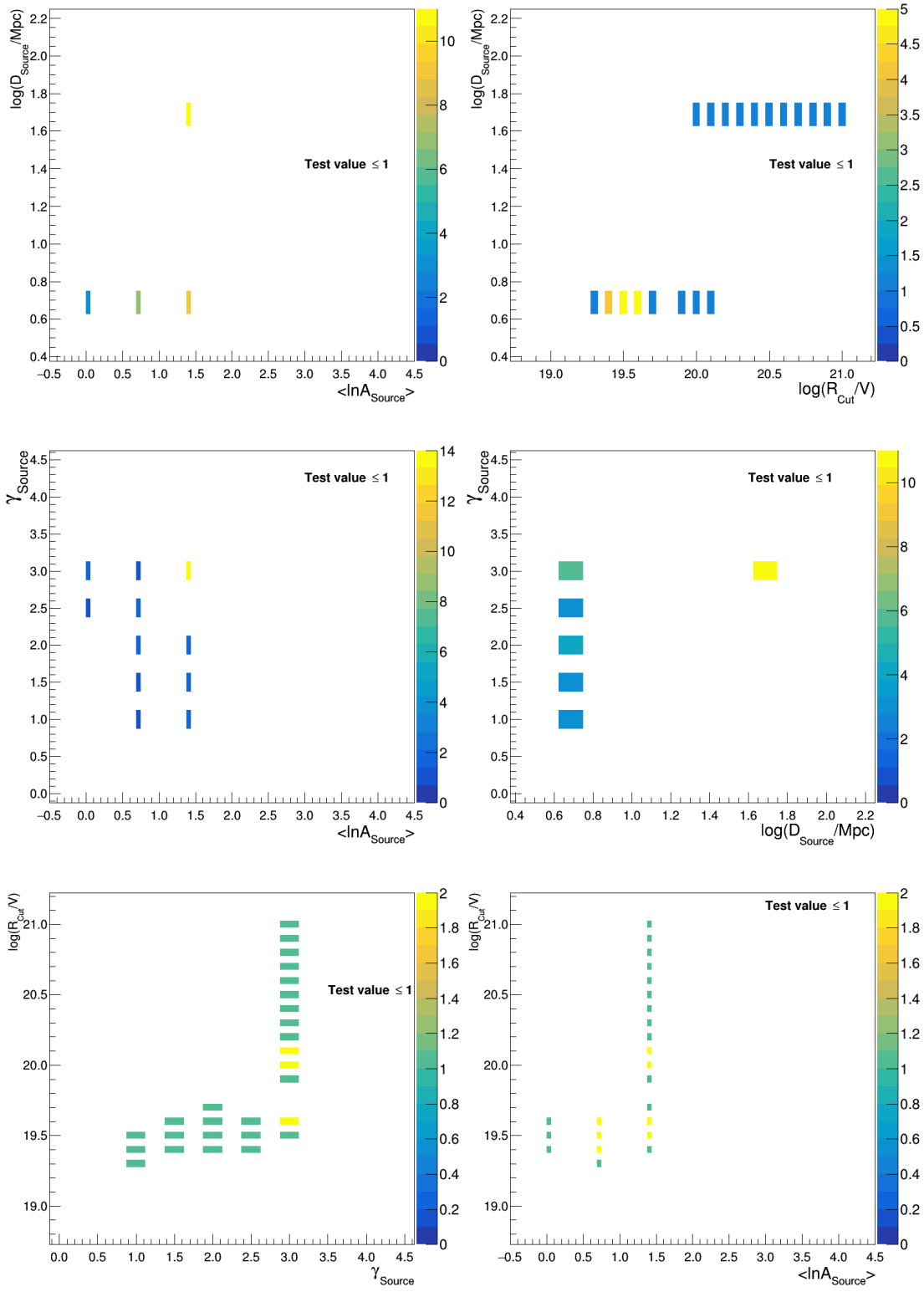


Figure 6: 2D histograms of the combinations of the free parameters for simulations satisfying our conditions.

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 180
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Emil Puha, Jozef Klačka, Roman Nagy

Processing of the Gaia and APOGEE data (Extended Abstract)

Emil Puha[1*]

Supervisor: Jozef Klačka[1†] Consultant: Roman Nagy[1‡]

Department of Astronomy, Physics of the Earth, and Meteorology, FMPHI CU, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

The enormous and accurate dataset of the astrometric mission Gaia will provide a new picture of our Galaxy in the next few years. One of our main goals is to study the stellar luminosity functions (LF) of stars in our Galaxy, which measure the number of stars in an absolute magnitude interval $M + \mathrm{d}M$ in a volume element $\mathrm{d}V$. These functions are fundamental descriptors of stellar populations – they could show evidence for spatial variation or the formation of specific populations. We intend to produce LFs for the individual stellar spectral types. As Gaia is not exactly a spectroscopic surveyor, we complemented our data with the spectral observations of the APOGEE survey. Prior their scientific usage, the data from these surveys have to be corrected in order to reduce the effects of observational and systematic errors. For Gaia data, the most important correction is the reduction of the parallax errors, which include: (i) formal uncertainties from the internal consistency of the measurements and (ii) the mean value of the systematic errors, which is called the parallax zero-point (ZP). Selecting stellar targets with an optimal value of the Re-normalised unit weight error (RUWE) provides us the best astrometric observations with the lowest uncertainties. ZP correction is achieved with a simple reduction of the published ZP value [3]. The next important step is the correction of the interstellar extinction in the absolute magnitudes determined from Gaia photometry $M_G = G - 5\log d + 5 - A_G$, where M_G is the absolute magnitude in Gaia G-band filter, G is the measured flux, d is the target's distance and A_G is the line-of-sight extinction. The coefficient A_G could be determined from various available Galactic dustmaps. Our extinction reduction was accomplished with the use of the Python *mwdust* package, which allowed us to query the three-dimensional dustmap of Green [1]. Eventually, we determined the spectral types of the Gaia targets. Cross-matching the Gaia data sample with the APOGEE catalogue provided important spectral information in a form of individual element's abundances. Based on the abundance tables published in [2] we were able to divide our data sample to four distinct spectral groups as seen on Figure 1. This result allows us to construct

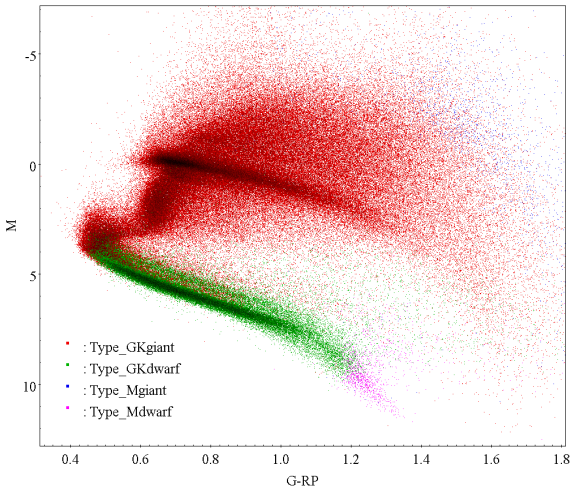


Figure 1: Spectral groups on a Hertzsprung-Russel diagram (x-axis is the color, y-axis is the absolute G magnitude) from Gaia magnitudes and parallaxes.

LF's for individual spectral groups, thus we can study their Galactic evolution separately.

References

[1] Green, G. M. e. a. (2019). A 3d dust map based on gaia, pan-starrs 1, and 2mass. *The Astrophysical Journal*, 887(1):93.

[2] Jönsson, H. e. a. (2020). Apogee data and spectral analysis from sdss data release 16. *The Astronomical Journal*, 160(3):120.

[3] Lindegren, L. e. a. (2020). Gaia early data release 3: The astrometric solution. *arXiv preprint arXiv:2012.03380*.

*emil.puha@fmph.uniba.sk
†jozef.klacka@fmph.uniba.sk
‡roman.nagy@fmph.uniba.sk

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 181
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Martina Kováčová, Leonard Kornoš

Možnosť dopravy materiálu z trpasličej planéty Ceres k Zemi prostredníctvom rezonancie 8:3 v strednom dennom pohybe s Jupiterom (rozšírený abstrakt)

Martina Kováčová[1]* Leonard Kornoš[1]†‡

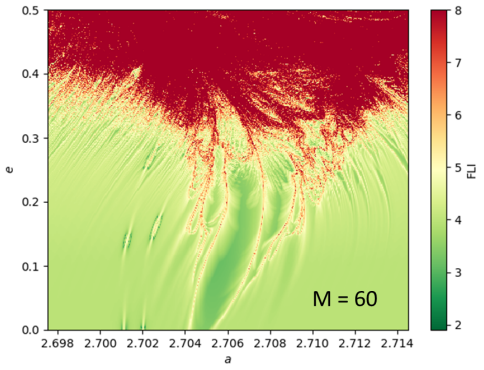
[1] Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava
[2]

Odhaduje sa, že každý deň vstúpi do atmosféry Zeme niekoľko desiatok ton materiálu. Meteoroidy môžu predstavovať hrozbu pre družice a väčšie objekty aj pre život na Zemi. A preto je dôležité zaoberať sa tým, odkiaľ tieto telesá pochádzajú a ako sa k nám môžu dostať. A práve nestabilné oblasti, ako napríklad rezonancie, majú potenciál výrazne ovplyvniť orbitálny vývoj telies.

V tejto práci sme sa zamerali na rezonanciu 8:3 v strednom dennom pohybe s Jupiterom vzhľadom na jej relatívnu blízkosť k trpasličej planéte Ceres. Misia Dawn odhalila, že povrch tejto trpasličej planéty je štrukturálne homogénny s veľkým množstvom kráterov a s viacerými jasnými miestami. My sme sa rozhodli pozrieť na možnosť, že by jedným zo zdrojov meteoroidov dopravovaných k Zemi mohol byť práve Ceres.

Prvým krokom bola snaha zmapovať a vizualizovať chaos v okolí rezonancie 8:3 pomocou indikátora chaosu FLI (Fast Lyapunov Indicator) [Froeschlé et al., 1997, Lega et al., 2016]. Pomocou FLI mapy (Obr. 1) sme z oblasti s nižšími excentricitami ($e \leq 0.25$) vybrali 500 častíc s najnižšími a 500 častíc s najvyššími hodnotami FLI, t.j. najstabilnejšie a najmenej stabilné častice. Pohyb týchto častíc sme následne numericky integrovali po dobu $15\,Myr$.

Vývoj stabilných častíc bol v prevažnej miere pokojný, len 2 časticiam sa podarilo uniknúť zo Slnečnej sústavy, niekoľkým ďalším sa mierne zvýšili excentricity. Počas simulácie s nestabilnými časticami, 209 častíc niekedy prekonalo hranicu pre perihéliovú vzdialenosť $q \leq 1.3\,AU$ a stalo sa tak blízkozemskými objektmi. V 177 prípadoch bol prekonaný limit $q \leq 1\,AU$. V nestabilnom prípade až 138 častíc uniklo zo Slnečnej sústavy. Dominantný vplyv na konečný stav týchto častíc mal práve Jupiter.



Obr. 1: FLI mapa okolia rezonancie 8:3 s Jupiterom v rovine dráhy trpasličej planéty Ceres na mriežke 400x400 počiatočných podmienok pre epochu $MJD = 58484.0$ a pre strednú anomáliu $M = 60°$, pričom $a \in \langle 2.6975; 2.7145 \rangle\, AU$, a $e \in \langle 0; 0.5 \rangle$.

Naše výsledky naznačujú, že aj napriek tomu, že sa na rezonanciu 8:3 v strednom dennom pohybe s Jupiterom nezvykne pozerať ako na potenciálny zdroj blízkozemských objektov, tak je možné, aby sa prostredníctvom tejto rezonancie dostal materiál do blízkozemskej oblasti, potenciálne aj materiál z trpasličej planéty Ceres.

Pod'akovanie. Táto práca bola podporená agentúrou VEGA, projekt č. 1/0596/18, grantom APVV-16-0148 a grantom UK/369/2020.

Literatúra

[Froeschlé et al., 1997] Froeschlé, C., Lega, E., and Gonczi, R. (1997). Fast lyapunov indicators. application to asteroidal motion. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 67:41–62.

[Lega et al., 2016] Lega, E., Guzzo, M., and Froeschlé, C. (2016). Theory and application of the fast lyapunov idicator (fli) method. In Skokos, C., Gottwald, G., and Laskar, J., editors, *Chaos Detection and Predictability*. Springer, Germany, Heidelberg.

*kovacova308@uniba.sk
†leonard.kornos@fmph.uniba.sk
‡Školiteľ

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 182
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Adriana Pisarčíková, Pavol Matlovič, Juraj Tóth

Výskum prítomnosti organického materiálu v meteoroidoch pomocou spektrálnych pozorovaní meteorov

Adriana Pisarčíková[1*] Pavol Matlovič[1†] Juraj Tóth[1‡§]

[1] Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Zaujímavú oblasť skúmania spektier meteorov predstavuje emisia vodíka, ktorá naznačuje prítomnosť organického materiálu alebo vody v meteoroide [Jenniskens and Mandell, 2004]. V rámci diplomovej práce [Pisarčíková, 2020] sme okrem výskumu diverzity spektrálnych vlastností meteoroidov skúmali aj emisiu čiary vodíka Hα a jej súvis s orbitálnymi, atmosférickými a štrukturálnymi parametrami, čo nám umožnilo preskúmať prítomnosť čiary z rôznych pohľadov v rôznych zdrojoch meteoroidov, nakoľko jej zastúpenie v populácií malých telies slnečnej sústavy nebolo ešte preskúmané. V tomto príspevku predstavíme naše rozšírené výsledky analýzy emisie Hα čiary o ďalšie spracované dáta zo spektier meteorov zachytených spektrálnym systémom All-sky Meteor Orbit System (AMOS-Spec) inštalovaným na Astronomickom a geofyzikálnom observatóriu Modra.

V priebehu pozorovacieho obdobia bolo AMOS-Spec systémom zaznamenaných 270 spektier meteorov vhodných na analýzu. V rámci tejto vzorky bolo detekovaných 48 spektier meteorov s emisiou Hα čiary, ktoré tvoria základ tejto práce. Orbitálne parametre z viacstaničných pozorovaní boli k dispozícii pre 39 meteorov s emisiou Hα čiary, zatiaľ čo 6 z nich vykazovalo hyperbolickú dráhu. Vzorka meteorov pokrýva absolútnu magnitúdu v rozsahu -1 až -12, čo zodpovedá veľkosti mm-dm meteoroidom.

Naše výsledky potvrdzujú volatilný charakter čiary Hα. Pozorujeme koreláciu medzi zvýšenou emisiou volatilného Na a emisiou Hα, pričom pozorujeme rovnaký proces sublimácie pri blízkych perihéliových priblíženiach k Slnku. Vodík sa pri tomto procese prejavuje ešte prchavejšie ako sodík, pozorujeme totiž výrazný pokles obsahu Hα pri meteoroidoch, ktoré sa približujú k Slnku na vzdialenosť <0.4 AU. Navyše skúmané meteoroidy pochádzajú z kometárnych dráh, väčšinou s dlhšou periódou (Halley typ), čo potvrdzuje očakávanie väčšieho množstva prchavých látok v kometárnych meteoroidoch.

Detekciu emisie Hα čiary sme pozorovali prevažne v rýchlejších a jasnejších meteoroch, patriacich najmä známym meteorickým rojom (Perzeidy, Leonidy, Orionidy). Zaznamenali sme typicky krehkejšiu pevnosť materiálu pre tieto meteory, čo naznačuje, že obsah organického materiálu alebo vody viazanej v mineráloch ovplyvňuje štruktúru meteoroidu.

Emisiu vodíkovej čiary sme skúmali aj v konkrétnom meteorickom roji, v Perzeidách, ktorý je v našej vzorke najviac zastúpený. Na analýzu bolo k dispozícií 15 Perzeíd s detegovanou Hα emisiou a 10 Perzeíd bez detekcie skúmanej emisie. Výsledky poukazujú závislosť na jasnosti. Väčšina Perzeíd s detegovanou Hα čiarou bola jasnejšia ako -4 mag. Prítomnosť Hα emisie v prípade Perzeíd je zjavne závislá predovšetkým od fyzikálnych podmienok preletu meteoroidu v atmosfére. Prípady chýbajúcej čiary vodíka v spektre jasnejších Perzeíd však môžu byť aj spôsobené efektom starnutia meteoroidov.

Zaujímavým rozšírením k získaným výsledkom je momentálne prebiehajúci ESA PECS-MetSpec projekt zameraný na simulovanú abláciu meteoritov v plazmovom veternom tuneli v Stuttgarte za účelom zlepšenia metodiky identifikácie materiálovej distribúcie meteoroidov AMOS systémom. V prvotnej analýze získaných spektier meteoritov sme identifikovali Hα čiaru a aj molekulárny pás CN, ktorý je ďalším vhodným kandidátom na prítomnosť organických zlúčenín v meteoroidoch.

Literatúra

[Jenniskens and Mandell, 2004] Jenniskens, P. and Mandell, A. M. (2004). Hydrogen emission in meteors as a potential marker for the exogenous delivery of organics and water. *Astrobiology*, 4:123–134.

[Pisarčíková, 2020] Pisarčíková, A. (2020). *Diverzita spektrálnych a štrukturálnych vlastností meteoroidov*. Diploma thesis, Department of Astronomy, Physics of the Earth and Meteorology, Comenius University, Bratislava.

*pisarcikova@fmph.uniba.sk
†matlovic@fmph.uniba.sk
‡juraj.toth@fmph.uniba.sk
§Školiteľ

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 183–190
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Karin Vančíková

Využitie textúrovej analýzy GLCM aplikovanej na T2 mapy na diagnostiku skorých degeneratívnych zmien u pacientov rok po parciálnej meniskektómii

Karin Vančíková[1]*
[1] Katedra jadrovej fyziky a biofyziky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava, Slovensko

Abstrakt

V tejto práci som sa venovala problematike diagnostiky chrupaviek a ich zmien v skorých štádiách osteoartrózy. Mnohé štúdie dokazujú, že resekcia tkaniva meniskov spôsobuje abnormálne biomechanické zmeny v kolennom kĺbe, vedúce k vzniku degeneratívnych zmien v chrupavke (osteoartróza OA). Cieľom práce bolo zistiť, či rok po parciálnej meniskektómii sú v chrupavke viditeľné a kvantifikovateľné zmeny.

Kvantitatívne dáta merané u deviatich pacientoch pomocou Magnetic Resonance (MR)-techniky TESS (T2 mapovanie) boli vyhodnocované textúrovou analýzou Gray-Level Co-occurence Matrix (GLCM). Tá umožňuje kvantifikovať distribúciu T2 relaxačných časov chrupavky na úrovni pixelov. Preto má potenciál detegovať počiatočné zmeny v chrupavkách efektívnejšie ako samotná biochemická analýza T2 relaxačných časov.

Z 20 textúrových GLCM parametrov aplikovaných na dáta vykazovalo 18 parametrov štatisticky signifikantné zmeny. Z výsledkov vyplýva, že pacienti vykazovali štrukturálne zmeny v oblasti resekcie menisku v porovnaní s referenčnou nezaťažovanou časťou chrupavky.

Pri správnom nastavení a výbere parametrov sa GLCM javí ako potenciálne silný a citlivý diagnostický nástroj, umožňujúci odhalenie skorých osteoartritických zmien v chrupavke, ktoré nie sú viditeľné na morfologických MRI snímkach ani na T2 mapách.

Kľúčové slová: Magnetická rezonancia, Osteoartróza, Parciálna meniskektómia, Chrupavka, T2 mapovanie, Textúrová analýza, GLCM

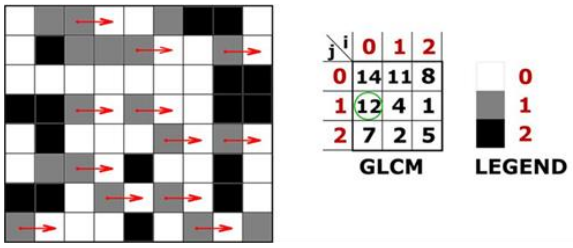
1 Úvod

Poškodenie meniskov je bolestivé a funkčne obmedzujúce zranenie, ktoré často konči operačným zákrokom. Ročná incidencia zranení meniskov je približne 66/100 000 ľudí [Anetzberger et al, 2014]. Parciálna meniskektómia patrí medzi najčastejšie operácie menisku, najmä kvôli rýchlosti tejto procedúry a dobrým krátkodobým pooperačným výsledkom [Doral et al. 2018]. Priemerne 89,6% pacientov po operácii dosiahlo dobré alebo vynikajúce výsledky, pričom až 86% pacientov sa mohlo vrátiť k plnému zaťaženiu a športovaniu. Naopak dlhodobé výsledky nie sú uspokojivé, keďže dobré alebo vynikajúce výsledky dosiahlo 58-96% pacientov (štúdie s follow-up 7-15 rokov). Jedna štúdia uvádza dokonca len 48% návrat pacientom k plnému zaťaženiu po ôsmych rokoch [McKeon et al. 2009].

Z biomechanického pohľadu, pri parciálnej meniskektómii sa resekuje časť menisku a tým sa zmenší kontaktná plocha medzi chrupavkou a meniskom o 10-20% [McKeon et al. 2009]. Tým sa zníži funkcia meniskov, a to absorpcia tlaku a jeho transmisia počas zaťažovania [Doral et al. 2018]. To má za následok zvýšenie lokálneho tlaku na chrupavku o 40-70% [McKeon et al. 2009]. Takéto abnormálne zmeny v biomechanike kolenného kĺbu môžu viesť k vzniku degeneratívnych osteoartritických zmien v chrupavke [Jeong, 2012]. Preto je dôležité zistiť, ako skoro sa tieto zmeny vyvíjajú. Vďaka tomu by sa doktor a pacient vedeli rozhodnúť, či je tento typ operácie vhodný pre konkrétneho pacienta s ohľadom na jeho vek a aktivitu.

Textúrová analýza je nástroj na spracovanie klinických obrazov (napr. z MRI) z ktorých sa extrahujú kvantitatívne dáta. V prípade GLCM ide o textúrové charakteristiky, ktoré sa získavajú počítaním štatistických vzťahov medzi susednými voxelmi [Rizzo et al. 2018]. Pri tejto analýze je kľúčový výber počtu odtieňov šedej a dominantný smer, ktorým sa budú pozorovať zmeny v chrupavkách (napr. 0, 45, 90, 135 stupňov). Analýza je založená na určovaní počtu zmien intenzít v obraze, teda ako často sa hodnota intenzity *i* vyskytuje vedľa hodnoty intenzity *j* v dominantnom smere (Obr. 1). Takto sa vytvorí matica z ktorej sa počítajú štatistické parametre charakterizujúce štrukturálne vlastnosti obrázku [Peuna et al., 2018].

* karin.vancikova@gmail.com



Obr. 1: Príklad výpočtu zmien intenzít v obraze pri nastavení 3 úrovní šedej a dominantnom smere 0°, upravené [Peuna et al. 2018].

GLCM sa používa na analýzu homogénnych orgánov a ich patológii, ako napríklad tumory mozgu a pľúc [Blumenkrantz et al. 2008], ale aj tumory prsníkov, rekta a obličiek [Davnall et al. 2012]. V posledných rokoch pribudlo niekoľko publikácii, ktoré skúmajú možnosti aplikácie GLCM analýzy kvantitatívnych MR máp chrupaviek [Williams et al. 2017], [Juras et al. 2020]. Táto technika poskytuje doplňujúce informácie o organizácii kolagénovej siete a teda môže byť použitá pri skúmaní symptomatickej OA, lézii chrupaviek, degenerácii chrupavky po zranení predného krížového väzu alebo u subjektov s rizikom OA [Joseph et al. 2011]. Práve skúmanie rôznych spôsobov zobrazenia skorých osteoartických zmien v chrupavke, ako aj chrupaviek OA rizikových pacientov má zmysel najmä z toho dôvodu, že liečba OA bude úspešná len vtedy, ak bude aplikovaná v skorých štádiách, pred vznikom nezvratných štrukturálnych a funkčných zmien v osteochondrálnej jednotke [Goldring, 2016].

2 Metódy

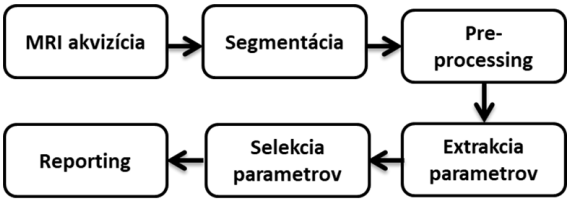
2.1 Testovacia skupina

Do tejto štúdie bolo zahrnutých 9 pacientov, 2 ženy a 7 mužov vo veku 25 až 56 rokov a meralo sa 5 pravých a 4 ľavé kolená. Priemer indexov telesnej hmotnosti BMI pacientov bol 23,8 ± 2,5. Všetci pacienti boli meraní rok po parciálnej mediálnej meniskektómii a prešli oficiálnym rehabilitačným plánom. Podmienkou bola neprítomnosť sprievodnej traumy laterálneho menisku a ligamentov v kolennom kĺbe. Vylúčení boli tí, ktorí trpeli zápalovým ochorením kĺbu, artritickou degeneráciou vyššou ako Kellgren-Lawrence skóre 1 alebo mali kontraindikácie pre MRI skenovanie.
Merací protokol bol schválený lokálnou etickou komisiou Lekárskej Univerzity vo Viedni a všetci pacienti podpísali informovaný súhlas. Dáta boli pred spracovaním anonymizované, v súlade s požiadavkami na ochranu osobných údajov.

2.2 MRI akvizícia

Pacienti boli meraní pomocou 7T celotelového MR skenera (Magnetom, Siemens Healthineers, Nemecko) s 28- kanálovou vysielaco- prijímacou cievkou (Siemens Healthineers, Erlangen, Nemecko). Merania prebiehali v rokoch 2015 a 2016 a boli vykonané vyškoleným operátorom (Pracovisko MR centra vysokého magnetického poľa Lekárskej univerzity vo Viedeni). Bola použitá alternatívna technika T2 mapovania Tripple- Echo Steady-State (TESS). Pri jednom skenovaní sa generujú tri echá, z ktorých sa matematicky vypočítavajú T2 mapy [Heule et al. 2014]. Práve T2 relaxačné časy korelujú so zmenami v množstve a štruktúre kolagénových vlákien a v množstve vody v chrupavke [Juras et al. 2016].

T2 mapovanie bolo vykonané s týmito základnými parametrami: zobrazovacia rovina = koronálna, potlačenie tuku v obraze, opakovací čas TR = 9.31 msec, počet akvizícii = 1, hrúbka vrstvy = 3 mm, meracia matica = 320 × 320 pixelov, zobrazovacia matica (po interpolácii) = 640 x 640 pixelov, zobrazená plocha = 160 × 160 mm^2, rozlíšenie v zobrazenej ploche (nominálne) = 0.19 × 0.19 mm/pixel, sklápací uhol = 15°, čas merania = 2 min.



Obr. 2: Schéma postupu

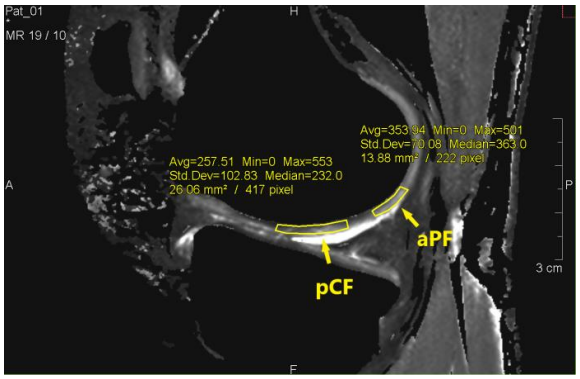
2.3 Pre-processing

Dáta som manuálne segmentovala pomocou softwaru JiveX DICOM Viewer (JiveX 4.3.3, VISUS Technology Transfer GmbH, Bochum, Nemecko). Vo femorálnej chrupavke boli vybraté dva regióny záujmu (ROI) oba na mediálnej kondyle kolenného kĺbu (Obr.3). Prvý bol umiestnený na centrálnej posteriórnej časti v mieste resekcie menisku (pCF- posterior central femur). Druhý bol umiestnený v anteriórnej časti posteriórnej chrupavky (aPF- anterior part of posterior femur) a je považovaný za referenciu, keďže táto časť je minimálne zaťažovaná v porovnaní s pCF [Wang et al. 2014] a nepredpokladajú sa v nej skoré degeneratívne zmeny spojené s resekciou menisku. Segmentácia bola vykonávaná v 1 až 3 vrstvách s ohľadom na anatómiu kolena každého pacienta, pričom som sa vyhýbala artefaktom ktoré by znehodnotili dáta. Priemerný počet pixelov v pCF ROIoch je 323,5 ± 91,97 a u aPF 199,89 ± 34,64. Takto

vysegmentované ROIe boli ukladané vo formáte pres.

2.4 Analýza dát

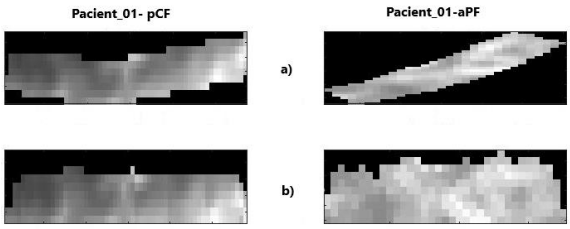
Analýza GLCM bola vykonávaná pomocou Matlab R2019a (Math Works, MA, USA). Bolo použitých 20 GLCM parametrov z MatLab knižnice [Uppuluri, 2008] (Obr.4). Každý ROI bol otočený, sploštený aby sa korigovalo zakrivenie chrupavky a prevzorkovaný (Obr.5). GLCM parametre boli počítané v paralelnej orientácii, teda 0˚ (paralelne s rozhraním chrupavka - kosť) a s ofsetom 1. T2 relaxačné časy boli premapované do 16 odtieňov (hodnôt) šedej.



Obr. 3: Príklad umiestnenia ROIov u Pacienta 1 a ich parametre (pCF- posterior central femur, aPF- anterior part of posterior femur), prostredie softveru Jivex

Feature name	Equation
Autocorrelation	$f_1 = \sum_i \sum_j (ij) p(i,j)$
Contrast	$f_2 = \sum_i \sum_j \lvert i-j \rvert^2 p(i,j)$
Correlation	$f_3 = \sum_i \sum_j \frac{(ij)p(i,j) - \mu_x \mu_y}{\sigma_x \sigma_y}$
Cluster prominence	$f_4 = \sum_i \sum_j (i+j-\mu_x-\mu_y)^4 p(i,j)$
Cluster shade	$f_5 = \sum_i \sum_j (i+j-\mu_x-\mu_y)^3 p(i,j)$
Dissimilarity	$f_6 = \sum_i \sum_j \lvert i-j \rvert p(i,j)$
Energy	$f_7 = \sum_i \sum_j p(i,j)^2$
Entropy	$f_8 = -\sum_i \sum_j p(i,j) \log\left(p(i,j)\right)$
Homogeneity	$f_9 = \sum_i \sum_j \frac{1}{1+(i-j)^2} p(i,j)$
Maximum probability	$f_{10} = \underset{i,j}{MAX}\ p(i,j)$
Sum of squares: Variance	$f_{11} = \sum_i \sum_j (i-\mu)^2 p(i,j)$
Sum average	$f_{12} = \sum_{i=2}^{2N_g} i p_{x+y}(i)$
Sum variance	$f_{13} = \sum_{i=2}^{2N_g} (i-f_{14})^2 p_{x+y}(i)$
Sum entropy	$f_{14} = \sum_{i=2}^{2N_g} p_{x+y}(i) \log\left(p_{x+y}(i)\right)$
Difference entropy	$f_{15} = -\sum_{i=0}^{N_g-1} p_{x-y}(i) \log\left(p_{x-y}(i)\right)$
Information measure of correlation 1	$f_{16} = \frac{f_9 - HXY_1}{MAX\{HX, HY\}}$
Information measure of correlation 2	$f_{17} = \left(1 - e^{-2(HXY_2 - f_9)}\right)^{1/2}$
Difference variance	$f_{18} = \sum_{i=0}^{N_g-1} i^2 p_{x-y}(i)$
Inverse difference normalized	$f_{19} = \sum_i \sum_j \frac{1}{1+\lvert i-j \rvert / N_g} p(i,j)$
Inverse difference moment normalized	$f_{20} = \sum_i \sum_j \frac{1}{1+(i-j)^2 / N_g^2} p(i,j)$

Obr. 4: GLCM štatistické parametre, upravené [Peuna et al. 2018]



Obr. 5:Ukážka ROIov Pacienta 1, a) nepravený ROI, b) sploštený ROI, obrázky generuje Matlab

3 Výsledky

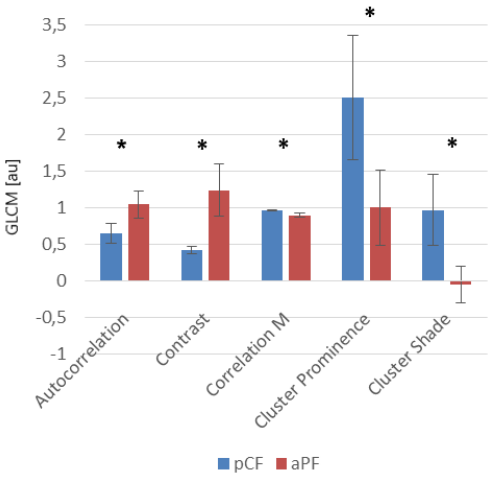
3.1 Štatistická analýza

Štatistická analýza bola vykonávaná pomocou IBM SPSS Statitics for Windows, v20.0 (IBM Armonk, NY, USA). Boli porovnávané textúrové parametre medzi potenciálne symptomatickým ROIom pcF a referenciou aPF. Na overenie normality rozdelenia dát sa použil Shapiro-Wilkov Test, pri signifikancii väčšej ako 0,05 boli parametre považované za normálne rozdelené. V prípade *Contrast, Correlation, Dissimilarity, Homogeneity, Difference variance, Difference entropy, Information measure, Information measure of correlation 2, Inverse difference normalized* a *Inverse difference moment normalized* bol použitý neparametrický Mann-Whitney U test, nakoľko nie sú normálne rozdelené. P hodnota bola vo všetkých prípadoch nižšia ako zvolená hladina významnosti 0,05 (vo všetkých prípadoch p=0,000) čím sa potvrdila existencia štatisticky významných rozdielov.

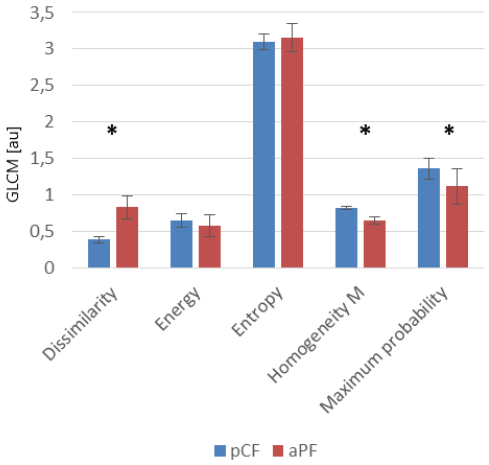
V prípade normálne rozdelených premenných veličín *Autocorrelation, Cluster Prominence, Cluster Shade, Energy, Entropy, Maximum probability, Sum of squares, Sum average, Sum variance* a *Sum entropy* sa použil parametrický Independent-Samples T- test. P hodnota bola nižšia ako zvolená hladina významnosti 0,05 u *Autocorrelation, Cluster shade, Sum of squares , Sum average, Sum variance* a to p=0,000, *Cluster prominence* (p=0,001) a *Maximum probability* (p=0,024) kde sa potvrdila existencia štatisticky významných rozdielov. U *Energy* a *Entropy* sa nepotvrdil štatisticky významný rozdiel medzi ROImi.

Výsledky tejto analýzy vykazujú zmeny v chrupavkách u pacientov po parciálnej meniskektómii. Pozorované parametre boli vyššie v pCF ako u referenčnej aPF u *Correlation, Cluster Prominence, Cluster Shade, Energy, Homogeneity, Maximum probability, Sum entropy, Information measure of correlation 2, Inverse difference normalized* a *Inverse difference moment normalized.* Naopak nižšie hodnoty vykazovali paremetre *Autocorrelation, Contrast, Dissimilarity, Entropy, Sum of squares, Sum average, Sum*

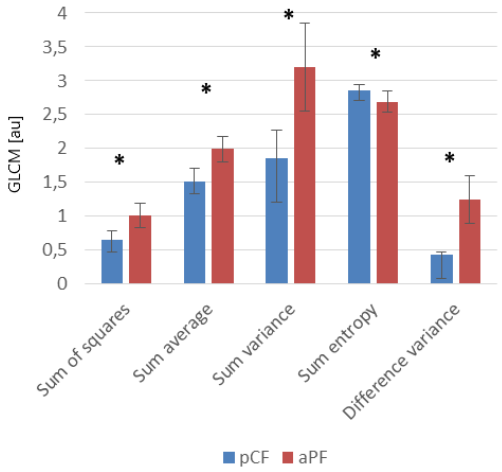
variance, Difference variance, Difference entropy, Information measure (Obr. 6-9).



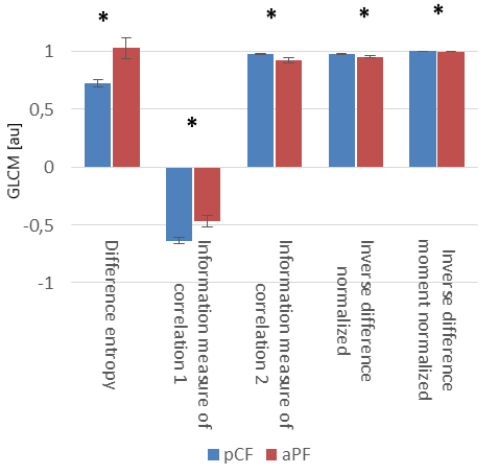
Obr. 6: Výsledky analýzy textúrových parametrov chrupavky pacientov po parciálnej meniskektómii



Obr. 7: Výsledky analýzy GLCM parametrov chrupavky pacientov po parciálnej meniskektómii



Obr. 8: Výsledky analýzy textúrových parametrov chrupavky pacientov po parciálnej meniskektómii



Obr. 9: Výsledky analýzy textúrových parametrov chrupavky pacientov po parciálnej meniskektómii

3.2 Diskusia

Signifikancie v 18 parametroch z 20 ukazujú, že GLCM analýza je citlivá na degeneratívne zmeny chrupaviek u pacientov po parciálnej meniskektómii v regióne pCF.

GLCM parametre môžeme rozdeliť do 4 kategórii a to kontrast, usporiadanosť, deskriptívna štatistika a ďalšie [Mryka 2017].

Do skupiny kontrast patria parametre *Contrast, Dissimilarity* a *Homogeneity*. Parameter ***Contrast*** vyjadruje intenzitu kontrastu medzi pixelom a jeho susedom v celom obrázku [1]. Zvýšenie tohto parametra môže indikovať zvýšenú štrukturálnu neintegritu a teda rozpad kolagénovej siete [Peuna et al., 2018]. Pri hodnotách parametra *Contrast* bol pozorovaný nárast u pacientov s OA [Peuna et al., 2018], [Carballido-Gamio et al. 2009], [Carballido-Gamio et al. 2011] čo nesúhlasí s našimi

pozorovaním v regióne pCF. Williams et al. v svojej práci uviedol, že pri miernej OA (Kellgren-Lawrence skóre 1 a 2) sa hodnoty zvyšujú a pri už vyvinutej OA (Kellgren-Lawrence skóre 2 a 3) sa hodnoty *Contrast* znižujú [Williams et al. 2017].

Parameter ***Dissimilarity*** sleduje variáciu (rôznosť) voxelových párov šedej úrovne [1]. Zvýšené hodnoty vyšli u subjektov s OA [Peuna et al., 2018] čo nesúhlasí s našimi výsledkami v regióne pCF.

Parameter ***Homogeneity*** sleduje hladkosť (homogenitu) distribúcie šedej v obraze [Santos et al. 2015]. Zvýšené hodnoty môžu vyjadrovať intaktnosť kolagénovej siete a jej dobrú organizáciu [Mryka 2017], [Peuna et al., 2018]. Približne inverzne koreluje s parametrom *Contrast* [Santos et al. 2015]. *Homogeneity* vyšla nižšia u pacientov s OA [Carballido-Gamio et al. 2009], [Peuna et al., 2018] a naopak vyššia v [Carballido-Gamio et al. 2011] [Williams et al. 2017] čo súhlasí s našimi výsledkami v regióne pCF.

Do skupiny, ktorá sa zameriava na, usporiadanosť, resp. aké pravidelné sú rozdiely v hodnotách pixelov, patria parametre *Energy* a *Entropy* [Mryka 2017]. ***Energy*** vyjadruje uniformitu voxelových párov šedej úrovne, pričom vyššie hodnoty vyjadrujú usporiadanosť [1] [Mryka 2017]. *Energy* vyšla vyššia v niektorých štúdiách u pacientov s OA [Carballido-Gamio et al. 2011] [Williams et al. 2017] rovnako ako v regióne pCF v našej práci. Naopak, vyšla nižšia u pacientov s OA v dvoch sledovaných prácach [Peuna et al., 2018] [Carballido-Gamio et al. 2009].

Entropy vyjadruje neusporiadanosť medzi pixelmi, pričom vyššie hodnoty indikujú väčšiu neusporiadanosť [Santos et al. 2015]. Vďaka tomu predpokladáme, že *Entropy* bude rásť v chrupavkách s miernou OA, pri ktorej predpokladáme začiatok rozpadu kolagénovej siete. Pri tomto parametre bol pozorovaný nárast u pacientov s OA [Peuna et al., 2018], [Carballido-Gamio et al. 2009], [Carballido-Gamio et al. 2011] [Blumenkrantz et al. 2008] čo opäť nesúhlasí s našimi výsledkami v regióne pCF.

Do deskriptívnej štatistickej kategórie patrí *Correlation* a *Sum of squares* (Variance). Ich rovnice sú podobné ako bežné deskriptívne štatistické parametre, ako napríklad stredná hodnota alebo štandardná odchýlka, no nie sú počítané z pôvodných hodnôt pixelov, ale z GLCM výstupov [Mryka 2017].

Correlation je miera toho, ako koreluje pixel so susedným pixelom v celom obrázku, teda vyjadruje lineárnu závislosť úrovne šedej v susedných pixeloch [Santos et al. 2015]. Tento parameter vyšiel nižší u pacientov s OA [Peuna et al., 2018], [Carballido-Gamio et al. 2009] čo je v rozpore s našimi výsledkami v regióne pCF.

Sum of squares (Variance) meria rozptyl distribúcie hodnôt šedej úrovne s ohľadom na priemer [Santos et al. 2015]. Tento parameter vyšiel v práci Carballido-Gamio et al. nižší u pacientov s OA, čo súhlasí s našimi výsledkami v regióne pCF [Carballido-Gamio et al. 2009]. Naopak v práci Peuna et al. vyšiel tento parameter vyšší, no nevykazoval štatisticky signifikantné rozdiely v mediálnej časti femuru [Peuna et al., 2018].

Ostatné parametre (kategória ďalšie) boli použité v súvislosti s výskumom chrupavky iba v práci Peuna et al. s výnimkou *Difference variance*, ktorá pravdepodobne nebola použitá vôbec.

Autocorrelation reflektuje opakujúce sa vzorce a je mierou jemnosti a hrubosti textúry [1], [Peuna et al., 2018]. V našich výsledkoch sa tento parameter v regióne pCF, v ktorom predpokladáme OA zmeny, znížil, naopak v práci Peuna et al. vyšli hodnoty vyššie u pacientov s OA v porovnaní s referenciami, no tento parameter nevykazoval štatisticky signifikantné rozdiely v mediálnej časti femuru [Peuna et al., 2018].

Cluster prominence a ***Cluster shade*** vyjadrujú tendenciu zhlukovania pixelov v regióne [1]. Konkrétne *Cluster prominence* je mierou krivolakosti a asymetrie a *Cluster shade* je mierou krivolakosti a uniformity [2]. V našich výsledkoch sa oba parametre v regióne pCF zvýšili. V práci Peuna et al. nesledovali systematický rozdiel v prípade *Cluster prominence*. V *Cluster shade* sa zvýšil u pacientov s OA, čo súhlasí s našimi výsledkami v regióne pCF [Peuna et al., 2018].

Maximum probability vyjadruje výskyt najviac prevažujúceho páru zo susedných hodnôt intenzít [2]. V našej práci sa tento parameter zvýšil v mieste operácie. V práci Peuna et al. nesledovali systematický rozdiel medzi pacientami s OA a referenčnými subjektami.

Sum average vyjadruje priemer distribúcie súčtu šedej úrovne v obraze resp. meria vzťah medzi výskytom párov s nižšou a vyššou intenzitou [Santos et al. 2015], [2].V našej práci sa tento parameter znížil v regióne pCF. V práci Peuna et al. vyšiel parameter *Sum average* nižší u pacientov s OA, no nevykazoval štatisticky signifikantné zmeny v mediálnej časti femuru [Peuna et al., 2018].

Sum variance vyjadruje rozptyl distribúcie súčtu úrovne šedej v obraze [Santos et al. 2015]. V našej práci vyšiel tento parameter nižší v regióne pCF, opačne ako v práci Peuna et al., pričom parameter nevykazoval štatisticky signifikantné zmeny [Peuna et al., 2018].

Sum entropy meria neusporiadanosť súvisiacu s distribúciou úrovne šedej v obraze [Santos et al. 2015]. Tento parameter nám vyšiel vyšší v regióne pCF, čo súhlasí s prácou Peuna et al. [Peuna et al., 2018].

Parameter ***Difference entropy*** je mierou náhodnosti rozdielov v hodnotách intenzity susedných pixelov [2]. Naše výsledky sa nezhodujú s výsledkami Peuna et al., v ktorej sa tento parameter zvýšil u pacientov s OA [Peuna et al., 2018].

Information measures of correlation 1 *a* ***2*** hodnotí koreláciu medzi rozdeleniami pravdepodobností *i* a *j*, teda kvantifikuje zložitosti textúr [2]. Opäť výsledky týchto parametrov vyšli opačne ako v práci Peuna et al., kde parameter *Information measures of correlation 1* sa zvýšil a naopak parameter *Information measures of correlation 2* sa znížil u pacientov s OA v porovnaní s referenciami [Peuna et al., 2018].

Inverse difference normalized vyjadruje mieru lokálnej homogenity obrazu resp. normalizuje rozdiel medzi susednými hodnotami intenzity vydelením celkového počtu diskrétnych hodnôt intenzít [2].

Inverse difference moment normalized tiež vyjadruje mieru lokálnej homogenity obrazu, ale normalizuje druhú mocninu rozdielu medzi susednými hodnotami intenzity delením druhou mocninu celkového počtu diskrétnych hodnôt intenzity [2].

Obe hodnoty vyšli v našej práci v regióne pCF opačne ako v práci Peuna et al., kde sa oba parametre u pacientov s OA znížili [Peuna et al., 2018].

Difference variance vyjadruje mieru homogenity, ktorá kladie vyššiu váhu na rôzne páry úrovní intenzít, ktoré sa viac odchyľujú od priemeru [2].

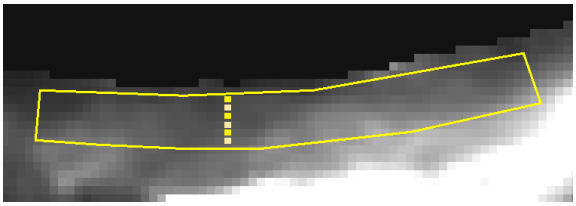
Pri porovnávaní GLCM parametrov je veľmi dôležité dbať na to, v akom smere sa pozorujú zmeny intenzite pixelov resp. zmeny v hodnotách T2 relaxačných časov. V našom prípade sme pozorovali zmeny paralelne s rozhraním chrupavka - kosť (0˚). Teda o výsledkoch nerozhodujú zmeny v intenzite spojené s prirodzenou laminárnou architektúrou kolagénových vlákien, ktorá je pozorovaná v chrupavke zdravých jedincov [Welsch et al. 2008], ale rozhodujú iba zmeny v heterogenite v rámci jednej vrstvy. Pri pozorovaní zmien perpendikulárne na rozhranie chrupavka - kosť laminárna štruktúra moduluje T2 relaxačné hodnoty. A navyše, v tomto smere má chrupavka malé rozmery (niekoľko pixelov) čo limituje analýzu [Peuna et al., 2018] (Obr. 11). Rozdielnosť dominantných smerov je zdrojom nesúladu výsledkov väčšiny štúdii. A navyše, v niektorých štúdiách pri meraní oboma smermi nezohladnili smer analýzy pri vyhodnocovaní výsledkov. V našej práci som sa snažila porovnávať výsledky analýz s rovnakým dominantným smerom.

V našej práci sme použili pixel ofset 1 (spacing), čo znamená, že zmeny v intenzite pixelov boli pozorované vzhľadom k susednému pixelu. Nastavenie tohto parametra bolo v spomínaných prácach rôzne, no podľa Peuna et al. veľmi podobné výsledky vychádzajú pri použití rôznych pixel ofsetov [Peuna et al., 2018].

	NV	P 2018	C-G 2009	C-G 2011	W 2017	B 2008
dom.s.	0˚	0˚	rôzne	0˚ a 90˚	0˚, 90˚	0˚, 90˚
p.ú.š.	16	8	?	?	?	?
ofset	1	1	1	1 až 5	1, 3, 5	1 až 3
AC	↓	↑*				
CON	↓	↓	↓	↑ v 90 ˚	↑	
CORR	↑	↓	↓			
CP	↑	b.s.r.				
CS	↑	↑				
H	↑	↓	↓	↑	↑	
D	↓	↑		↑ v 90 ˚		
ENER	↑	↓	↓	↑ v 90 ˚	↑	
ENTR	↓	↑	↑	↑		↑
MP	↑	b.s.r.				
SS	↓	↑ *	↓			
SA	↓	↑ *				
SV	↓	↑ **				
SE	↑	↑				
DV	↓					
DE	↓	↑				
IMC 1	↓	↑				
IMC2	↑	↓				
IDN	↑	↓				
IDMN	↑	↓				

Obr. 10: Porovnanie našich výsledkov (NV) a nastavenia parametrov[1]

[1](dom.s.- dominantný smer, p.ú.š.- počet úrovní šedej) s prácami Peuna et al. (P 2018), Carballido-Gamio et al. (C-G 2009),Carballido-Gamio et al. (C-G 2011), Williams et al. (W 2017), Blumenkrantz et al. (B 2008), *- štatisticky signifikantné zmeny pozorované v inom regióne, b.s.r.- bez systematického rozdiel, **- bez štatisticky signifikantných zmien (AC- Autocorrelation, CON- Contrast, CORR- Correlation, CP- Cluster prominence, CS- Cluster shade, H- Homogeneity, D- Dissimilarity, ENER- Energy, ENTR- Entropy, MP- Maximum probability, SS- Sum of squares (Variance), SA- Sum average, SV- Sum variance, SE- Sum entropy, DV- Difference variance, DE- Difference entropy, IMC 1- Information measure of correlation 1, IMC2- Information measure of correlation 2, IDN- Inverse difference normalized, IDMN- Inverse difference moment normalized)



Obr. 11: Príklad rozmeru ROIu pCF Pacienta 1 v perpendikulárnom smere na rozhranie chrupavka – kosť, (žlté pixle sú len názorné, skutočné pixle sú bez medzier)

V tejto práci sme použili 16 odtieňov (úrovní/hodnôt) šedej. Takto vybraný parameter, nebol použitý v žiadnej spomínanej štúdii, no považuje sa za optimálny [1], [Juras et al. 2020]. V tomto prípade je korektné porovnávať výsledky s rôznym nastavením tohoto parametra, keďže porovnávame iba zmeny, teda trend sa nemení pri použití rôzneho počtu úrovní šedej. Porovnávanie výsledných čísiel je korektné iba pri nastavení rovnakých parametrov. Toto je cieľom metódy GLCM. Po optimalizácii všetkých parametrov by sa mohli porovnávať číselné výsledky medzi skupinami subjektov, čo by robilo túto metódu jednoduchou a rýchlou, teda použiteľnou v klinickej praxi [Blumenkrantz et al. 2008].

Výhodou tejto práce bolo použitie 20 GLCM parametrov, pričom iba v štúdii Peuna et al. pracovali s toľkými parametrami [Peuna et al., 2018]. No v práci Peuna et al. neboli všetky parametre vysvetlené. V súčasných článkoch o GLCM aplikovaných na chrupavkách sú najviac reportované parametere ***Contrast, Homogeneity Energy* a *Entropy*.** Podľa Peuna et al. by sa pri analýze GLCM mali primárne použiť parametre *Contrast, Entropy* a *Information measure of correlation 2*, dodatočne *Correlation, dissimilarity, Energy, Homogeneity, Difference entropy, Information measure of correlation 1, Inverse difference, Inverse difference normalized* a *Inverse difference moment normalized* [Peuna et al., 2018].

Celkovo nevýhodou analýzy GLCM je, že nie je definované, ako súvisia textúrové parametre s morfologickými a molekulovými zmenami v chrupavke, prípadne so zmenami na celulárnej úrovni. Interpretácia niektorých parametrov je jednoduchšia. Napríklad pri parametre *Contrast*, *Homogeneity* a *Entropy* vieme predpokladať vplyv zmien v chrupavke na tieto parametre. No sú to len predpokladané vysvetlenia, k interpretácii parametrov v súvislosti so zmenami v chrupavkách je nevyhnutná štúdia s histopatologickým porovnaním parametrov a zmien v chrupavke. Pri štúdiách vyhodnocujúcich pacientov s OA sa ukazuje, že výsledok trendu parametra závisí aj od rozvinutosti OA, teda či subjekt má len riziko OA, alebo je už táto choroba vyvinutá či už v miernom alebo pokročilom štádiu.

Potenciálnym zdrojom chýb mohlo byť použitie rôznych MRI sekvencií. Analýza GLCM je citlivá na veľkosť ROIov, pričom platí, že analýza bude presnejšia pri ROIoch s väčším počtom pixelov [Peuna et al., 2018].

Pre podrobné skúmanie chrupaviek je nevyhnutné pozorovať zmeny vo všetkých častiach chrupavky.

Limitáciou tejto štúdie bol malý počet testovacích subjektov a preto nebolo korektné rozdeľovať pacientov do vekových skupín, aj keď vieme, že T2 relaxačné parametre závisia od veku meraného subjektu [Williams et al. 2017].

Záver

V tejto práci bola použitá textúrová analýza T2 máp pomocou GLCM. GLCM extrahuje informácie súvisiace s priestorovým rozložením intenzít pixelov pomocou analýzy súčasných výskytov pri určenom ofsete a orientácii. Konkrétne z matíc intenzity pixelov sa vypočítavajú parametre pravdepodobností s rôznym váhovým faktorom.

GLCM analýza sa javí ako potenciálne silný diagnostický nástroj pri odhaľovaní OA zmien pri správnom nastavení parametrov. Do budúcnosti je nevyhnutný výskum zameraný na koreláciu morfologických a molekulových zmien v chrupavke so zmenami textúrových parametrov.

Poďakovanie

Za podporu a odborné vedenie ďakujem môjmu školiteľovi Ing. Pavlovi Szomolányimu, PhD. Za ochotu pri konzultácii by som rada poďakovala Mgr. Vladimírovi Jurášovi PhD..

Literatúra

[Anetzberger et al, 2014] Anetzberger H. et al. (2014). Meniscectomy: indications, procedure, outcomes, and rehabilitation. *Orthopedic Research and Reviews* roč. 3, č. 1, s.1-9.

[Blumenkrantz et al. 2008] Blumenkrantz G. et al. (2008). The feasibility of characterizing the spatial distribution of cartilage T2 using texture analysis. *Osteoarthritis and Cartilage*, 16, 584e590.

[Davnall et al. 2012] Davnall F. et al. (2012). Assessment of tumor heterogeneity: an emerging imaging tool for clinical practice? *Insights Imaging*; 3(6):573-89.

[Doral et al. 2018] Doral M.N. et al. (2018). Modern treatment of meniscal tears, EFORT *Open Rev Instructional Lecture: Sports & Arthroscopy:* volume 3.

[Carballido-Gamio et al. 2009] Carballido-Gamio J. et al. (2009). Spatial analysis of magnetic resonance T[sub 1ρ] and T[sub 2] relaxation times improves classification between subjects

with and without osteoarthritis. *Med Phys*.; 36:4059.

[Carballido-Gamio et al. 2011] Carballido-Gamio J. et al. (2011). Longitudinal analysis of MRI T2 knee cartilage laminar organization in a subset of patients from the osteoarthritis initiative: a texture approach. *Magn Reson Med*.; 65:1184–1194.

[Goldring, 2016] Goldring S.R. (2016). Changes in the osteochondral unit during osteoarthritis: structure, function and cartilage–bone crosstalk, *Nat Rev Rheumatol*. Nov; 12(11):632-644.

[Heule et al. 2014] Heule r. et al. (2014). Triple Echo Steady-State (TESS) Relaxometry. *Magnetic Resonance in Medicine* 71:230–237.

[Jeong, 2012] Jeong H. et al.(2012). Meniscectomy. *Knee Surg Relat Res*; 24(3):129-136.

[Joseph et al. 2011] Joseph G.B. et al. (2011). Texture analysis of cartilage T2 maps: individuals with risk factors for OA have higher and more heterogeneous knee cartilage MR T2 compared to normal controls - data from the osteoarthritis initiative. *Arthritis Research & Therapy*, 13:R153

[Juras et al. 2016] Juras V. et al. (2016). A comparison ofmulti-echo spin-echo and triple-echo steady-state T2 mapping for in vivo evaluation of articular cartilage. *Eur Radiol* 26:1905–1912.

[Juras et al. 2020] Juras V. et al. (2020). Reproducibility of an Automated Quantitative MRI Assessment of Low-Grade Knee Articular Cartilage Lesions, *Cartilage*1-12

[McKeon et al. 2009] McKeon B.P. et al (2019). Knee arthroscopy, New York: Springer-Verlag, Online ISBN 978-0-387-89504-8.

[Mryka 2017] Mryka HB. (2017). GLCM Texture: A Tutorial v. 3.0 March 2017, University of Calgary

[Peuna et al., 2018] Peuna A. et al. (2018). Variable Angle Gray Level Co-occurrence Matrix Analysis of T2 Relaxation Time Maps Reveals Degenerative Changes of Cartilage in Knee Osteoarthritis: Oulu Knee Osteoarthritis Study, *J Magn Reson Imaging*.;47(5):1316-13272018.

[Rizzo et al. 2018] Rizzo et.al (2018). Radiomics: the facts and the challenges of image analysis, *European Radiology Experimental* 2:36.

[Santos et al. 2015] Santos T.A. et al. (2015). MRI Texture Analysis Reveals Bulbar Abnormalities in Friedreich Ataxia, *American Journal of Neuroradiology* 36 (12) 2214-2218;

[Uppuluri, 2008] Uppuluri A. (2008). GLCM texture features. MATLAB Central File Exchange. Available from: https://www.mathworks.com/ matlabcentral/fileexchange/22187-glcm-texture-features.

[Wang et al. 2014] Wang Y. et al (2014). Comparison of stress on knee cartilage during kneeling and standing using finite element models, *Medical Engineering & Physics* 36(4)

[Welsch et al. 2008] Welsch G.H. et al. (2008). In vivo biochemical 7.0 Tesla magnetic resonance: Preliminary results of dGEMRIC, zonal T2, and T2* mapping of articular cartilage, *Invest. Radiol.* 43, 619–626

[Williams et al. 2017] Williams A. et al. (2017). Early Articular Cartilage MRI T2 Changes After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Correlate With Later Changes in T2 and Cartilage Thickness, *J Orthop Res*.; 35(3): 699–706.

[1] Juras V. GLCM with T2 Mapping – What is it and How to do it, Medical University of Vienna, prednáška

[2] Radiomics Features, Gray Level Co-occurrence Matrix (GLCM) Features [https://pyradiomics.readthedocs.io/en/latest/features.html#module-radiomics.glcm]

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 191–194
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Martina Velísková, Iveta Waczulíková

Ukazovatele spojené so zvýšeným rizikom úmrtia u hypertenzných pacientov s COVID-19

Martina Velísková[1]*
Iveta Waczulíková[1‡§]
[1] Katedra jadrovej fyziky a biofyziky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstrakt

Koronavírus SARS-CoV-2, ktorý spôsobuje ochorenie COVID-19, vyvoláva u pacientov predovšetkým respiračné problémy. Spolu s prítomnosťou rizikových faktorov ako vek, obezita či artériová hypertenzia v mnohých prípadoch vedie až k smrti pacienta. V spolupráci s interným oddelením Fakultnej nemocnice s poliklinikou v Žiline sme analyzovali dáta pacientov s artériovou hypertenziou, ktorí boli v období od októbra 2020 do januára 2021 hospitalizovaní s ochorením COVID-19. Na základe logistickej regresie, analýzy korelácie a prehľadu literatúry sme vybrali markery, ktoré súvisia so zvýšeným rizikom úmrtia. Cieľom je nájsť markery, ktoré by poslúžili pri nasadení správnej a najmä včasnej liečby pacientom s ochorením COVID-19.
Kľúčové slová: Koronavírus, SARS-CoV-2, artériová hypertenzia, markery, úmrtie

1 Úvod

Koronavírus SARS-CoV-2 patrí do rodiny koronavírusov, ktoré spôsobujú napríklad *Middle-East Respiratory Syndrome* (MERS) a *Severe Acute Respiratory Syndrome* (SARS). SARS-CoV-2 bol prvýkrát identifikovaný vo Wuhane (Čína) [Lavillengrad, 2021]. V marci 2020 vyhlásila WHO pandémiu. Väčšina pacientov postihnutá týmto vírusom trpí ochorením COVID-19 (*coronavirus disease 2019*), ktoré sa manifestuje horúčkou, suchým kašľom a únavou. Medzi menej časté príznaky patrí bolesť hrdla, bolesti hlavy, hnačka, zápal spojiviek, strata čuchu a chuti. Najzávažnejšie príznaky zahŕňajú ťažkosti pri dýchaní, dusenie sa a tlak na hrudi [WHO, 2021]. Závažnejšie príznaky sa vyskytujú najmä u pacientov s rizikovými faktormi, medzi ktoré patria napríklad pľúcne ochorenia, srdcové ochorenia, diabetes a choroby spojené s imunitným systémom. U približne 5-10 % pacientov sa vyvinie syndróm akútnej respiračnej tiesne (ARDS, *acute respiratory distress syndrome*) [Huang, 2020]. Výskumy naznačujú, že SARS-CoV-2 silne moduluje imunitnú odpoveď, čo vedie k lymfopénii (zmenšenie počtu lymfocytov) a uvoľneniu zápalových cytokínov, ktoré môžu vážne ohroziť život pacienta [Huang et al., 2020; Chen et al., 2020].

2 Materiál a metódy

V našej práci sme spracovávali a analyzovali dáta, ktoré boli zozbierané a namerané tímom MUDr. Márie Gadušovej, PhD., MUDr. Moniky Kulinovej, MUDr. Laurenca Vojteka a primárky MUDr. Alžbety Gondžúrovej vo Fakultnej nemocnici s poliklinikou v Žiline na Internom oddelení, a to v období od októbra 2020 do januára 2021. Z celkového počtu 435 pacientov (muži aj ženy) prijatých s ochorením COVID-19 vo veku od 22 do 96 rokov malo 316 pacientov artériovú hypertenziu, pričom boli priemerne hospitalizovaní 6,6 dňa. Hospitalizovaným pacientom boli odobraté vzorky krvi a boli zaznamenané hodnoty FER (ferritínu), IL-6 (interleukín 6), CRP (C-reaktívny proteín) a LEU (leukocyty). Namerané hodnoty boli v rámci skupín zomrelých a preživších pacientov porovnávané s cieľom zistiť, či je medzi týmito skupinami štatisticky signifikantný rozdiel hodnôt. Na súbor sme aplikovali metódy popisnej štatistiky, logistickej regresie a analýzy korelácie.

3 Výsledky

Súbor, ktorý sme získali z Fakultnej nemocnice s poliklinikou v Žiline obsahoval 435 pacientov vo veku od 22 do 96 rokov s diagnostikovaným ochorením COVID-19, ktorí boli hospitalizovaní v období od októbra 2020 do januára 2021. Pacientov do 65 rokov bolo 175 (40,2%), nad 65 rokov ich bolo 260 (59,7%). Z celkového počtu pacientov bolo 243 (55,8%) mužov a 192 žien (44,1%). 132 pacientov (30,3%) v rámci uvedeného obdobia zomrelo. Pacienti, ktorí prežili, boli hospitalizovaní priemerne 6,5 dňa a pacienti,

* veliskova2@uniba.sk
‡ iveta.waczulikova@fmph.uniba.sk
§ Školiteľ

Tabuľka 1 Charakteristiky pacientov s Covid-19

Charakteristika	Celkovo	*Úmrtie*	*Prežitie*
Celkový počet	435 (100%)	132 (30,3%)	303 (69,6%)
Mužské pohlavie	243 (55,8%)	80 (32,9%)	163 (67,1%)
Ženské pohlavie	192 (44,1 %)	52 (27,1%)	140 (72,9%)
Vek (roky) ≤ 65	175 (40,2%)	31 (17,7%)	144 (82,3%)
> 65	260 (59,7%)	101 (38,8%)	159 (61,2%)
Počet hypertonikov	316 (100%)	116 (36,7%)	200 (63,3%)
Mužské pohlavie	175 (55,4%)	68 (38,9%)	107 (61,1%)
Ženské pohlavie	141 (44,6 %)	48 (34%)	93 (66%)
Pacienti s AH bez komorbidít	78 (24,7%)	14 (17,9%)	64 (82,1%)
Pacienti s AH a komorbiditami DM a CO	109 (34,4%)	55 (50,5%)	54 (49,5%)

ktorí umreli boli hospitalizovaní priemerne 7,25 dňa. Z uvedeného súboru sme vybrali pacientov s arteriálnou hypertenziou, ktorých bolo 316, z toho 175 mužov (55,4%) a 141 žien (44,6%). Medzi pacientami s AH sa nachádzalo 78 pacientov (24,7%) bez ďalších komorbidít, ale aj 109 pacientov (34,4%) s komorbiditami ako diabetes mellitus (DM) a rôzne cievne ochorenia (CO). Pacientom boli merané hladiny ferritínu (FER), interleukínu 6 (IL-6), CRP (C-reaktívny proteín) a leukocytov (LEU). Tieto hodnoty sme použili pri vytváraní modelu logistickej regresie a identifikovaní ukazovateľov zvýšeného rizika úmrtia hypertenzných pacientov na COVID-19. Niektoré dáta však chýbajú.

Ferritín bol zaznačený u 181 pacientov, z toho 72 zomrelo. Medián hodnoty hladiny ferritínu u preživších bol 550 (10-2000), u zomrelých pacientov 825 (2-2000).

Tabuľka 2 Hodnoty FER u preživších a zomrelých pacientov

FER	Prežitie	Úmrtie
Medián	550	825
Q1	311	459,1
Q3	986	2000
Minimum	10	2
Maximum	2000	20000

FER –ferritin, Q1 – kvartil 1, Q3 – kvartil 3

IL-6 bol uvedený pri 243 pacientoch, z toho 90 zomrelo. Medián hodnoty hladiny IL-6 u preživších bol 36,4 (1,8-11000), u zomrelých 116,5 (2-50000).

Tabuľka 3 Hodnoty IL-6 u preživších a zomrelých pacientov

IL-6	Prežitie	Úmrtie
Medián	36,4	116,5
Q1	18,7	67,38
Q3	75	300
Minimum	1,8	2
Maximum	11000	50000

IL-6 – interleukín 6, Q1 – kvartil 1, Q3 – kvartil 3

CRP malo zaznačených 306 pacientov, z toho 110 zomrelo. Medián hodnoty hladiny CRP u preživších bol 96,5 (2,5-390), u zomrelých 175,25 (8,5-478).

Tabuľka 4 Hodnoty CRP u preživších a zomrelých pacientov

CRP	Prežitie	Úmrtie
Medián	96,5	175,25
Q1	52,5	129
Q3	156	251
Minimum	2,5	8,5
Maximum	390	478

CRP – C-reaktívny proteín, Q1 – kvartil 1, Q3 – kvartil 3

LEU malo uvedených 308 pacientov, z toho 114 zomrelo. Medián hodnoty hladiny LEU u preživších bol 9,8 (3,01-72), u zomrelých 16,05 (1,17-95).

Tabuľka 5 Hodnoty LEU u preživších a zomrelých pacientov

LEU	Prežitie	Úmrtie
Medián	9,8	16,05
Q1	7	10
Q3	13	23,7
Minimum	3,01	1,17
Maximum	72	95

LEU – leukocyty, Q1 – kvartil 1, Q3 – kvartil 3

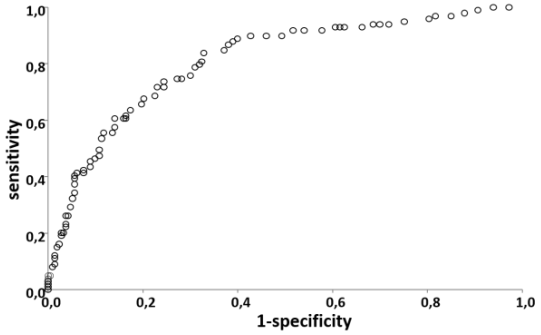
Tabuľka 6 Multivariačný logistický model predikcie úmrtia na základe potenciálnych prediktorov veku, IL-6, CRP a LEU (vhodne logaritmicky transformované)

Prediktor	Koeficient	OR	95% CI	Z hodnota	p hodnota
Vek	0,05	1,05	1,02 – 1,08	4,04	<0,0001
Log IL-6	0,79	2,19	1,35 – 3,59	3,16	0,0016
Log CRP	2,25	9,52	3,05 – 29,75	3,88	0,0001
Log LEU	0,56	1,74	0,89 – 3,39	1,63	0,1038

Logit model: Odchýlka (pravdepodobnostný pomer) chi-kvadrát = 86,05; P-hodnota < 0.0001. Diagnostická výkonnosť pri *cut-off* bode max(sens+spec) = 0,4: Pozorovaná prevalencia = 31,73%; Pozitívna prediktívna hodnota = 60,75%; Negatívna prediktívna hodnota = 83,41%; Percento modelom správne klasifikovaných pacientov = 75,64%; AUC (plocha pod ROC krivkou) = 81,13%.

IL-6 – interleukin 6, CRP – C-reaktívny protein, LEU – leukocyty, OR – *odds ratio* (pomer šancí)

Na analýzu logistickej regresie sme využili ako nezávislé premenné vek, IL-6, CRP a LEU a za závislú premennú sme pokladali úmrtie. Pre všetky markery sme zvolili logaritmickú transformáciu pri základe 10, keďže pôvodné dáta boli silne zošikmené (Tabuľka 6). Pri zvolenom *cut-off point* 0,4 bola senzitivita klasifikačného modelu 65,66% (95%CI 55,44% - 74,91%) a špecificita 80,28% (95%CI 74,3% - 85,4%). Pozitívna prediktívna hodnota bola 60,75% (95%CI 50,84% - 70,05), negatívna prediktívna hodnota 83,41% (95%CI 77,6% - 88,23%). Model správne klasifikoval 75,64% pacientov. Pozorovaná prevalencia úmrtí bola 31,73% (95%CI 26,6% - 37,21%). Plocha pod ROC krivkou bola 81,13%.



Graf 1 Klasifikačný model zostavený z potenciálnych prediktorov vek, IL-6, CRP a LEU. IL-6 – interleukin 6, CRP – C-reaktívny protein, LEU – leukocyty

4 Diskusia

V tejto práci sme analyzovali hladiny krvných ukazovateľov u pacientov s artériovou hypertenziou, ktorý majú až 2,3× väčšiu šancu ťažkého priebehu ochorenia COVID-19 [WHO, 2020]. FER ako prediktor sme vylúčili, keďže pri analýze logistickej regresie nebol štatisticky signifikantný. Z prediktorov vek, IL-6, CRP a LEU sa ako štatisticky významné pre predikciu možného úmrtia pacienta javili vek, IL-6 a CRP. Vek spolu s kardiovaskulárnym ochorením patria medzi rizikové faktory [Hobbs et al., 2021]. Hodnoty IL-6 a CRP boli signifikantne vyššie u pacientov, ktorí neprežili, a v mnohých štúdiách potvrdili rovnaký výsledok [Wang et al,., 2020; Guan et al., 2020; Chen G. et al. 2020]. Navyše hladiny plazmatického IL-6 sú silne asociované s ťažkým priebehom ochorenia [Lavillegrand, 2021]. Hodnoty plazmatického CRP produkovaného pečeňou sú odpoveďou na IL-6. Hodnoty CRP však zrejme nemôžu poslúžiť ako náhradný prediktor pre hodnoty IL-6 [Lavillegrand et al., 2021], nakoľko nemajú rovnakú rýchlosť produkcie. IL-6 je rýchlo uvoľňovaný zo zápalových buniek, naopak CRP je produkovaný pečeňovými bunkami, čo je časovo náročnejšie [Sproston et al., 2018].

Test korelácie podľa Spearmana vyšiel signifikantný ($p < 0,05$), čo poukazuje na súvis medzi IL-6 a CRP. Avšak, Sproston et al. (2018) uvádza, že korelácia medzi týmito dvomi markermi nevyšla signifikantná. Podobne pri analýze korelácie podľa Pearsona nám korelácia nevyšla štatisticky signifikantná, čo by naznačovalo nelineárny vzťah medzi týmito dvoma markermi.

Zvýšené hodnoty uvedených biomarkerov môžu byť buď biologickými markermi ochorenia, alebo súvisia s takzvanou cytokínovou búrkou [Ayanian et al., 2020]. Pri cytokínovej búrke dochádza k dysfunkcii T buniek a k lymfopénii (zmenšenie počtu lymfocytov), čo vedie k rozvinutiu ťažšej formy ochorenia [Tay et al., 2020], hyperinflamácii a multiorgánovému zlyhaniu [Ayanian et al., 2020]. Cytokínová búrka okrem uvoľnenia zápalových mediátorov vedie k aktivácii endotelu, kolapsu cirkulácie a zrážaniu [Pearce et al., 2020]. Pojem cytokínová búrka je však zatiaľ iba hypotetický a neexistuje jeho presná definícia, nakoľko nie sú ešte dostatočne preskúmané potrebné mechanizmy. V každom prípade by IL-6 spolu s CRP s ohľadom

na vek pacienta a prípadne hladinu LEU mohli poslúžiť ako klinické prediktory priebehu ochorenia COVID-19 s následným vhodným a individuálnym poskytnutím liečby [Herold et al., 2020]. Zápalové markery teda môžu pomôcť pri personalizovaní liečby a pre prognózu pacienta je dôležité ich sledovať odo dňa hospitalizácie pacienta.

Poďakovanie

Analýza dát bola umožnená aj vďaka podpore projektu KEGA 041UK-4/2020 s názvom Odborná príprava klinického a biomedicínskeho fyzika - implementácia nových technológií biomedicíny a metód aktívneho učenia.

Literatúra

[Ayanian et al., 2020] Ayanian, S, Reyes J, Lynn L, Teufel K. *The association between biomarkers and clinical utcomes in novel coronavirus pneumonia in a US cohort*. Biomark. Med. (2020) 14(12), 1091-1097

[Chen et al., 2020] Chen G, Wu D, Guo W, Cao Y, Huang D, Wang H, Wang T, et al. *Clinical and immunological features of severe and moderate coronavirus disease 2019*. J Clin Invest. 2020; 5:2620–9.

[Guan et al., 2020] Guan WJ, Ni ZY, Hu Y, Liang WH, Ou CQ, He JX, et al. Clinical characteristics of coronavirus disease 2019 in China. *N Engl J Med.* (2020) 382:1708–20. 10.1056/NEJMoa2002032

[Herold et al., 2020] Tobias Herold, MD, Vindi Jurinovic, PhD,a,d,f* Chiara Arnreich,a,d Brian J. Lipworth, MD,g Johannes C. Hellmuth, MD,a,h Michael von Bergwelt-Baildon, MD, PhD,a,c,e,h,i Matthias Klein, MD,b,j and Tobias Weinberger, MDb,k,l *Elevated levels of IL-6 and CRP predict the need for mechanical ventilation in COVID-19.* Allergy Clin Immunol 2020; 146:128-36.

[Hobbs et al., 2021] Hobbs ALV, Turner N, Omer I, Walker MK, Beaulieu RM, Sheikh M, Spires SS, Fiske CT, Dare R, Goorha S, Thapa P, Gnann J, Wright J, Nelson GE. *Risk Factors for Mortality and Progression to Severe COVID-19 Disease in the Southeast United States (US): A Report from the SEUS Study Group*. Infect Control Hosp Epidemiol. 2021 Jan 11:1-33. doi: 10.1017/ice.2020.1435. Epub ahead of print. PMID: 33427149.

[Huang et al., 2020] Huang C, Wang Y, Li X, Ren L, Zhao J, Hu Y, Zhang L, et al. *Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan China*. Lancet. 2020; 10223:497–506.

[Lavillegrand et al., 2021] Lavillegrand, Jean-Rémi et al., 2021. *Elevated plasma IL-6 and CRP levels are associated with adverse clinical outcomes and death in critically ill SARS-CoV-2 patients: inflammatory response of SARS-CoV-2 patients.* Annals of Intensice Care, 11:9. doi: 10.1186/s13613-020-00798-x

[Sproston et al., 2018] Sproston NR, Ashworth JJ. *Role of C-reactive protein at sites of inflammation and infection.* Front Immunol. 2018;9: 754.

[Tay et al., 2020] M. Z. Tay, C. M. Poh, L. Rénia, P. A. MacAry, and L. F. P. Ng, *The trinity of COVID-19: immunity, inflammation and intervention*. Nature Reviews Immunology, vol. 20, no. 6, pp. 363–374, 2020.

[Wang et al., 2020] Wang D, Hu B, Hu C, Zhu F, Liu X, Zhang J, et al. *Clinical characteristics of 138 hospitalized patients with 2019 novel coronavirus-infected pneumonia in Wuhan, China. JAMA.* (2020) 323:1061–9. 10.1001/jama.2020.1585

[WHO, 2020] WHO, 2020. *COVID-19 and NCD risk factors*. [cit. 2021-04-04]. Dostupné na: https://www.who.int/docs/default-source/ncds/un-interagency-task-force-on-ncds/uniatf-policy-brief-ncds-and-covid-030920-poster.pdf?ua=1

[WHO, 2021] WHO, 2021. World health organization *Coronavirus*. [cit. 2021-03-29]. Dostupné na: https://www.who.int/health-topics/coronavirus#tab=tab_3

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 195–201
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Juraj Jacko, Libuša Šikurová

Vplyv delécie génu *ERG6* na vybrané membránové vlastnosti kvasiniek *Candida glabrata*

Juraj Jacko[1]* Libuša Šikurová[1‡§]
[1] Katedra jadrovej fyziky a biofyziky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstrakt

Rastúca miera rezistencie kvasiniek voči antimykotikám prestavuje závažný medicínsky problém pri liečbe oportunistických kvasinkových infekcií. Na liečbu kvasinkových infekcií sa najčastejšie používajú azolové antimykotiká. Cieľovým miestom ich účinku je biosyntetická kaskáda ergosterolu. Gén *ERG6* v kvasinkách kóduje enzým Δ(24)-sterol-C-metyltransferázu, ktorý katalyzuje premenu zymosterolu na fekosterol v kaskáde syntézy ergosterolu. Zmena sterolovej kompozície plazmatickej membrány, kódovaná génom *ERG6*, môže ovplyvniť funkciu membránovej bariéry kvasiniek a meniť citlivosť kvasiniek na azolové antimykotiká.

Cieľom našej práce bolo sledovať vplyv delécie génu *ERG6* na usporiadanosť lipidových dvojvrstiev cytoplazmatickej membrány (membránová fluidita) a transmembránový potenciál medzi dvomi skupinami kvasinky *Candida glabrata* (wild-type a mutant Δ*erg6*). Membránovú fluiditu sme sledovali pomocou anizotropie fluorescencie sond DPH (1,6-difenyl-1,3,5-hexatrién) a TMA-DPH (4-trimetyl-amino-1,6-difenyl-1,3,5-hexatrién). Fluorescenčná sonda DPH zaznamenáva hydrofóbnu časť cytoplazmatickej membrány a sonda TMA-DPH zaznamenáva hydrofilnú časť cytoplazmatickej membrány. Pomocou sledovania posunu emisného maxima fluorescenčnej sondy DiS-C_3(3) (3-propyl-2-(3-(3-propyl-2(3H)benzotiazoly- lidén)-1-propenyl)benzotiazolium jodid sme ohodnotili zmeny v transmembránovom potenciáli.

Výsledky ukazujú, že delécia génu *ERG6* zvyšuje usporiadanosť lipidových dvojvrstiev cytoplazmatickej membrány a spôsobuje hyperpolarizáciu cytoplazmatickej membrány mutantných buniek oproti štandardným bunkám kvasiniek *Candida glabrata*.

Kľúčové slová: kvasinky, *Candida glabrata*, *ERG6*, DPH, TMA-DPH, DiS-C_3(3), fluorescenčná spektroskopia, usporiadanosť lipidových dvojvrstiev, membránová fluidita, transmembránový potenciál

1 Úvod

Kvasinky môžu u človeka vyvolať závažné patogénne ochorenia. Ochorenia spôsobené kvasinkami sa liečia pomocou antimykotík. Najpoužívanejšou skupinou sú azolové antimykotiká. V súčasnosti predstavuje závažný problém rastúca miera rezistencie kvasiniek. Táto skutočnosť je význačná hlavne pri rode *Candida*. Kvasinky rodu *Candida* sú celosvetovo najčastejšou príčinou ľudských kvasinkových oportunistických infekcií, pričom spôsobujú až 96% zo všetkých kvasinkových infekcií.

1.1 Cytoplazmatická membrána kvasiniek a rezistencia

Kvasinky sa v ľudskom tele vyskytujú prirodzene v ústnej dutine, hltane, črevách, vagíne, na koži *(Kourkoumpetis et al., 2011)* a v horných dýchacích cestách *(Rahendra, 2017)*.

Kvasinka *Candida glabrata* je ľudský oportunistický patogén. Infekcie kvasinkami *Candida glabrata* sa bežne vyskytujú u starších jedincov, diabetických pacientov, ľudí so zníženou imunitou, ľudí po operáciách a príjemcov transplantovaných solídnych orgánov. Cytoplazmatická membrána je aktívnou bariérou medzi organizmom a jeho vonkajším prostredím. Zmeny vonkajších fyzikálnych a (alebo) chemických podmienok môžu viesť k štrukturálnym zmenám plazmatickej membrány, ktoré ovplyvňujú jej fyzikálne vlastnosti a funkčnosť *(Toth Hervay et al., 2015)*.

* juraj.jacko@fmph.uniba.sk
‡ libusa.sikurova@fmph.uniba.sk
§ Školiteľ

Steroly sú základnými štruktúrnymi zložkami eukaryotických bunkových membrán. Zvyšujú rigiditu acylových reťazcov v dvojvrstve (znižujú fluiditu), čím zvyšujú nepriepustnosť plazmatickej membrány voči antimykotikám *(Zhang & Rao, 2010)*. V hubách je hlavným sterolom ergosterol, ktorý je konečným produktom biosyntetickej dráhy kvasinkových sterolov a ekvivalentom cholesterolu cicavcov. Mnoho experimentov na druhoch kvasiniek *Saccharomyces cerevisiae* a *Candida* preukázalo úlohu ergosterolu v permeabilite membrán, rezistencii voči liekom, transportu proteínov do plazmatickej membrány, sporulácii a endocytóze *(Parks et al., 1999; Heese-Peck et al., 2002; Munn et al., 1999; Sanglard et al., 2003; Mukhopadhyay et al., 2002)*

Súčasný celosvetový vzostup výskytu kandidóz je spôsobený zvýšeným výskytom kvasiniek rezistentným voči liečivám *(Rahendra, 2017)*. Infekcie kvasinkami *Candida glabrata* sa ťažko liečia, pretože je prirodzene rezistentná na mnohé azolové antimykotiká. Azolové antimykotiká zabraňujú syntéze ergosterolu inhibíciou enzýmu lanosterol-14α-demetyláza. Dochádza ku akumulácii 14α-metylovaných sterolov a narušaniu štruktúry cytoplazmatickej membrány kvôli nedostatku ergosterolu a až ku zastaveniu rastu kvasiniek. K rezistencii kvasiniek prispieva znížená priepustnosť cytoplazmatickej membrány voči azolom podmienená zmenami v sterolovej kompozícii membrány *(Loffler et al., 2000)*. Rezistentné bunky kvasiniek majú nižšiu membránovú fluiditu oproti bunkám senzitívnym *(Toth Hervay et al., 2015)*.

Gén *ERG6* sa nachádza na 13 chromozóme a kóduje enzým sterol-24-C-metyltransferáza, katalyzuje premenu zymosterol na fekosterol v kaskáde biosyntézy ergosterolu. Delécia génov zodpovedných za počiatočné kroky v biosyntetickej dráhe ergosterolu, kým sa nevytvorí prvá molekula sterolu (lanosterol), je smrteľná, čo dokazuje, že steroly majú zásadnú úlohu v bunkách húb *(Klug & Daum, 2014)*. Inaktivácia génov kódujúcich enzýmy pre neskoré štádiá biosyntézy ergosterolu nebráni rastu mutantov akumulujúcich steroly, ktoré sa líšia od ergosterolu *(Lees et al., 1995)*.

Mutácia v géne *ERG6* spôsobuje u *Candida parapsilosis* zníženie obsahu ergosterolu v cytoplazmatickej membráne a akumuláciu sterolových medziproduktov syntézy ergosterolu *(Lotfali et al., 2017)*. V štúdii *(Konečná et al., 2016)* je ukázané, že u štandardných kvasiniek *Kluyveromyces lactis* je obsah medziproduktov syntézy ergosterolu v cytoplazmatickej membráne prakticky nedetekovateľný a detegovať sa dá iba ergosterol. U kmeňa s deletovaným génom *ERG6* sú detekovateľné iba medziprodukty syntézy ergosterolu, samotný ergosterol nie. V štúdii *(Vandeputte et al., 2008)* bolo objavené, že delécia génu *ERG6* u kvasiniek *Candida glabrata* spôsobuje zníženie obsahu ergosterolu v bunkách a zvýšenie obsahu medziproduktov jeho syntézy, ktoré boli identifikované ako nesterolové Δ-5,7-dienoly.

1.2 Ciele práce

Cieľom predkladanej práce je zistiť, či zmeny v sterolovej kompozícii cytoplazmatickej membrány v dôsledku delécie génu *ERG6* majú vplyv na usporiadanosť lipidových dvojvrstiev (membránovú fluiditu) a transmembránový potenciál kvasiniek *Candida glabrata.*

2 Materiál a metódy

Vzorky kvasiniek boli pripravené na Katedre mikrobiológie a virológie Prírodovedeckej fakulty UK. V práci boli použité dva kmene kvasiniek *Candida glabrata*: štandardný kmeň (wt) a mutant s vyradenou alelou génu *ERG6* (Δ*erg6*). Pred prípravou vzorky boli všetky kvasinky vyrastené do exponenciálnej fázy a premyté tlmivým roztokom Tris-Cl (pH 7, Mr = 157,6 g/mol, c = 10 mmol/l).

Na merania anizotropie fluorescencie sme použili fluorescenčné sondy DPH (1,6-difenyl-1,3,5-hexatrién, Mr = 232,33 g/mol) a TMA-DPH (4-trimetyl-amino-1,6-difenyl-1,3,5-hexatrién, Mr = 461,62 g/mol) od spoločnosti Sigma-Aldrich, USA. Zásobné roztoky sond DPH (c = 5.10^{-4} mol/l) a TMA-DPH (c = $2,5.10^{-4}$ mol/l) boli vytvorené ich rozpustením v acetóne (Penta, Slovensko).

Na potenciometrické merania sme použili sondu DiS-C_3(3) (3-propyl-2-(3-(3-propyl-2(3H)benzotiazolylidén)-1-propenyl)benzotiazolium jodid, Mr = 520,49 g/mol) od spoločnosti Sigma-Aldrich, USA. Zásobný roztok sondy DiS-C_3(3) (c = 5.10^{-4} mol/l) bol vytvorený jej rozpustením v etanole (Centralchem, Slovensko). Zásobné roztoky sond boli uschovávané v tme pri teplote 4°C. Farbiace roztoky sond sme pripravili pred

meraním zo zásobných roztokov nariedením v Tris-Cl v pomere 1:250 a následne boli 40 minút trepané.

Emisné spektrá vzoriek sme merali pomocou fluorescenčného spektrofotometra LS55 (PerkinElmer, USA) v L formáte, ktorý bol prepojený so softvérom BLdevelopment. Meracia komora fluorescenčného spektrofotometra bola počas meraní teplotne stabilizovaná na 22°C pomocou teplotných stabilizátorov Peltier temperature programmer PTP1 a Water Peltier System PCB 1500 (PerkinElmer, USA).

Anizotropia fluorescencie je definovaná vzťahom:

$$r = \frac{I_{VV} - GI_{VH}}{I_{VV} + 2GI_{VH}}$$

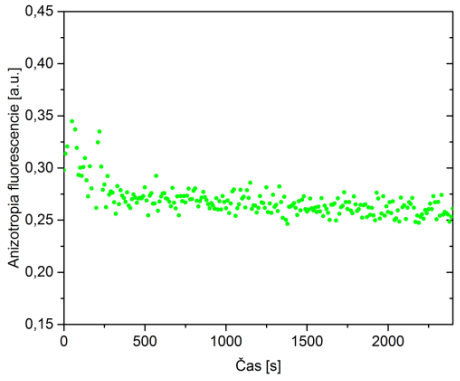
kde *I* je intenzita fluorescencie. Prvý index označuje orientáciu excitačného polarizátora, druhý emisného. Písmená *H* a *V* znamenajú horizontálna, resp. vertikálna orientácia. *G* predstavuje korekčný faktor. Je to pomer citlivostí detekčného systému pre vertikálne a horizontálne polarizované svetlo *(Lakowicz, 2006)*. Merali sme časový vývoj stacionárnej fázy anizotropie fluorescencie sond DPH a TMA-DPH pri ich inkorporácií do cytoplazmatickej membrány kvasiniek *Candida glabrata.* Použitá excitačná vlnová dĺžka bola 360 nm a emisná vlnová dĺžka bola 430 nm. Meranie so sondou DPH trvalo 40 minút, so sondou TMA-DPH 12 minút.

Pri meraniach transmembránového potenciálu sme sledovali časový vývin zmeny polohy emisného maxima ($\Delta\lambda_{max}$) sondy DiS-C_3(3). Vývoj polohy emisného maxima $\Delta\lambda_{max}$ je rozdiel v polohe emisného maxima na začiatku merania a na jeho konci. Excitačná vlnová dĺžka bola 508 nm, emisné spektrum malo rozsah 530 - 790 nm. Meranie trvalo 40 minút. Hodnotu zmeny polohy emisného maxima sondy DiS-C_3(3) sme určili ako rozdiel hodnôt vlnových dĺžok emisných maxím na začiatku merania a v ustálenom stave.

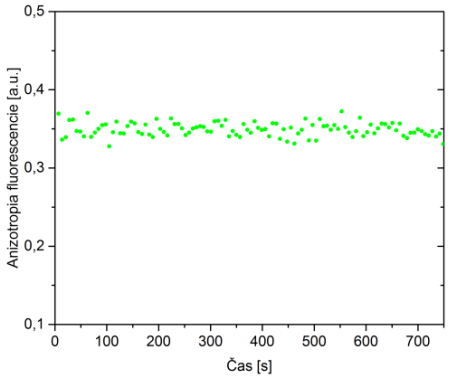
Graficky boli dáta spracované v programe OriginPro 2016 (Electronic Arts, USA), štatisticky v programe Statsdirect (StatsDirect, UK). Hodnotu anizotropie fluorescencie sondy DPH v ustálenom stave sme vypočítali pre každé meranie ako priemernú hodnotu zo získaných hodnôt z 1400. až 2400. sekundy. Hodnotu anizotropie fluorescencie sondy TMA-DPH v ustálenom stave sme vypočítali pre každé meranie ako priemernú hodnotu zo získaných hodnôt z 350. až 749. sekundy. Normalitu rozdelenia dát jednotlivých skupín sme overovali pomocou Shapiro-Wilkovho testu. Rozdiely medzi skupinami sme testovali pomocou nepárového t-testu. Zmeny polohy emisného maxima sondy DiS-C_3(3) v jednotlivých skupinách sme určili z 10 nezávislých meraní.

3 Výsledky

Vlastnosti cytoplazmatických membrán kvasiniek sme sledovali na štandardnom kmeni (wt) a na delečnom mutantovi (Δ*erg6*). Sledovali sme zabudovávanie sondy DPH do hydrofóbnej oblasti cytoplazmatickej membrány kvasiniek *Candida glabrata* (graf 1) a zabudovávanie sondy TMA-DPH do hydrofilnej oblasti cytoplazmatickej membrány kvasiniek *Candida glabrata* (graf 2).



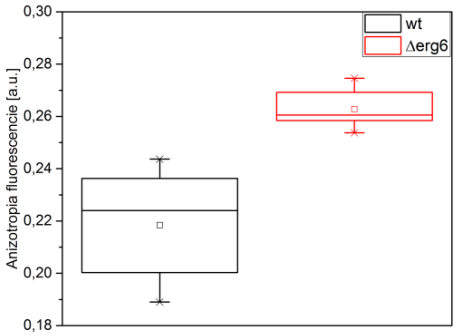
Graf 1: Zabudovávanie sondy DPH do hydrofóbnej oblasti cytoplazmatickej membrány kvasiniek *Candida glabrata*. Koncentrácia sondy vo vzorke bola $1{,}5.10^{-7}$ mol/l.



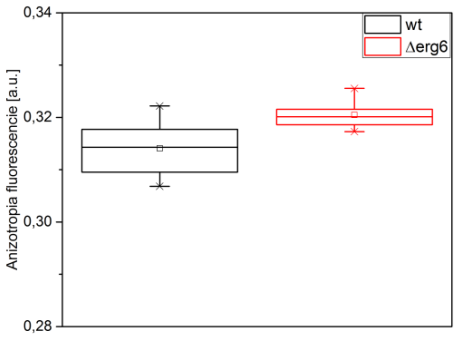
Graf 2: Zabudovávanie sondy TMA-DPH do hydrofilnej oblasti cytoplazmatickej membrány

kvasiniek *Candida glabrata*. Koncentrácia sondy vo vzorke bola 7,5.10^{-8} mol/l.

Graf 3 zobrazuje porovnanie hodnôt anizotropie fluorescencie sondy DPH v ustálenom stave a graf 4 zobrazuje porovnanie hodnôt anizotropie fluorescencie sondy TMA-DPH v ustálenom stave.

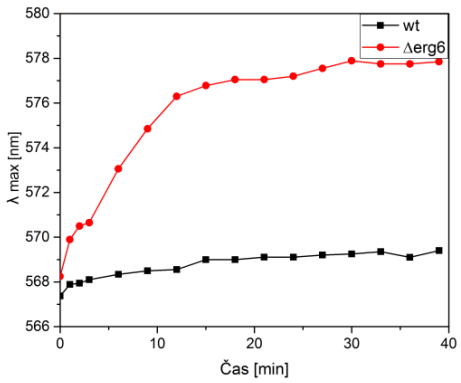


Graf 3: Porovnanie hodnôt anizotropie fluorescencie sondy DPH štandardného kmeňa (wt) a mutanta (Δ*erg6*) kvasiniek *Candida glabrata*. (r_s wt = 0,22 ± 0,02, r_s Δ*erg6* = 0,26 ± 0,005, p < 0,0001). Prvý a tretí kvartil sú znázornené ako okrajové vodorovné úsečky škatule, medián je stredová vodorovná os a priemer označuje krížik. Minimum a maximum sú označené koncovými vodorovnými úsečkami. Počet meraní každého kmeňa n = 10. r_s - anizotropia fluorescencie v ustálenom stave.

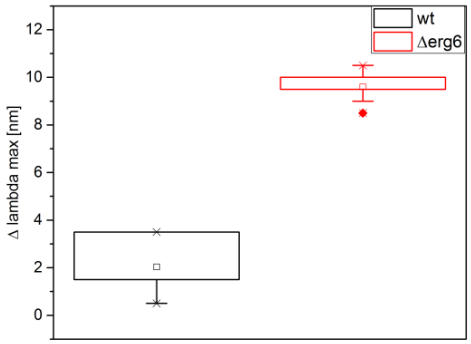


Graf 4: Porovnanie hodnôt anizotropie fluorescencie sondy TMA-DPH štandardného kmeňa (wt) a mutanta (Δ*erg6*) kvasiniek *Candida glabrata*. (r_s wt = 0,31 ± 0,005, r_s Δ*erg6* = 0,32 ± 0,002, p < 0,05). Prvý a tretí kvartil sú znázornené ako okrajové vodorovné úsečky škatule, medián je stredová vodorovná os a priemer označuje krížik. Minimum a maximum sú označené koncovými vodorovnými úsečkami. Počet meraní každého kmeňa n = 10. r_s - anizotropia fluorescencie v ustálenom stave.

Graf 5 zobrazuje priemerný časový vývoj polohy emisného maxima $\Delta\lambda_{max}$ sondy DiS-C_3(3) v suspenzii kvasiniek. Graf 6 zobrazuje porovnanie hodnôt zmeny polohy emisného maxima sondy DiS-C_3(3).



Graf 5: Priemerný časový vývoj polohy emisného maxima $\Delta\lambda_{max}$ sondy DiS-C_3(3) štandardného kmeňa (wt) a mutanta (Δ*erg6*) kvasiniek *Candida glabrata*. Počet meraní každého kmeňa n = 10. Koncentrácia sondy vo vzorkách bola 1,5.10^{-8} mol/l.



Graf 6: Porovnanie hodnôt zmeny polohy emisného maxima $\Delta\lambda_{max}$ sondy DiS-C_3(3) štandardného kmeňa (wt) a mutanta (Δ*erg6*) kvasiniek *Candida glabrata*. ($\Delta\lambda_{max}$ wt = 2,03 ± 1,08 nm, $\Delta\lambda_{max}$ Δ*erg6* = 9,60 ± 0,56 nm, p < 0,0001). Prvý a tretí kvartil sú znázornené ako okrajové vodorovné úsečky škatule, medián je stredová vodorovná os a priemer označuje krížik. Minimum a maximum sú označené koncovými vodorovnými úsečkami. Počet meraní každého kmeňa n = 10.

Pozorovali sme signifikantný pokles hodnôt anizotropie fluorescencie sondy DPH (o 17%, p < 0,0001) a pokles hodnôt fluorescenčnej anizotropie sondy TMA-DPH (o 2%, p < 0,05) medzi vyšetrovanými skupinami kvasiniek (Δ*erg6* mutant oproti wt). Tiež sme pozorovali

posun emisného maxima sondy DiS-C_3(3) k dlhším vlnovým dĺžkam u mutantného kmeňa než u štandardného kmeňa ($\Delta\lambda_{max}$ 7,57 nm, $p < 0{,}0001$). Výsledky ukazujú, že delécia génu *ERG6* ovplyvňuje usporiadanosť lipidových dvojvrstiev cytoplazmatickej membrány a transmembránový potenciál kvasiniek *Candida glabrata*.

4 Diskusia

V predloženej práci sme skúmali vplyv delécie génu *ERG6* na vybrané membránové vlastnosti kvasiniek *Candida glabrata*. Gén ERG6 kóduje enzým sterol-24-C-metyltransferázu, ktorý sa zúčastňuje biosyntézy ergosterolu *(SGD Project, 2020)*.

4.1 Merania so sondou DPH

Porovnaním hodnôt anizotropie fluorescencie sondy DPH v cytoplazmatickej membráne štandardného kmeňa kvasiniek *Candida glabrata* s jej mutantom Δ*erg6* sme zistili, že medzi získanými hodnotami je signifikantný rozdiel. Nárast hodnôt anizotropie fluorescencie sondy DPH v ustálenom stave bol 17%, čo odpovedá zvýšenej usporiadanosti lipidov v hydrofóbnej časti cytoplazmatickej membrány, teda zníženej fluidite membrány v jej hydrofóbnej oblasti.

V práci *(Younsi et al., 2000)*, autori vysvetľujú zvýšenú membránovú fluiditu zmenami v jej lipidovom zložení. Lipidové zloženie bunkových membrán má účinky na ich biofyzikálne vlastnosti. Nízka hladina ergosterolu v kvasinkovej cytoplazmatickej membráne vedie ku zníženiu membránovej fluidity *(Toth Hervay et al., 2015)*. Tiež uvádzajú, že zmena v lipidovom zložení cytoplazmatickej membrány predstavuje proces metabolickej rezistencie kvasiniek *Kluyveromyces lactis* voči amfotericínu B.

Zmeny v lipidovom zložení cytoplazmatickej membrány kvasiniek *Candida glabrata* môžu vysvetľovať zníženú priepustnosť voči antimykotikám a tým aj rastúcu mieru ich rezistencie voči nim. Lipidová kompozícia cytoplazmatickej membrány kvasiniek *Candida glabrata* ešte nebola zmeraná, čo môže byť stimulom k ďalšiemu výskumu, ktorý prispeje k objasneniu zníženia prieniku antimykotík cez cytoplazmatickú membránu.

4.2 Merania so sondou TMA-DPH

Porovnaním hodnôt anizotropie fluorescencie sondy TMA-DPH v cytoplazmatickej membráne štandardného kmeňa kvasiniek *Candida glabrata* s jej mutantom Δ*erg6* sme zistili, že medzi získanými hodnotami je rozdiel. Nárast hodnôt anizotropie fluorescencie sondy TMA-DPH v ustálenom stave bol 2%, čo odpovedá zvýšenej usporiadanosti lipidov v hydrofilnej časti cytoplazmatickej membrány a teda zníženej fluidite membrány v jej hydrofilnej oblasti.

Dôvodom malého rozdielu môže byť vplyv nesterolových Δ-5,7-dienolov *(Vandeputte et al., 2008)* na membránovú fluiditu a tiež nahradenie ergosterolu niektorým alebo viacerými medziproduktami jeho biosyntézy *(Konečná et al., 2016)*.

Pri štúdiu kvasiniek *Kluyveromyces lactis (Konečná et al., 2018)* autori nepozorovali, že by delécia génu *ERG6* vôbec vplývala na usporiadanosť hydrofilných častí cytoplazmatickej membrány.

4.3 Merania so sondou DiS-C3(3)

Porovnaním polohy emisného maxima λ_{max} sondy DiS-C_3(3) štandardného kmeňa kvasiniek *Candida glabrata* s jej mutantom Δ*erg6* sme zistili, že v získaných hodnotách je rozdiel. Rozdiel polohy emisného maxima λ_{max} sondy DiS-C_3(3) bol 7,57 nm. Vyššia hodnota vlnovej dĺžky emisného maxima sondy DiS-C_3(3) u mutanta Δ*erg6* než u štandardného kmeňa poukazuje na hyperpolarizáciu cytoplazmatickej membrány mutantných buniek. Na základe výsledkov získaných pomocou sondy DiS-C_3(3) mienime že, gén *ERG6* podieľa na kontrole transmembránového potenciálu cytoplazmatickej membrány, brániaci jej nadmernej hyperpolarizácii.

Nízka hladina ergosterolu v kvasinkovej cytoplazmatickej membráne vedie k narušeniu fyziologického transmembránového potenciálu *(Younsi et al., 2000)*. V práci *(Konečná et al., 2018)* neprítomnosť ergosterolu v membránach kvasiniek *Kluyveromyces lactis* a jeho nahradenie zymosterolom viedlo k hyperpolarizácii cytoplazmatickej membrány a ku zvýšeniu citlivosti mutantných kvasiniek na hygromycín B v porovnaní so štandardným kmeňom.

5 Záver

V práci sme skúmali vplyv delécie génu *ERG6* u kvasiniek *Candida glabrata* na vybrané membránové vlastnosti, t.j. usporiadanosť lipidových dvojvrstiev a transmembránový potenciál. Výsledky meraní anizotropie fluorescencie sond DPH a TMA-DPH ukazujú, že delécia génu *ERG6* zvyšuje membránovú fluiditu cytoplazmatickej membrány a tiež spôsobuje hyperpolarizáciu cytoplazmatickej membrány u kvasiniek *Candida glabrata*. Výsledky štúdie ukazujú, že gén *ERG6* hrá úlohu v stabilite cytoplazmatickej membrány, čo môže byť jeho príspevok v mechanizme rezistencie voči antimykotikám.

Poďakovanie

Táto práca bola podporená grantami UK/59/2021, VEGA 1/0697/18, KEGA 041UK-4/2020, SK-BY-RD-19-0019, PPI/APM/2018/1/00007/U/001, APVV-19-0094.

Literatúra

[Hesse-Peck et al., 2002] Heese-Peck, A., Pichler, H., Zanolari, B., Watanabe, R., Daum, G., & Riezman, H. (2002). Multiple Functions of sterols in yeast endocytosis. *Molecular Biology of the Cell*, *13*(November), 4100–4109. https://doi.org/10.1091/mbc.E02

[Klug & Daum, 2014] Klug, L., & Daum, G. (2014). Yeast lipid metabolism at a glance. *FEMS Yeast Research*, *14*(3), 369–388. https://doi.org/10.1111/1567-1364.12141

[Konečná et al., 2018] Konečná, A., Hervay, N. T., Benčová, A., Morvová, M., Šikurová, L., Jancikova, I., Gasková, D., & Gbelská, Y. (2018). Erg6 gene is essential for stress adaptation in Kluyveromyces lactis. *FEMS Microbiology Letters*, *365*(23), 1–8. https://doi.org/10.1093/femsle/fny265

[Konečná et al., 2016] Konečná, A., Toth Hervay, N., Valachovič, M., & Gbelska, Y. (2016). ERG6 gene deletion modifies Kluyveromyces lactis susceptibility to various growth inhibitors. *Yeast*, *33*(November), 621–632. https://doi.org/10.1002/yea

[Kourkoumpetis et al., 2011] Kourkoumpetis, T. K., Velmahos, G. C., Ziakas, P. D., Tampakakis, E., Manolakaki, D., Coleman, J. J., & Mylonakis, E. (2011). The Effect of Cumulative Length of Hospital Stay on the Antifungal Resistance of Candida Strains Isolated from Critically Ill Surgical Patients. *Mycopathologia*, *171*(2), 85–91. https://doi.org/10.1007/s11046-010-9369-3

[Lakowicz, 2006] Lakowicz, J. R. (2006). Principles of fluorescence spectroscopy. In *Remote Sensing* (Third). Springer.

[Lees et al., 1995] Lees, N. D., Skaggs, B., Kirsch, D. R., & Bard, M. (1995). Cloning of the late genes in the ergosterol biosynthetic pathway of Saccharomyces cerevisiae-A review. *Lipids*, *30*(3), 221–226. https://doi.org/10.1007/BF02537824

[Loffler et al., 2000] Loffler, J., Einsele, H., Hebart, H., Schumacher, U., Hrastnik, C., & Daum, G. (2000). Phospholipid and sterol analysis of plasma membranes of azole-resistant Candida albicans strains. *FEMS Microbiology Letters*, *185*(1), 59–63. https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2000.tb09040.x

[Lotfali et al., 2017] Lotfali, E., Ghajari, A., Kordbacheh, P., Zaini, F., Mirhendi, H., Mohammadi, R., Noorbakhsh, F., & Rezaie, S. (2017). Regulation of ERG3, ERG6, and ERG11 genes in antifungal-resistant isolates of Candida parapsilosis. *Iranian Biomedical Journal*, *21*(4), 275–281. https://doi.org/10.18869/acadpub.ibj.21.4.275

[Mukhopadhyay et al., 2002] Mukhopadhyay, K., Kohli, A., & Prasad, R. (2002). Drug susceptibilities of yeast cells are affected by membrane lipid composition. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, *46*(12), 3695–3705. https://doi.org/10.1128/AAC.46.12.3695-3705.2002

[Munn et al., 1999] Munn, A. L., Heese-Peck, A., Stevenson, B. J., Pichler, H., & Riezman, H. (1999). Specific sterols required for the internalization step of endocytosis in yeast. *Molecular Biology of the Cell*, *10*(11), 3943–3957. https://doi.org/10.1091/mbc.10.11.3943

[Parks et al., 1999] Parks, L. W., Crowley, J. H., Leak, F. W., Smith, S. J., & Tomeo, M. E. (1999). Use of sterol mutants as probes for sterol functions in the yeast, Saccharomyces cerevisiae. *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology*,

34(6), 399–404. https://doi.org/10.1080/10409239991209381

[Rahendra, 2017] Rahendra, P. (2017). Candida albicans: Cellular and molecular biology. In P. Rahendra (Ed.), *International Journal of Food Microbiology* (second, Vol. 121, Issue 2). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50409-4

[Sanglard et al., 2003] Sanglard, D., Ischer, F., Parkinson, T., Falconer, D., & Bille, J. (2003). Candida albicans mutations in the ergosterol biosynthetic pathway and resistance to several antifungal agents. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, *47*(8), 2404–2412. https://doi.org/10.1128/AAC.47.8.2404-2412.2003

[SGD Project, 2020] SGD Project. (2020). *ERG6 gene*. https://www.yeastgenome.org/locus/S000004467

[Toth Hervay et al., 2015] Toth Hervay, N., Goffa, E., Svrbicka, A., Simova, Z., Griac, P., Jancikova, I., Gaskova, D., Morvova, M., Sikurova, L., & Gbelska, Y. (2015). Deletion of the PDR16 gene influences the plasma membrane properties of the yeast Kluyveromyces lactis. *Canadian Journal of Microbiology*, *61*(4), 273–279. https://doi.org/10.1139/cjm-2014-0627

[Vandenputte et al., 2008] Vandeputte, P., Tronchin, G., Larcher, G., Ernoult, E., Bergès, T., Chabasse, D., & Bouchara, J. P. (2008). A nonsense mutation in the ERG6 gene leads to reduced susceptibility to polyenes in a clinical isolate of Candida glabrata. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, *52*(10), 3701–3709. https://doi.org/10.1128/AAC.00423-08

[Younsi et al. 2000] Younsi, M., Ramanandraibe, E., Bonaly, R., Donner, M., & Coulon, J. (2000). Amphotericin B resistance and membrane fluidity in Kluyveromyces lactis strains. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, *44*(7), 1911–1916. https://doi.org/10.1128/AAC.44.7.1911-1916.2000

[Zhang & Rao, 2010] Zhang, Y. Q., & Rao, R. (2010). Beyond ergosterol: Linking ph to antifungal mechanisms. *Virulence*, *1*(6), 551–554. https://doi.org/10.4161/viru.1.6.13802

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 202–205
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Šimon Šutý, Iveta Waczulíková

Interakcia amfifilných dendrónov s ľudskou krvou a jej zložkami

Šimon Šutý[1]* Iveta Waczulíková[1‡§]
[1] Katedra jadrovej fyziky a biofyziky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstrakt

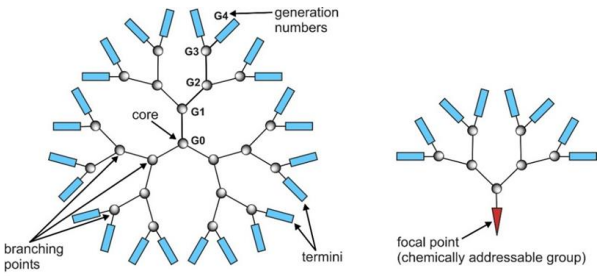
Nanočastice predstavujú v posledných desaťročiach intenzívne skúmanú oblasť pre ich unikátne fyzikálnochemické vlastnosti vhodné pre potenciálne využitie v rôznych odvetviach, okrem iného aj v medicíne. Jednu skupinu nanočastíc tvoria tzv. dendróny, ktoré predstavujú vysoko rozvetvené polymérne nanočastice s dobre definovanou štruktúrou. Vďaka unikátnym fyzikálnochemickým vlastnostiam – dobrej rozpustnosti a vyššej reaktivite určenej terminálnymi skupinami predstavujú v obore nanomedicíny možné potenciálne nosiče liečiv, ktoré sa môžu zabudovať na povrchové skupiny alebo do vnútornej štruktúry dendrónu. Vzhľadom na vysokú diverzitu a organizáciu zložiek ľudského tela je potrebné preskúmať ich správanie a interakcie s biologickými systémami v prvom kroku v podmienkach in vitro. V našej práci sme sa zaoberali skúmaním vplyvu amfifilných dendrónov prvej a druhej generácie pri výsledných koncentráciách 2 µmol/l a 10 µmol/l na vzorky plnej krvi od zdravých dobrovoľníkov (7 mužov a 7 žien vo veku 20 až 28 rokov). Pomocou automatického hematologického analyzátora sme sledovali zmeny koagulačných parametrov krvi a analyzovali interakcie medzi dendrónmi a jednotlivými krvnými elementami. Skúmaním krvných parametrov ako je počet erytrocytov, trombocytov a koagulačných faktorov ako protrombínového a aktivovaného čiastočného tromboplastínového času a i. sme získali vstupný obraz o pôsobení amfifilných dendrónov na zložky krvi. Získané výsledky sme štatisticky vyhodnotili a zostrojili sme korelačné matice a interakčné grafy. Zo získaných dát sme potvrdili interakcie dendrónov s krvou a tiež že vplyv dendrónu na krvné parametre narastá s vyššou generáciou a koncentráciou dendrónu, avšak sme zistili, že vzájomný vplyv týchto faktorov nie je aditívny, ale synergický. Tento efekt sme pozorovali najmä na trombocytoch pri použití dendrónu druhej generácie pri koncentrácii 10 µmol/l. Pri týchto podmienkach sme súčasne zaznamenali výrazný pokles počtu trombocytov vo vzorkách krvi. Na krvných náteroch z týchto vzoriek sme pomocou svetelného mikroskopu sledovali výrazné zhluky trombocytov. Oblasť nižších koncentrácií je možné z pohľadu hematokompatibility považovať za bezpečnú pre oba skúmané dendróny.

Kľúčové slová: dendróny, krv, trombocyty

1 Úvod

Dendróny predstavujú umelo syntetizované rozvetvené polyméry, ktoré pripomínajú stromy. Dendróny predstavujú taktiež podjednotku resp. jednu z vetiev komplexnejších nanočastíc nazývaných dendriméry. Dendriméry sú široko akceptované ako štvrtá trieda polymérov, po lineárnych, zosieťovaných (crosslinked) a rozvetvených štruktúrach [Tomalia, 2005]. Sú to trojrozmerné molekuly v nanorozmeroch a často radiálne symetrické molekuly s dobre definovanou a monodisperznou architektúrou. Ich veľkosť sa určuje v generáciách (G), na základe vrstvenej (layer-by-layer) štruktúry, ako sú syntetizované (Obr. 1). Dendriméry sú predmetom výskumu už viac ako 40 rokov [Buhleier, 1978; Tomalia, 1985]. Tisícky štúdií predstavili použitie dendrimérov v rôznych oblastiach, vrátane medicínskej aplikácie ako je prenos liečiv, genetickej informácie (DNA, RNA) alebo v zobrazovacích metódach. Na základe štruktúry a kompozície dendrimérov môžu byť molekuly liečiva zachytené fyzicky v ich vnútornej štruktúre alebo chemicky konjungované na ich povrchu. Pred približne dvadsiatimi piatimi rokmi viedlo fyzické zachytávanie molekúl liečiva do vnútornej štruktúry dendriméru ku konceptu tzv. dendritickej krabice [Jansen, 1995]. Ďalej, množstvo molekúl liečiv bolo konjungovaných na dendritickom povrchu [Svenson, 2009; Svenson 2012; Ma 2013]. Napriek tejto enormnej výskumnej snahe — a odpovedajúcemu financovaniu — táto trieda polymérov sa nepreniesla do klinickej praxe vo významnejšom stupni – sčasti aj pre sprísnenie procesu schvaľovania farmaceutík pre humánnu terapiu [ICH, 2020]. Skoré príklady komerčných využití dendrimérov sú vo veľkej miere obmedzené na *in vitro* aplikácie.

* simon.suty@fmph.uniba.sk
‡ iveta.waczulikova@fmph.uniba.sk
§ Školiteľ

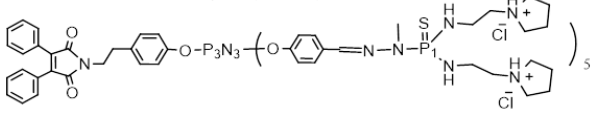


Obr. 1 Schematická štruktúra dendriméru a dendrónu a ich základných častí

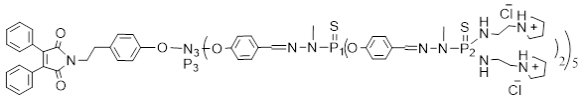
Dendriméry však majú vzhľadom na svoje vlastnosti vysoký potenciál pre vývoj teranostík – látok, ktoré v sebe kombinujú diagnostické a terapeutické účinky. Preto je pre súčasnú medicínu výzvou vytvoriť netoxické a biokompatibilné nanočastice, ktoré neovplyvňujú fyziologické vnútorné prostredie a udržujú celkovú homeostázu. Na základe tohto, pre efektívne a bezpečné použitie nanočastíc je potrebné skúmať a zohľadniť ich fyzikálne a biochemické vlastnosti ako napríklad tvar, veľkosť, rozpustnosť a schopnosť tvoriť agregáty v dôsledku interakcií, pre ich potenciálny príspevok ku vytváraniu toxicity v organizme [Matus et al., 2018].

1.2. Amfifilné fosforové dendróny

V našej práci sme sa zaoberali skúmaním amfifilných fosforových dendrónov prvej (D1) a druhej (D2) generácie (Obr. 2) a ich interakcii s ľudskou krvou. Chemické zloženie dendrónov bolo v prípade D1 ($C_{124}H_{198}C_{l10}N_{34}O_8P_8S_5$) a Mr (D1) = 3055,77 g/mol a v prípade D2 ($C_{264}H_{418}Cl_{20}N_{74}O_{18}P_{18}S_{15}$) bola Mr (D2) = 6664,18 g/mol. Tieto dendróny nám boli poskytnuté v rámci bilaterálneho projektu APVV SK-BY-RD-19-0019 Analýza interakcie medzi amfifilnými dendrónmi a biologickými systémami.



D1



D2

Obr 2. Chemická štruktúra amfifilných fosforových dendrónov D1 a D2

2 Experimentálna časť

2.1 Metodika a priebeh hematologických vyšetrení

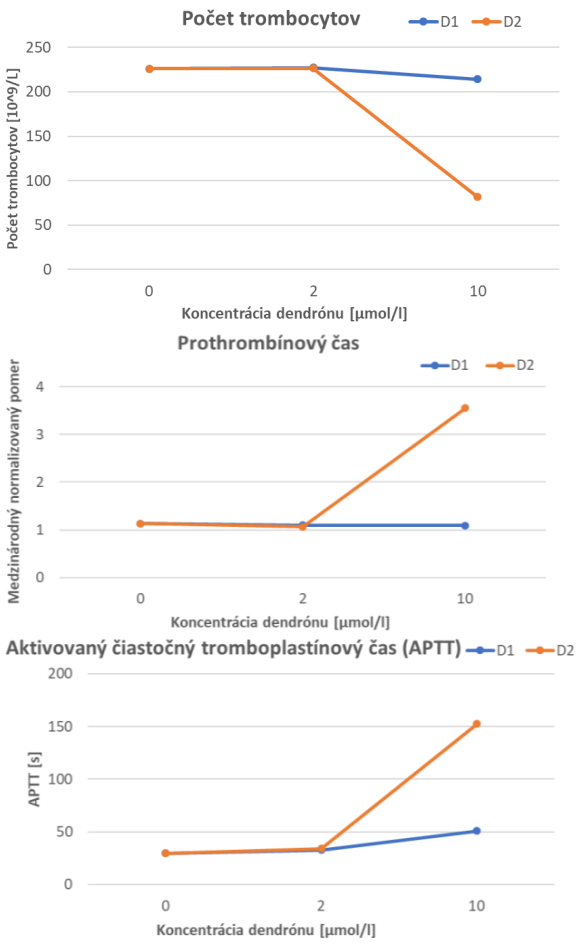
Večer pred samotným meraním sme pripravili pracovné roztoky rozriedením 20 µl zásobného roztoku (c = 3 mmol/l) dendrónu D1 v 100 µl fyziologického roztoku, čím sme získali výsledný roztok o koncentrácii 500 µmol/l. Rovnako sme pripravili pracovný roztok pre dendrón D2, aby sme získali pracovný roztok s výslednou koncentráciou 500 µmol/l. Pre kontrolné merania sme nariedili 20 µl dH2O v 100 µl fyziologického roztoku. Všetky zásobné aj pracovné roztoky boli skladované pri 4°C a chránené pred svetlom.

Všetky krvné odbery boli vykonané zdravotnou sestrou na Oddelení hematológie a transfuziológie Onkologického Ústavu svätej Alžbety a boli schválené etickou komisiou. Darcovia krvi boli dobrovoľníci, muži a ženy vo veku od 20 do 28 rokov. Dobrovoľníkom bolo zdôraznené min. 3 hodiny pred odberom nejesť, nefajčiť a nepiť nič iné ako čistú vodu. Odber krvi bol vykonaný vždy ráno do dvoch 4,5 ml skúmaviek pre skúmanie koagulačných parametrov obsahujúcich trisodium citrát vo forme roztoku s objemom 0,45 ml a c = 0,129 mol/l (výsledný pomer krvi a citrátu bol 9:1). Pre krvný obraz bola odobraná krv do jednej 10 ml skúmavky obsahujúcej K_2EDTA s výslednou koncentráciou 1,8 mg/ml.

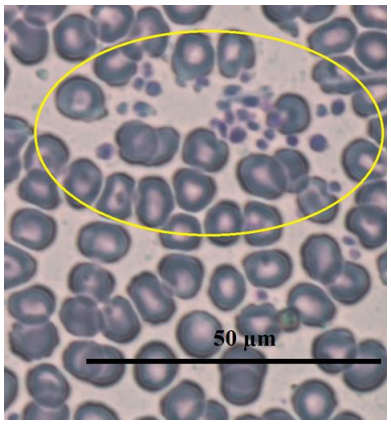
Následne po prepipetovaní krvi z krvných skúmaviek do označených ependorfiek sme pridali 20 µl a 4 µl z pracovného roztoku dendrónov D1 a D2, aby sme získali výsledné koncentrácie $c_{vyššia}$ = 10 µmol/l a $c_{nižšia}$ = 2 µmol/l. Do kontrolných vzoriek sme pridali vždy 20 µl pracovného fyziologického roztoku.

Jednotlivé vzorky krvi s dendrónmi alebo bez nich boli skúmané, pomocou automatického hematologického analyzátora COULTER DxH 800 a boli stanovované parametre ako sú: počet jednotlivých krvných elementov (červených a bielych krviniek, krvných doštičiek) a priemerné objemy týchto krvných elementov, hematokrit a iné štandardne sledované krvné parametre. Zo vzoriek pre krvný obraz boli vytvorené krvné nátery na mikroskopických sklíčkach, ktoré boli po vysušení skúmané pomocou svetelnej mikroskopie. Zaznamenávané boli prípadné abnormality tvaru a počtu červených krviniek a iných krvných elementov napr. krvných doštičiek.

3 Výsledky



Obr. 3 Interakčné grafy priemernej zmeny počtu trombocytov, protrombínového času a aktivovaného čiastočného tromboplastínového času po pridaní dendrónu D1 a D2 o koncentrácii 2 µmol/l a 10 µmol/l



Obr. 4 Snímka krvného náteru zo svetelného mikroskopu zo vzorky D2 s koncentráciou 10 µmol/l. Malé fialové telieska predstavujú trombocyty, ktoré začali agregovať a vytvárať zhluky (žltý ovál) (mierka 50 µm)

4 Diskusia

Z nameraných výsledkov z automatického hematologického analyzátora sme vytvorili interakčné grafy a korelačné matice, ktoré indikovali najvýraznejší vplyv dendrónu D2 pri koncentrácii 10 µmol/l. Určité zmeny v laboratórnych ukazovateľoch sme zaznamenali aj pri koncentrácii 2 µmol/l dendrónu D2 ako aj pri koncentrácii 10 µmol/l dendrónu D1, neboli však sprevádzané klinicky relevantnými zmenami v mikroskopicky hodnotených krvných náteroch. Jedným z klinicky dôležitých parametrov, ktorý sa najvýraznejšie menil, bol počet krvných doštičiek (trombocytov). Pomocou automatického hematologického analyzátora sme sledovali počet trombocytov, ktorý sa so zvyšujúcou koncentráciou a generáciou dendrónu znižoval. Tento fakt nám hovorí o pravdepodobnej primárnej agregácii trombocytov a o vytváraní zrazenín, ktoré boli v prípade vzorky D2 s koncentráciou 10 µmol/l viditeľné aj pod svetelným mikroskopom ako zjavné zhluky trombocytov (Obr. 4).

Poďakovanie

Práca je umožnená vďaka projektu APVV SK-BY-RD-19-0019 Analýza interakcie medzi amfifilnými dendrónmi a biologickými systémami a projektu NAWA EUROPARTNER PPI/APM/2018/1/00007/U/001: Strengthening and spreading international partnership activities of the Faculty of Biology and Environmental Protection for interdisciplinary research and innovation of the University of Lodz.
Analýza dát je umožnená aj vďaka podpore projektu KEGA 041UK-4/2020 s názvom Odborná príprava klinického a biomedicínskeho fyzika - implementácia nových technológií biomedicíny a metód aktívneho učenia.

Literatúra

[Buhleier, 1978] Buhleier E., Wehner W., Vögtle F., (1978). Branched Polyamines Functionalized with Proposed Reaction Pathways Based on 1H-NMR, Atomic Absorption and IR Spectroscopies, *Synthesis*, 1978, 155–158.

[Jansen, 1995] Jansen J., Meijer E. W., Brabandervan den Berg E. (1995) The dendritic box: Shape-selective liberation of encapsulated guests, J. Am. Chem. Soc., 117:4417–4418.

[Ma, 2013] MA X. et al. (2013). Synthesis of degradable bifunctional dendritic polymers as versatile drug carriers, Polym. Chem., 4:812–819.

[Matus et al., 2018] Matus M.F. et al. (2018). Nanotechnology and primary hemostasis:

Differential effects of nanoparticles on platelet responses; In Vascular Pharmacology, 101:1-8

[Svenson, 2009] Svenson S. (2009). Dendrimers as versatile platform in drug delivery applications, Eur. J. Pharm. Biopharm, 71:445–462.

[Svenson, 2012] Svenson S., Tomalia D.A.(2012). Dendrimers in biomedical applications – reflections on the field, Advanced Drug Delivery Reviews, 64:102 – 115

[Tomalia, 2005] Tomalia D. A. (2005). Birth of a new macromolecular architecture: dendrimers as quantized building blocks for nanoscale synthetic polymer chemistry, Prog. Polym. Sci., 30: 294–324.

[Tomalia, 1985] Tomalia, D. A et al. (1985). A new class of polymers: Starburst-dendritic macromolecules, Polym J, 1985, 17:117–132.

[ICH, 2020] The International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Pharmaceuticals for Human Use (ICH) (cit.: 7.4.2021) https://www.ich.org/

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 206
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Aleksandra Lavrikova, Helena Bujdáková, Karol Hensel

Decontamination of *E. coli* and *S. aureus* in liquids by transient spark discharge

Aleksandra Lavrikova[1]* Helena Bujdáková[2†] Karol Hensel[1‡§]
[1] Division of Environmental Physics, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava
[2] Department of Microbiology and Virology, PriF UK, Mlynská dolina, 842 15 Bratislava

Cold atmospheric plasma (CAP) is known for its chemical activity and ability be used in biomedicine. Understanding the complex mechanisms of plasma-cell interactions caused a great concern for studying its bactericidal effect on different matrices and in liquid media. The liquid-phase processes have been identified to be the main key to determine detailed pathways of plasma-cell interactions [3]. A strict interdependence of gas and liquid phases leads to formation of various reactive oxygen and nitrogen species, RONS which are responsible for bio-decontamination [1,2].

Transient spark (TS) discharge (DC-driven self-pulsing repetitive streamer to spark transition discharge) was operated in ambient atmospheric pressure air at the constant applied voltage ~14 kV and pulse repetition frequency ~ 2 kHz. The discharge was applied directly to planktonic solutions of *S. aureus* and *E. coli* (volume = 5 mL, $C_n=10^7$ CFU/mL) repetitively circulated through the discharge plasma zone for 5 and 10 min. Metabolic activity and bacterial viability induced by plasma treatment in different liquids (culture media Mueller-Hinton broth (MHB), phosphate buffered solution (PBS) and saline solutions) and bacterial growth phases (exponential and stacionary) were evaluated. Accumulation of RONS (nitrites NO_2^-, nitrates NO_3^-, hydrogen peroxide H_2O_2 [4]) in liquids was studied.

TS discharge treatment resulted in an effective inactivation (up to 3 log reduction) of *E. coli* and *S. aureus* in saline solution. Metabolic activity was not in a correlation with viability of bacteria as it decreased with increasing treatment time for both *E. coli* and *S. aureus* (Fig. 1) in all three types of liquids.

Reduced metabolic activity and the presence of RONS did not cause bactericidal effect against *E. coli* and *S. aureus* in PBS and culture media after TS discharge treatment. RONS in combination with acidic environment promoted bactericidal effect in saline solution. The findings prove that CAP treatment bio-decontamination efficiency depends on type of a liquid and less on the bacteria growth phase. This confirms the potential of using plasma for various biomedical applications and the need for more detailed studies of the mechanisms of plasma-cell interaction.

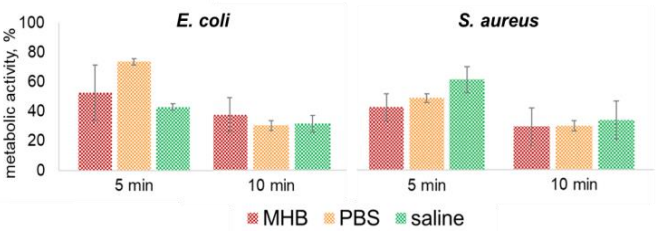


Figure 1: Metabolic activity of *E. coli* and *S. aureus* after TS discharge treatment as a function of the solution (culture media (MHB), saline and PBS).

Acknowledgements. This research was funded by Slovak Research and Development Agency grant APVV-17-0382.

References

[1] K. Hensel, K. Kučerová, B. Tarabová et al. (2015). Effects of air transient spark discharge and helium plasma jet on water, bacteria, cells, and biomolecules. *Biointerphases*, 10(2): 029515.

[2] L. Han S. Patil, D. Boehm et al. (2016). Mechanisms of inactivation by HV ACP differ for *E. coli* and *S. aureus*. *Appl. Environ. Microbiol.*, 82: 450-458.

[3] X. Liao, J. Li, Y. Suo et al. (2018). Effect of preliminary stresses on the resistance of *E. coli* and *S. aureus* toward non-thermal plasma (NTP) challenge. *Food Res. Int.*, 105: 178–183.

[4] B. Tarabová, P. Lukeš, M. Janda et al. (2018). Specificity of detection methods of nitrites and ozone in aqueous solutions activated by air plasma, *Plasma Proc Polym.*, 15:e1800030.

* lavrikova6@uniba.sk
† helena.bujdakova@uniba.sk
‡ karol.hensel@uniba.sk
§ Supervisor

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 207
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Petra Kohútová, Zuzana Garaiová, Maksim Ionov, Tibor Hianik

Štúdium dendrimérov enkapsulovaných v lipozómoch a ich potenciálne využitie v terapii onkologických ochorení (rozšírený abstrakt)

Petra Kohútová[1]*
Školiteľ: Zuzana Garaiová[1†], Maksim Ionov[2‡], Tibor Hianik[1§]
[1] Katedra jadrovej fyziky a biofyziky, FMFI UK, Mlynská dolina F1, 842 48 Bratislava, Slovensko
[2]Oddelenie všeobecnej biofyziky, Univerzita Łódź, Pomorska 141/143, 90-236 Łódź, Poľsko

Abstrakt

Lipozómy sú sférické častice zložené z lipidov, do ktorých je možné zabudovať viacero druhov liečiv/látok [El-Hammadi and Arias, 2019]. Dendriméry sú polymérne molekuly s radiálnou symetriou [Tomalia et al., 1985]. Pre svoju diverzitu v zložení a tiež možnosť modifikácií sa intenzívne skúmajú s potenciálom uplatnenia v medicínskom aj priemyselnom odvetví [Klajnert and Bryszewska, 2001].

Práca je zameraná na vytvorenie duálneho systému kombinujúceho vlastnosti lipozómov a dendrimérov. Konkrétne sa zameriavame na biofyzikálne štúdium lipozomálnej enkapsulácie karbosilánových dendrimérov obsahujúcich ruténium s protirakovinovými vlastnosťami (FITC-CRD_{13}) [Michlewska et al., 2019].

Lipozómy sme pripravili Banghamovou hydratačnou metódou z dimyristoylfosfatidylcholínu, dimyristoylfosfatidyl-glycerolu a cholesterolu. Lipidy boli rozpustené v chloroforme, ktorý bol následne odparený. Lipidový film bol hydratovaný za kontinuálneho miešania 1,5 h pri T = 40°C tlmivým roztokom (10 mM fosfátový pufor, pH 7,4) bez dendrimérov (kontrolná vzorka) resp. s FITC-CRD_{13} dendrimérmi (pasívna enkapsulácia; 10 μmol/l). Vzniknuté lipozómy boli extrudované a ocharakterizované metódou dynamického rozptylu svetla a laserovej Dopplerovej velocimetrie z hľadiska veľkosti - hydrodynamického priemeru (Z-avg), indexu polydisperzity (PDI)) a zeta potenciálu (ζ).

Pre kontrolnú vzorku lipozómov boli namerané hodnoty Z-avg = 310 ± 11 nm, PDI = 0.216, ζ = -47.5 ± 1.8 mV. Pre FITC-CRD_{13} pasívne enkapsulovanú vzorku lipozómov boli namerané hodnoty Z-avg = 304 ± 5nm, PDI = 0.216, ζ = -46 ± 1.4 mV.

Získané predbežné výsledky poukazujú na nesignifikantné ovplyvnenie študovaných parametrov pod vplyvom pasívnej hydratačnej lipozomálnej enkapsulácie FITC-CRD_{13} dendrimérov.

Kľúčové slová: lipozómy, dendriméry, pasívna enkapsulácia

Poďakovanie

Práca bola uskutočnená vďaka grantovým podporám: VEGA 1/0756/20;
APVV: SK-PL-18-0080 a SK-BY-RD-19-0019; KEGA: 041UK-4/2020 a NAWA program EUROPARTNER.

Literatúra

[El-Hammadi and Arias, 2019] El-Hammadi and Arias, J. L. (2019). An Update on liposomes in drug delivery: A patent Review (2014–2018). *Expert Opinion on Therapeutic Patents,* 29:891-907.

[Klajnert and Bryszweska, 2001] Klajnert, B. and Bryszewska, M. (2001). Dendrimers: Properties and Applications. *Controlled Release Systems: Advances in Nanobottles and Active Nanoparticles.* 48:199-208.

[Michlewska et al., 2019] Michlewska, S. et al. (2019). Synthesis and characterization of FITC labelled ruthenium dendrimer as a prospective anticancer drug. *Biomolecules.* 9: 1-15.

[Tomalia et al., 1985] Tomalia, D. A. et al. (1985). A New class of Polymers: Starburst-Dendric Macromolecules. *Polymer Journal.*, 17: 117-132.

* kohutova85@uniba.sk
† zuzana.garaiova7@gmail.com
‡ maksim.ionov@biol.uni.lodz.pl
§ tibor.hianik@fmph.uniba.sk

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 208
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Daniel Truchan, Adriana Annušová

Designing planar experimental model for bioconjugation

Daniel Truchan[1]* Adriana Annušová[2‡§]
[1] Department of nuclear physics and biophysics, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava
[2] Institute of Physics, Slovak Academy of Sciences, Dúbravská cesta 9, 845 11 Bratislava

The rationale behind this research is to improve control over environmental conditions of bioconjugation by limiting reaction sites to one plane. Moreover, this enables investigation of different partial steps of the process.

In this work, we focus on bioconjugation of oxide-based compounds to proteins by suitable linking molecule. We have opted for linking molecules with rather short carbohydrate chain as such non-polar molecules are suitable for eventual functionalization in volume [1]. We have worked with silicon wafer covered by native oxide with hydroxyl functional groups heading outwards and being available for reaction. Crucial part of a bioconjugate is the linking molecule – we have tested a trio of them: 3-amino propyltriethoxysilane (APTES), 3-aminopropyl phosphonic acid (APPA) and 4-aminobutyl phosphonic acid (ABPA). We have deposited them to the wafer by two means: liquid phase deposition and specialized T-bag method. The latter reportedly results in well-ordered monolayer for octadecylphosphonic acid (ODPA) [2] (N. B. missing amino group). We have measured the molecular structures mainly by means of spectroscopic ellipsometry (SE, its variant imaging SE) and as an ultimate test we employed horseradish-peroxidase assay (HRP-assay) with mouse M75 antibody [3] covalently bound to the amino-groups of the trio of molecules. Photographic film enables spatial localisation of the fluorescent signal originating from HRP on the wafer surface.

Our work has revealed that liquid phase deposition is suitable for preparation of nanolayers of all featured molecules (Fig. 1). T-bag method from literature does not lead to well-ordered monolayer as proclaimed – comparison of typical structures for ODPA and APPA molecules is shown in Fig. 2. APPA molecular nanolayer proved to be usable as a planar model for bioconjugation (Fig. 3).

References

[1] Alsharif, N. A., Merzaban, J. S., Kosel, J. (2020). 'Biofunctionalization of Magnetic Nanomaterials'. *Journal of Visualized Experiments*, 161

[2] Vega, A., Thissen, P. and Chabal, Y. J. (2012). 'Environment-controlled tethering by aggregation and growth of phosphonic acid monolayers on silicon oxide'. *Langmuir*, 28 (21) 8046 - 8051

[3] Pastoreková, S., Závadová, Z., Košťál, M., Babušíková, O., Závada, J. (1992). 'A novel quasi-viral agent, MaTu, is a two-component system'. *Virology*, 187 (2) 620

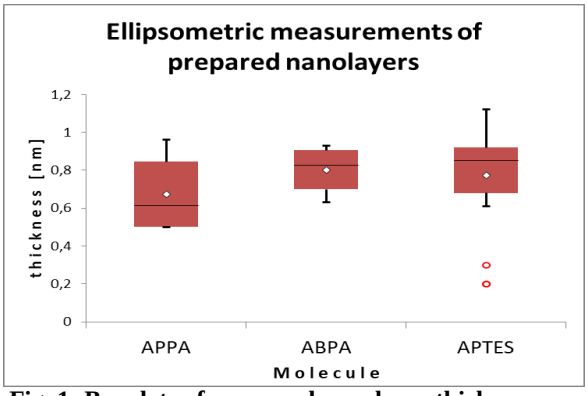


Fig. 1: Boxplots of measured nanolayer thicknesses obtained by SE for different molecules prepared by liquid phase deposition: a comparison.

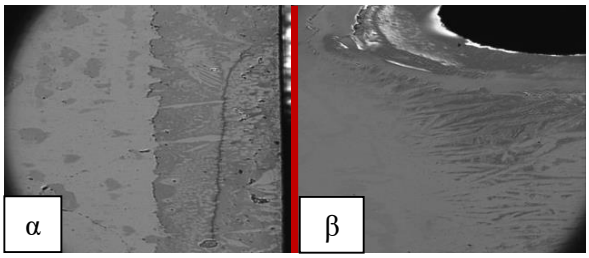


Fig. 2: Molecular structures observed on planar substrate (T-bag method) by imaging SE. (α – ODPA 1 mmol/l, β –APPA 50 mmol/l).

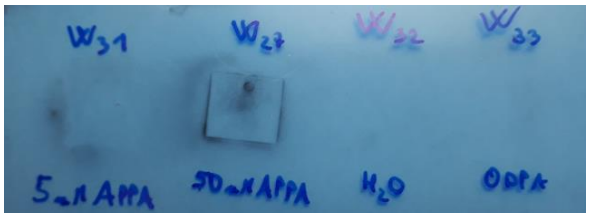


Fig. 3: HRP-assay results on photographic film. T-bag method, different APPA concentrations were used (5 mmol/l for W_{31} and 50 mmol/l W_{27}), controls W_{32} (clean) and W_{33} (nanolayer with no amino group).

*truchan.dan@gmail.com ‡fyziaann@savba.sk §Supervisor

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 209
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Daniela Džubinská, Milan Zvarík, Iveta Waczulíková

Spektrálna analýza moču – nové možnosti v diagnostike rakoviny močového mechúra

Daniela Džubinská[1]* Milan Zvarík[1†] Iveta Waczulíková[1‡§]
[1] Katedra jadrovej fyziky a biofyziky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Rakovina močového mechúra (RMM) je jednou z najbežnejších malignít urologického systému. U väčšiny prípadov sa odhalí v neskorom štádiu, čo predstavuje pre pacienta nepriaznivú prognózu. Diagnostika a sledovanie RMM sa vykonáva hlavne invazívnymi metódami, cystoskopiami, čo pre pacienta predstavuje nutnosť opakovaných nepríjemných a bolestivých vyšetrení [Schulster, 2019]. Preto rastie záujem o nájdenie menej invazívnej metódy, napr. využitie biomarkerov. Pozmenený metabolizmus rakovinových buniek ovplyvňuje zloženie metabolitov v telesných tekutinách. Keďže moč je v prípade rakoviny močového mechúra v priamom kontakte s transformovanými epiteliálnymi bunkami, javí sa ako perspektívny biologický materiál na identifikáciu potenciálnych onkomarkerov [Shao et al., 2017]. Odlišnosti v metabolických profiloch moču tak môžu napomôcť v diagnostike rakoviny. Hlavným nedostatkom súčasných markerov rakoviny močového mechúra (napr. BTA stat, NMP22) je nízka špecificita, senzitivita a vysoká miera falošne pozitívnych výsledkov, najmä u pacientov s hematúriou [Budman et al., 2008].

Keďže hematúria (H) je vedľajším príznakom RMM, zamerali sme sa na porovnanie pacientov s RMM a pacientov s H, ktorá nebola indukovaná malignitou (štúdia prípadov a kontrol). Jedným zo špecifických cieľov tejto práce bolo vzájomné porovnanie absorpčných a fluorescenčných charakteristík oboch skupín pacientov a identifikovanie spektrálnych charakteristík moču vhodných pre diferenciálnu diagnostiku RMM – potvrdenie alebo vylúčenie malignity. Na analýzu vzoriek moču pacientov s rôznym štádiom RMM a pacientov s hematúriou sme využili fyzikálnu metódu – vysokoúčinnú kvapalinovú chromatografiu (HPLC) s využitím absorpčnej a fluorescenčnej detekcie. Chromatografické píky boli podrobené ROC analýze na vyhodnotenie predikčnej schopnosti jednotlivých píkov, kde pri optimálnom deliacom bode najlepšie výsledky na klasifikáciu pacientov dosiahol pík so senzitivitou 90% a špecificitou 74%. Využitím logistickej regresie sme rozlíšili pacientov pomocou viacerých parametrov súčasne. Cieľom logistickej regresie bolo získať model s najlepšou klasifikačnou silou pomocou čo najmenšieho počtu píkov, ktoré vstupovali do modelu. Na základe hodnoty AIC bol vybraný najlepší model pre klasifikáciu pacientov - klasifikačný model s 2 píkmi (senzitivita 90%, špecificita 89%). Logistickou regresiou sme vytvorili aj klasifikačný model, do ktorého vstupovalo 7 chromatografických píkov, a ktorý dosahoval 100% senzitivitu a špecificitu. Následne vytvorením modelov viacrozmernej diskriminačnej analýzy sme boli schopní odlíšiť pacientov so senzitivitou blízkou 100% a špecificitou 96% (Tabuľka 1).

Tabuľka 1 Výsledok diagnostického testu

	Diagnóza	
Výsledok testu	RMM	H
RMM	22	1
H	0	24

Poďakovanie

Táto práca bola podporená projektami VEGA 01/0136/18, APVV: SK-BY-RD-19-0019, NAWA EUROPARTNER PPI/APM/2018/1/00007/U/001 a KEGA: 041UK-4/2020.

Literatúra

[Schulster, 2019] Schulster, (1991). Bladder Cancer Academy 2019 Selected Summaries. *Rev Urol*., 21(1):23-28.

[Shao et al., 2017] Shao C. H., Chen C.L., Lin J.Y. (2017). Metabolite marker discovery for the detection of bladder cancer by comparative metabolomics. Oncotarget. 2017;8(24):38802-38810.

[Budman et al., 2008] Budman LI, Kassouf W, Steinberg JR. Biomarkers for detection and surveillance of bladder cancer. *Can Urol Assoc J*. 2008;2(3):212-221.

* dzubinska2@uniba.sk
† milan.zvarik@fmph.uniba.sk
‡ iveta.waczulikova@fmph.uniba.sk
§ Školiteľ

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 210
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Pavol Nechaj, Martin Gera

Monitoring of Low-Level Wind Shear by Ground-based 3D Lidar at Bratislava Airport (Extended Abstract)

Pavol Nechaj[1,2]* Martin Gera[1†§]
[1] Department of Astronomy, Physics of the Earth, and Meteorology, FMFI UK, Mlynská Dolina, 842 48 Bratislava
[2] MicroStep-MIS, Čavojského 1, 841 04 Bratislava 4

A meteorological lidar is a remote sensing instrument for observing the properties of the atmosphere that are particularly related to the motion of the air, including low-level wind shear. It emits electromagnetic pulses, detects the reflected pulses from the targets (aerosols), and estimates radial wind velocities on the basis of the Doppler effect. The Doppler lidar provides a unique insight into 3D wind flows in a topographically complex region around the Bratislava Airport, especially during weather events accompanied by considerable low-level wind shear – abrupt changes of wind speed and/or direction in the lowest level above surface (below 500 m).

The aim of the study [Nechaj et al., 2019] was to demonstrate developments towards a lidar-based automated system for wind shear detection and alerting for operational usage in the air traffic control, focusing mostly on wind shear weather events typical for the Bratislava Airport: vertical discontinuities in the wind field, stable vertical vortices from the nearby mountain range, and frontal passages (gust fronts). The study provides analysis of four selected wind shear weather events and explores the ability of the algorithm processing lidar data to monitor these hazardous events in a relatively high spatial and temporal resolution and to issue corresponding alerts in compliance with the recommendations of the International Civil Aviation Organisation [ICAO, 2005].

The most important conclusions may be summarized as follows:

- In the climatic conditions of Bratislava, a medium-type lidar can usually "see" along the glide path (under the elevation of 3°) up to 6–7 km, and 1–2.5 km vertically in the RHI regime.
- Lidar is able to monitor the evolution of wind shear weather events at a high spatial and temporal resolution. From the perspective of aeronautical safety, it is important to stress that lidar is capable to monitor also wind shear situations in clear and seemingly peaceful atmosphere at a high pressure, when the pilot standardly receives only measurements of the surface wind, which are directly opposite to the winds aloft, encountered shortly before landing and after take-off.
- Lidar does not replace radar. Lidar beams are more attenuated by rainfall than those of the radar, therefore, in showery rain, radar can "see" further than lidar. The Bratislava Airport, however, has a specific (unfortunate) feature: due to the orographic settings, the radar cannot see the airport (only higher levels of the boundary layer). Thus, the lidar and the radar in Bratislava complement each other not only from the perspective of weather (dry vs. wet events), but also in the aspect of the topographical configuration of the target area.
- Algorithm-based issuing of wind shear alerts (microburst alerts) that meet the ICAO requirements is possible on the basis of lidar observations.
- Automated wind shear alerts may suffer from false alarms generated by noise in the data. Therefore, quality check is inevitable (demonstrated by a cross-check by means of the neighbouring beams with alerts).

References

[Nechaj et al., 1991] Nechaj, P., Gaál, L., Bartok, J., Vorobyeva, O., Gera, M., Kelemen, M., and Polishchuk, V. (2019). Monitoring of Low-Level Wind Shear by Ground-based 3D Lidar for Increased Flight Safety, Protection of Human Lives and Health. In *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2019; 16(22):4584.

[ICAO, 2005] International Civil Aviation Organization. *Manual on Low Level Wind Shear and Turbulence*, 1st ed.; ICAO Doc: Montreal, QC, Canada, 2005;

* pavol.nechaj@fmph.uniba.sk
† martin.gera@fmph.uniba.sk
§ Supervisor

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 211
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Veronika Oravczová, Marek Tatarko, Tibor Hianik

Development of acoustic biosensors based on DNA aptamers for detection of bacteria

Veronika Oravczová[1]*, Marek Tatarko[1†], Tibor Hianik[1‡§]
[1]Department of Nuclear Physics and Biophysics, FMFI UK, Mlynská dolina F1, 842 48 Bratislava

Foodborne bacteria are prominent cause of many diseases. According to World Health Organization (WHO), approximately 600 million people get sick from contaminated food, out of which 420 000 die each year worldwide [WHO, 2020]. Early detection of foodborne pathogens is a crucial step towards prevention of such diseases. The traditional methods for bacterial detection used in dairy laboratories require up to 72 hours to confirm negative result and up to a week to confirm positive case [Mandal et al., 2011]. Rapid methods available for a commercial use based on polymerase chain reaction (PCR) are of high cost and require trained personnel [Law et al., 2015]. Instead, classical methods based on culture growth are most often used. It is therefore important to develop a method, which would be low-cost, rapid, easy to use and sufficiently sensitive. Acoustic biosensors based on nucleic acid aptamers offer these advantages. Our work is focused on the development and testing of acoustic aptasensor for detection of pathogenic bacteria *Listeria innocua*. It is based on multi-frequency quartz crystal microbalance method (QCM). The quartz crystal was functionalized with NeutrAvidin for the immobilization of aptamer specific for *Listeria innocua*. Figure 1. shows the frequency change after application of *Listeria innocua* samples of known CFU/ml (colony forming unit/ml). After each application, the surface of the biosensor was washed with phosphate buffer saline (PBS). The sensor was able to selectively detect the bacteria with limit of detection (LOD) $1.6x10^3$ CFU/ml with detection time 30 minutes. This LOD demonstrates aptasensors ability to detect *Listeria* at concentrations that are less than the predicted infectious dose of *Listeria spp.* (10^6 CFU/ml). It is apparent that the QCM method in combination with the aptamers is highly specific and rapid assay for pathogen detection with a relatively low LOD. For this reason, further research could be focused on improvement the detection limit and also on optimizing the protocol for detecting bacteria directly in dairy products.

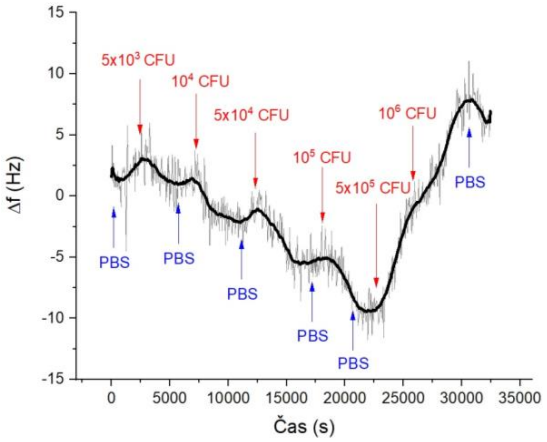


Figure 1. Kinetics of fundamental frequency changes following addition of *Listeria innocua* and washing the sensor surface by PBS.

Acknowledgements

This work was supported by European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Sklodowska-Curie grant agreement No 690898 and by Science Grant Agency VEGA project number: 1/0419/20.

References

[Law et al., 2015] Law, J.-F., Ab Mutalib, N.-S., Chan, K.-G., Lee, L.-H. (2015). Rapid methods for the detection of foodborne bacterial pathogens: principles, applications, advantages and limitations. *Front. Microbiol.*, 5:770. DOI: 10.3389/fmicb.2014.00770

[Mandal et al., 2011] Mandal, P., Biswas, A.K., Choi, K., Pal, U.K. (2011). Methods for rapid detection of foodborne pathogens: An overview. *Am. J. Food Technol.*, 6:87-102. DOI: 10.3923/ajft.2011.87.102.

[WHO, 2020] WHO, 2020. World Health Organization. [Online] Available at: https://www.who.int/activities/estimating-the-burden-of-foodborne-diseases[Cit. 16 01 2020].

* oravczova2@uniba.com
† marek.tatarko@fmph.uniba.sk
‡ tibor.hianik@fmph.uniba.sk
§ Supervisor

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 212–215
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Barbora Stachová, Ján Blaško, Juraj Országh

Elektrónmi indukovaná fluorescencia pyridínu C_5H_5N

Barbora Stachová[1]* Ján Blaško[1†] Juraj Országh[1‡§]

[1] FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

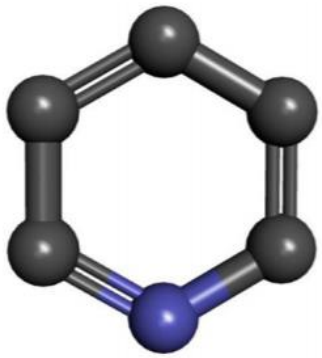
Abstrakt

Cieľom tejto práce bolo štúdium elektrónmi indukovanej fluorescencie pyridínu C_5H_5N metódou skrížených zväzkov s následnou analýzou jeho optického emisného spektra a relatívnych účinných prierezov. Optické emisné spektrá boli merané v rozsahu 200-700 nm pri viacerých elektrónových energiách v intervale od 15 po 100 eV. V spektre sme identifikovali Balmerovu sériu vodíka a produkty disociácie molekuly pyridínu ako sú emisné pásy kladného iónu CH^+, systémy pásov C_2 a deexcitačné prechody fragmentov CN a NH. Taktiež sme získali relatívne účinné prierezy vybraných excitačných prechodov v rozsahu 10-100 eV s odhadom ich prahovej energie.

Kľúčové slová: pyridín, fluorescencia, optické emisné spektrum, účinný prierez.

1 Úvod

Pyridín je aromatická organická heterocyklická zlúčenina zo skupiny uhľovodíkov vytvorená výmenou jedného CH za atóm dusíka. Primárnym zdrojom pyridínu a pyridínových báz je čiernouhoľný decht, z ktorého sa získava pomocou kyseliny sírovej a destilácie. Taktiež je produktom rozpadu mnohých prírodných materiálov v prírode. Má polárny charakter a zásadité vlastnosti. Pyridín je veľmi dobré rozpúšťadlo a taktiež sa používa ako prekurzor na agrochemikálie do hnojív [Kozmik]. Viaceré pyridínové deriváty sú dôležité farmaceutiká a používajú sa ako tuberkulostatiká (izoniazid, etionamid), antihistaminiká (feniramín), antibakteriálne liečivá (sulfapyridín), antihypertenzíva (nifedipín) a herbicídy (paraquat, diquat) [Budovská, 2020]. Pyridín sa nachádza rovnako aj vo vitamínoch B3 (niacín) a B6 (pyridoxín), koenzýmoch, alkaloidoch ako trigonelín, ktoré priaznivo vplývajú na správnu funkciu ľudského organizmu. Nikotín patrí medzi zlúčeniny obsahujúce pyridín. Jeho silné psychoaktívne účinky, ktoré ovplyvňujú mozgové funkciu a často vedú k závislosti sú predmetom viacerých štúdií. Avšak boli zistené aj pozitívne terapeutické účinky nikotínu vďaka stimulácii acetylcholínových receptorov v mozgu, ktoré môžu zvýšiť koncentráciu a pamäť a môžu pomôcť pri liečbe niektorých kognitívnych porúch, ako je schizofrénia, Alzheimerova choroba a porucha pozornosti s hyperaktivitou (ADHD) [Ryszka et al., 2017].



Obr. 1: Molekula pyridínu, sivá znázorňuje atómy uhlíka, modrá atóm dusíka [Śmiałek et al., 2016].

Elektrón-molekulové reakcie hrajú dôležitú úlohu v rôznych prostrediach ako je vesmír, atmosféry planét, priemyselná plazma, či medicína. Štúdium týchto reakcií je potrebné pre porozumenie mnohých procesov vo vesmíre, v prírode ako aj pre implementáciu inovatívnych metód v priemysle. Jedným z procesov, ku ktorým dochádza pri zrážkach elektrónov s molekulami je elektrónmi indukovaná fluorescencia (EIF). EIF je výsledok excitácie častíc nárazom elektrónu s následnou emisiou žiarenia pri ich deexcitácii. Na analýzu EIF sa využíva optická emisná spektroskopia, ktorá je potrebná na získanie dát v podobe optických emisných spektier a účinných prierezov pre jednotlivé druhy reakcií.

Mnohé štúdie sú zamerané na vibračnú a elektrónovú štruktúru pyridínu. Z experimentálnych a výpočtových výsledkov vyplýva, že najvyšší obsadený molekulový orbitál je typu n [Śmiałek et al., 2016]. Táto štúdia bola zameraná na skúmanie molekuly pyridínu pomocou fotoelektrónovej spektroskopie a autori určili ionizačné energie pre vonkajšie a vnútorné valenčné orbitály prostredníctvom použitia fotoelektrónového spektrometra s vysokým rozlíšením. Taktiež boli určené C–C natiahnutia a ohyb benzénového kruhu ako dôsledok vibronickej štruktúry viacerých stavov. Linert a Zubek [Linert et al., 2016]

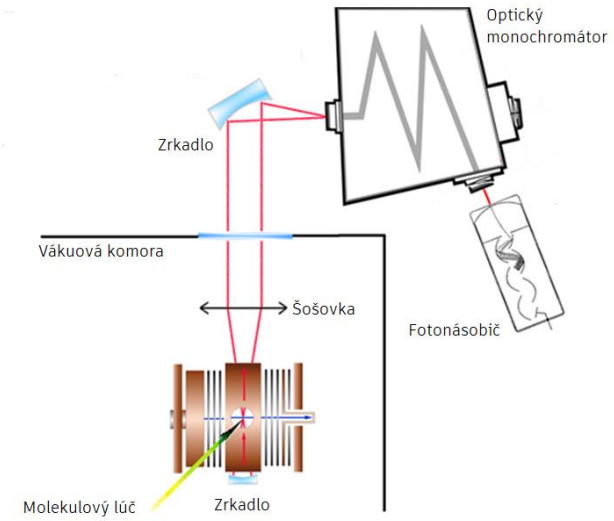
* stachova38@uniba.sk
† jan.blasko@fmph.uniba.sk
‡ juraj.orszagh@fmph.uniba.sk
§ Školiteľ

študovali elektrónové excitácie v rozsahu energií od 3,5 do 10 eV pomocou electron-energy-loss spektroskopie. Taktiež rozlíšili, ktoré z týchto prechodov sú opticky povolené a zakázané vďaka uhlom rozptylu v miere 10-180˚. Fotónmi indukovaná fluorescencia a fotodisociácia pyridínu bola zhrnutá v práci [Wasowicz et al., 2016]. Získané boli emisné spektrá v rozsahu 390-520 nm pri energiách 24 a 45 eV. Identifikované boli emisné čiary Balmerovej série, emisné pásy radikálu CH a Swan systému C_2. Taktiež bola študovaná formácia NH fragmentu.

2 Experiment

Štúdium EIF bolo realizované experimentálnou aparatúrou založenou na metóde skrížených zväzkov. Monochromatický elektrónový lúč je generovaný trochoidálnym elektrónovým monochromátorom umiestneným vo vákuovej komore. Tento interaguje s molekulovým lúčom študovaného plynu formovaným efuzívnou kapilárou, orientovaným kolmo na elektrónový lúč. Pokiaľ je študovaná látka v kvapalnom stave, na napúšťací systém je možné pripojiť nádobu s kvapalnou vzorkou, ktorá je potom odparovaná do napúšťacieho systému. Excitované častice sú jedným z produktov elektrón-molekulovej interakcie. Tlak plynu musí byť stabilný pre udržanie režimu binárnych zrážok. Keďže excitované produkty nie sú stabilné, dochádza ku ich deexcitácii, pri ktorej sa emituje žiarenie vo forme fotónov. Tieto fotóny sú následne vedené optickým systémom, ktorý zahŕňa plankonvexnú UV kremíkovú šošovku umiestnenú vo vákuu, okno z materiálu MgF_2 umiesteného na vákuovej komore a parabolické zrkadlo, ktoré fokusuje fluorescenčné žiarenie do vstupnej štrbiny optického monochromátora Czerny-Turner 0,25 m. Pre zosilnenie signálu je oproti kremíkovej šošovke umiestnené sférické zrkadlo s ohniskom v centre reakčnej komory. Po prechode optickým monochromátorom je signál detegovaný prostredníctvom nízkošumového fotonásobiča Hamamatsu. Schéma experimentálnej aparatúry je znázornená na Obr. 2.

Experimentálna aparatúra pracuje v dvoch módoch. V prvom sa pri konštantnej energii elektrónov postupne prelaďuje vlnová dĺžka a je možné ním získať fluorescenčné spektrá – intenzita žiarenia ako funkcia vlnovej dĺžky. V druhom móde sa získavajú účinné prierezy – intenzita žiarenia ako funkcia elektrónovej energie pri konštantnej vlnovej dĺžke.



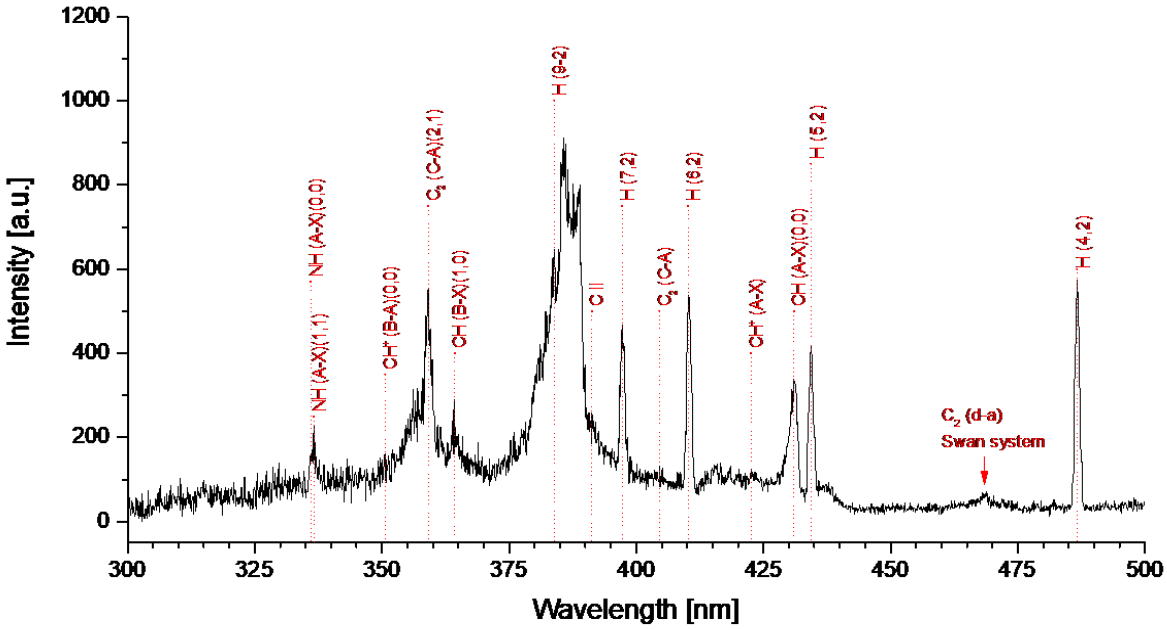
Obr. 2: Schéma experimentálnej aparatúry na štúdium elektrónmi indukovaných fluorescenčných procesov. Zelenou farbou je označený molekulový lúč, modrou elektrónový a červenou fluorescenčný signál.

3 Výsledky

Emisné spektrá molekuly pyridínu C_5H_5N boli merané v rozsahu 200-700 nm pri elektrónových energiách v intervale od 15 po 100 eV, s krokom 5 eV. Na Obr. 3 je znázornené emisné spektrum v intervale vlnových dĺžok 300-500 nm s krokom 0,1 nm pri energii elektrónov 70 eV. Veľkosť štrbín monochromátora bola nastavená na 300 μm. Toto spektrum bolo upravené na citlivosť aparatúry. V rozsahu 200-300 nm neboli zaznamenané žiadne excitačné prechody, od 500 do 700 nm bola nameraná iba spektrálna čiara vodíka H_α (3-2) z Balmerovej série.

V časti 300-380 nm boli identifikované emisné pásy kladného iónu CH^+ ($B^1\Delta \rightarrow A^1\Pi$), molekuly C_2 ($C^1\Pi_g \rightarrow A^1\Pi_u$)(2,1) a CH radikálu, konkrétne prechod CH ($B^1\Delta \rightarrow X^1\Pi$)(1,0). Taktiež sme identifikovali emisné pásy fragmentu NH ($A^3\Pi \rightarrow X^3\Sigma^-$)(0,0) a (1,1). Produkcia excitovaného NH fragmentu pri disociácii pyridínu nie je intuitívna, keďže v materskej molekule tento fragment prítomný nie je. Tento proces prebieha v niekoľkých na seba nadväzujúcich krokoch. Najprv príde k prerušeniu štruktúry benzénového jadra a odtrhnutiu atómu vodíka. Na konci otvoreného jadra sa následne atóm vodíka naviaže na dusík po roztrhnutí C-N väzby [Wasowicz et al., 2016]. Elektrónmi indukované excitačné prechody NH fragmentu doposiaľ neboli pozorované v iných štúdiách.

Na Obr. 4 je znázornená časť spektra 379-391 nm, ktorá bola meraná pri veľkosti vstupnej štrbiny monochromátora 100 μm pre zlepšenie rozlíšenia. Energia elektrónov bola 50 eV. V tomto úseku sme sme identifikovali prvky Balmerovej série H_η (9-2)

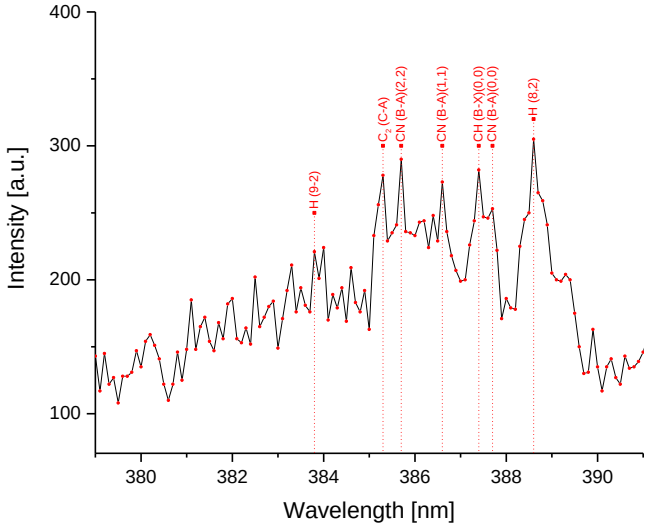


Obr. 3: Emisné spektrum pyridínu C_5H_5N pri 70 eV.

a H_ζ (8-2), emisné pásy molekuly C_2 ($C^1\Pi_g \rightarrow A^1\Pi_u$), fragmentov CN ($B^2\Sigma \rightarrow A^2\Pi$)(2,2), (1,1), (0,0) a radikálu CH ($B^2\Sigma^- \rightarrow X^2\Pi$)(0,0).

V rozsahu vlnových dĺžok 390-500 nm boli detegované čiara C II ($2s^24s\ ^2S–2s^23p\ ^2P^0$), čiary Balmerovej série H_ε (7-2), H_δ (6-2), H_γ (5-2), H_β (4-2), molekula C_2 ($C^1\Pi_g \rightarrow A^1\Pi_u$), Swan systém C_2 ($d^3\Pi_g \rightarrow a^3\Pi_u$), kladný ión CH^+ ($A^1\Pi \rightarrow X^1\Sigma^+$) a radikál CH ($A^2\Delta \rightarrow X^2\Pi$)(0,0). Jednotlivé prechody boli identifikované podľa [Pearse et al., 1965] a [Országh et al., 2017] a sú uvedené v Tab.1.

Spolu s emisnými spektrami boli namerané aj účinné prierezy jednotlivých prechodov, ktoré budú detailne analyzované v pripravovanej rozsiahlejšej publikácii.



Obr. 4: Emisné spektrum pyridínu C_5H_5N pri 50 eV.

Vlnová dĺžka (nm)	*Prechod*
336	NH ($A^3\Pi \rightarrow X^3\Sigma^-$)(0,0)
336,6	NH ($A^3\Pi \rightarrow X^3\Sigma^-$)(1,1)
350,6	CH^+ ($B^1\Delta \rightarrow A^1\Pi$)
359,1	C_2 ($C^1\Pi_g \rightarrow A^1\Pi_u$)(2,1)
364,3	CH ($B^1\Delta \rightarrow X^1\Pi$)(1,0)
383,8	H_η (9-2)
385,3	C_2 ($C^1\Pi_g \rightarrow A^1\Pi_u$)
385,7	CN ($B^2\Sigma \rightarrow A^2\Pi$)(2,2)
386,6	CN ($B^2\Sigma \rightarrow A^2\Pi$)(1,1)
387,4	CH ($B^2\Sigma^- \rightarrow X^2\Pi$)(0,0)
387,7	CN ($B^2\Sigma \rightarrow A^2\Pi$)(0,0)
388,6	H_ζ (8-2)
391,3	C II($2s^24s\ ^2S–2s^23p\ ^2P^0$)
397,2	H_ε (7-2)
404,6	C_2 ($C^1\Pi_g \rightarrow A^1\Pi_u$)
410,2	H_δ (6-2)
422,6	CH^+ ($A^1\Pi \rightarrow X^1\Sigma^+$)
431	CH ($A^2\Delta \rightarrow X^2\Pi$)(0,0)
434,4	H_γ (5-2)
465-470	C_2 ($d^3\Pi_g \rightarrow a^3\Pi_u$)
486,7	H_α (3-2)

Tab. 1: Identifikované deexcitačné prechody s priradenými vlnovými dĺžkami.

4 Záver

Táto práca bola zameraná na štúdium excitačných procesov indukovaných monochromatizovanými elektrónmi. Študovali sme molekulu pyridínu C_5H_5N, ktorá má široké využitie ako v priemysle tak aj v medicíne a získali sme dáta v podobe emisných spektier a relatívnych účinných prierezov vybraných prechodov. V spektrách boli analyzované a identifikované excitačné prechody viacerých molekúl, či fragmentov. Takýto typ štúdie, zameraný na elektrónmi indukovanú fluorescenciu pyridínu doposiaľ nebol publikovaný. Naša práca preto ponúka jedinečné pozorovania excitačných a disociačných procesov tejto molekuly, pomocou ktorých je možné určiť jej vlastnosti, štruktúru a fragmentačné kanály. Analýza získaných dát stále prebieha. Rozsiahlejšia štúdia bude publikovaná v karentovanom časopise.

Poďakovanie

Chcela by som sa poďakovať svojmu školiteľovi RNDr. Jurajovi Országhovi, PhD. za trpezlivý prístup, ochotu pri konzultovaní problémov a možnosť pracovať na tomto projekte. Taktiež by som sa rada poďakovala Mgr. Jánovi Blaškovi za spoluprácu, merania a analýzu dát. Tento projekt bol čiastočne podporený projektom Agentúry pre podporu výskumu a vývoja č. APVV-19-0386 a projektom VEGA 1/0489/21.

Literatúra

[Budovská, 2020] Budovská, M. (2020). *Vybrané heterocyklické zlúčeniny*, 15-26.

[Kozmík] Kozmík, V. *Organická chemie II, Heterocyklické sloučeniny.*

[Linert et al., 2016] Linert, I. and Zubek, M. (2016). Electron energy-loss spectroscopy of excited states of the pyridine molecules. *The European Physical Journal D* 70: 74.

[Országh et al., 2017] Országh, J., Danko, M., Čechvala, P. and Matejčík, Š. (2017). Dissociative Excitation of Acetylene Induced by Electron Impact: Excitation-emission Cross-sections. *The Astrophysical Journal* 841:17.

[Pearse et al., 1965] Pearse, R. W. B. and Gaydon, A. G. (1965). *The identification of molecular spectra*, 3rd edition.

[Ryszka et al., 2017] Ryszka, M., Allzadeh, E., Li, Z. and Ptasińska, S. (2017). Low-energy electron-induced dissociation in gas-phase nicotine, pyridine, and methyl-pyrrolidine. *The Journal of Chemical Physics* 147, 094303.

[Śmiałek et al., 2016] Śmiałek, M. A., MacDonald, M. A., Ptasińska, S., Zuin, L. and Mason, N. J. (2016). Photoelectron and threshold photoelectron valence spectra of pyridine. *The European Physical Journal D* 70: 42.

[Wasowicz et al., 2016] Wasowicz, T. J., Dabkowska, I., Kivimäki, A., Coreno, M. and Zubek, M. (2016). Elimination and migration of hydrogen in the vacuum-ultraviolet photodissociation of pyridine molecules. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* 50, 015101.

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 216–220
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Martin Kuťka, Michal Stano

Úprava mikroporéznych membrán plazmou pre ich použitie ako separátorov v elektrolýznych článkoch

Martin Kuťka[1]* Michal Stano[1‡§]
[1] Katedra experimentálnej fyziky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstrakt

Prechod od výroby elektrickej energie z fosílnych palív k výrobe elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov je jednou z najväčších výziev súčasnosti. V posledných rokoch došlo k zvýšeniu podielu výroby elektrickej energie z veternej a slnečnej fotovoltickej energie, avšak ich rozvoj je spojený s nutnosťou uskladnenia energie. Do budúcnosti sa očakáva, že veľký význam pri tomto uskladnení energie bude mať vodíková energetika, v ktorej sa prebytková energia využije na výrobu vodíka elektrolýzou vody. Cieľom našej práce je vývoj medzielektródových separátorov pre alkalické elektrolýzne články. V súčasnosti sa ako separátory najčastejšie používajú mikroporézne polymérne membrány, do ktorých sa na zvýšenie hydrofilnosti pridávajú anorganické prímesi, čím však zároveň dochádza k zhoršeniu mechanickej pevnosti membrán. V tejto práci sa zaoberáme alternatívnym spôsobom prípravy hydrofilných membrán na báze polysulfónu, ktorý sa vyznačuje vysokou chemickou odolnosťou voči alkalickým elektrolytom. Príprava membrán spočíva v aktivácii ich povrchu nízkoteplotnou plazmou a následnom kovalentnom naviazaní a polymerizácii vhodného monoméru, ktorým bola kyselina akrylová. Efekt úpravy sme skúmali gravimetricky a meraním elektrického odporu membrán v prostredí alkalického elektrolytu. Pozorovali sme, že nami zvolený spôsob úpravy poréznych membrán vedie k výraznému zníženiu ich odporu.

Kľúčové slová: plazma, úprava povrchu, polymér, separátor, elektrolýza

1 Úvod

S cieľom znížiť množstvo emisií skleníkových plynov sa v blízkej budúcnosti očakáva nárast podielu výroby elektrickej energie z veternej a slnečnej fotovoltickej energie. Nevýhodou týchto zdrojov energie je, že neumožňujú nepretržitú výrobu elektrickej energie. Preto je nutné uskladniť energiu v čase, keď je možné vyrobiť viac energie ako je jej spotreba. V súčasnosti približne 99 % takto vyrobenej energie je uskladnených pomocou prečerpávacích vodných elektrární [F. Geth et al., 2015]. Takéto riešenie je však náročné na výber vhodnej lokality, a preto sa do budúcnosti predpokladá rozvoj uskladnenia energie vo forme vodíka. V tomto prípade sa elektrická energia premieňa na vodík pomocou elektrolýzy vody.

Pri elektrolýze vody sa prechodom elektrického prúdu cez rozhranie elektród a elektrolytu rozkladajú molekuly vody na vodík a kyslík, ktoré sa vylučujú na jednotlivých elektródach. Medzi elektródy sa vkladá separátor, ktorého úlohou je efektívne oddeliť vzniknutý vodík a kyslík a zabrániť ich následnému zmiešavaniu. V praxi existuje niekoľko typov elektrolýznych článkov, pričom dva hlavné typy sú PEM (polymer electrolyte membrane) elektrolyzéry a alkalické elektrolyzéry. Zatiaľ čo PEM elektrolyzér je kompaktnejší, v porovnaní s alkalickým elektrolyzérom má vyššie investičné náklady a kratšiu životnosť [A. Ursua et al., 2012].

V alkalických elektrolyzéroch sú separátory vyrobené z poréznych a elektricky nevodivých materiálov. Prenos iónov medzi elektródami umožňuje kvapalný elektrolyt (najčastejšie 30 hm.% vodný roztok KOH), ktorý sa nachádza aj v póroch separátora. Z tohto dôvodu je vodivosť závislá nielen od vodivosti elektrolytu, ale aj od vlastností separátora [A. Godula-Jopek, 2015], pričom vysoká vodivosť, resp. nízky odpor membrány je dôležitý kvôli účinnosti elektrolýzneho článku. Dôležitou vlastnosťou separátora je aj hydrofilnosť. V prípade nedostatočného zmáčania separátora elektrolytom dochádza k vyzrážaniu a zachyteniu bubliniek plynov vo vnútri separátora, čo spôsobuje zvýšenie odporu a podporuje zmiešavanie plynov [M. Schalenbach et al., 2016].

V minulosti sa na výrobu separátorov používal vláknitý biely azbest, od ktorého sa však upustilo potom, čo bol azbest zaradený medzi karcinogény. V súčasnosti sa ako separátory najčastejšie používajú porézne polymérne membrány. Medzi polyméry, ktoré sú dostatočne chemicky odolné v prostredí alkalického elektrolytu patria polysulfón, polyfenylén sulfid a polytetrafluóretylén (teflón) [R. Renaud & R. L. LeRoy, 1982, V. M. Rosa et al., 1995]. Nevýhodou separátorov vyrobených z týchto polymérov je ich nedostatočná

* kutka6@uniba.sk
‡ michal.stano@fmph.uniba.sk
§ Školiteľ

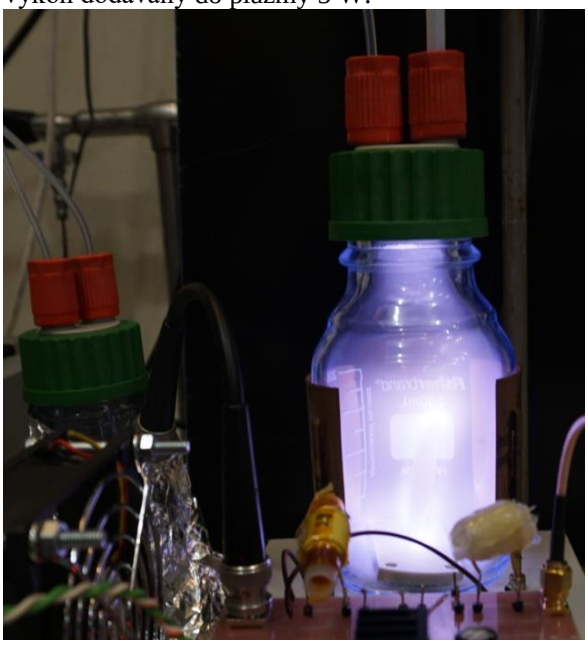
hydrofilnosť [V. Buršíková et al., 2004]. Na zvýšenie hydrofilnosti sa pri výrobe membrán používajú anorganické prímesi. Najznámejší takýto materiál je kompozit polysulfónu a ZrO_2, tiež známy ako Zirfon® Perl. Vplyv hmotnostného podielu ZrO_2 na vlastnosti membrány bol študovaný v práci [L. Xu et al., 2014], pričom zvyšovanie tohto podielu viedlo k zhoršeniu mechanickej pevnosti membrán.

V našej práci sme sa zamerali na zvýšenie hydrofilnosti membrán vyrobených z polysulfónu pomocou úpravy ich povrchu nízkoteplotnou plazmou. Pri pôsobení aktívnych častíc plazmy (elektrónov, iónov) a UV žiarenia prebiehajú na povrchu polyméru rôzne reakcie, ktorých výsledkom je, v závislosti od použitého plynu, vznik širokého spektra funkčných skupín na povrchu polyméru. Okrem funkčných skupín vznikajú na povrchu polyméru aj radikály – tzv. aktivácia povrchu. Pri kontakte týchto radikálov s iným monomérom, môžeme dosiahnuť kovalentné naviazanie a následnú polymerizáciu tohto monoméru, čím vznikne kopolymér. Tento proces nazývame očkovanie [J. Friedrich, 2012]. Radikály potrebné pre očkovanie môžeme na povrchu membrány vytvoriť pomocou plazmy inertného plynu alebo cez vytvorenie hydroperoxidových skupín kyslíkovou plazmou, ktoré sa pri zahriatí rozpadnú, pričom vznikne radikál. Vhodným monomérom na dosiahnutie hydrofilnosti je kyselina akrylová (CH_2=CH–COOH), ktorej očkovaním vznikne na povrchu membrány kopolymér kyseliny polyakrylovej obsahujúci veľké množstvo karboxylových skupín, vďaka ktorým sa povrch membrány stane hydrofilným [A. Ciszewski et al., 2006, S. Saxena et al., 2010].

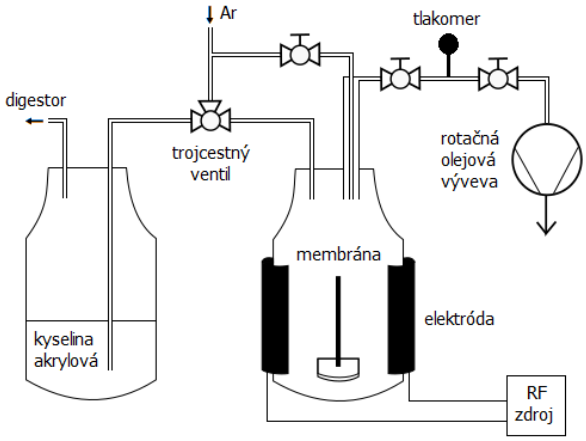
2 Experiment

2.1 Aktivácia povrchu membrán

V tejto práci sme použili filtračné membrány z polysulfónu, typ Tuffryn od spoločnosti PALL, s nominálnou veľkosťou pórov 0.45 µm. Na aktiváciu povrchu membrán bola použitá aparatúra, ktorej schéma je znázornená na Obr. 2. Upravovaná membrána bola umiestnená v sklenenej fľaške pomocou držiaku z polypropylénu. Do fľašky bol privedený argón ako pracovný plyn a pomocou vývevy bolo v prietokovom režime zabezpečené udržiavanie tlaku 100 Pa. Hodnota tlaku vo fľaške bola kontrolovaná tlakomerom. Na generovanie plazmy vo fľaške boli použité dve elektródy, ktoré sa nachádzali na vonkajšej stene fľašky. Elektródami sme generovali rádiofrekvenčný výboj napájaný zdrojom s frekvenciou 13.56 MHz. Tento zdroj môže fungovať buď v kontinuálnom režime, alebo v pulznom režime. Pri úprave membrán zdroj pracoval pulznom režime so striedou 50 % a frekvenciou pulzov 10 kHz. Pri uvedených nastaveniach zdroja bol meraním určený stredný výkon dodávaný do plazmy 5 W.



Obr. 1: Aktivácia povrchu membrán.



Obr. 2: Schéma aparatúry na aktiváciu povrchu membrán.

2.2 Očkovanie kyseliny akrylovej

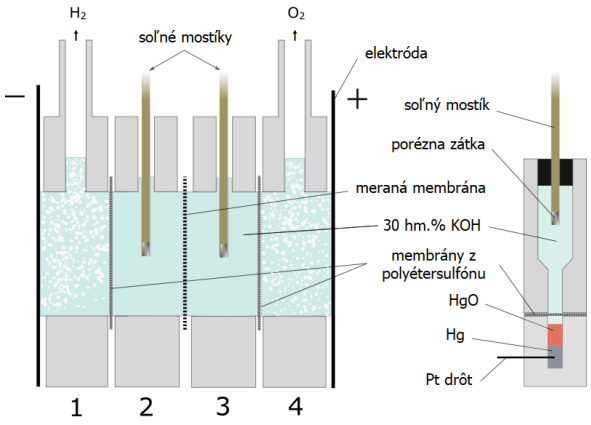
Pred použitím kyseliny akrylovej bolo potrebné odstrániť primiešaný stabilizátor, ktorý zamedzuje jej polymerizácii počas skladovania. Stabilizátor sme odstránili pomocou vákuovej destilácie pri teplote 55 °C a tlaku približne 20 hPa. Po vákuovej destilácii bola kyselina akrylová rozpustená v destilovanej vode na koncentráciu 10 obj.%. Po ukončení procesu aktivácie povrchu membrány bol výboj vypnutý a uzavretý prietok plynu. Následne sme pristúpili k očkovaniu kyseliny akrylovej, ktorú sme priviedli do fľašky cez trojcestný ventil vďaka podtlaku vo fľaške. Aktivovaná membrána bola

zaliata dostatočným množstvom roztoku kyseliny akrylovej a následne bola fľaška zohriata teplotu 70 °C, pri ktorej prebiehalo očkovanie. Doba očkovania bola pre jednotlivé membrány rôzna, nakoľko sme chceli dosiahnuť rôzne úrovne očkovania membrány. Po ukončení procesu očkovania boli upravené membrány vyprané v destilovanej vode a vysušené.

2.3 Charakteristika upravených membrán

Efekt úpravy sme najprv skúmali gravimetricky – určením tzv. úrovne očkovania. Úroveň očkovania (grafting degree, GD) vyjadruje pomer hmotnosti polyméru kyseliny polyakrylovej, ktorý vznikol na povrchu membrány, k hmotnosti membrány pred očkovaním. Tento pomer bol určený meraním hmotnosti membrán pred a po očkovaní.

Následne sme merali elektrický odpor membrán v prostredí alkalického elektrolytu. Na meranie elektrického odporu membrán bol použitý štvorkontaktný článok, ktorý je schématicky znázornený na Obr. 3. Tento článok pozostával zo štyroch blokov tvaru kvádra, pričom každá časť má v strede kruhový otvor s prierezom 12 cm^2. V zloženom článku tieto otvory predstavujú valcové dutiny, ktoré boli zaplavené 30 hm.% roztokom KOH. Elektrický prúd bol do článku privedený pomocou elektród pripevnených na vonkajších stenách blokov 1 a 4. Meraná membrána bola vložená medzi bloky 2 a 3. Na rozhraniach 1–2 a 3–4 boli umiestnené membrány z polyétersulfónu, ktoré slúžili na zabránenie prechodu bubliniek elektrolýznych plynov do priestoru blokov 2 a 3, kde prebiehalo meranie odporu membrány. Do blokov 2 a 3 boli pomocou soľných mostíkov pripojené referenčné elektródy slúžiace ako napätové sondy. Pred meraním odporu membrány bolo zmerané referenčné napätie medzi týmito elektródami bez meranej membrány. Odpor membrány bol následne určený z rozdielu napätí medzi sondami nameranými s vloženou membránou a bez vloženej membrány pri rovnakom prúde cez článok. Elektrolýzny článok bol počas merania udržiavaný na teplote 50 °C pomocou termostatu.



Obr. 3: Schématické znázornenie článku na meranie elektrického odporu.

3 Výsledky

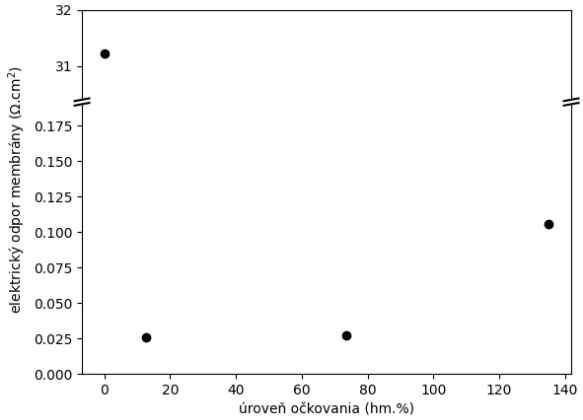
V Tabuľke 1 je uvedená doba aktivácie t_A, doba očkovania t_G a výsledná úroveň očkovania GD jednotlivých membrán.

t_A [min]	t_G [min]	GD [hm.%]
1	60	12.8
1	60	73.6
2	90	135.1

Tabuľka 1: Výsledky merania GD membrán.

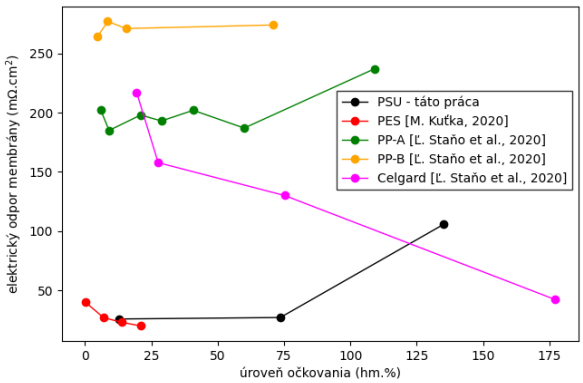
Pri očkovaní prvej a druhej membrány sme pri rovnakých podmienkach dosiahli rozdielnu úroveň očkovania. Počas privádzania kyseliny akrylovej do fľašky s prvou membránou došlo k upchatiu prívodu. Následne sa pri spriechodnení prívodu dostal vzduch do fľašky, ktorý spôsobil nižšiu výslednú úroveň očkovania. Rozdielna úroveň očkovania nám však umožnila určiť elektrický odpor upravenej membrány na väčšom intervale úrovne očkovania.

Výsledky merania elektrického odporu jednotlivých membrán v závislosti od ich úrovne očkovania sú znázornené v grafe na Obr. 4. Okrem upravených membrán sme rovnakým postupom zmerali odpor aj jednej neupravenej membrány (GD = 0 hm.%). Z týchto výsledkov je vidno, že všetky upravené membrány majú výrazne nižší odpor ako neupravená membrána. Neupravenej membráne bol nameraný odpor 31.2 Ω.cm^2 a upraveným membránam bol nameraný odpor v intervale 0.025 – 0.1 Ω.cm^2. Pri membráne s úrovňou očkovania 135.1 hm.% sme pozorovali vyšší odpor ako pri upravených membránach s nižšou úrovňou očkovania, stále však o dva rády nižší ako pri neupravenej membráne.



Obr. 4: Graf závislosti elektrického odporu membrán od úrovne očkovania.

Pre porovnanie výsledkov našej práce sú v grafe na Obr. 5 znázornené výsledky z prác [M. Kuťka, 2020] a [Ľ. Staňo et al., 2020]. V týchto prácach bola taktiež študovaná úprava poréznych polymérnych membrán očkovaním kyseliny akrylovej, avšak s použitím iných typov membrán. Skúmané boli membrány z polyétersulfónu (PES) a polypropylénu (PP-A, PP-B, Celgard). Pri všetkých typoch membrán bolo pozorované zníženie odporu oproti neupraveným membránam. Hodnoty odporu dosiahnuté v tejto práci sú porovnateľné s hodnotami PES membrán a patria k najnižším hodnotám odporu, ktoré boli dosiahnuté očkovaním kyseliny akrylovej na porézne polymérne membrány. Preto usudzujeme, že membrány z nami zvoleného materiálu (polysulfón, PSU) sú po danej úprave vhodné ako separátory v alkalických elektrolýznych článkoch.



Obr. 5: Porovnanie výsledkov z tejto práce s inými prácami.

4 Záver

V rámci práce sme pripravili sériu troch vzoriek mikroporéznych membrán z polysulfónu aktiváciou ich povrchu v nízkoteplotnej plazme a následným očkovaním kyseliny akrylovej. Meraním elektrického odporu neupravenej membrány a upravených membrán sme pozorovali, že nami zvolený spôsob úpravy poréznych membrán vedie k výraznému zníženiu ich odporu v prostredí alkalického elektrolytu. Upravené membrány mali odpor v intervale 0.025 – 0.1 Ω.cm^2.

Poďakovanie

Chcel by som sa poďakovať svojmu školiteľovi Michalovi Stanovi, doc. Anne Zahoranovej a Ľubomírovi Staňovi za materiálnu a odbornú pomoc pri príprave a realizácii experimentov. Moja vďaka patrí aj FMFI UK za udelenie štipendia VPS. Práca vznikla v rámci projektu VEGA 1/0811/21.

Literatúra

[F. Geth et al., 2015] F. Geth, T. Brijs, J. Kathan, J. Driesen, and R. Belmans, "An overview of large-scale stationary electricity storage plants in Europe: Current status and new developments," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 1212–1227, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.145.

[A. Ursua et al., 2012] A. Ursua, L. M. Gandia, and P. Sanchis, "Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends," *Proc. IEEE*, vol. 100, no. 2, pp. 410–426, Feb. 2012, doi: 10.1109/JPROC.2011.2156750.

[A. Godula-Jopek, 2015] A. Godula-Jopek, Hydrogen production: by electrolysis. Weinheim, Germany: John Wiley & Sons, 2015.

[M. Schalenbach et al., 2016] M. Schalenbach, W. Lueke, and D. Stolten, "Hydrogen Diffusivity and Electrolyte Permeability of the Zirfon PERL Separator for Alkaline Water Electrolysis," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 163, no. 14, pp. F1480–F1488, 2016, doi: 10.1149/2.1251613jes.

[R. Renaud & R. L. LeRoy, 1982] R. Renaud, R.L. LeRoy, Separator materials for use in alkaline water electrolysers, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 7, Issue 2, 1982, Pages 155-166, ISSN 0360-3199, doi.org/10.1016/0360-3199(82)90142-2.

[V. M. Rosa et al., 1995] Rosa, V.M., Santos, M.B.F. and Da Silva, E.P. (1995) New Materials for Water Electrolysis Diaphragms. *International Journal of Hydrogen Energy*, 20, 697-700.

[V. Buršíková et al., 2004] V. Buršíková and et al., "Surface energy evaluation of Plasma Treated Material by Contact Angle Measurement." Masaryk University in Brno, Czech republic, 2004.

[L. Xu et al., 2014] L. Xu, Y. Yu, W. Li, Y. You, W. Xu, and S. Zhang, "The influence of manufacturing parameters and adding support

layer on the properties of Zirfon® separators," *Front. Chem. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 3, pp. 295–305, Sep. 2014, doi: 10.1007/s11705-014-1433-y.

[J. Friedrich, 2012] J. Friedrich, The Plasma Chemistry of Polymer Surfaces: Advanced Techniques for Surface Design. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012.

[A. Ciszewski et al., 2006] A. Ciszewski, I. Gancarz, J. Kunicki, and M. Bryjak, "Plasma-modified polypropylene membranes as separators in high-power alkaline batteries," *Surf. Coat. Technol*., vol. 201, no. 6, pp. 3676–3684, Dec. 2006, doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.08.146.

[S. Saxena et al., 2010] S. Saxena, A. R. Ray, and B. Gupta, "Graft polymerization of acrylic acid onto polypropylene monofilament by RF plasma," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 116, pp. 2884–2892, 2010, doi: 10.1002/app.31823.

[M. Kuťka, 2020] M. Kuťka, (2020). Úprava poréznych polymérnych membrán nízkoteplotnou plazmou - bakalárska práca, školiteľ: Ľ. Staňo, Fakulta matematiky fyziky a informatiky, Univerzita Komenského v Bratislave

[Ľ. Staňo et al., 2020] Ľ. Staňo, M. Stano, and P. Ďurina, "Separators for alkaline water electrolysis prepared by plasma-initiated grafting of acrylic acid on microporous polypropylene membranes," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 80–93, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.10.233.

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 221–225
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Adam Kerdík, Juraj Surovčík, Veronika Medvecká

Plazmou asistovaná kalcinácia pri príprave TiO_2 nanovlákien

Adam Kerdík[1]* Juraj Surovčík[1†] Veronika Medvecká[1‡§]
[1] Katedra experimentálnej fyziky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstrakt

TiO_2 nanovlákna sú žiadaným materiálom vďaka svojim fotokatalytickým vlastnostiam. Najčastejšou metódou ich prípravy je termálna kalcinácia kompozitných nanovlákien pripravených pomocou zvlákňovacích metód. Pri termálnej kalcinácii dochádza k odbúravaniu organického polyméru slúžiaceho ako matrica. Nevýhodou tohto procesu je pomerne dlhá doba ohrevu a možné poškodenie štruktúry vlákien. V našej práci sme skúmali využitie nízkoteplotnej plazmy pri príprave nanovlákien TiO_2, za účelom zefektívnenia následnej termálnej kalcinácie. Ako nosný polymér vlákien pripravených pomocou elektrospinningu bol použitý polyvinylpyrolidón a zdrojom kovu bol tetraisopropoxid titaničitý. Na opracovanie vzoriek bola použitá plazma generovaná Difúznym koplanárnym povrchovým bariérovým výbojom. Štúdium preukázalo vplyv nízkoteplotnej plazmy na odbúravanie organickej matrice. Zmeny v chemických väzbách boli pozorované pomocou Fourierovskej infračervenej spektroskopie. Na určenie zmien v chemickom zložení bola použitá energo-disperzná spektroskopia a morfológia povrchu bola skúmaná na základe snímkov zo skenovacieho elektrónového mikroskopu. Merania boli uskutočnené na referenčných vzorkách a vzorkách opracovaných plazmou.

Kľúčové slová: TiO_2 nanovlákna, termálna kalcinácia, polyvinylpyrolidón, tetraisopropoxid titaničitý, plazma, DCSBD, FTIR, EDX, SEM

1 Úvod

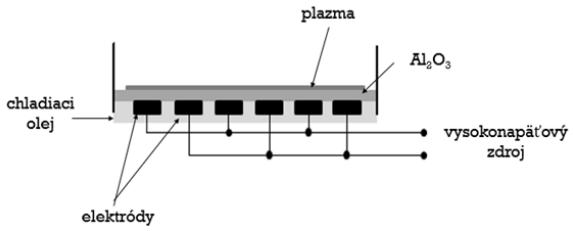
Štúdium nanoštruktúr oxidu titaničitého (TiO_2) prilákalo pozornosť viacerých výskumných skupín, vďaka výborným fotokatalytickým vlastnostiam tohto materiálu [Chen, X. et al., 2007]. Nanovlákna TiO_2 sa tiež vyznačujú veľkým špecifickým povrchom, čo zvyšuje efektívnosť ich využitia. Najčastejším spôsobom prípravy keramických nanovlákien je dvojkroková metóda pozostávajúca z elektrostatického zvlákňovania a následnej termálnej kalcinácie. Pri elektrostatickom zvlákňovaní dochádza k tvorbe vlákien s priemerom 10-100 nm, ktoré pozostávajú z nosného polyméru a anorganického prekurzora [Surovčík, J., 2018]. Nosný polymér slúži ako matrica a prekurzor ako donor kovu. V našej práci bol ako matrica použitý polyvinylpyrolidón (PVP) – (C_6H_9NO) a ako prekurzor tetraisopropoxid titaničitý (TTIP) - $(Ti\{OCH(CH_3)_2\}_4)$. Takto pripravené vlákna sú následne vystavené procesu termálnej kalcinácie. Pod termálnou kalcináciou rozumieme zahrievanie nanovlákien zložených z polyméru a prekurzoru na vysoké teploty (približne 1000°C) po dobu niekoľkých hodín. Pri tomto procese dochádza k odbúravaniu organického polyméru a vytvoreniu oxidu kovu, ktorý vďaka štruktúre matrice kryštalizuje vo forme vlákien. Nevýhodou termálnej kalcinácie je možné poškodenie vlákien a vysoké energetické a časové nároky procesu. Ako alternatíva sa naskytuje možnosť použitia nízkoteplotnej plazmy na predprípravu vlákien pred termálnou kalcináciou. Vďaka vysokej energii častíc je plazma schopná inicializovať chemické reakcie na povrchu vzoriek [Zahoranová, A. et al., 2016], ktoré majú za následok rozklad organickej časti a oxidáciu kovu. Cieľom tejto práce je štúdium vplyvu nízkoteplotnej plazmy na odbúravanie polyméru a organickej časti prekurzora. Medzi analytické metódy sme zaradili gravimetriu, fourierovskú infračervenú spektroskopiu (FTIR), rastrový elektrónový mikroskop (SEM) a energo-disperznú spektroskopiu (EDX).

2 Difúzny koplanárny povrchový bariérový výboj

Ako zdroj plazmy v našej práci bol použitý Difúzny koplanárny povrchový bariérový výboj (DCSBD). Výboj je tvorený elektródami na vysokom napätí, ktoré sa striedajú s uzemnenými elektródami (Obr. 1) [Černák, M. et al., 2004]. Na povrchu elektród je dielektrická vrstva tvorená oxidom hlinitým (Al_2O_3). Plazma má podobu rýchlo pohybujúcich sa mikrofilamentov v tvare písmena H. Ich hustota sa pri vyšších príkonoch zdroja zväčšuje a plazma nadobúda difúzny charakter. Výhodou DCSBD je schopnosť generovať plazmu vhodnú na šetrnú

* kerdik1@uniba.sk
† juraj.surovcik@fmph.uniba.sk
‡ veronika.medvecka@fmph.uniba.sk
§ Školiteľ

modifikáciu povrchov materiálov. Vysoká homogenita plazmy má taktiež za následok vysokú homogenitu opracovania vzoriek. Vďaka svojim výhodným vlastnostiam bol DCSBD použitý za účelom zlepšenia povrchových vlastností rôznych materiálov [Zahoranová, A. et al., 2014] [Tučeková, Z. et al., 2015] [Štěpánová, V. et al., 2015].

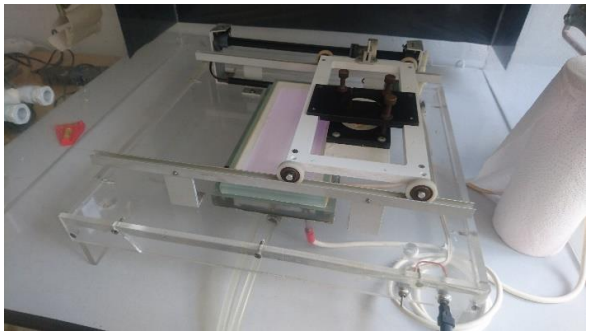


Obr. 1: Schéma DCSBD

3 Experiment

3.1 Opracovanie nanovlákien

DCSBD sme napájali zdrojom sínusového striedavého napätia s frekvenciou 15 kHz pri príkone 400 W. Nanovlákna boli v plazme opracované po dobu 1, 3, 5, 10, 30 min. Ako pracovný plyn bol použitý laboratórny vzduch. Pripravené vzorky boli prilepené na sklíčko, ktoré bolo následne umiestnené na pohyblivý vozík. Pohyblivý vozík bol použitý za účelom zabezpečenia stálej vzdialenosti vzoriek od povrchu výboja (Obr. 2). Taktiež bol možný pohyb vzoriek v horizontálnom smere za účelom lepšieho opracovania vzoriek. Vzdialenosť sklíčka od povrchu výboja bola nastavená na 0,8 mm.



Obr. 2: Priebeh opracovania nanovlákien s použitím pohyblivého vozíka

3.2 Gravimetria

Za účelom prvotného určenia možnej aplikácie plazmy pri výrobe keramických nanovlákien boli uskutočnené gravimetrické merania. Dôsledkom odbúravania nosného polyméru zo vzoriek pri opracovaní plazmou dochádza k hmotnostnému úbytku vzoriek. V našich meraniach sme najprv odvážili referenčné vzorky na váhach KERN ABT 220-4M, (Kern&Sohn GmbH, Germany). Následne sme vzorky opracovali v plazme 1 minútu a odvážili. Tie isté vzorky boli potom znova opracované plazmou ďalšie 2 minúty, čím sme dosiahli celkový čas opracovania 3 minúty. Podobne sme pokračovali aj pre zvyšné expozičné časy. Percentuálny hmotnostný úbytok sme následne získali zo vzťahu:

$$\chi(t) = \frac{m_0 - m(t)}{m_0} \cdot 100[\%]$$

kde $m(t)$ je hmotnosť opracovanej vzorky v jednotlivých expozičných časoch a m_0 je hmotnosť pôvodnej vzorky pred opracovaním. Merania boli uskutočnené na troch vzorkách a následne štatisticky vyhodnotené.

3.3 Fourierovská infračervená spektroskopia

Chemické väzby formované na povrchu skúmaných vzoriek počas opracovania plazmou boli skúmané pomocou infračervenej spektroskopie. Pracovali sme so spektrometrom Bruker Optics Vector 22 vybaveným prídavným zariadením PIKE MIRacle™. Ako ATR kryštál bol použitý diamant a ZnSe. Spektrum bolo merané v oblasti od 500 do 4000 cm^{-1} s rozlíšením 4 cm^{-1}. Počet skenov bol nastavený na 10. Spektrum bolo zmerané na troch miestach každej vzorky. Zmerané spektrum bolo následne vyhodnotené na základe literatúry zaoberajúcej sa problematikou [Medvecká, V. et al., 2018] [Starbova, K. et al., 2012].

3.4 Rastrový elektrónový mikroskop

Za účelom odhalenia zmien v topológii nanovlákien po opracovaní plazmou bol použitý elektrónový mikroskop. Snímky povrchu vlákien boli realizované na Oddelení tuhých látok (Fakulta matematiky fyziky a informatiky, Univerzita Komenského) a na Ústave fyzikálnej elektroniky (Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita). Pred meraním boli vzorky pokovené vrstvou zlata a paládia s hrúbkou 10 nm pri tlaku 1-10 mbar. Na nanesenie vrstvy bol použitý naprašovač Quorum Q150R-ES. Na snímanie povrchu nanovlákien bol použitý elektrónový mikroskop Mira 3 (TESCAN s.r.o., Česká republika). Urýchľovacie napätie bolo nastavené na 10 kV. Zväčšenie vzoriek bolo 1 kx a 10 kx.

3.5 Energo disperzná spektroskopia

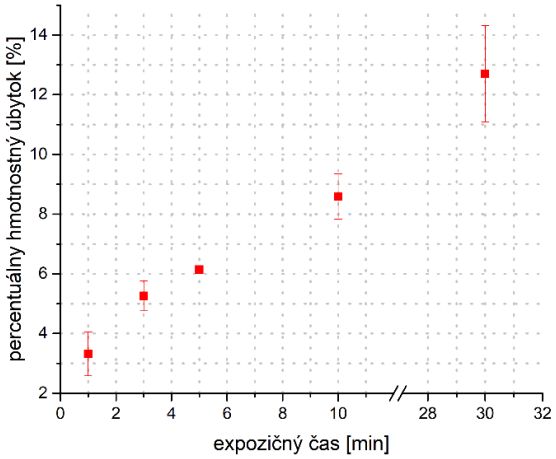
Bežnou súčasťou elektrónového mikroskopu býva detektor na meranie röntgenového spektra. Pomocou analýzy EDX spektier dokážeme pozorovať zmeny

v chemickom zložení nanovlákien pred a po opracovaní plazmou. Ako prídavný detektor elektrónového mikroskopu bol použitý X-MAX 50 (Oxford Instruments, Veľká Británia). Vrstva pokovenia, ktorá bola na povrch naprášená pred použitím elektrónového mikroskopu bola z EDX spektra odstránená dekonvolúciou. Meranie bolo uskutočnené na troch miestach vzorky a následne štatisticky spracované.

4 Výsledky

4.1 Gravimetria

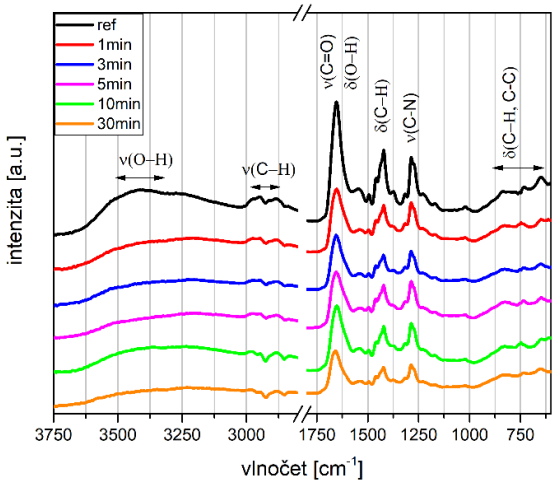
Na obrázku 3 môžeme s rastúcim expozičným časom pozorovať pokles hmotnosti nanovlákien. Úbytok hmotnosti bol pozorovaný už po prvej minúte opracovania. Po 30 minútach opracovania sme zaznamenali úbytok hmotnosti nanovlákien o 12,7% svojej pôvodnej hmotnosti. Pokles hmotnosti nanovlákien pri opracovaní plazmou je spôsobený odbúravaním organického materiálu.



Obr. 3: Graf závislosti percentuálneho hmotnostného úbytku od expozičného času

4.2 Fourierovská infračervená spektroskopia

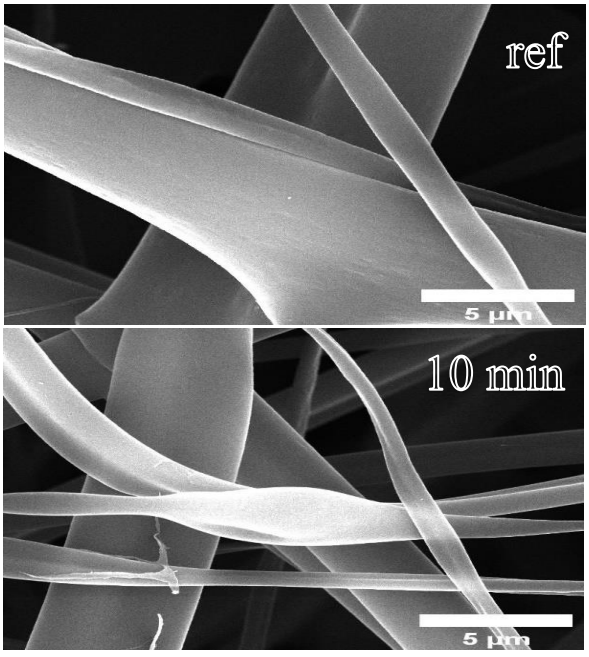
Na obrázku 4 je zobrazené infračervené spektrum nanovlákien pri daných expozičných časoch. Pozorované píky prislúchajú najmä väzbám, ktoré sa vyskytujú v organickom prekurzore PVP. Najvýraznejší pík v oblasti 1650 cm^{-1} zodpovedá valenčnej vibrácii charakteristickej karbonylovej skupiny ν(C=O). Široká oblasť v rozmedzí 3200-3500 cm^{-1} prislúcha vibráciám O-H väzby, ktoré sú prítomné v hydroxylových skupinách organických zlúčenín alebo vo vode. Stopy vody môžu byť vo vzorkách prítomné, keďže sa jedná o hygroskopické materiály schopné naviazať vlhkosť zo vzduchu. Intenzita týchto píkov je však v porovnaní s ostatnými prítomnými väzbami menšia čo by zodpovedalo nízkemu zastúpeniu naviazanej vody vo vláknach.

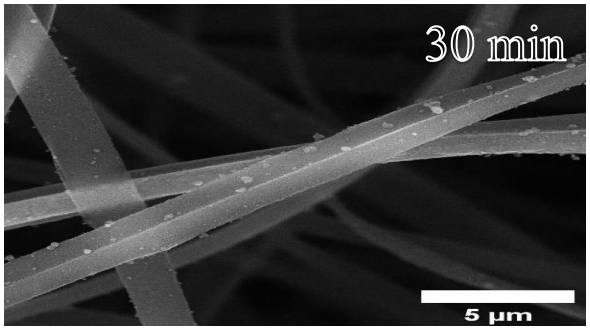


Obr. 4: Infračervené spektrum referenčných vzoriek a vzoriek opracovaných plazmou 1-30 min

4.3 Rastrový elektrónový mikroskop

Snímky z elektrónového mikroskopu sú znázornené na obrázku 5. S rastúcim expozičným časom sme pozorovali pokles v hrúbke nanovlákien. Tento pokles zodpovedá odbúravaniu organického materiálu a zhoduje sa s výsledkami z gravimetrie, ktoré poukazovali na pokles hmotnosti nanovlákien. Na povrchu vzoriek opracovaných 30 minút môžeme taktiež pozorovať formovanie nových častíc. Tieto častice môžu byť zodpovedné za zvýšenie špecifického povrchu nanovlákien. Veľký špecifický povrch je typickou vlastnosťou keramických nanovlákien, ktorá ich predurčuje pre mnohé aplikácie [Jirsák, O. et al. 2009].

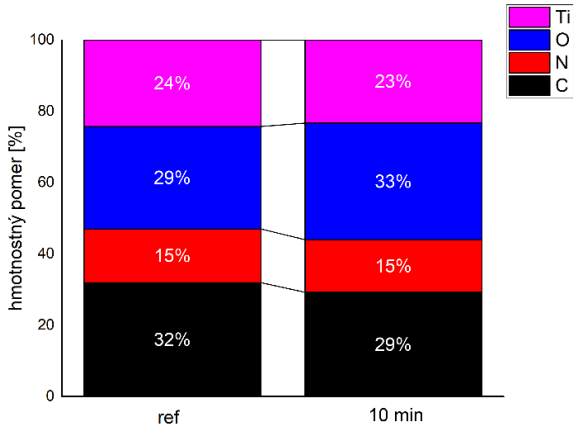




Obr. 5: Snímky referenčnej a plazmou opracovaných vzoriek pri zväčšení 10 kx

4.4 Energo-disperzná spektroskopia

Na obrázku 6 je znázornené percentuálne zastúpenie hmotností chemických prvkov zastúpených v referenčných vzorkách a vzorkách opracovaných v plazme 10 min. Pri opracovaných vzorkách bol pozorovaný pokles v percentuálnom zastúpení uhlíka kompenzovaný vyššou prítomnosťou kyslíka. Nárast kyslíka je zapríčinený oxidačným efektom plazmy. Pokles uhlíka nám opäť hovorí o odbúravaní organického polyméru účinkom plazmy, ako naznačujú aj výsledky gravimetrie a SEM analýzy. Tento pokles však nie je veľmi výrazný, čo je pravdepodobne spôsobené krátkym expozičným časom (10 min), pre ktorý boli výsledky zhotovené.



Obr. 6: Percentuálne zastúpenie chemických prvkov prítomných v referenčných nanovláknach a plazmou opracovaných nanovláknach

5 Záver

V práci bol študovaný vplyv nízkoteplotnej plazmy na nanovlákna TiO_2 za účelom zefektívnenia procesu ich výroby. Našim cieľom bolo preukázať vplyv plazmy na odbúravanie organického materiálu prítomného v matrici PVP a v organickej časti prekurzora TTIP. Výsledky gravimetrických meraní preukázali vplyv plazmy na úbytok hmotnosti opracovaných nanovlákien. Bližší pohľad v rámci SEM analýzy odhalil pokles v hrúbke nanovlákien ako aj formovanie nových častíc na ich povrchu, čo môže viesť k zvýšeniu špecifického povrchu pripravených nanovlákien. Zmeny v chemickom zložení, ktoré sme získali z EDX analýzy nám potvrdili, že dochádza k úbytku uhlíka a teda k odbúravaniu nosného polyméru. Infračervené spektrum referenčných a opracovaných vzoriek bolo tvorené píkmi prislúchajúcimi väzbám prítomných v PVP a TTIP, pričom nedochádzalo k výraznejším zmenám.

Poďakovanie

Moje poďakovanie patrí mojej školiteľke RNDr. Veronike Medveckej, PhD. za uvedenie do problematiky, pomoc pri experimentoch, konzultáciu výsledkov ako aj cenné rady pri písaní práce. Ďalej sa chcem poďakovať Mgr. Jurajovi Surovčíkovi za poskytnutie experimentálnych dát vzoriek vystavených termálnej kalcinácii a ich konzultáciu. Taktiež sa chcem poďakovať Ing. Pavlovi Ďurinovi, PhD. a RNDr. Zlate Tučekovej, PhD. za zhotovenie SEM a EDX analýzy. Prezentované výsledky vznikli vďaka podpore Vedeckej grantovej agentúry MŠVVaŠ SR a SAV (VEGA) v rámci projektu 1/0782/19: Štúdium plazmochemických procesov pri príprave anorganických nanovlákien metódou plazmou asistovanej kalcinácie.

Literatúra

[Chen, X. et al., 2007] Chen X., Mao S. S. (2007). Titanium Dioxide Nanomaterials: Synthesis, Properties, Modifications, and Applications“ *ChemInform*, 38(41).

[Surovčík, J., 2018] Surovčík J., (2018) Štúdium plazmou asistovanej kalcinácie kompozitných submikrónových vlákien. Diplomová práca, školiteľ: Medvecká V., Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Univerzita Komenského v Bratislave

[Zahoranová, A. et al., 2016] Zahoranová, A. et al., (2016). Effect of Cold Atmospheric Pressure Plasma on the Wheat Seedlings Vigor and on the Inactivation of Microorganisms on the Seeds Surface, *Plasma Chem Plasma Process*, pp.397–414

[Černák, M. et al., 2004] Černák, M. et al., (2004). Generation of Thin Surface Plasma Layers for Atmospheric-Pressure Surface Treatments, *Contrib.Plasma Phys.*, pp.492-495,

[Zahoranová, A. et al., 2014] Zahoranová, A. et al., (2014). Study of low temperature plasma treatment of plant seed, *In Hakone XIV Proccedings*, pp. 139-143,

[Tučeková, Z. et al., 2015] Tučeková, Z. et al., (2015). Parameters of Plasma Generated by Diffuse Coplanar Surface Barrier Discharge Used

for Inactivation of Escherichia Coli, *WDS'15 Proceedings of Contributed Papers — Physics*, pp.187-191

[Štěpánová, V. et al., 2015] Štěpánová, V., Slavíček, P., Stupavská, M., Jurmanová, J., & Černák, M. (2015). Surface chemical changes of atmospheric pressure plasma treated rabbit fibres important for felting process. *Applied Surface Science*, 355, 1037–1043

[Medvecká, V. et al., 2018] Medvecká V., Kováčik D., Zahoranová A., Černák M., (2018). Atmospheric pressure plasma assisted calcination by the preparation of TiO 2 fibers in submicron scale, *Applied Surface Science*, 428,

[Starbova, K. et al., 2012] K. Starbova, D. Petrov, N. Starbov, V. Lovchinov. Synthesis of supported fibrous nanoceramics via electrospinning. *Ceram. Int*. 38 (2012) 4645–4651.

[Jirsák, O. et al., 2009] Jirsák O., Dao T. A. (2009). Production, Properties and End-Uses of Nanofibres *Nanotechnology in Construction 3, 95–99*

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 226–230
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Marek Pavle, Miroslav Zahoran

Simulácia reflektrónového prieletového hmotnostného spektrometra

Marek Pavle[1*]
Školiteľ: Miroslav Zahoran[1†]
[1]Katedra experimentálnej fyziky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstrakt: Pomocou simulovaného reflektrónového prieletového hmotnostného spektrometra v programe TOFMS2 sme skúmali závislosť hmotnostného rozlíšenia od týchto parametrov: rozmery vstupného otvoru, termická energia iónov, vstupná energia iónov, potenciál urýchľujúcej elektródy, potenciál akceleračnej elektródy, potenciál reflektrónovej elektródy a hmotnosť iónov. Skúmali sme aj vplyv počtu iónov a rozmerov vstupného otvoru na veľkosť náhodných fluktuácií výsledkov dopadu iónov na detektor pri čo najoptimálnejších parametroch. Cieľom bolo dosiahnutie čo najlepšieho hmotnostného rozlíšenia skúmaného iónu.

Pre ióny dusíka za príslušných vhodných parametrov sme zistili interval hodnôt vstupnej energie iónov s vysokým hmotnostným rozlíšením s následným strmým spádom hmotnostného rozlíšenia. Interval hodnôt alebo hodnotu s vysokým hmotnostným rozlíšením sme zistili aj v závislosti od zvyšných vstupných parametrov s príslušnými optimálnymi parametrami.

Kľúčové slová: hmotnostný spektrometer, hmotnostné rozlíšenie, maximálny zhluk iónov, parametre gaussovského fitu, parametre spektrometra, stabilita hmotnostného rozlíšenia

1 Úvod

Hmotnostná spektrometria sa zaoberá identifikáciou skúmanej zionizovanej vzorky cez polohu a výšku píkov po dopade iónov na detektor po ich prelete spektrometrom, konkrétne sa zaoberáme reflektrónovým prieletovým hmotnostným spektrometrom. Toto zariadenie využíva rozdiely potenciálov medzi elektródami, podľa ktorých sa delí na tri časti: extrakčná, driftová, reflektrónová a detektorová. V extrakčnej časti sú ióny urýchľované, v driftovej časti sa vplyvom nulovej elektrickej intenzity pohybujú konštantnou rýchlosťou a pri vstupe do reflektrónovej časti sú spomaľované až do stočenia sa do opačného smeru, kedy sú opäť urýchľované až po vstup do driftovej časti. Bezrozmerná miera spoľahlivosti identifikácie skúmanej vzorky sa nazýva hmotnostné rozlíšenie. Skúmame premenlivosť hmotnostného rozlíšenia v závislosti od parametrov nastrelených iónov a spektrometra: veľkosť vstupného otvoru, počet iónov, termickej energie iónov, vstupnej energie iónov, potenciálu urýchľujúcej elektródy, potenciálu extrakčnej elektródy, potenciálu reflektrónovej elektródy a hmotnosti iónov.
Na orientačné určenie intervalu s vysokým hmotnostným rozlíšením pri optimálnych parametroch sledujeme závislosť počtu na detektor dopadajúcich iónov v maximálnom zhluku od každého z ôsmych vymenovaných parametrov. Počty na detektor dopadajúcich iónov zaznamenávame v 3ns intervaloch. Na simulovanie prieletu nastrelených iónov celým reflektrónovým prieletovým hmotnostným spektrometrom využívame softvér zvaný TOFMS2. Zoznam všetkých vstupných parametrov, postup využitia softvéru TOFMS2 aj s ukladaním výpočtov a stručná analýza štruktúry spektrometra sú uvedené v kapitole Prílohy v podkapitolách Príloha 1, Príloha 2, Príloha 3, Príloha 4.[Marek Pavle, 2021]

2 Teoretický základ

Postup zostrojenia gaussovského fitu v programe zvanom Mathcate je uvedený v kapitole Prílohy v podkapitole Príloha 5. Z tohto postupu získame tri parametre zostrojenej gaussovskej krivky: gaussovská stredná hodnota, gaussovská smerodajná odchýlka, maximum gaussovskej krivky.
Na výpočet hmotnostného rozlíšenia potrebujeme poznať iba smerodajnú odchýlku gaussovského fitu na výpočet gaussovskej strednej šírky v polovici maxima, t.j. *FWHM*. *FWHM* odvodíme z podmienky polovičnej hodnoty maxima gaussovskej funkcie[Marek Pavle, 2021]:

$$\frac{B}{2\sigma\sqrt{2\pi}} = \frac{B}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \qquad (2.1).$$

Nech μ je stredná hodnota gaussovského rozdelenia pre čas, σ je smerodajná odchýlka gaussovského rozdelenia čas, B je normovacia konštanta gaussovského rozdelenia.
$(x-\mu) = \pm\, \sigma\sqrt{2\ln(2)}$, a to znamená, že:

$$FWHM = 2\,\sigma\sqrt{2\ln(2)} \qquad (2.2).$$

Vzťah na výpočet hmotnostného rozlíšenia je[Cotter, 1997]:

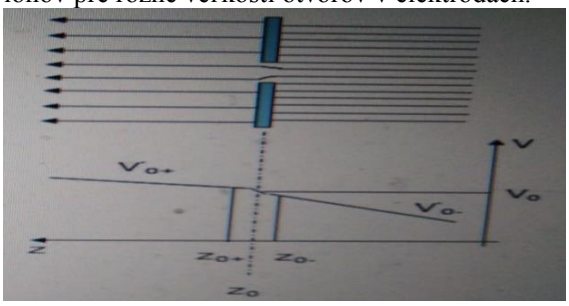
$$\frac{m}{\Delta m} = \frac{\mu}{2\Delta\mu} \qquad (2.3).$$

*marpavle@gmail.com
†miroslav.zahoran@fmph.uniba.sk

$\Delta\mu$=*FWHM* dosadíme do vzťahu (2.3), ktorý takto prejde na vzťah[Marek Pavle, 2021], [Cotter, 1997]:

$$\frac{\mu}{2\Delta\mu} = \frac{\mu}{4\sigma\sqrt{2\ln(2)}} \qquad (2.4).$$

μ je gaussovská stredná hodnota času dopadov identických iónov na detektor vzhľadom na detektorom zaznamenávaný minimálny časový interval, napríklad 3ns. $\Delta\mu$ je priemerný gaussovský rozptyl času dopadov identických iónov na detektor vzhľadom na detektorom zaznamenávaný minimálny časový interval, napríklad 3ns.
Zo vzťahu (2.1) je vidno, že smerodajná odchýlka σ časového rozptylu na detektor dopadajúcich identických iónov je nepriamo úmerná amplitúde gaussovského rozdelenia. Z toho vyplýva, že σ pre čas je v prípade vysokých hmotnostných rozlíšení prakticky nepriamo úmerná počtu identických iónov v maximálnom zhluku.
Náhodné fluktuácie presných polôh nastrelených iónov vo vstupnom otvore extrakčnej časti zvanom BunchBox spôsobujú, že pri opakovaných meraniách pri tých istých parametroch nedostávame dokonale zhodné výsledky časového priebehu dopadov iónov na detektor. Na zredukovanie vplyvu týchto náhodných fluktuácií sa počíta aritmetický priemer dostatočného množstva opakujúcich sa meraní počtu identických iónov v maximálnom zhluku.
Zvolením minimálnych rozmerov BunchBox spolu s vyšším počtom iónov zabezpečíme minimálnu veľkosť náhodných fluktuácií identických meraní, t.j. zvýšime stabilitu meraní kvôli menším vzájomným dráhovým oneskoreniam.
Na dráhový rozptyl identických iónov vo všetkých smeroch má ďalej vplyv aj ich termická energia. Podľa logickej hypotézy od veľkosti termickej energie iónov závisí aj veľkosť ich priestorového rozmazania vplyvom nehomogenity elektrického poľa od otvorov elektród, cez ktoré tieto ióny prechádzajú. Vplyv tejto nehomogenity na rozptyl iónového zväzku, ktorá má spolu s termickou energiou vplyv na pokles vysokého hmotnostného rozlíšenia, si vysvetlíme pomocou nasledovného obrázku. Tento vplyv termickej energie iónov by bolo treba overiť pre istý interval termickej energie iónov pre rôzne veľkosti otvorov v elektródach.



Obr.č.1: Schéma závislosti potenciálu od z-ovej polohy pre elektródu s otvorom a jej okolím, pričom napravo od otvoru elektródy je oblasť s vyššou elektrickou intenzitou, naľavo od otvoru elektródy je oblasť s nižšou elektrickou intenzitou.

Na Obr.č.1 je vyznačená srtmosť zmeny potenciálu V v závislosti od polohy z čo je inými slovami elektrická intenzita. V'_{0^+} je elektrická intenzita naľavo od elektródy a je prakticky konštantná. V'_{0^-} je elektrická intenzita napravo od elektródy a je prakticky konštantná. Iba v otvore elektródy a jej tesnom okolí v intervale od z_{0^-} po z_{0^+} sa elektrická intenzita nezanedbateľne mení v závislosti od okamžitej polohy z.
Časový rozptyl iónu v otvore elektródy vzhľadom na vertikálny, t.j. longitudálny smer je popísateľný takouto pohybovou diferenciálnou rovnicou[4]:

$$m\frac{d^2r}{dt^2} = \frac{1}{2}q\frac{d^2V}{dz^2}r \qquad (2.5).$$

Z tejto rovnice je vidno, že zrýchlenie rozptylu iónového zväzku v radiálnom smere r počas prechodu cez otvor elektródy závisí od zmeny elektrickej intenzity v transverzálnom smere z iónového zväzku počas jeho prieletu cez otvor elektródy. [Dahl P., 1973]
Aby boli ióny počas prieletu reflektrónovým prieletovým hmotnostným spektrometrom správne nasmerované na detektor musia byť do extrakčnej časti cez vstupný otvor BunchBox nastrelené správnou vstupnou energiou v smere rovnobežnom z výškou elektród, tzv. longitudálnou energiou. Extrakčná a detektorová časť sú vzájomne od seba oddelené dvoma tieniacimi elektródami.[Marek Pavle, 2021]
Podľa logickej hypotézy do určitej hodnoty longitudálnej energie je elektrická príťažlivosť tieniacej elektródy na nastrelené ióny zanedbateľne malá až počnúc určitou hodnotou longitudálnej energie sa časť iónov priblíži ku tieniacej elektróde do takej vzdialenosti, kedy vplyvom tejto elektrickej príťažlivosti dochádza ku zvyšovaniu vzájomných dráhových oneskorení identických iónov, čo má vplyv na pokles hmotnostného rozlíšenia. Pri ďalšom zvyšovaní longitudálnej energie sa počet na detektor dopadajúcich iónov prakticky zastabilizuje, lebo na nastrelený ión sa okrem extrakčných elektród a tieniacich elektród začne prejavovať aj pôsobenie ostatných blízkych elektród. To platí až do určitej hodnoty, pri ktorej by bol nastrelený ión zachytený jednou z týchto elektród. Pri veľmi vysokej longitudálnej energií by bol ión zachytený tieniacou elektródou. Majme dve skupiny iónov s rôznou hmotnosťou a meranie s vysokým hmotnostným rozlíšením ľahších iónov. Na dosiahnutie podobne vysokého hmotnostného

rozlíšenia pre ťažšie ióny potrebujeme týmto iónom dodať vyššiu kinetickú energiu v transverzálnom smere na dosiahnutie podobne veľkej rýchlosti. Pri ich súčasnom nastrelení je obom skupinám iónov dodaná rovnaká kinetická energia od rozdielu potenciálov medzi elektródami spektrometra, ale kvôli rôznym rýchlostiam ich prieletu spektrometrom sa líšia ich hmotnostné rozlíšenia po ich dopade na detektor. Preto prakticky rovnaké hmotnostné rozlíšenie pre ťažšie ióny dosiahneme pri vyššej hodnote urýchľujúceho potenciálu kvôli vyrovnaniu ich rýchlosti s rýchlosťami ľahších iónov pri menšej hodnote urýchľujúceho potenciálu. Pomocou rozdielu potenciálov medzi urýchľujúcou elektródou a extrakčnými elektródami identickéióny s rôznou rýchlosťou vzhľadom na transverzálny smer sfokusujeme do jednej roviny, v ktorej pomalšie identické ióny dobehnú tie rýchlejšie. V závislosti od zmeny potenciálu druhej extrakčnej g-mriežky dosiahneme rôzne strmosti zmeny počtu identických iónov v maximálnom zhluku pre dve rôzne hmotnosti, čo pri optimálnych parametroch súvisí s rozdielnymi zmenami ich rýchlostí. V reflektrónovej časti identické ióny s rôznou kinetickou energiou energeticky nafokusujeme na tú istú hodnotu nulovej kinetickej energie v mieste ich stočenia sa do opačného smeru, kedy je ich okamžitá rýchlosť nulová. Ióny s rôznou hmotnosťou majú rôznu veľkosť rozptylu rýchlostí a s tým súvisiacu aj rôznu veľkosť hmotnostného rozlíšenia.

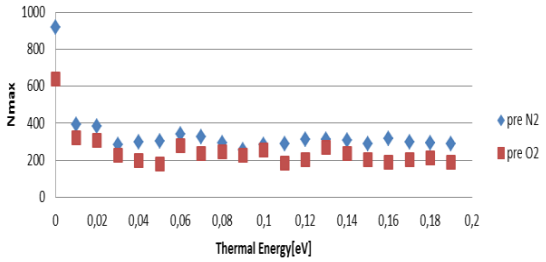
Pri optimálnych parametroch sa to napríklad prejavuje rôzne prudkými zmenami počtu identických iónov v maximálnom zhluku pre oba ióny.

Majme za sebou idúce nezávislé merania, pričom pri kažkom ďalšom meraní pri tých istých parametroch do spektrometra nastrelíme rovnaký počet iónov, ktoré sú o jednu atómovú hmotnostnú jednotku ťažšie v porovnaní s iónmi z predošlého merania. Nech prvá skupina meraní je pre ľahšie ióny a ďalšia skupina meraní je pre ťažšie ióny. Pri menení ľahších iónov dochádza ku prudším zmenám počtu identických iónov v maximálnom zhluku ako dôsledok prudších zmien hmotnostného rozlíšenia z dôvodu vyššieho pomeru rýchlosti predošlého iónu v porovnaní s rýchlosťou aktuálneho iónu.

3 Výsledky a diskusia

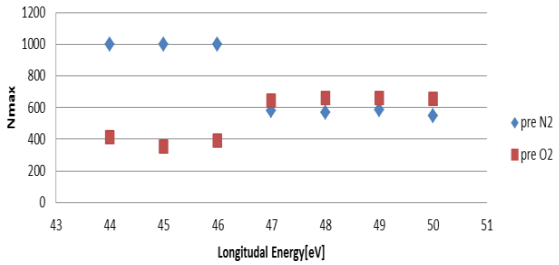
Pri všetkých výsledkoch sme riešili iba ióny N_2 a O_2.

Fluktuácie polôh iónov ovplyvňujú veľkosť hmotnostného rozlíšenia po ich dopade na detektor. Vyššiu stabilitu výsledkov hmotnostného rozlíšenia dostávame v súlade s teóriou pri vyššom počte nastrelených iónov, čo vidno z porovnania percentuálnych chýb meraní počtu iónov v maximálnom zhluku pre 300 iónov a pre 1000 iónov pre ióny N_2 a O_2. Percentuálna chyba bola rátaná ako podiel smerodajnej odchýlky a aritmetického priemeru 10 meraní počtu iónov v maximálnom zhluku. Percentuálna chyba merania počtu iónov v maximálnom zhluku pri 10 meraniach pri tých istých parametroch vyšla 5,95% pre 300 iónov N_2, 23,39% pre 300 iónov O_2, 0,73% pre 1000 iónovN_2, 1,76% pre 1000 iónov O_2.



Obr.č.2: Závislosť maximálneho zhluku dopadajúcich iónov od teploty iónov. Výpočet bol robený pri parametroch BunchBox[0,01;0,01;0,01]; AC Plate=735,6V;AC_G_FRAME_2=-975V;RF_G_FRAME_2=-1000V; pre1000 iónov; krok po 0,1V.

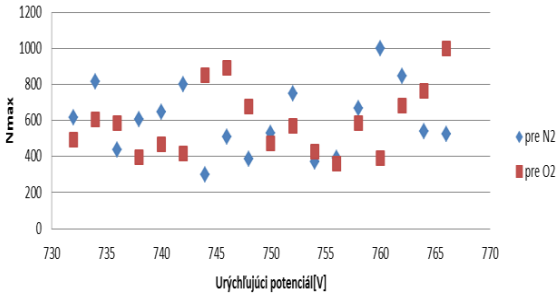
Podľa Obr.2 fluktuácie spôsobené tepelným kmitom iónov sa pri vybraných parametroch prejavujú na výraznom poklese hmotnostného rozlíšenia už pri tepelnej energii 0,01eV≈116,09K.



Obr.č.3: Závislosť maximálneho zhluku na detektor dopadajúcich iónov od počiatočnej longitudálnej energie nastrelených iónov v eV. Výpočet bol robený pri parametroch BunchBox(0.01,0.01,0.01); Thermal Energy=0eV; AC Plate=760V; AC_G_FRAME_2= 900V; RF_G_FRAME_2=-1000V; pre 1000 iónov; krok po 2eV.

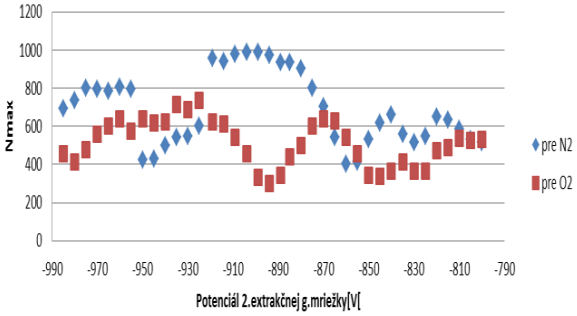
Podľa Obr.č.3 do určitej hodnoty vstupnej energie iónov je elektrická príťažlivosť medzi tieniacou platňou a nastrelenými iónmi zanedbateľne malá, ale podľa logickej hypotézy počnúc určitým úzkym intervalom hodnôt longitudálnej energie vplyv tieniacej platne prestáva byť zanedbateľne malý a dochádza ku strmému poklesu hmotnostného rozlíšenia. Táto hypotéza zatiaľ nebola výpočtami

preukázaná, preto ju navrhujem overiť pri menení potenciálov tieniacich elektród.



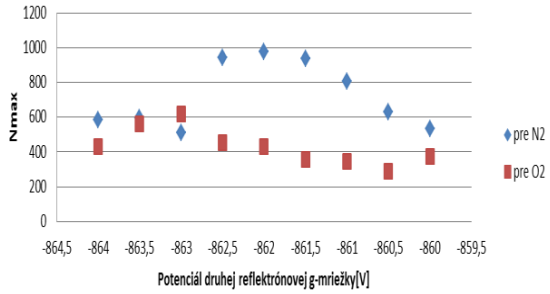
Obr.č.4: Závislosť maximálneho zhluku na detektor dopadajúcich iónov od urýchľujúceho potenciálu. Výpočet bol robený pri parametroch BunchBox[0.01,0.01,0.01]; AC_G_FRAME_2=-900V; RF_G_FRAME_2=-1000V; Thermal Energy=0eV; 1000 častíc; krok po 2V.

Podľa Obr.č.4 na dosiahnutie podobne vysokého hmotnostného rozlíšenia potrebujeme ťažším iónom dodať vyššiu kinetickú energiu zvýšením urýchľujúceho potenciálu.



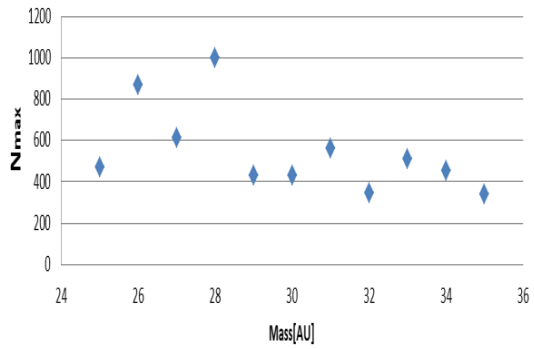
Obr.č.5: Závislosť maximálneho zhluku dopadajúcich iónov od potenciálu druhej extrakčnej g-mriežky. Výpočet bol robený pri parametrov BunchBox (0.01,0.01,0.01); AC Plate=760V; RF_G_FRAME_2=-862V; Thermal Energy=0eV; pre1000 iónov; kroky 5V a 6V.

Podľa Obr.č.5 pri vybraných parametroch pre ľahšie ióny máme strmšie zmeny počtu iónov v maximálnom zhluku v závislosti od zmeny potenciálu extrakčnej elektródy v porovnaní s ťažšími iónmi kvôli vyšším zmenám priemerného dráhového oneskorenia u ľahších iónov.



Obr.č.6: Závislosť maximálneho zhluku dopadajúcich iónov od potenciálu druhej reflektrónovej g-mriežky RF_G_FRAME_2. Výpočet bol robený pri parametroch BunchBox(0.01,0.01,0.01); AC Plate=760V; AC_G_FRAME_2=-904V; 1000 častíc; Thermal Energy=0eV;krok po 0,5V.

Pri vybraných parametroch v 4-voltovom intervale hodnôt potenciálu reflektrónovej elektródy pozorujeme prejav vyššej fluktuácie hmotnostného rozlíšenia v závislosti od zmeny potenciálu reflektrónovej elektródy kvôli vyššiemu rozmazaniu kinetickej energie ľahších iónov.



Obr.č.7: Závislosť maximálneho zhluku dopadajúcich iónov od ich hmotnosti prvej grupy iónov, pričom, ióny druhej grupy majú hmotnosť 32AU(teda ióny O_2). Výpočet bol robený pri parametroch BunchBox(0.01,0.01,0.01); Thermal Energy=0eV ; AC Plate=760V; AC_G_FRAME_2=-900V; 1000 častíc; krok po 1AU.

Pri menení ľahších iónov po hmotnosti 1AU v intervale od 25AU do 29AU sa prejavujú vyššie zmeny hmotnostného rozlíšenia v porovnaní s menením ťažších iónov po hmotnosti 1AU v intervale od 30AU do 35AU, lebo pri takomto menení je u ľahších iónov väčší podiel rýchlosti predošlého iónu ku rýchlosti aktuálneho iónu.

4 Záver

Teoreticky sme sa zoznámili so vzťahom na výpočet spoľahlivosti identifikácie skúmanej vzorky cez parametre gaussovského fitu, a to hmotnostného rozlíšenia.
Zaoberali sme sa aj minimalizáciou náhodných fluktuácií hmotnostného rozlíšenia nastavením minimálnych rozmerov vstupného otvoru a nastrelením dostatočného počtu identických iónov.
Na určenie intervalu s vysokým hmotnostným rozlíšením sme skúmali závislosť počtu iónov v maximálnom zhluku od 7 parametrov: veľkosti vstupného otvoru, počet iónov, termickej energie iónov, vstupnej energie iónov, potenciálu urýchľujúcej elektródy, potenciálu extrakčnej elektródy, potenciálu reflektrónovej elektródy a hmotnosti iónov.
Motiváciou ďalšieho výskumu meraní s vysokým hmotnostným rozlíšením sú merania s dostatočne malou termickou energiou iónov rôznou od nuly pri optimálnych parametroch, pri ktorých vyšli zatiaľ najvyššie namerané hmotnostné rozlíšenia pri nulovej termickej energii simulovaných iónov. Túto korekciu hmotnostného rozlíšenia dodaním malej hodnoty termickej energie bude potrebné vykonať nato, aby sme na základe simulovaných meraní mohli vykonať reálny experiment so skutočnými iónmi a reflektrónovým prieletovým hmotnostným spektrometrom, kedy nulová termická energia iónov je nefyzikálny prípad.
Pri ďalších meraniach navrhujem aj overiť vplyv veľkosti otvorov v elektródach a hodnoty longitudálnej energie na veľkosť a stabilitu hmotnostného rozlíšenia.

Poďakovanie

Chcel by som sa poďakovať svojmu školiteľovi doc. RNDr. Miroslavovi Zahoranovi Csc. za cenné pripomienky pred odovzdaním mojej práce.
Hlavne by som chcel poďakovať profesorovi Branislavovi Radjenovicovi za to, že môžem využívať jeho softvér TOFMS2 na simuláciu prieletu iónov v reflektrónovom hmotnostnom spektrometri. Rovnako by som chcel poďakovať aj prof. RNDr. Štefanovi Matejčíkovi, DrSc. zato, že na jeho notebooku môžem používať softvér TOFMS2 od profesora Branislava Radjenovica.
Autor ďakuje za finančnú podporu projektom APVV-19-038: „Iónové a elektrónové procesy pre pokročilé spektrometrické metódy“ a VEGA 1/0489/21 „Štúdium excitačných zrážok elektrónov s molekulami astrofyzikálneho významu".

Literatúra

[Marek Pavle, 2021] Marek Pavle (2021). Optimalizácia reflektrónového prieletového hmotnostného spektrometra. Diplomová práca, to be published.
[Cotter, 1997] Cotter, Robert J. (1997). Time of Flight Mass Spectrosmetry – Instrumentation and Application in Biological Research, (ACS Professional Reference Books, Washington, DC).
[Dahl P., 1973] Dahl P. (1973). Introduction to Electron and Ion Optics, (Academia Press, London).

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 231–241
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Michal Damek, Mário Janda

Modelovanie plazmochemických procesov v prechodovej iskre

Michal Damek[1] Mário Janda[2]

[1] Katedra jadrovej fyziky a biofyziky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava
[2] Katedra astronómie, fyziky zeme a meteorológie, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

1 Abstrakt

Predmetom našej práce bolo štúdium sekundárneho streamera metódou počítačového modelovania, ktoré pozostávalo z modifikácie vyvíjaného softvéru, následnom vykonaní dvanástich výpočtov a ich fyzikálnej interpretácie.

Prechodová iskra, podobne ako ostatné plazmochemické výboje, je študovaná primárne experimentálnymi metódami pozorovania. Ďalej sú však vyvíjané teoretické metódy pre štúdium tohto deja, ktoré spočívajú v počítačovom modelovaní. Nami používaná metóda spočíva v 0D modeli, vo voľne dostupnom softvéri ZDPlaskin,[1] ktorý sa používa na sledovanie časového vývinu koncentrácii v závislosti od počiatočných podmienok v podobe koncentrácie plynov, pričom neberie do úvahy priestorové rozloženie plazmy.

Prvá časť našej práce spočívala v úprave programu využívajúcemu tento softvér tak, aby mohol byť pri jednom spustení použitý pre viacero výpočtov v porovnaní s dovtedajším stavom, keď mohol byť použitý len pre jeden výpočet prislúchajúci jednému jeho spusteniu. Na splnenie tohto cieľa sme si museli naštudovať základy jazyka Fortran90, v ktorom je používaný softvér napísaný, ale aj základy jazyka Bash, pre prekonanie technických komplikácii s násobným spustením programu, ktoré budú spomenuté neskôr.

Druhá časť našej práce spočívala vo vykonaní sérii výpočtov s rôznymi hodnotami parametrov, o ktorých sa predpokladá, že hrajú dôležitú úlohu v sekundárnom streameri a vo vyhodnotení týchto výpočtov pre päť druhov častíc. Tieto častice sú voľné elektróny, ktoré inicializujú primárne plazmochemické reakcie, $N_2(C)$, ktorých prechod do nižšieho stavu spôsobuje žiarivú vlnu, prostredníctvom ktorej pozorujeme sekundárny streamer a troch častíc, ktoré sú spoluzodpovedné za antimikrobiálne vlastnosti plazmy: častice atomárneho kyslíku, atomárneho dusíku a ozónu.

1 michal.damek7@gmail.com
2 Mario.Janda@fmph.uniba.sk
2 školiteľ

2 Popis modelu

2.1 Priebeh redukovaného elektrického poľa

Plazmochemické reakcie inicializované elektrónmi sú v plazme riadené veľkosťou redukovaného elektrického poľa E/N. Každý výpočet sa začínal s konštantnou hodnotou redukovaného elektrického poľa $E/N(0) = 60$ Td. Táto fáza trvala 20 ns. Nasledujúci nárast E/N predstavoval primárny streamer. Nábehová hrana primárneho streamera t_H trvala 15 ns a redukované elektrické pole sa zastavilo v čase $t_{max} = 35$ ns na maximálnej hodnote $E/N_{max} = 280$ Td. Priebeh nábehovej hrany bol určený funkciou[9]:

$$E/N(t) = E/N(0) + l_t \frac{E/N_{max} - E/N(0)}{t_H - t + l_t}, \quad (1.)$$

kde parameter $l_t = 1.5$ ns určuje mieru rastu tejto funkcie. Následne nastal prudký pokles E/N na minimálnu hodnotu $E/N_{min} = 40$ Td, ktorý trval 2 ns. Priebeh relaxácie E/N(t) bol určený funkciou:

$$E/N(t) = E/N_{min} + (E/N_{max} - E/N_{min}) \exp[-2 l_t (t - t_H)]. \quad (2.)$$

Po prudkom poklese E/N na hodnotu 40 Td bola táto hodnota držaná po dobu 25 ns, alebo 60 ns (parameter t_1). Po ubehnutí doby určenej parametrom t_1 nastal lineárny nárast E/N, ktorý predstavoval nábehovú hranu sekundárneho streamera. Dĺžka času nábehovej hrany sekundárneho streamera bola 2 ns, alebo 5 ns (parameter t_2). Počas tejto doby narástlo E/N na hodnotu 80 Td, 90 Td, alebo 99 Td. Po ubehnutí nábehovej hrany sekundárneho streamera nastala fáza, počas ktorej bolo E/N držané na konštantnej hodnote rovnej E/N_{se} po dobu 50 ns, až do konca

jednotlivých simulácií.

V našej práci sme nemenili parametre primárneho streamera, ktorého priebeh bol daný funkciou popísanou rovnicami (1.) a (2.). Cieľom našej práce bolo modelovať plazmochemické výpočty pre rôzne doby trvania oneskorenia sekundárneho streamera za primárnym (25 ns, alebo 60 ns), doby trvania nábehovej hrany sekundárneho streamera (2 ns, alebo 5 ns) a pre rôzne maximálne hodnoty E/N počas sekundárneho streamera (80, 90, alebo 99 Td). Celkovo sme spravili 12 výpočtov, po jednom pre každú možnú kombináciu týchto parametrov.

Cieľom práce však neboli len samotné výpočty, ale aj spôsob ich dosiahnutia. Limitácia verzie modelu z ktorého sme vychádzali spočívala v skutočnosti, že počas jedného spustenia bolo možné urobiť iba jeden výpočet. Pred manuálnym spustením druhého výpočtu bolo nutné editovať konfiguračné súbory so vstupnými parametrami a po výpočte presunúť, alebo premenovať výstupné súbory. Táto vlastnosť softvéru spôsobuje limitáciu jeho využitia pri viacerých výpočtoch, s viacerými parametrami. Z hľadiska zvýšenia efektívnosti práce do budúcnosti bolo cieľom prerobiť model tak, aby umožnil automatizované spúšťanie veľkej sady výpočtov s viacerými menenými vstupnými parametrami. Pre vyriešenie s týchto problémov sme sa najskôr snažili modifikovať samotný zdrojový kód modelu, písaný v jazyku Fortran 90, ďalej spomínaný pod skratkou F90. Od tohto riešenia sme nakoniec upustili hlavne z toho dôvodu, že pri pokuse po vykonanie viacerých výpočtov nám skript nešiel skompilovať, pričom hlásil obrovské množstvo chýb – cez sto. Program ZDPlaskin používa predpripravenú knižnicu s predpripravenými funkciami a preto by bolo časovo náročné iba len skontrolovať, či jednotlivé funkcie po vykonaní svojich úloh znova nastavia jednotlivé globálne a lokálne premenné do stavu pred vykonaním výpočtu. Tento pokus sme uzavreli s hypotézou, že jednotlivé funkcie nie sú navrhnuté tak, aby boli násobne použité počas jedného zbehnutia skriptu.
Preto sme sa rozhodli pre riešenie, ktoré spočívalo vo vytvorení externého skriptu, ktorý mal spustiť používaný výpočtový program, vložiť doň vstupné parametre, vypnúť program po úspešnom priebehu výpočtov a uložiť výstupné dáta na miesto, v ktorom by sa predišlo ich prepísaniu opätovným spustením výpočtu s ďalšími parametrami. Tento postup vyhovoval aj našej hypotéze o pôvode chýb pri pokuse o viacnásobné počítanie so softvérom ZDPlaskin, pretože keď sa softvér vypol po vykonaní každého skriptu, nedošlo ku násobnému používaniu predovšetkým funkcii inicializujúcich výpočty.

2.2 Zdrojový kód v jazyku Fortran90

Na modelovanie využívame voľne dostupnú sadu rutín na plazmochemické modelovanie s názvom ZDPlasKin.[10] Napísané sú v jazyku Fortran90. Viac podrobností o spôsobe ich použitia možno nájsť na stránke projektu (http://http://www.zdplaskin.laplace.univ-tlse.fr/). Nutnou podmienkou praktického využitia je doplnenie o modul, ktorý popisuje modelovaný problém (časové priebehy elektrických polí, …). V našom prípade sa zdrojový kód obsahujúci tieto primárne inštrukcie nazýval „reaction_N2O2.F90“, ďalej spomínaný pod skratkou „*reF*.“ Tento kód bol na KAFZM FMFI UK vyvíjaný približne od roku 2016.[9, 12] Celý zdrojový kód modulu *reF* je uvedený v bakalárskej práci v prílohe 7.2 a vykonané úpravy sú farebne zvýraznené.
Ako už bolo spomenuté, pôvodne sme sa snažili prepísať samotný kód modelu (*reF*) napísaný v programovacom jazyku Fortran90. Ale aj pre potreby riešenia s externým skriptom bolo potrebné urobiť úpravu kódu *reF* v jazyku Fortran90. Táto úprava primárne spočívala v naprogramovaní kódu tak, aby sa “vedel opýtať” externého súboru na sadu parametrov, ktoré majú vystupovať v jednotlivých výpočtoch. Spočiatku sme sa snažili vytvoriť externý skript, ktorý by spustil program *reF* a následne mu po vydaní signálu týmto programom nadiktoval potrebné parametre. Problém však nastal v skutočnosti, že po spustení programu *reF* sa čítanie externého skriptu zastavilo až do momentu, kým neprebehli všetky inštrukcie tohto spusteného programu.

Preto finálne riešenie spočívalo vo vytvorení skriptu, ktorý pripraví tabuľku s inštrukciami, v poradí koľké hodnoty parametrov v jednotlivých tabuľkách si má program načítať, spustí program *reF*, po prebehnutí programu zruší tabuľku s inštrukciami, exportuje tabuľky s výsledkami, pretože by boli prepísané programom *reF* po nasledujúcom spustení a postup opakuje až do prebehnutia všetkých požadovaných výpočtov programu *reF*.

Preto sme ako prvý krok museli vytvoriť

nové premenné pre E/N_{se}, t_1 a t_2, ktoré sme dosadili na miesta, kde sa mali podieľať na výpočtoch. Príkladom takýchto miest bol cyklus na určenie doby konštantnej hodnoty E/N:

```
do g = 0, ftimep          !konstantne dolne el
```

Význam viacerých nami vytvorených riadkov spočíval v overení priebehu výpočtu, pričom tieto riadky neboli vo finálnej podobe programu zmazané. Medzi takéto príkazy patrí: write(*,*) "line16"; write(*,*) "line17"; write(*,*) "fieldp",fieldp, "ftimep"; ftimep, "stimep", stimep, "ttimep", ttimep a podobne. Tieto príkazy nemajú priamy podiel na fungovaní programu.

Keďže dátový typ načítaných parametrov bol "integer", bola do programu pridaná funkcia dble(), ktorá ich v pre potreby ďalších výpočtov konvertovala na "double precision". Pre samotné načítavanie dát sme vytvorili funkciu "Loading_subrutine" (ďalej v texte spomínaná pod skratkou „*fls*"), ktorej príkaz na spustenie "call Loading_subrutine" musel byť umiestnený pred časť kódu inicializujúcu plazmochemické výpočty.

2.3 Funkcia „Loading_subrutine"

Prvá časť *fls* sa skladá z deklarácii lokálnych premenných a následného deklarovania jednotlivým premenným nulovú hodnotu. Nasledujúci odsek načítava dátový súboru „conditionsfile" v ktorom sa nachádzajú inštrukcie, ktoré z neskôr prečítaných dát má *fls* použiť v danom výpočte. Príkaz „open(10,file = "./conditionsfile")" slúži na otvorenie dátového súboru, pričom *10* je identifikátor vzniknutej dátovej štruktúry. Nasledujúci riadok „read(10,"(7I1)") fparameter, space, sparameter, space, tparameter, space, foparameter" prikazuje načítať dáta nachádzajúce sa v „conditionsfile" do dátovej štruktúry „10". V reťazci „(7I1)" je zakódované formátovanie - nájdené dáta budú v tvare *sedem celých čísel (integer) o rozmere jeden*. Premenná „space" slúži v našom programe na oddelenie parametrov ktoré načítavame (fparameter, sparameter, tparameter, foparameter). Spomenuté štyri premenné majú hodnotu poradia hodnoty dosadenej za daný parameter. Vo výpočtoch sme síce používali tri meniace sa parametre, pôvodne sme ale pri predpokladali, že budeme meniť štyri parametre. Štvrtý parameter sme v kóde ponechali pre prípad budúcich výpočtov so štyrmi premennými. Po skončení práce s každým súborom, je treba vzniknutú dátovú štruktúru z pamäte uvoľniť príkazom *close()*, pričom v zátvorke sa musí nachádzať identifikačné číslo štruktúry. Pri príprave tejto funkcie sme sa inšpirovali prácou.[13]. Obsah súboru „conditionsfile" bol pre každý výpočet vygenerovaný pomocou skriptu napísaného v jazyku Bash, ktorý teda zabezpečoval možnosť spustenia hromadného výpočtu.

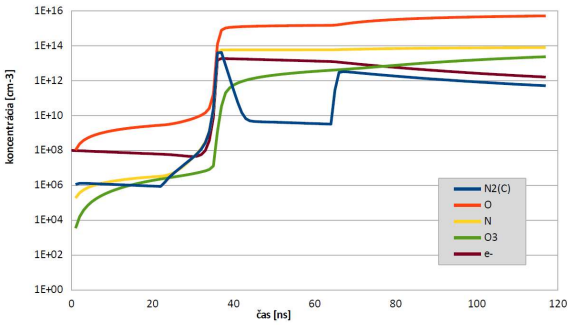
2.4 Programovanie v jazyku Bash Script

V tejto podkapitole by sme chceli vysvetliť zdrojový kód použitého skriptu, ktorý sa nachádza v prílohe priloženej bakalárskej prce.. Každý skript v napísaný v jazyku Bash musí v prvom priadku obsahovať `#!/bin/bash`, aby po jeho spustení operačný systém vedel akým spôsobom ho má interpretovať. Nasledujúce štyri riadky obsahujú deklaráciu premenných, ktorých hodnota sa rovná počtu hodnôt daného parametra, ktorý má byť použitý v jednotlivých výpočtoch. Ďalšie štyri premenné, ktoré sú deklarované v nasledujúcich štyroch riadkoch, budú použité ako prechodné úložisko informácie o tom, koľká hodnota daného parametra má byť pri nasledujúcom spustení *reF* načítaná. Dátový súbor, do ktorého sme uložili informácie o tom, aké hodnoty jednotlivých parametrov majú byť načítané v konkrétnom výpočte sme vytvorili príkazom `echo "$fieldpc $ftimepc $stimepc $ttimepc" > conditionsfile`, kde `conditionsfile` bol názov súboru. Preto sme vo „*while do*" cykloch použili porovnanie *-le*, ktorého význam spočíva v *less or equal*, teda menšia, alebo rovná hodnota. Príkaz *newdir_new=""* slúži k vytvoreniu nového priečinka, do ktorého sme po každom výpočte premiestnili vygenerované súbory s dátami z jednotlivých výpočtov, ktoré by boli pri nasledujúcom spustení výpočtu prepísané. Na ich premiestnenie do nového priečinku sme použili príkaz *mv*. Po uložení dát vygenerovaných z jednotlivých výpočtov sme príkazom *rm -f* zmazali dátový súbor *conditionsfile*.

3 Výsledky

V našej práci sme spracovali časový výboj koncentrácii piatich druhov častíc, vybraných spomedzi 56 druhov častíc, ktorých koncentrácie

boli počítane použitým softvérom. Týchto päť častíc sú voľné elektróny e^-, molekulárny dusík N_2 v stave $C^3\Pi_u$, ktorý je ďalej skrátene označovaný ako $N_2(C)$, častice atomárneho kyslíka O, atomárneho dusíka N a molekúl ozónu O_3. Výpočty začali nastavením hodnôt koncentrácii na hodnote 10^{+8} cm^{-3} pre koncentráciu častíc voľných elektrónov a nulovou hodnotou koncentrácii zvyšných štyroch sledovaných druhov častíc. Okrem voľných elektrónov teda na začiatku plyn obsahoval iba N_2 (80%) a O_2 (20%) v základných stavoch. Pred primárnym sterameron ma E/N nízku hodnotu rovnú 60 Td a zároveň je nízka aj koncentrácia častíc e^-, ktoré v dominantnej miere inicializujú procesy ionizácie. Z tohto dôvodu je aj nízka tvorba ostatných sledovaných častíc pred primárnym streamerom (Obr. 1). Koncentrácia elektrónov navyše mierne klesá, pretože ak je vo vzduchu E/N menšie ako ~120 Td, prebieha vo väčšej miere elektrónový záchyt ako ionizácia.

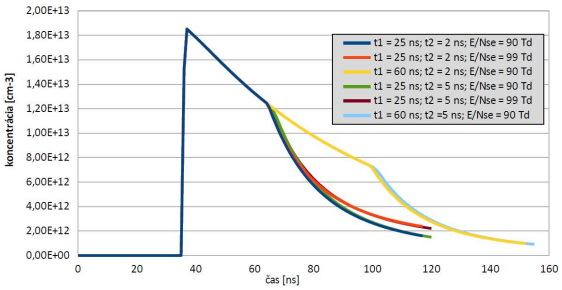


Obr. 1
Ilustračný graf závislosti koncentrácie častíc (cm^{-3}) od času (ns) v logaritmickej škále, t1 = 60 ns, t_2 = 2 ns , E/N_{se} = 90 Td

Pomalé elektróny sa zachytávajú predovšetkým reakciou:

$$e^- + O_2 + M \rightarrow O_2^- + M. \qquad (R1)$$

Rýchlosť tejto reakcie v našich výpočtoch je najvyššia pri E/N = 40 Td. Zaujímavosťou je, že počas sekundárneho streamera, kedy ma E/N v závislosti od príkladu 80, 90, alebo 99 Td, dochádza rýchlejšiemu úbytku voľných elektrónov, ako počas doby konštantnej hodnoty E/N po odznení primárneho streamera, kedy malo E/N hodnotu iba 40 Td (Obr. 2).



Obr. 2
Priebeh koncentrácie voľných elektrónov (cm^{-3}) v závislosti od času (ns) v lineárnej škále.

Dôvodom je urýchlenie disociatívneho elektrónového záchytu s prahovou energiou približne 4,5 eV:

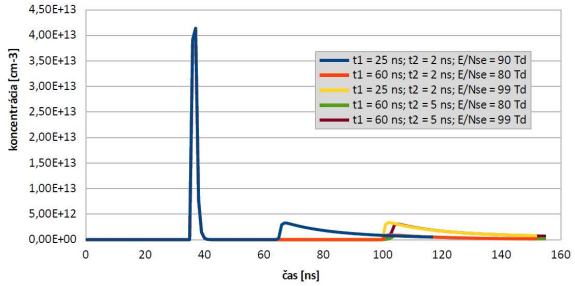
$$e^- + O_2 \rightarrow O + O^-. \qquad (R2)$$

Keďže jednotlivé druhy častíc sú produkovane rozdielnymi chemickými reakciami, časový vývin ich koncentrácii reaguje na nárast E/N rôzne a nie všetky druhy častíc majú najväčšiu koncentráciu počas primárneho streamera. Fyzikálny význam primárneho streamera spočíva primárne v tvorbe voľných elektrónov ionizáciou neutrálnych častíc, pretože ionizácia ma vysokú prahovú energiu a prebieha len vtedy, keď je vysoká hodnota E/N. Na ionizáciu molekuly O_2 je totiž potrebná energia 12,4 eV, a na ionizáciu N_2 až 15,6 eV. Koncentrácia voľných elektrónov po odznení primárneho streamera preto už iba upadá (Obr. 2). Naopak, niektoré druhy častíc dosahujú maximá svojej koncentrácie v neskorších časoch. Medzi takéto častice patri napríklad O, za ktorého vznik zodpovedajú viaceré mechanizmy a nie je dominantne tvorený neutrálnou disociáciou O_2 po zrážke s rýchlym elektrónom. Nižšiu, ale stále vysokú prahovú energiu (~11 eV) má aj nasledujúca reakcia:

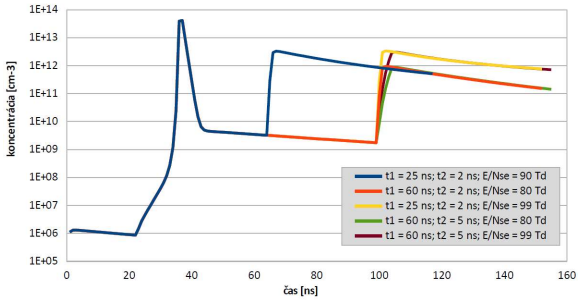
$$e^- + N_2 \rightarrow e^- + N_2\,(C). \qquad (R3)$$

Tento druh excitácie spôsobený neelastickou zrážkou s voľným elektrónom je hlavný mechanizmus tvorby excitovaného stavu $N_2(C)$. Pre vysokú prahovú energiu je silne závislý na veľkosti E/N a maximum jeho koncentrácie sa dosahuje počas primárneho streamera. Zoslabnutím E/N na 40 Td dochádza k prudkému poklesu koncentrácie $N_2(C)$ po zrážkach s inými molekulami, alebo vyžiarením fotónu. Veľký

účinný prierez reakcie (R3) a zároveň nižšia hodnota prahovej energie, ako pre ionizáciu, spôsobujú, že dochádza k celkom výraznému rastu koncentrácie tejto častice aj počas nárastu E/N na začiatku sekundárneho streamera (Obr. 3 a 4).



Obr. 3
Graf závislosti koncentrácie $N_2(C)$ (cm^{-3}) od času (ns) s lineárnou mierkou, rôzne výpočty.



Obr. 4
Graf závislosti koncentrácii $N_2(C)$ (cm^{-3}) od času (ns) s logaritmickou mierkou, viaceré výpočty.

Postupný pokles koncentrácie $N_2(C)$ počas sekundárneho streamera možno vysvetliť poklesom koncentrácie voľných elektrónov potrebných k iniciácii reakcie (R3). Mechanizmy určujúce priebeh zvyšných troch častíc, atomárneho dusíka, atomárneho kyslíka a ozónu, sú zložitejšie. Tato skutočnosť je zapríčinená dvomi dôvodmi. Tieto neutrálne častice vznikajú v plazme viacerými reakciami a nie vždy priamo po zrážke s elektrónom, ale niekoľkými krokmi, z ktorých každý sa skladá z elementárnych plazmochemickych reakcii. Dominantný mechanizmus tvorby častíc N spočíva v disociacii molekuly N_2 nepružnou zrážkou s voľným elektrónom:

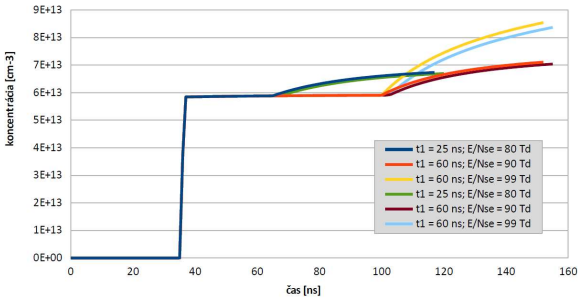
$$e^- + N_2 \rightarrow e^- + N + N \qquad (R4)$$

Pre uskutočnenie rozpadu N_2 je potrebná energia približne 10 eV. Na to sú potrebne vysokoenergetické elektróny produkovane predovšetkým v primárnom streameri. Častica N môže neskôr vzniknúť aj inými chemickými reakciami, napríklad rekombináciou pomalých elektrónov s iónom N_2^+, alebo reakciou excitovaného stavu molekulárneho dusíka s atómom kyslíka:

$$e^- + N_2^+ \rightarrow N + N, \qquad (R5)$$

$$O + N_2^* \rightarrow NO + N. \qquad (R6)$$

Ako je možne vidieť na obr. 5, po páde hodnoty E/N na konci primárneho streamera dochádza prakticky k zastaveniu rastu koncentracie N, pretože iné reakcie tvorby N sú pomalé oproti reakcii (R4).



Obr. 5
Graf závislosti koncentrácie atomárneho dusíka N (cm^{-3}) od času (ns) pre viaceré kombinácie vstupných parametrov. Hodnota parametra t_2 bola pre všetky zo zobrazených príkladov 5 ns.

Na rozdiel od $N_2(C)$ však vďaka týmto iným mechanizmom tvorby a pomalším zánikom jej koncentrácia za primárnym streamerom prudko nepadá. Hlavným mechanizmom zániku N je reakcia s O_2 za vzniku NO. Neskôr, počas sekundárneho streamera môžeme vidieť zase mierny nárast koncentrácie N. Počas sekundárneho streamera sa zvýši hodnota E/N. Takže nárast koncentrácie N môže byť vysvetlený tak, že pre rast koncentrácie N je potrebná prítomnosť energetických elektrónov, ako to vyplýva z podmienky prahovej energie reakcie (R4). Koncentrácia N však mierne rastie počas celej doby trvania sekundárneho streamera, napriek nepretržitému poklesu koncentrácie voľných elektrónov. Toto naznačuje, že tvorba atómov dusíka súvisí v sekundárnom streameri

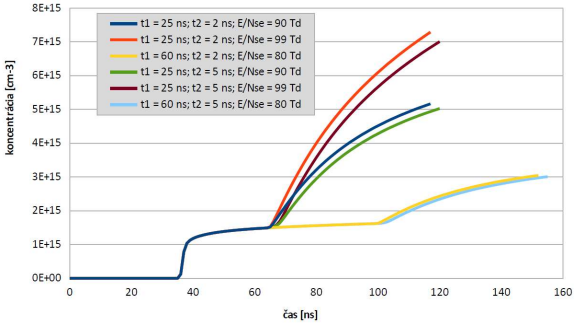
hlavne s ďalšími reakciami, ako sú (R5), (R6) a iné. Tvorba atomárneho kyslíka spočíva vo viacerých disociačných reakciách, napríklad v disociácii záchytom elektrónu (R2), alebo neutrálnej disociácii inicializovanej voľnými elektrónmi:

$$e^- + O_2 \rightarrow e^- + O + O. \qquad (R7)$$

Ďalší z mechanizmov spočíva v disociácii iniciovanej exitovanými stavmi molekuly N_2, aj s N_2 (C):

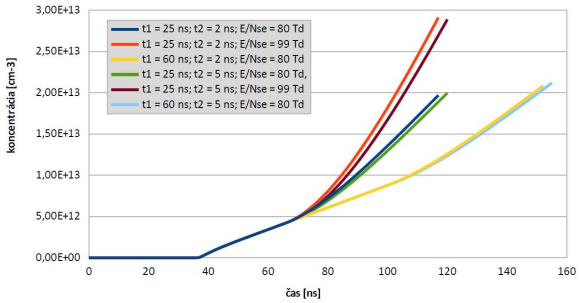
$$O_2 + N_2\,(C) \rightarrow O + O^* + N_2. \qquad (R8)$$

Energia prvého excitovaného stavu $N_2(A^3\Sigma_u)$ je 6,17 eV, zatiaľ čo energia potrebná na disociáciu molekuly O_2 je približne 5,5 eV. To znamená, že všetky excitované stavy molekuly N_2 majú dostatok energie na disociáciu O_2. Množstvom mechanizmov tvorby atomárneho kyslíka je možne vysvetliť fenomény zobrazene na obr. 6: mierny rast koncentrácie O aj za primárnym streamerom, keď E/N má hodnotu iba 40 Td, ale aj výrazný nárast koncentrácie počas doby sekundárneho streamera.



Obr. 6
Graf závislosti koncentrácie atomárneho kyslíka O (cm^{-3}) od času (ns) pri rôznych hodnotách študovaných parametroch.

Množstvom mechanizmov tvorby atomárneho kyslíka, ako aj nižšia väzobná energia O_2 v porovnaní s N_2, vysvetľuje aj vyššiu koncentráciu O v porovnaní s N (Obr. 1). Najzložitejší priebeh z piatich druhov sledovaných častíc má koncentrácia ozónu (Obr. 7).

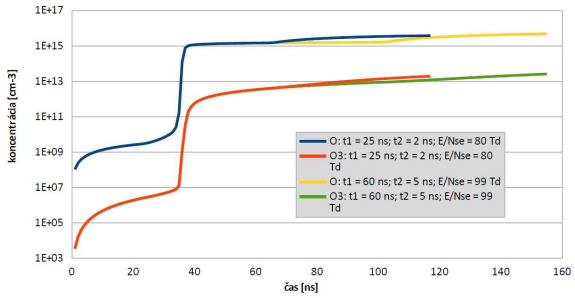


Obr. 7
Graf závislosti koncentrácie O_3 (cm^{-3}) od času (ns) pre rôzne hodnoty skúmaných parametrov.

Začína sa pozvoľným nárastom, ktorý sa zrýchli nástupom primárneho streamera. Ako vidieť na obr. 1, koncentrácia O_3 zareaguje nárastom na primárny streamer ako posledná a po jeho uplynutí, podobne ako u všetkých zvyšných častíc, sa spomalí rast O_3, avšak v porovnaní so zvyšnými časticami zaznamenáva stále značný rast. Najrýchlejší nárast začína príchodom sekundárneho streamera. Spočíva to v mechanizme tvorby O_3, ktorý pozostáva z viacerých krokov. Prvým krokom je tvorba atomárneho kyslíka O, ktorý je potrebný pre tvorbu O_3 trojčasticovou reakciou:

$$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M \qquad (R9)$$

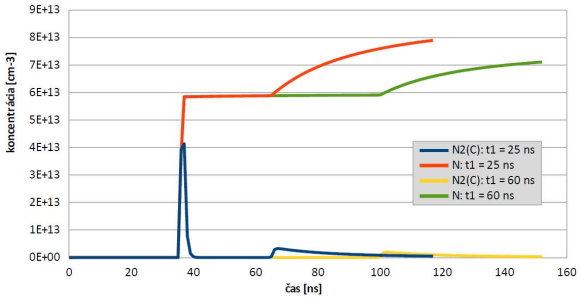
Najčastejšie plnia úlohu tretej častice molekuly O_2, alebo N_2. Reakcia R9 je relatívne pomalá a preto by nárast koncentrácie O_3 pokračoval ak by sme predĺžili našu simuláciu až do momentu, kedy sa spotrebuje atomárny kyslík. Koreláciu medzi koncentráciami O a O_3, predpokladanú z R9 zobrazuje obr. 8.



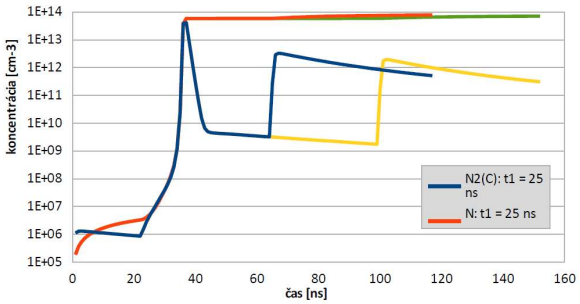
Obr. 8
Graf koncentrácií O_3 a O (cm^{-3}) v závislosti od času (ns) pre dve sady vstupných parametrov.

3.1 Vplyv zmeny hodnoty parametra t_1

Zmenou parametra t_1 z 25 na 60 ns sa predĺžila doba s nízkou hodnotou E/N, počas ktorej klesá koncentrácia voľných e^- (Obr. 4). Z toho dôvodu, pri $t_1 = 60$ ns je koncentrácia e^- v momente začiatku sekundárneho streamera nižšia. Nižšia koncentrácia voľných e^- poskytuje vysvetlenie nižších hodnôt koncentrácie častíc $N_2(C)$ a N, pre $t_1 = 60$ ns v porovnaní s $t_1 = 25$ ns, za predpokladu zachovania hodnôt zvyšných vstupných parametrov (Obr. 9 a 10).

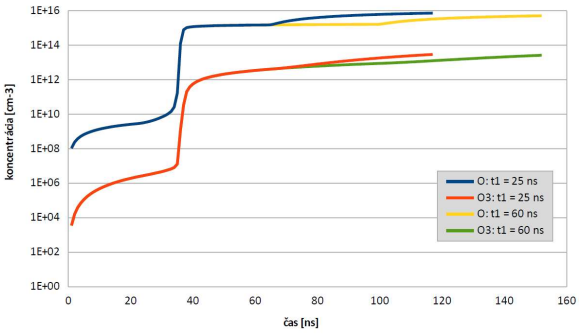


Obr. 9
Koncentrácia N a $N_2(C)$ (cm^{-3}) v závislosti od času (ns), lin. mierka, dva výpočty líšiace sa hodnotou parametra t_1. Hodnoty parametra t_2 sú 2 ns a hodnoty parametra E/Nse sú 90 Td.



Obr. 10
Koncentrácia N a $N_2(C)$ (cm^{-3}) v závislosti od času (ns), logaritmická mierka, výpočty líšiace sa hodnotou parametra t_1. Hodnoty parametra t_2 sú 2 ns a hodnoty parametra E/N_{se} sú 90 Td.

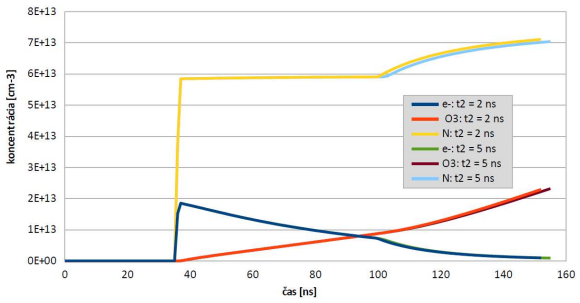
Ako bolo spomenuté v predchádzajúcich odsekoch, častice $N_2(C)$ a N sú dominantne produkované reakciami, ktorých rýchlosť je priamo úmerná koncentrácii elektrónov (R3, R4 a R5). Preto poklesy ich koncentrácie na konci výpočtov pri zmene hodnoty parametra t_1 z 25 ns na 60 ns sú vyraznejšie, ako poklesy koncentrácie O a O_3. Medzi hlavné dôvody patri skutočnosť, že častica O vzniká viacerými reakciami, napríklad disociaciou O_2 po zrážke s excitovanými stavmi N_2, v čase medzi primárnym a sekundárnym streamerom, keď koncentrácia voľných elektrónov klesá. V prípadeO_3 je to dane tým, že rýchlosť reakcie vzniku tejto molekuly priamo zavisí od koncentrácie O, nie od koncentrácie e^-. V konečnom dôsledku môžeme konštatovať, že bol preukázaný pomerne nízky konečný pokles koncentrácii častíc N, O a O_3 vplyvom zmenou hodnoty parametra t_1 z 25 ns na 60 ns (Obr. 11).



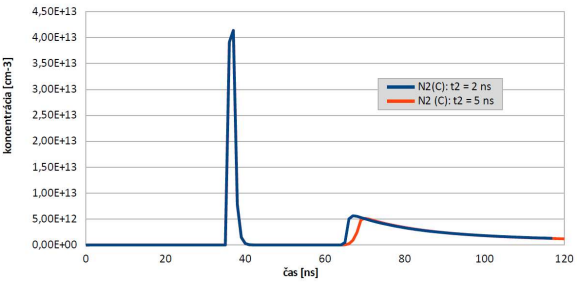
Obr. 11
Graf závislosti koncentrácie častíc O a O_3 (cm^{-3}) od času (ns) po aplikovaní log. mierky, dva výpočty líšiace sa hodnotou parametra t_1.

3.2 Vplyv zmeny hodnoty parametra t_2

V našej práci sme porovnávali výsledky získane pre dve hodnoty parametra t_2, rovne 2 ns a 5 ns. Tento časový úsek je pomerne krátky v porovnaní s t_1. Preto ma zmena tohto parametra minoritný vplyv na vývoj koncentrácie študovaných častíc (Obr. 12). Najväčší rozdiel je vidieť v priebehoch koncentrácie $N_2(C)$, pričom tento rozdiel nespočíva vo výrazne odlišných hodnotách koncentrácie, ale v rýchlosti zmeny koncentrácie $N_2(C)$ počas nábehovej hrany sekundárneho streamera (Obr. 13).

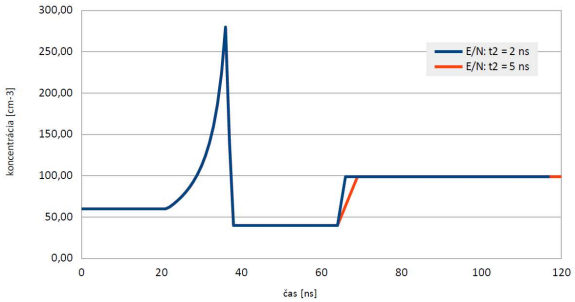


Obr. 12
Grafy závislostí koncentrácie častíc e^-, N a O_3 (cm^{-3}) od času (ns), výpočty líšiace sa hodnotou parametra t_2. Hodnota t_1 bola 60 ns a hodnota E/N_{se} bola 90 Td.



Obr. 13
Závislosť koncentrácie $N_2(C)$ (cm^{-3}) od času (ns). Zobrazenie zmeny tvaru krivky pri zmene hodnoty parametra t_2, pri zachovaní zvyšných parametrov. Hodnoty parametra t_1 = 25 ns a hodnota E/N_{se} = 90 Td.

Zmena tvaru časového vývinu koncentrácie $N_2(C)$ je spôsobená citlivosťou tvorby tejto častice na hodnotu E/N (Obr. 14), pretože prislúchajúca chemická reakcia (R3) má prahovú energiu 11 eV, ktorú získajú elektróny iba ak je E/N dostatočne silné. Hodnota E/N potrebná na inicializáciu prislúchajúcej chemickéj reakcie je okolo 60 Td.

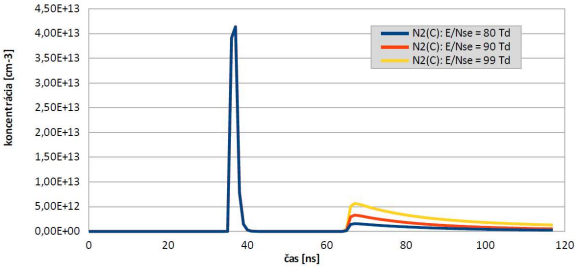


Obr. 14
Graf závislosti redukovaného elektrického poľa E/N (Td) od času (ns), priebeh redukovaného elektrického poľa prislúchajúceho grafom koncentrácii $N_2(C)$ zobrazených na obr. 12

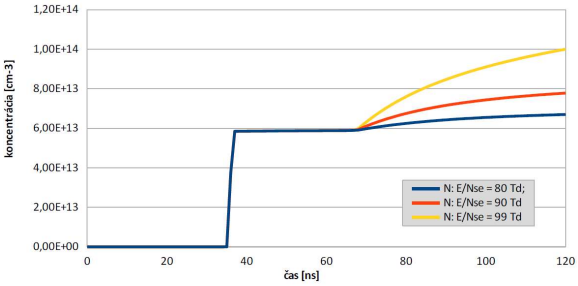
Ďalší faktor ovplyvňujúci kvantitu tvorby N_2 (C) je koncentrácia voľných elektrónov, pričom počas krátkeho úseku nábehovej hrany sekundárneho streamera ju môžeme považovať za konštantnú. Prakticky zmysel týchto výsledkov spočíva v poskytnutí odpovede na otázku, či by bolo možne sledovať rýchlosť zmeny E/N počas propagácie sekundárneho streamera pomocou merania intenzity emisie $N_2(C)$.

3.3 Vplyv E/N počas sekundárneho streamera

Vyššie hodnoty E/N_{se}, pri zachovaní hodnôt zvyšných parametrov, spôsobujú vyšší rast koncentrácii študovaných ťažkých častíc (Obr. 15 a 16).

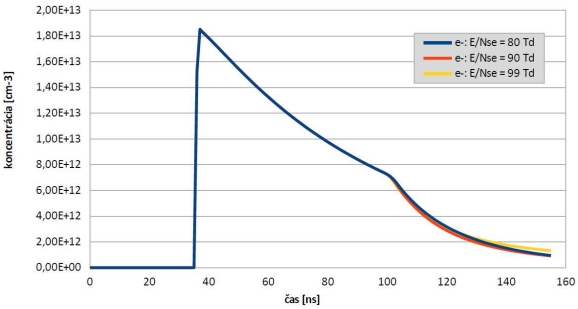


Obr. 15
Graf závislosti koncentrácie $N_2(C)$ (cm^{-3}) od času (ns), vplyv zmeny E/N_{se}. Hodnota parametra t_1 = 25 ns a hodnota t_2 sa rovná 2 ns.



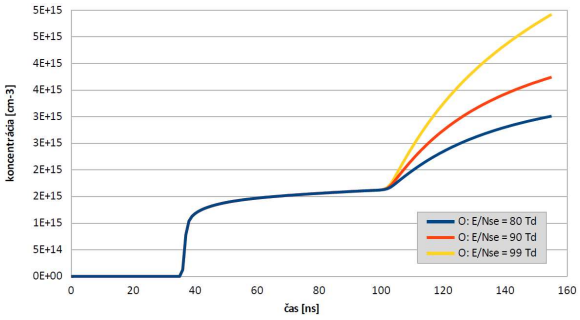
Obr. 16
Graf závislosti koncentrácie N (cm^{-3}) od času (ns), vplyv zmeny E/N_{se}. Hodnota parametra t_1 = 25 ns a hodnota parametra t_2 sa rovná 5 ns.

Koncentrácia voľných e^- počas sekundárneho streamera nenarastá, pretože všetky nami študované hodnoty E/N_{se} (80 Td, 90 Td a 99 Td) sú menšie ako 120 Td, čo je medzná hodnota E/N, od ktorej začínajú vo vzduchu prevládať ionizačné zrážky nad elektrónovým záchytom. Naopak, je možne pozorovať (Obr. 17), že pri väčšej hodnote E/N_{se} došlo k rýchlejšiemu poklesu ich koncentrácie. Tento výsledok možno interpretovať už spomenutým mechanizmom urýchlenia disociatívneho záchytu.

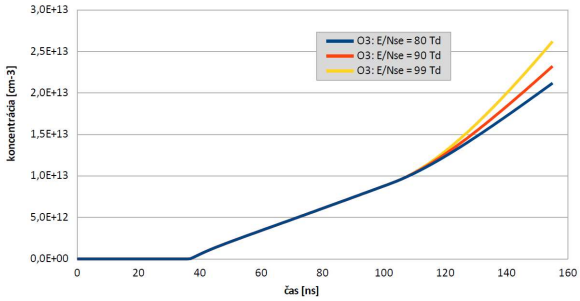


Obr. 17
Graf závislosti koncentrácie voľných elektrónov (cm^{-3}) od času (ns), vplyv zmeny E/N_{se}. Hodnota parametra t_1 sa rovná 60 ns a hodnota t_2 sa rovná 5 ns.

Rozdiel koncentrácie elektrónov pre rôzne hodnoty E/N_{se} je však relatívne malý. Väčšie zmeny boli pozorovane v prípade koncentrácie ostatných študovaných častíc. Najväčší vplyv je možne pozorovať u koncentrácie $N_2(C)$ z dôvodu priamej závislosti ich produkcie od množstva energetických elektrónov a teda od hodnoty E/N, čo už bolo popísané v predchádzajúcich odsekoch. Najmenší vplyv možno pozorovať v priebehoch koncentrácie O_3, keďže ide o nepriamu súvislosť ich produkcie od veľkosti E/N, ktorá je sprostredkovaná najprv tvorbou voľných elektrónov, následnou tvorbou O, od koncentrácie ktorých závisí samotná tvorba O_3. Napriek skutočnosti, že počas sekundárneho streamera dochádza k poklesu koncentrácie voľných elektrónov a hodnota E/N je nižšia ako v primárnom streameri, naše výpočty poukázali na veľký význam sekundárneho streamera pre plazmochémiu. Dôvodom je dlhšie trvanie v porovnaní s primárnym streamerom. Ako ukazuje obr.16, nárast E/N na 80 Td je dostatočný pre inicializáciu ďalšej tvorby $N_2(C)$, pričom obr. 17, 18 a 19 poukazujú na dôležitosť sekundárneho streamera na tvorbu N, O a O_3.



Obr. 18
Graf závislosti koncentrácie O (cm^{-3}) od času (ns), vplyv zmeny E/N_{se}.Hodnota parametra t_1 sa rovná 60 ns a hodnota parametra t_2 sa rovná 5 ns.



Obr. 19
Graf závislosti koncentrácie O_3 (cm^{-3}) od času (ns), vplyv zmeny E/N_{se}. Hodnota parametra t_1 sa rovná 60 ns a hodnota t_2 sa rovná 5 ns.

Záver

Môžeme konštatovať, že v rámci našej práce sa nám podarilo vytvoriť postup umožňujúci viacnásobné použitie programu reaction_N2O2.F90 bez nutnosti externého zásahu užívateľa programu po každom výpočte. Náš postup spočíva v externom skripte napísanom v jazyku Bash Script. Tento výsledok umožňuje pohodlnejšie využívanie programu reaction_N2O2.F90, čo môže nájsť svoje uplatnenie predovšetkým pri parametrických štúdiách zameraných na sledovanie vplyvu zmien viacerých vstupných parametrov na plazmochemické reakcie indukované prechodovou iskrou. Získané výsledky budú použité pri porovnávaní s výsledkami vychádzajúcimi z experimentálnych meraní.

Pre uplatnenie postupu pri budúcom používaní nášho postupu, pri testovaní odlišných parametrov, bude nutné, aby užívateľ vytvoril pre daný parameter globálnu premennú v reaction_N2O2.F90 a zároveň, aby vytvoril dátový súbor obsahujúci v stĺpcoch používané hodnoty daného parametra. V prípade, že by mali hodnoty daného parametra iný počet cifier ako dve, musel by užívateľ vykonať aj zmenu v príkaze *read(...)*, kde by zmenil počet cifier čítaných parametrov z dvoch do požadovaného počtu.

Z modelovaných plazmochemických výpočtov môžeme konštatovať, že bol preukázaný pomerne nízky konečný pokles koncentrácii častíc N, O a O_3 vplyvom zmenou hodnoty parametra t_1 z 25 ns na 60 ns (Obr. 11) a teda nízky vplyv rôznej dĺžky fázy medzi primárnym a sekundárnym streamerom na časový vývoj koncentrácii týchto častíc. Taktiež sme preukázali, že zmena rýchlosti rastu redukovaného elektrického poľa na začiatku sekundárneho streamera (parameter t_2) má minoritný vplyv na vývoj koncentrácie študovaných častíc (Obr. 12). Zároveň môžeme konštatovať, že bola preukázaná zmena tvaru časového vývinu koncentrácie $N_2(C)$ pri zmene hodnoty parametra t_2, ktorá je spôsobená citlivosťou tvorby tejto častice na hodnotu E/N. Praktický význam výsledkov – zodpovedá možnosť sledovať rýchlosť zmeny E/N počas propagácie sekundárneho streamera pomocou merania intenzity emisie $N_2(C)$. Parameter E/N_{se} má najväčší vplyv na koncentráciu $N_2(C)$, pretože ich produkcia priamo závisí od množstva energetických elektrónov a teda od hodnoty E/N. E/N_{se} najmenej vplýva na koncentráciu O_3, keďže ich tvorba je sprostredkovaná tvorbou voľných elektrónov a následnou tvorbou O, od koncentrácie ktorých závisí samotná tvorba O_3. Napriek poklesu koncentrácie e^- a nižšej hodnote E/N, ako v primárnom streamere, naše výpočty poukázali na veľký význam sekundárneho streamera pre plazmochémiu, vďaka dlhšej dobe trvania v porovnaní s dobou trvania primárneho streamera. Ako ukazuje obr. 16 nárast E/N na 80 Td je dostatočný pre inicializáciu ďalšej tvorby $N_2(C)$, pričom obr. 17, 18 a 19 poukazujú na dôležitosť sekundárneho streamera na tvorbu N, O a O_3.

Referencie

[1] S. Pancheshnyi, B. Eismann, G.J.M. Hagelaar, L.C. Pitchford, Computer code ZDPlasKin, http://www.zdplaskin.laplace.univ-tlse.fr (University of Toulouse, LAPLACE, CNRS-UPS-INP, Toulouse, France, 2008).

[2] Thompson, W.B. An Introduction to Plasma Physics In Elsevier [online]. 2013 . [cit: 2020-06-05]. Dostupne na internete: https://books.google.sk/books ? id=26g3BQAAQBAJ ISBN 9781483164779

[3] Komkov, I.D., Kruchinin, A.M., Nosikov, A.V., Sevostianov, A.N. (1976), " Plasma Furnace for Carbothermic Reduction of Rare and Refractory Metals," in Plasma Processes in Metallurgy and Technology of Inorganic Materials, A.A. Baikov Institute of Metallurgy of USSR Academy of Sciences, Nauka (Science), Moscow.

[4] Horvath, M., Bilitzky, L., Hattner, J. (1985), Ozone, Science, Budapest.

[5] Kozlov, G.I., Khudiakov, G.N., Kobsev, Yu.N. (1974), Plasma-Chemical Process of Natural Gas Conversion into Acetylene, Hydrogen and Soot, Institute of Problem of Mechanics of USSR Academy of Sciences, ENIN, vol. 48, Moscow.

[6] E. Stoffels, I.E. Kieft, R.E.J. Sladek, L.J.M. van den Bedem, E.P. van der Laan, M. Steinbuch,

Plasma Sources Sci. Technol. **15**, S169 (2006)

[7] Kulikovsky A. A., *Production of Chemically Active Species in the Air by a Single Positive Streamer in a Nonuniform Field* IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 25, NO. 3, JUNE 1997 439

[8] B. Klingbeil, D. A. Tidman, and R. F. Fernsler, "Ionizing gas breakdown waves in strong electric fields," *Phys. Fluids*, vol. 15, no. 11, pp. 1969–73, 1972. 56

[9] Janda M., Hensel K., Machala Z.: Kinetic Plasma Chemistry Model of Pulsed Transient Spark Discharge in Air Coupled with Nanosecond Time-Resolved Imaging and Spectroscopy, J. Phys. D: Appl. Phys. 51 (33), 334002 (2018)

[10] S. Pancheshnyi, B. Eismann, G.J.M. Hagelaar, L.C. Pitchford, Computer code ZDPlasKin, http://www.zdplaskin.laplace.univ-tlse.fr (University of Toulouse, LAPLACE, CNRS-UPS-INP, Toulouse, France, 2008).

[11] Modelovanie plazmochemických procesov v prechodovej iskre / autor Damek, M., školiteľ Janda, M., doc. RNDr, Bakalárska práca na FMFI UK - Bratislava, 2011

[12] Modelovanie plazmochemických procesov v prechodovej iskre / autor Molnár Matej, školiteľ Janda Mário, RNDr., Diplomová práca na FMFI UK – Bratislava, 2017

[13] Pancheshnyi S., Eismann B., Hagelaar G. and Pitchford L., "ZDPLASKIN: A NEW TOOL FOR PLASMACHEMICAL SIMULATIONS", The Eleventh International Symposium on High Pressure, Low Temperature Plasma Chemistry (HAKONE XI), September 2008, Oleron Island, France.

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 242
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Sandra Ďurčányová, Anna Zahoranová

Porovnanie účinnosti rôznych zdrojov nízkoteplotnej plazmy na povrchovú úpravu biologického materiálu (rozšírený abstrakt)

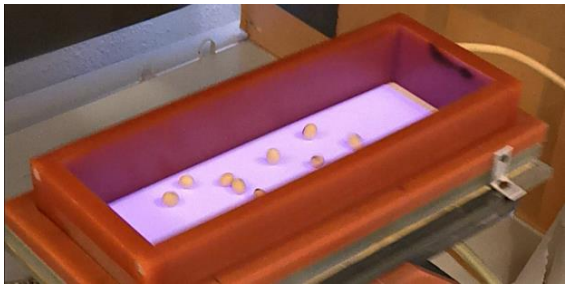
Sandra Ďurčányová*, Anna Zahoranová‡§
Katedra experimentálnej fyziky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Plazmová úprava biologických materiálov, ako napríklad rastlinných semien, za účelom ich dekontaminácie a zlepšenia rastových parametrov, je čoraz aktuálnejšou témou [Šerá, Šerý, 2018]. Pre tento typ úprav je vhodná nízkoteplotná plazma (NTP), keďže kvôli jej nízkej celkovej teplote nedochádza k termickému poškodeniu vzoriek.

Cieľom práce je porovnať účinky plazmovej úpravy pomocou dvoch zdrojov NTP: DCSBD (difúzny koplanárny povrchový bariérový výboj) a MSDBD (multi-dutinový povrchový dielektrický bariérový výboj).

DCSBD bol vyvinutý a optimalizovaný špecificky pre účely povrchových úprav polymérnych materiálov. MSDBD je relatívne nový zdroj a jeho efekt na povrch materiálov je menej preskúmaný. Jeho výhoda spočíva vo vyfukovaní plazmy do priestoru prúdiacim plynom, čo zabezpečuje kontakt produktov plazmy s opracovávaným materiálom do väčšej vzdialenosti.

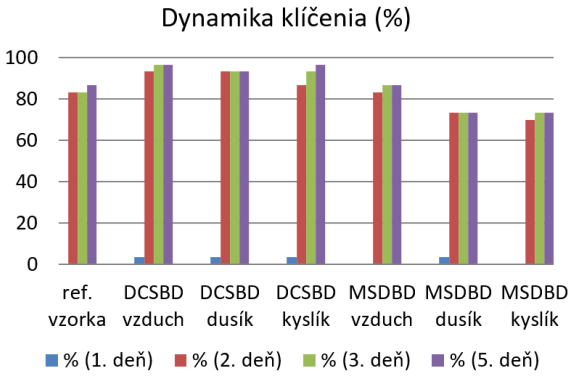
Ako biologické vzorky boli zvolené semená sóje. Plazmovú úpravu sme vykonávali v rôznych pracovných plynoch (vzduch, N_2, O_2), s rôznymi expozičnými časmi (10 s, 30 s, 45 s) a pri MSDBD aj pri rôznych prietokoch plynu (5-10 l/min). Príkon DCSBD zdroja bol 400 W, MSDBD zdroja 35 W.



Obr. 1: Plazmová úprava sóje pomocou DCSBD.

Meranie kontaktného uhla (WCA) vypovedá o zmenách povrchovej energie a o miere chemických zmien na povrchu. Pri úprave MSDBD sa najlepším z hľadiska hodnoty WCA ukázal prietok plynu 9 l/min. Najvýraznejší pokles WCA nastal pre oba plazmové zdroje pri použití N_2.

Pomocou ATR-FTIR analýzy sme sledovali chemické zmeny na povrchoch plazmou opracovaných semien. Pozorovali sme nárast intenzít na vlnočtoch väzieb zodpovedajúcich C=O-karbonylovej skupiny a skupine O-H, čo naznačuje prítomnosť polárnych kyslíkových skupín na povrchu [Zahoranová et al., 2018]. Zároveň pokles intenzít na vlnočtoch prislúchajúcim väzbám v lipidoch môže naznačovať oxidáciu lipidov na povrchu semien vplyvom reaktívnych kyslíkatých a dusíkatých častíc plazmy.



Obr. 2: Dynamika klíčenia.

Testy dynamiky klíčenia (Obr. 2) ukázali zlepšenie klíčivosti až do 10% oproti referenčnej vzorke pre všetky vzorky opracované pomocou DCSBD plazmy. Meranie rastových parametrov vyklíčených semien ukázalo najvýraznejšie zlepšenie oproti referenčnej vzorke pre plazmovú úpravu s použitím DCSBD v N_2 a vo vzduchu.

Literatúra

[Šerá, Šerý, 2018] Šerá B., Šerý M., (2018). Non-thermal plasma treatment as a new biotechnology in relation to seeds, dry fruits, and grains, *Plasma Science and Technology*, *20*(4).

[Zahoranová et al., 2018] Zahoranová A., Hoppanová L., et al. (2018). Effect of Cold Atmospheric Pressure Plasma on Maize Seeds:..., *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 38, 969–988.

* sandra.durcanyova@gmail.com
‡ zahoranova1@uniba.sk
§ Školiteľ

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 243
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Kateryna Trach, Martin Sabo, Oleksandr Prystopiuk, Štefan Matejčík

Quantitative MCC-GC-IMS analysis of Arabica and Robusta coffees in mixes

Kateryna Trach[1]* Martin Sabo[2†] Oleksandr Prystopiuk[1♦] Štefan Matejčík[1‡§]
[1] Department of Experimental Physics, FMFI UK, Mlynská dolina F2, 842 48 Bratislava
[2] MaSa Tech s.r.o., Sadová 3018/10, 915 01 Stará Turá

Fraud in coffee mixes is a widespread problem. In the most often case Arabica is replaced with more cheap Robusta species. Due to the huge difference in composition, mainly in volatile organic compounds (VOCs), containing in these species, poor mix affects beverage quality, alters its taste and aroma.

Quality assessment of coffee is a great issue for small enterprises, which have no asses to quality control laboratories. Moreover, such small enterprises can not utilize analytical methods due to the high cost of equipment and the need for highly qualified personnel to operate it and to interpret the results.

Ion mobility spectrometry (IMS) shows rapid growth in use for the identification and quantification of VOCs in foods. The method is relatively simple, demands almost no sample preparation, and no consumables are needed. IMS instruments are compact and have affordable prices. However, IMS spectra interpretation can be done only by an experienced specialist. This drawback limits the method implementation at the small enterprises. Application of the software based on machine learning algorithms is a potential solution aimed to eliminate this drawback by performing software-based IMS spectra interpretation and quantitative analysis of VOCs present in the sample. With this IMS analysis of coffee mixes may become attractive for small coffee-focused enterprises.

To investigate, whether the software based on the machine learning approach can determine the quantitative composition of coffee powder mix containing various proportions of Arabica and Robusta species, 41 samples were processed and analyzed. Among them 22 samples were pure Arabica species, 8 were pure Robusta and 11 were mixes. Most of the samples were ground by a mechanical grinder. Mixes were created by adding 10-90% (by mass) of Robusta to 90-10% of Arabica (both freshly ground). Each mix contained a single kind of each species. Afterwards, 1.0g of the mix capped in a 20 ml glass vial was incubated in the oven at 90°C for 20 minutes. 2.25 ml of headspace vapor was automatically sampled and introduced into the heated injector of the MCC-GC-IMS Peakmachine (MaSa Tech, SK). 41 2D IMS maps were obtained and classified by random forest method provided in the Chemometrics software [Chemometrics webpage]. Results of the classification are shown in Fig. 1. The accuracy average is 0.96, which is sufficient for practical applications.

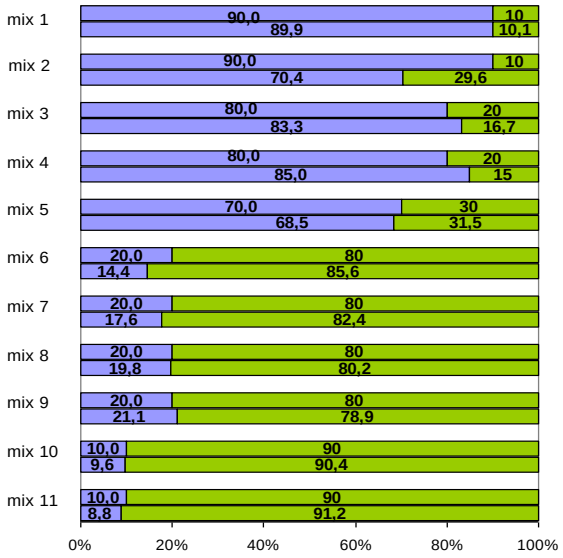


Figure 1: Results of the classification (for each mix the upper bar denotes created mix composition, the lower – revealed composition).

This research was partially funded by the Slovak Research and Development Agency (APVV-19-0386). The authors would like to express gratitude to RNDr. Ladislav Moravsky, PhD.

References

[Manzo, 2014] Manzo J. (2014). Machines, people and social interaction in 'Third Wave' Coffeehouses. In *Journal of Arts and Humanities*, 8:1-12.

[Chemometrics webpage] MaSa Tech control software. Accessed 20.03.2021. https://www.masatech.eu/control-software

* trach1@uniba.sk
† martin.sabo@masatech.sk
♦ prystopiuk1@uniba.sk
‡ stefan.matejcik@fmph.uniba.sk
§ Supervisor

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 244
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Ján Ďurian, Štefan Matejčík

Efektívna GPU implementácia metódy 1D Particle-in-Cell/Monte Carlo Collisions na modelovanie rádiofrekvenčných výbojov

Ján Ďurian[1]* Štefan Matejčík[1]
[1] Katedra experimentálnej fyziky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

V tejto práci predstavujeme novú GPU implementáciu numerickej metódy Particle-in-Cell/Monte Carlo Collisions (PIC/MCC) pre modelovanie kapacitných rádiofrekvenčných (RF) výbojov. Táto práca je sumár niektorých výsledkov publikovaných v [Z. Juhasz et al., 2021].

PIC/MCC je skupina numerických metód, ktorá sa v modelovaní plazmy využíva od 60-tych rokov minulého storočia. Princíp metódy spočíva v sledovaní trajektórii jednotlivých nabitých častíc v plazme, pričom ich vzájomnú elektrostatickú interakciu modelujeme prostredníctvom mriežky. Zrážky nabitých častíc s neutrálnymi sa následne modelujú Monte Carlo metódami.

Metódy PIC/MCC sú výpočtovo veľmi náročné kvôli vysokému počtu prítomných častíc. Tento problém dlhodobo motivuje snahy optimalizovať a hlavne paralelizovať výpočty v PIC/MCC. My sme na paralelizáciu kódu využili grafické karty (GPU).

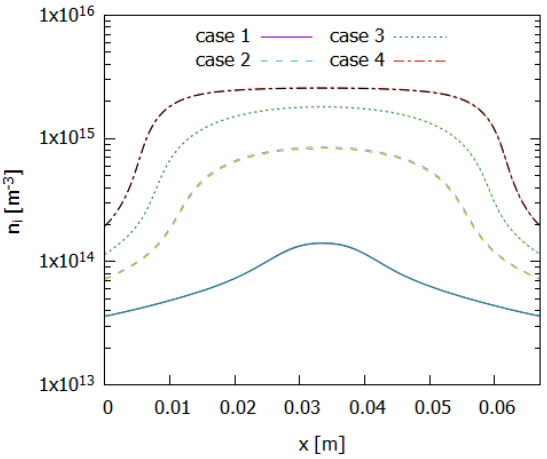
Počas integrácie pohybu častíc v PIC/MCC jednotlivé častice spolu nijako neinterferujú, čo nám umožňuje veľmi jednoducho túto časť kódu paralelizovať. GPU tak vedia vykonávať výpočty na tisícoch častíc naraz, čím sa výpočty výrazne zrýchľujú.

Problém nastáva v interpolácii distribúcie koncentrácií častíc na mriežku, ako príprava na výpočet distribúcie hustoty náboja. Táto operácia je podobná tvorbe histogramu, akurát v našom prípade hodnoty koncentrácii častíc na body mriežky interpolujeme (napr. lineárne). Tu dochádza k problému synchronizácie prístupu vlákien GPU k dátam mriežky, čo ale vieme riešiť využitím tzv. atomických operácií.

Posledným veľkým problémom je implementácia riešenia elektrických polí tvorených elektródami výbojky, ako aj samotnými nabitými časticami. Z nainterpolovaných koncentrácií častíc vieme pomocou rovníc $\Delta\varphi = -\rho/\varepsilon_0$ a $E = -\nabla\varphi$ vypočítať elektrické pole pôsobiace na častice.

Poissonovu rovnicu riešime využitím FDM, čím sa rovnica prevedie na trojdiagonálny lineárny systém $A_{ij}\varphi_j = -\rho_j/\varepsilon_0$. V našom kóde sme riešenie potenciálu implementovali ako súčin inverznej matice A_{ij} a hustoty náboja ρ_j podľa rovnice $\varphi_j = A_{ij}^{-1}\rho_j/\varepsilon_0$. Takýto súčin je možné vypočítať úplne paralelne, vďaka čomu je toto riešenie vhodné pre implementáciu na GPU.

Pre overenie presnosti nášho kódu sme použili súbor „benchmarkov“ publikovaných v [M. M. Turner et al., 2013]. Najväčšia odchýlka našich výsledkov od „benchmarku“ je 2.7%.



Obrázok 1 - Porovnanie vypočítaných koncentrácii iónov medzi našim kódom a "benchmarkom".

S našim kódom sme dosiahli 6 až 37-násobné zrýchlenie výpočtov v porovnaní s klasickou CPU implementáciou. Tieto výsledky ukazujú, že naša PIC/MCC implementácia je presná, a efektívne využíva výpočtový výkon GPU. Náš kód je tak pripravený na ďalší vývoj a aplikáciu v budúcom výskume.

Autori ďakujú za finančnú podporu projektu Agentúry APVV č. APVV-19-038.

APVV-19-038: Iónové a elektrónové procesy pre pokročilé spektrometrické metódy

Literatúra

[Z. Juhasz et al., 2021] Z. Juhasz et al. (2021). Efficient GPU implementation of the Particle-in-Cell/Monte-Carlo collisions method for 1D simulation of low-pressure capacitively coupled plasmas. *Comput. Phys. Commun*, 263.

[M. M. Turner et al., 2013] M. M. Turner et al. (2013). Simulation benchmarks for low-pressure plasmas: Capacitive discharges. *Phys. Plasmas*, 20.

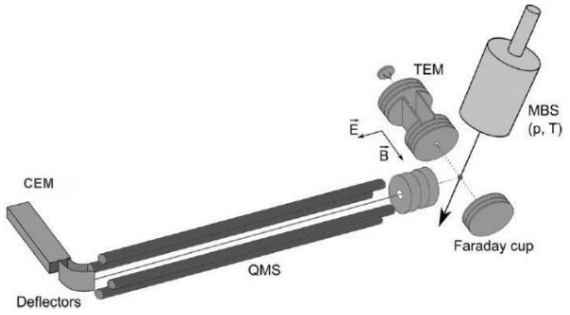
* durian5@uniba.sk

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 245
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Ján Blaško, Peter Papp, Štefan Matejčík

Elektrónmi indukovaná fragmentácia molekúl 2-methyl-2-oxazolínu a 2-etyl-2-oxazolínu

Ján Blaško[1]* Peter Papp[1†] Štefan Matejčík[1+]
[1] Katedra experimentálnej fyziky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Na výskum elektrónmi indukovaných molekulových procesov sme použili experiment so skríženým elektrónovým a molekulovým lúčom (Obr. 1). Zdroj molekulového lúča (MBS) bol naplnený meranou vzorkou (2M2O, CAS: 1120-64-5, čistota 98%, Sigma Aldrich a 2E2O, CAS: 10431-98-8, čistota 99%, Sigma Aldrich) a pomocou kapiláry generoval efuzívny lúč prechádzajúci do vákua. Elektróny boli generované trochoidálnym elektrónovým monochromátorom (TEM) generujúcim elektrónový lúč s dobre špecifikovanou energiou. Po kolízii elektrónov s molekulovým lúčom boli kladné ióny slabým elektrickým poľom extrahované z kolíznej oblasti do kvadrupólového hmotnostného spektrometra (QMS), kde ióny s vybranou m/z prešli cez QMS do detektora CEM (ang.: Channeltron electron multiplier).



Obr. 1: Schéma aparatúry [Lacko a Papp, 2018].

Aparatúra pracuje v dvoch štandardných módoch. V prvom móde sa meralo hmotnostné spektrum pri konštantnej elektrónovej energií 70 eV v rozmedzí od 10 amu do 105 amu pre 2E2O a od 10 do 90 amu pre 2M2O. K detegovaným hmotnostiam m/z sme priradili možné fragmenty. V druhom móde sa merali účinné prierezy pre konkrétne ióny s daným m/z ako funkcia elektrónovej energie (s krokom 0,025 eV) v okolí prahovej energie daného fragmentu. Ionizačná energia bola odhadnutá na základe Wannierovho zákona [Wannier, 1953]. Ionizačná energia pre 2 – metyl – 2 – oxazolín bola stanovená na 9,5 eV a pre 2 – etyl – 2 – oxazolín na 9,13 eV (Obr. 2) [Blaško a Papp, 2021]. Na kalibráciu kinetickej energie elektrónov sme použili argón, pre ktorý je dobre známa ionizačná energia 15,759 eV. Prvý krát boli určené prahové energie pre fragmenty [Blaško a Papp, 2021]. Z rozdielu ionizačnej energie a prahovej energie je možné určiť disociačnú energiu fragmentov.

m/z	Supposed products	Energy (eV)
85	P^+	9,5 (IE)
84	$(P\text{-}H)^+$	9,89
56	$C_2H_2NO^+$, $C_3H_4O^+$	10,42
55	C_2HNO^+, $C_3H_3O^+$ $C_3H_5N^+$	10,15 & 10,51
54	$C_3H_4N^+$	13,39
53	$C_3H_3N^+$	14,62
52	$C_3H_2N^+$	13,1
51	C_3HN^+	15,72 & 16,71
45	$C_2H_5O^+$	15,37
44	$C_2H_4O^+$, CH_2NO^+	10,52
43	$CHNO^+$, $C_2H_3O^+$ $C_2H_5N^+$	10,37
42	$C_2H_4N^+$, $C_2H_2O^+$	11,37 & 12,11
41	$C_2H_3N^+$	12,56
40	$C_2H_2N^+$	14,15
39	C_2HN^+	14,63
31	CH_3O^+	12,5 & 13,51
30	CH_2O^+	11,27
29	$C_2H_5^+$, CH_3N^+, CHO^+	13,03 & 13,97
28	$C_2H_4^+$, CH_2N^+, CO^+	13,39
27	$C_2H_3^+$, CHN^+	13,93 & 14,53
26	$C_2H_2^+$, CN^+	11,77 & 14,78
15	CH_3^+	15,46
14	N^+, CH_2^+	16,33

Tab. 1: Prahové energie pre 2M2O.

Autori ďakujú za finančnú podporu projektom: APVV č. APVV-19-0386-1: Iónové a elektrónové procesy pre pokročilé spektrometrické metódy, VEGA 1/0489/21: Štúdium excitačných zrážok elektrónov s molekulami astrofyzikálneho významu.

Literatúra

[Blaško a Papp 2021] Blaško, J., Papp, P. a Matejčík, Š. (2021) Dissociation of 2-methyl-2-oxazoline and 2-ethyl-2-oxazoline molecules induced by low energy electron impact. *23rd Symposium on Application of Plasma Processes, Book of Contributed Papers* 39-43

[Lacko a Papp, 2018] Lacko, M., Papp, P., Matejčík, Š. (2018) Dissociation of dicyclohexyl phthalate molecule induced by low-energy electron impact. *J. Chem. Phys.*, 148, 214305

[Wannier, 1953] Wannier, G. H. (1953) The Threshold Law for Single Ionization of Atoms or Ions by Electrons. *Physical Review*, 90:5 817-825.

* jan.blasko@fmph.uniba.sk
† peter.papp@fmph.uniba.sk
+ stefan.matejcik@fmph.uniba.sk

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 246
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Oleksandr Prystopiuk, Kateryna Trach, Štefan Matejčík

Modulated high-voltage power supply based on push-pull topology for DBD plasma sources

Oleksandr Prystopiuk[1]* Kateryna Trach[1◊] Štefan Matejčík[1‡§]
[1] Department of Experimental Physics, FMFI UK, Mlynská dolina F2, 842 48 Bratislava

High-voltage modulated power supply prototype has been developed to power dielectric barrier discharge plasma sources that are widely used for both fundamental and applied research. The device is intended to provide up to 50 W of power to an impedance-matched DBD coaxial jet at the frequency of 500 kHz to operate the jet in Townsend-like mode at atmospheric pressure. The output voltage can be provided in form of unmodulated AC of 6 kV amplitude, amplitude-shift keyed voltage, and amplitude modulated voltage in the range of 30V – 6 kV.

circuit (as shown in Fig. 1, a) the transformer output can be matched to any electrically short load which has purely resistive impedance at a central frequency only. This feature allows to use the PSU with unmatched DBD plasma sources.

The modulator design is based on IRS2452 (Infineon Corp.) high-voltage class D amplifier IC. With this approach, only several bulky components are needed to obtain modulation voltage with +310 V maximal amplitude. Finally, modern SiC MOSFETs allow minimizing power losses and heat dissipation.

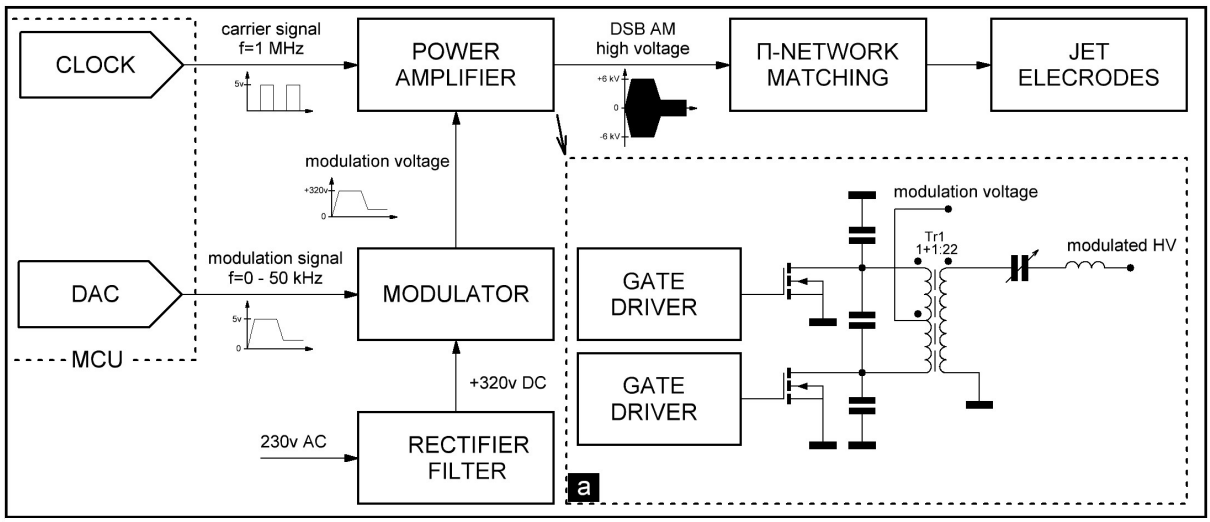


Figure 1: Block diagram of the modulated HV power supply; a) – a simplified representation of the push-pull topology with inductive reactance compensation.

The power amplifier is based on push-pull topology operated in class E (active device switches at the moment of no current flow). It has shown itself as a simple and efficient solution for the output stage of low-frequency radio transmitters. To obtain the same benefits aforementioned topology was used to develop modulated HV PSU. In particular, push-pull topology with the compensation of inductive reactance also known as Mallory circuit [Mallory, 1988] was used to drive the center-tapped primary coil of the step-up transformer (see Fig. 1, a). Its output impedance is matched with 50 Ohm HV coaxial cable by single-stage Π-network. Alternatively, with the serial CL-

Acknowledgments

This work was supported by the Slovak Research and Development Agency (grant APVV-19-0386). The authors would like to express sincere gratitude to Karol Švorc and Ing. Daniel Manca for the manufacturing of prototype components.

References

[Mallory, 1988] Mallory, M. (1988). Optimizing the "Simple Beacon" Transmitter. In *Western Update* No. 59, Sep. 1988.

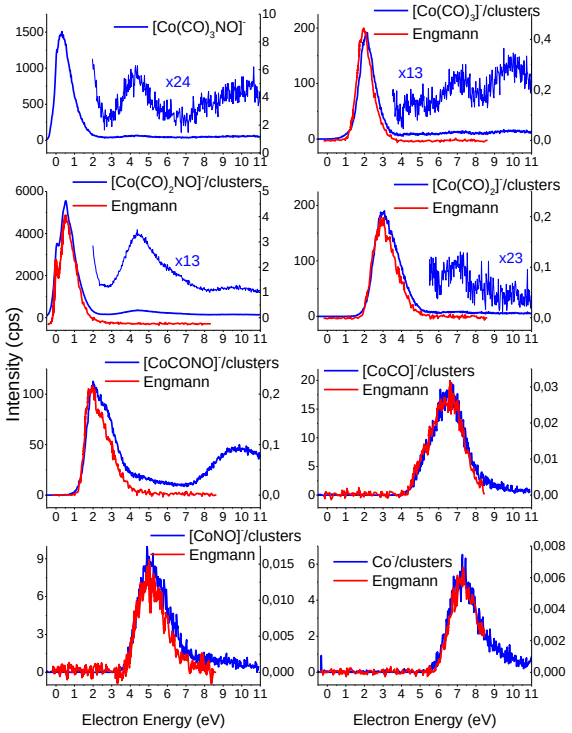
* prystopiuk1@uniba.sk
◊ trach1@uniba.sk
‡ stefan.matejcik@fmph.uniba.sk
§ Supervisor

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 247
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Dušan Mészáros, Peter Papp, Štefan Matejčík

Nízkoenergetický elektrónový záchyt na molekulové klastre $Co(CO)_3NO$

Dušan Mészáros[1]* Peter Papp[1‡§] Štefan Matejčík[1]
[1] Katedra experimentálnej fyziky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

V tejto práci sme sa venovali elektrónovému záchytu (EA) a disociatívnemu elektrónovému záchytu (DEA) na klastroch $Co(CO)_3NO$ použitím hmotnostnej spektrometrie. $Co(CO)_3NO$ sa používa ako prekurzor pri depozícii Co pri technológiách FEBID (depozícia indukovaná fokusovaným elektrónovým zväzkom) a EBISA (aktivácia povrchu indukovaná elektrónovým zväzkom) [1]. Naše výsledky z meraní klastrov tvorených koexpanziou s Ar sme porovnali už s existujúcimi výsledkami z plynnej fázy [2] a s predchádzajúcim meraním klastrov tvorených metódou „pick-up" na He nanokvapkách [3].



Obr. 1: Porovnanie energetických spektier DEA na $Co(CO)_3NO$ v plynnej fáze (červená) [2] s našimi klastrovými meraniami (modrá)

DEA produkty z našich klastrových meraní sa až na pár rozdielov (viď Obr. 1) veľmi dobre zhodujú s predošlými meraniami v plynnej fáze [2]. Hlavný rozdiel v meraniach plynnej fázy [2] a klastrov spočíva v schopnosti klastrov stabilizovať takzvané „core-excited" rezonancie nachádzajúce sa pri energiách vyšších ako najnižší excitovaný stav $Co(CO)_3NO$ (zhruba 3,3 eV). Tieto rezonancie ale neboli detegované v plynnej fáze pre DEA fragmenty charakteristické nízkoenergetickou rezonanciou (blízko 0 eV).

Značnejšie rozdiely sme pozorovali pri porovnaní našich klastrových meraní z koexpanzie molekúl $Co(CO)_3NO$ a Ar s meraniami z „pick-up" metódy na He nanokvapky [3]. Naše merania sa vyznačovali lepšou rozlíšiteľnosťou jednotlivých rezonancií v spektre, vďaka lepšej rozlišovacej schopnosti energie elektrónového zväzku v našej práci v porovnaní s predošlou [3]. Merania klastrov z He nanokvapiek síce ukázali aké klastrové produkty sa pri EA a DEA vytvoria ale ich spektrá vykazovali pomerne slabú informáciu o jednotlivých rezonanciách. Pre molekulový ión a jeho dimér sme namerali dominantnú rezonanciu blízko 0 eV, ako aj pre $Co(CO)_2NO^-$ a jeho klaster s materskou molekulou. Okrem súbežnej excitácie molekuly a EA či DEA pripisujeme týmto rezonanciám aj niekoľkokrokové elektrón/klastrové interakcie, neutrálna disociácia molekuly a rozptyl elektrónu so zmenšenou kinetickou energiou nasledované EA a DEA v klastri.

Poďakovanie

Táto práca bola financovaná Slovenskou agentúrou na podporu výskumu a vývoja, projekt číslo APVV-19-0386.

Literatúra

[1] Drost, M. et al. (2018). Surface-Anchored Metal–Organic Frameworks as Versatile Resists for Gas-Assisted E-Beam Lithography: Fabrication of Sub-10 Nanometer Structures. *ACS Nano*, 12:3825–3835.
[2] Engmann, S., et al. (2013). Absolute cross sections for dissociative electron attachment and dissociative ionization of cobalt tricarbonyl nitrosyl in the energy range from 0 eV to 140 eV. *J. Phys. Chem.*, 138:044305.
[3] Postler, J., et al. (2015). Electron-Induced Chemistry of Cobalt Tricarbonyl Nitrosyl (Co(CO)(3)NO) in Liquid Helium Nanodroplets. *J. Phys. Chem. C*, 119:20917.

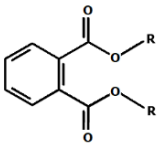
* meszaros44@uniba.sk
‡ peter.papp@fmph.uniba.sk
§ Školiteľ

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 248
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Daniel Pokorný, Peter Papp

Konformačné štúdium vybraných ftalátov a stanovenie ich protónových afinít

Daniel Pokorný[1]* Peter Papp[1‡§]
[2] Katedra experimentálnej fyziky, FMFI UK v Bratislave, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Ftaláty sú skupina chemických zlúčenín (Obr. 1) využívaných vo výrobnom procese rôznych odvetví priemyslu, napr. farmaceutickom či potravinárskom priemysle, pri výrobe stavebných materiálov, hračiek, atď. Mnohé z ftalátov sú vo vyšších koncentráciách považované za zdraviu škodlivé, aj z toho dôvodu je schopnosť ich detekcie prípadne rozkladu aktuálna tematika v oblasti výskumu.



R = metyl
R = etyl
R = propyl
R = butyl
R = izobutyl

Obr. 1: Všeobecná schéma štruktúry ftalátu s dvomi identickými charakteristickými skupinami R.

Na KEF FMFI UK v Bratislave sa touto problematikou zaoberajú experimentálne metódou iónovej pohyblivostnej spetrometrie (IMS) [Michalczuk et al., 2019]. Ako je v uvedenom článku spomenuté, pomocou IMS je možné detegovať veľmi malé množstvá látok na úrovni *ppm* až *ppt*. Princíp detekcie je založený na ión molekulových reakciách pri vysokom tlaku a protón transferových reakciách medzi reakčnými iónmi (pôvod z korónového výboja) a detegovanými molekulami.

V tejto práci sa zaoberáme teoretickou interpretáciou výsledkov z IMS experimentu pre dietylftalát (DEP), dietylizoftalát (DEIP), dietyltereftalát (DETP), dipropylftalát (DPP), diizopropylftalát (DIPP), dipropyltereftalát (DPTP), dibutylftalát (DBP), diizobutylftalát (DIBP) a dibutyltereftalát (DBTP). Z experimentu je známa iba pohyblivosť a hmotnosť daného produktu, nie však jeho schopnosť viazať protón, takzvaná protónová afinita (PA). Práve PA je hlavným parametrom v IMS, ktorý rozhoduje či daný ión bude alebo nebude detekovateľný. Ak sa molekula ftalátu zrazí s reakčným iónom (H_3O^+, resp. jeho vodné klastre) a jeho PA ja väčšia ako PA reakčného iónu, vtedy dochádza ku protónovému transferu a vzniknutý ión je detekovateľný.

Pre väčšinu látok sú však ich PA neznáme, je treba ich získať z iných experimentov alebo teoretických výpočtov. Navyše, identické molekuly môžu mať rôzne optimálne priestorové usporiadanie atómov vedúce ku stabilným štruktúram, nazývajú sa konformérmi danej molekuly (napr. relatívne usporiadanie oboch -OCOR skupín na Obr. 1). Už v predošlej práci [Michalczuk et al., 2019] bolo ukázané, že PA dietylftalátu (DEP) závisí aj od jeho geometrie, ktorý jeho konformér či dokonca aj izomér (DEP vs jeho izo- a tere- izomér) reaguje s reakčnými iónmi.

Našim cieľom tejto práce je identifikovať, ktoré konformery a izoméry sú najpravdepodobnejšími produktami v IMS experimente, a to pre skupinu ftalátov DEP, DEIP až DBTP (uvedené vyššie). Pomocou teoretických výpočtov v programovom balíku GAUSSIAN [Gaussian 16, 2019] najprv identifikujeme rôzne konformery jednotlivých študovaných ftalátov a následne aj geometrie ich protonizovaných ekvivalentov. Z ich minimálnych energií určíme PA pre jednotlivé ftaláty použitím „*Density Functional Theory"* (DFT) metód kvantovej chémie (funkcionály B97D a ωB97X-D). Porovnávaním rôznych energetických profilov v závislosti od natočenia jednotlivých charakteristických skupín -OCOR sme schopný určiť teoreticky najnižšiu možnú energiu pre danú molekulu a tak identifikovať konformér/izomér, vyskytujúci sa v experimente s najväčšou pravdepodobnosťou.

Poďakovanie

Táto práca bola financovaná Slovenskou agentúrou na podporu výskumu a vývoja, projekt číslo APVV-19-0386.

Literatúra

[Michalczuk et al., 2019] Michalczuk, B., Moravský, L., Papp, P., Mach, P., Sabo, M., Matejčík, Š. (2019). Isomer and conformer selective atmospheric pressure chemical ionisation of dimethyl phthalate. *PCCP*, 21:13679–13685.

[Gaussian 16, 2019] Frisch, M. J. et al. (2019), Gaussian 16, Revision C.01, Gaussian, Inc., Wallingford CT.

* pokorny26@uniba.sk
‡ Peter.Papp@fmph.uniba.sk
§ Školiteľ

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 249
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Mária Cíbiková, Karol Hensel, Richard Cimerman

Odstraňovanie naftalénu v systéme plazmovej katalýzy využitím ZrO_2 a $BaTiO_3$ materiálov

Mária Cíbiková[1]* Karol Hensel[1†§] Richard Cimerman[1‡!]
[1]Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

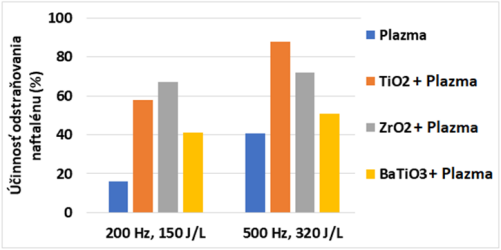
Biomasa je jedným z alternatívnych zdrojov energie. Avšak pri jej spracovaní (splyňovanie, spaľovanie a pod.) vzniká množstvo rôznych polutantov, vrátane dechtov. Dechty sú komplexnou zmesou zväčša kvapalných uhľovodíkov, ktoré sú zodpovedné za mnohé poruchy v priemyselných zariadeniach. Navyše sú tiež vysoko toxické a karcinogénne a preto sa hľadajú rôzne spôsoby ako ich odstraňovať. Existujú viaceré tepelné a katalytické metódy odstraňovania dechtov, avšak mnohé z nich sú sprevádzané nízkou účinnosťou, či vysokou energetickou náročnosťou. V tomto smere sa priaznivo javí využitie plazmovej katalýzy. Plazma obsahuje rôzne reaktívne častice, ktoré dokážu reagovať s časticami cieľového plynu (napr. dechtu) a tým ho rozkladať. Katalýza zase dokáže znížiť spotrebu energie a zlepšiť selektivitu. Skombinovanie schopností plazmy a katalýzy vedie k zlepšeniu účinkov rozkladu cieľovej zlúčeniny, pričom môže dochádzať až k synergickým efektom. Inými slovami, celkový účinok môže byť vyšší ako súčet účinkov jednotlivo plazmy a katalýzy.

V tejto práci sme sa zaoberali účinkami kombinácie plazmy s materiálmi ZrO_2 a $BaTiO_3$ na odstraňovanie dechtov. Ako modelový decht sme si zvolili naftalén. ZrO_2 je katalytický materiál, ktorého špecifický povrch vykazuje oxidačno-redukčné, acido-bázické a adsorpčné vlastnosti. $BaTiO_3$ je feroelektrický materiál s vysokou dielektrickou konštantou, vďaka čomu dokáže zosilniť intenzitu elektrického poľa vo výboji. Vďaka týmto zaujímavým vlastnostiam sme sa rozhodli preskúmať ich účinky pri odstraňovaní naftalénu, v systéme plazmovej katalýzy.

Plazmu sme generovali v laboratórnom vzduchu pomocou dielektrického bariérového výboja, pričom materiál (ZrO_2 alebo $BaTiO_3$) bol umiestnený medzi elektródami vo forme peletiek o veľkosti Ø 2-3 mm.

Nosný plyn (vzduch), obohatený o pary naftalénu s počiatočnou koncentráciou 5000 ppm, bol privádzaný do plazmovo-katalytického reaktora (sklenená trubica dlhá 7,5 cm s veľkosťou Ø 1,5 cm), v ktorom bol opracovaný a následne sa priviedol do FTIR spektrometra na analýzu. Prietok plynu bol ustálený na hodnotu 0,5 L/min. Experiment prebiehal v atmosférickom tlaku pri teplote 100°C (zabezpečenej výhrevnou pecou), pričom reaktor bol napájaný striedavým vysokým napätím s amplitúdami 11-14 kV pri dvoch rôznych frekvenciách 200 Hz a 500 Hz. Amplitúdu elektrického napätia sme nastavili tak, aby sme pri 200 Hz získali hodnotu špecifickej energie vloženej do výboja (SIE) 150 J/L a pri 500 Hz 320 J/L.

Merania ukázali (obr. 1), že plazmová katalýza je pri odstraňovaní naftalénu naozaj účinnejšia ako samotná plazma. Pri porovnaní účinností jednotlivých plazmovo-katalytických reaktorov sme zistili, že pri nižšej frekvencii sa ako najlepší javil reaktor naplnený ZrO_2 s účinnosťou až 67 % a pri vyššej TiO_2 s účinnosťou 88 %. Údaje o plazme a TiO_2 sú pre porovnanie prebraté z práce [Cimerman, 2018], na ktorú táto práca nadväzuje. Okrem sledovania účinností sme skúmali sme aj niektoré elektrické vlastnosti plazmovo-katalytických reaktorov a taktiež produkciu plynných a tuhých produktov pomocou FTIR. Medzi plynné produkty patrili najmä H_2O, CO_2, CO, HCOOH a medzi tuhé zase rôzne uhlíkaté zlúčeniny, ktoré sa usádzali najmä na stenách reaktora a okienkach plynnej kyvety. Kvalitatívne bola vyhodnotená produkcia CO, ktorý je najlepším indikátorom rozkladania uhľovodíkov, keďže sa na rozdiel od H_2O a CO_2 bežne vo vzduchu nenachádza. Pri 200 Hz vykazoval najvyššiu produkciu CO reaktor naplnený $BaTiO_3$ a pri 500 Hz reaktor naplnený TiO_2.



Obr. 1: Účinnosti odstraňovania naftalénu jednotlivých plazmovo-katalytických reaktorov, pri rôznych frekvenciách aplikovaného napätia.

Literatúra

[Cimerman, 2018] Cimerman, R., Račková, D., Hensel, K. (2018). Tars removal by non-thermal plasma and plasma catalysis. *J. Phys. D, Appl. Phys.* 51 (27), 274003.

* cibikova17@uniba.sk
† karol.hensel@fmph.uniba.sk
‡ cimerman@fmph.uniba.sk
§ Školiteľ
! Konzultant

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 250
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Romana Ružanská, Veronika Medvecká, Anna Zahoranová

Povrchová úprava skla a papiera nízkoteplotnou plazmou (rozšírený abstrakt)

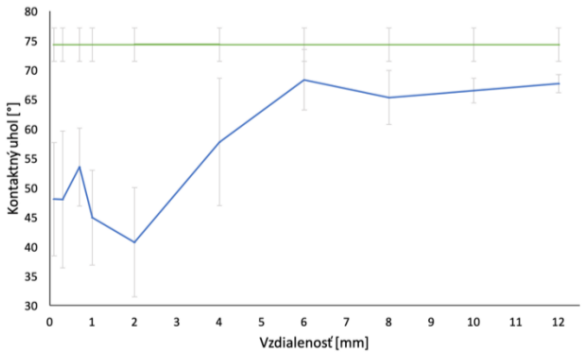
Romana Ružanská [1*] Veronika Medvecká [1†] Anna Zahoranová [1‡§]
[1] Katedra experimentálnej fyziky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Cieľom tejto práce bolo skúmanie zmien na povrchu dvoch materiálov v dôsledku úpravy nízkoteplotnou plazmou (NTP) generovanou pri atmosférickom tlaku pomocou Multidutinového povrchového výboja (angl. multi-hollow surface dielectric barrier discharge - MSDBD). MSDBD obsahuje 105 otvorov s priemerom 0.6 mm, ktoré umožňujú vyfukovať plazmu na zvolený povrch. Plocha, ktorú tieto otvory pokrývajú je 4 cm^2. Pri použití vzduchu ako pracovného plynu je podľa výrobcu efekt plazmovej úpravy až do vzdialenosti 5 mm, čo je rádovo viac v porovnaní s DCSBD výbojom, ktorý má efektívnu vzdialenosť do 0.3 mm. [Homola, T. et al., 2017]

Overovali sme efektívnosť úpravy NTP aj pre väčšie vzdialenosti pri povrchovej úprave skla a papiera. Zmeny sme ohodnotili pomocou merania veľkosti kontaktného uhla vody, čo je rýchla metóda na stanovenie zmien zmáčavosti povrchu. Pracovali sme vo vzduchu s prietokom 6 L/min. Fixovaným parametrom bol čas opracovania 5 sekúnd a vzdialenosť sme menili od 0.1 mm až po 12.45 mm

Povrchová úprava skla bola efektívna na zmenu hydrofilných vlastností skla pre všetky skúmané vzdialenosti. Veľkosť kontaktného uhla vody na povrchu skla nezávisí od vzdialenosti od výbojky. Najlepší výsledok pre sklo sme dosiahli pre vzdialenosť 2 mm a to pokles z referenčných 51.0° ± 3.3° na 7.8° ± 2.5°.

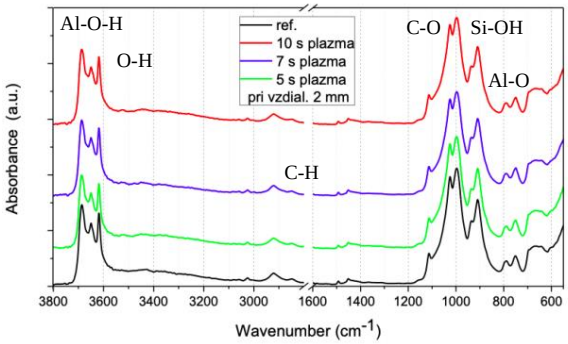
Papier, ktorý sme používali, bol výrobcom povrchovo modifikovaný. Na jeho povrch bola nanesená vrstva $Al_2O_32SiO_22H_2O$.



Obr.1: Závislosť kontaktného uhla od vzdialenosti pre papier, čas opracovania NTP 5 s

Najlepší výsledok pre papier sme dosiahli pri vzdialenosti 2 mm a to pokles z referenčných 74.3° ± 2.9° na 40.7° ± 9.3°. Pri rovnakom čase dosiahli [Galmiz, O. et al., 2019] s DCSBD výbojom pri vzdialenosti 0.3 mm hodnotu 39.00° ± 2.00°

Zmeny v chemických väzbách na povrchu papiera sme analyzovali pomocou spektroskopickej metódy ATR-FTIR. Ako ukázala analýza, zmeny oproti referenčnej vzorke sú veľmi malé, chemické skupiny na povrchu ostávajú zachované. Vidíme, že povrchová úprava plazmou neznehodnotila povrch papiera.



Obr. 1: ATR-FTIR spektrum papiera (2 mm, 5 s)

Záverom práce je, že MSDBD je vhodný na povrchovú úpravu skla a papier, je efektívny v porovaní s inými zdrojmi plazmy. Plazmová úprava spôsobila zmenu hydrofilných vlastností materiálov. Výhodou MSDBD je jeho veľkosť a kompaktnosť. Na rozdiel od DCSBD výboja nepotrebuje chladenie olejom pretože MSDBD výbojka je chladená priamo pracovným plynom.

Literatúra

[Homola, T. et al., 2017] Homola, T. et al., (2017) An Array of Micro-hollow Surface Dielectric Barrier Discharges for Large-Area Atmospheric-Pressure Surface Treatments. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, roč. 37, č. 4, s.1149-1163

[Galmiz, O. et al., 2019] Galmiz, O. et al., (*2019*) Effect of atmospheric pressure plasma on surface modification of paper. *AIP Advances*, roč. 9, č. 10, s.105013

* ruzanska1@uniba.sk
† medvecka3@uniba.sk
‡ zahoranova1@uniba.sk
§ školiteľ

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 251
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Emanuel Maťaš, Richard Cimerman, Karol Hensel

Elektrické a optické charakteristiky povrchového bariérového výboja generovaného v perforovanom keramickom elemente

Emanuel Maťaš[1]* Richard Cimerman[1†] Karol Hensel[1‡]
[1] Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

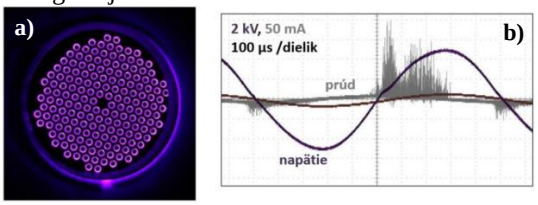
Dielektrické bariérové (DBD) výboje už mnoho rokov získavajú svoje uplatnenie v rôznych aplikáciách, ako napríklad čistenie vzduchu od nežiadúcich látok [Cimerman 2018] [Kogelschatz 2003], leptanie, čistenie a odprašovanie povrchov [Dimitrakellis 2018]. Podľa geometrie elektród rozdeľujeme DBD výboje na povrchové a objemové. Pri povrchových DBD výbojoch sú elektródy blízko seba vzájomne oddelené len vrstvou dielektrika. Výboj sa potom generuje na povrchu elektródy a šíri po povrchu dielektrika. Pri objemových výbojoch sú elektródy ďalej od seba, čím sa výboj generuje v priestore (plyne) medzi nimi.

V našej práci sme skúmali elektrické a optické charakteristiky a chemickú aktivitu povrchového DBD výboja generovaného pomocou perforovaného keramického elementu (*Kyocera*). Konštrukcia elementu pozostávala z dvoch Ni/Au elektród vzájomne oddelených vrstvou keramiky Al_2O_3. Jedna elektróda bola umiestnená na povrchu keramiky, tzv. odhalená elektróda, na ktorú sa privádzalo vysoké napätie s amplitúdou 3 – 7 kV a s frekvenciou 200 – 2000 Hz. Druhá elektróda bola uzemnená a zapuzdrená vo vnútri keramiky. Rozmery elementu boli 50 x 50 x 1 mm, pričom obsahoval 170 otvorov s vnútorným priemerom 1,5 mm. Po aplikovaní vysokého napätia sa výboj generoval na hranách jednotlivých otvorov elementu (Obr. 1 (a)), čo umožňovalo efektívny kontakt prefukovaného plynu s výbojom. Ako nosný plyn sa použil syntetický suchý vzduch, ktorý následne prechádzal cez zvlhčovač, (nádobu s vodou), čím sa obohacoval o vodné pary a tým bolo možné vlhkosť vzduchu variovať v rozmedzí 20 – 80 %. Plyn vždy prúdil smerom od zapuzdrenej k odhalenej elektróde s prietokom 0,5; 1 a 2,4 l/min.

Charakteristiky skúmaného výboja sme vyhodnocovali pri rôznych podmienkach (prietok a relatívna vlhkosť vzduchu, frekvencia a amplitúda aplikovaného napätia). V rámci elektrických charakteristík sme vyhodnocovali výkon výboja, amplitúdu a početnosť prúdových pulzov, z optických charakteristík najmä emisnú intenzitu žiarenia výboja.

Optická emisná spektroskopia výboja bola uskutočnená pomocou optickej sústavy (clonky a šošovky) pričom signál bol privádzaný optickým vláknom do emisného spektrometra. Chemická aktivita študovaného výboja bola vyhodnotená pomocou UV absorpcie (254 nm) pre prípad produkcie ozónu O_3, ako aj infračervenou absorpčnou spektroskopiou (FTIR) v prípade produkcie oxidu dusného N_2O a kyseliny dusičnej HNO_3.

Z výsledkov práce vyplýva, že výboj je najstabilnejší (v zmysle elektrických a optických charakteristík) v suchom vzduchu, čo znamená, že po aplikovaní dostatočne vysokého napätia (min. 3 kV) sa výboj začal postupne generovať v jednotlivých otvoroch elementu. S rastúcou relatívnou vlhkosťou vzduchu rástlo aj zápalné napätie výboja, výboj sa generoval len v niektorých otvoroch, poklesla intenzita žiarenia výboja, ako aj produkcia O_3 a N_2O, no koncentrácia HNO_3 práve naopak vzrástla. Nakoľko študovaný výboj umožňuje priame a efektívne opracovanie prúdiaceho plynu, jeho potencionálne využitie môže byť napríklad v systémoch na čistenie znečistených plynov alebo pri opracovaní povrchov či ich biologickej dezinfekcii.



Obr. 1: a) Fotografia výboja [Expozícia 4 s, F5.6, ISO 400]; b) časový priebeh napätia a prúdu pri aplikovanom napätí s amplitúdou 5 kV a s frekvenciou 1 kHz (2,4 l/min; relat. vlhkosť 40%)

Literatúra

[Cimerman 2018] Cimerman R., Račková D. and Hensel K. "Tars removal by non-thermal plasma and plasma catalysis." *J. Phys. D: Appl. Phys.* 51 (2018): 274003.

[Kogelschatz 2003] Kogelschatz U. "Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications." Plasma chemistry and plasma processing 23.1 (2003): 1-46.

[Dimitrakellis 2018] Dimitrakellis P. and Gogolides E. "Atmospheric plasma etching of polymers: A palette of applications in cleaning/ashing, pattern formation, nanotexturing and superhydrophobic surface fabrication." *Microelectronic Engineering* 194 (2018): 109-115.

* matas9@uniba.sk
† cimerman@fmph.uniba.sk
‡ hensel@fmph.uniba.sk

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 252–262
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Barbora Krajmerová, Klára Velmovská

Neformálne vzdelávanie vo fyzike formou online videohovorov

Barbora Krajmerová[1*] Klára Velmovská[1†‡]

[1]Katedra didaktiky matematiky, fyziky a informatiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstrakt

Neformálne vzdelávanie v oblasti fyziky môže dopomôcť k rozvoju vedomostí a zručností nadobudnutých v škole a prepojiť ich s reálnymi situáciami. V súčasnej dobe, zasiahnutej celosvetovou pandémiou, sme nútení hľadať nové spôsoby vzdelávania. V práci sa venujeme teoretickému vymedzeniu neformálneho vzdelávania a online synchrónnemu vzdelávaniu formou videohovorov. Predkladáme niekoľko fyzikálnych experimentov určených pre neformálne vzdelávanie žiakov na úrovni ISCED 2 (t. j. druhý stupeň základných škôl). Experimenty sú spracované do žiackych listov a usmernení pre vedúceho neformálneho vzdelávania z fyziky. Experimenty boli zrealizované so žiakmi 6. až 9. ročníka základných škôl v rámci neformálneho vzdelávania formou online videohovorov. Príspevok tiež obsahuje analýzu zrealizovaného prieskumu. Vidíme možnosť, že neformálne vzdelávanie vo fyzike formou online videohovorov je vhodnou alternatívou ku klasickému neformálnemu vzdelávaniu vo fyzike, pokiaľ si to okolnosti vyžadujú.

Kľúčové slová: neformálne vzdelávanie vo fyzike, videohovor, online priestor, pokus, experiment.

1 Úvod

Už približne rok (s niekoľkými prerušeniami) sa školské vzdelávanie na druhom stupni základných škôl poväčšine realizuje online. Vo väčšine škôl sa obmedzil rozvrh vyučovacích hodín a prerušila sa krúžková činnosť, aby sa zabezpečilo čo najmenšie stretávanie sa detí. Avšak podobne, ako je možné realizovať formálne vzdelávanie na diaľku, tak sa domnievame, že je to možné aj s neformálnym vzdelávaním.

Keďže absentuje krúžková činnosť a deti nemajú možnosť absolvovať ani rôzne fyzikálne krúžky, tak sme sa rozhodli zistiť, či je možné realizovať neformálne vzdelávanie vo fyzike v online priestore. K tomu sme najskôr zadefinovali pojmy (dištančné vzdelávanie, offline vzdelávanie, synchrónne a asynchrónne online vzdelávanie), navrhli sme súbor experimentov a postup, ako bude online neformálne vzdelávanie prebiehať. V rámci toho sme uskutočnili prieskum, aby sem zistili, výhody a nevýhody tejto formy neformálneho vzdelávania.

2 Vzdelávanie

Každý človek je vedome alebo podvedome vystavovaný množstvu podnetov a informácií. Niektoré informácie človek vyhľadáva cielene, iné nadobudnuté vedomosti si ani nemusí uvedomovať. Kireš [2015] považuje za základnú úroveň poznávania vnímanie podnetov z okolia. "Nie je dôležitá iba schopnosť získať informácie, ale aj schopnosť analyzovať ich, posúdiť a stanoviť podložené závery." [Velmovská a kol., 2021]

Vzdelávanie sa môžeme vnímať ako každodennú činnosť, ktorú človek praktizuje už od narodenia. Pešek a kol. [2020] hovorí, že učenie sa úzko súvisí s pamäťou a rečou. Z evolučného hľadiska pokladá za významné obdobie asi pred 50 000 rokmi, kedy sa začala vyvíjať reč. Vďaka nej je učenie oveľa efektívnejšie a dokážeme si navzájom odovzdávať vedomosti, nápady, skúsenosti. Taktiež slovami dokážeme vysvetľovať abstraktné pojmy. „S prijímaním, vyhľadávaním, spracovaním, využívaním a interpretovaním získaných informácií úzko súvisí celý rad praktických zručností, spôsobilostí intelektuálnej práce a postupného formovania postojov, ktoré ako celok nazývame kompetencie. Proces získavania poznatkov a ich transformáciu na vedomosti spolu so získavaním zručností a spôsobilostí nazývame vzdelávanie." [Kireš a kol., 2016]

Vzdelávanie môže mať rôzne podoby, formy. Získavanie poznatkov je komplexný proces. V tejto práci sa nebudeme venovať všetkým spôsobom vzdelávania, avšak Ainsworth, Eaton, [2010] uvádzajú, že je dôležité poznať rôzne druhy a cesty vzdelávania. Môže to byť užitočné hlavne pre učiteľov a študentov. Každý si môže nájsť spôsob výučby, ktorý mu je najprirodzenejší a najefektívnejší. Potom, ako človek spozná svoj spôsob vzdelávania môže lepšie pochopiť

* barbora.krajmerova@gmail.com
† klara.velmovska@fmph.uniba.sk
‡ Školiteľ

a tolerovať individuálne prístupy vzdelávania druhých.

Učenie sa – či už formálne, neformálne alebo informálne – je súčasťou sociálneho systému, v ktorom vnútorné motivácie (napríklad zvedavosť) a vonkajšie motivácie (napríklad zamestnateľnosť alebo spoločenské postavenie) interagujú a vzájomne sa ovplyvňujú. Pokiaľ sú výsledky učenia sa považované za cenné a integrované do väčšieho sociálneho systému, potom sa stáva sociálne relevantným.[Popa, 2012]. Človek sa vzdeláva celý život, v niektorých životných etapách rýchlejšie, v iných pomalšie. Zo sociálneho a ekonomického hľadiska je pre každého výhodné, ak sa dokáže naučiť nové veci a prispôsobovať sa dynamicky sa meniacej spoločnosti.

2.1 Rozdelenie foriem vzdelávania a vymedzenie pojmov

Najčastejšie sa stretávame u rôznych autorov s rozdelením vzdelávania na formálne, neformálne a informálne vzdelávanie. Ako napríklad Chistholmová [2005], Popa [2012] a ďalší. Avšak Werqiun [2007] v správe OECD navrhuje aj štvrtú formu vzdelávania a to poloformálne vzdelávanie (ang. semi-formal education). V nasledujúcej tabuľke 1 rozoznáva ich rozdelenie vzhľadom na zámernosť výučby a vzhľadom na ciele výučby.

	Zámerná výučba	Nezámerná výučba
Aktivita má vzdelávacie ciele	Formálne vzdelávanie	Poloformálne vzdelávanie
Aktivita nemá vzdelávacie ciele	Neformálne vzdelávanie	Informálne vzdelávanie

Tabuľka 1: Rozdelenie foriem vzdelávania [Werquin, 2007]

Ďalej upresňuje, že **poloformálne vzdelávanie** sa odohráva, ak sa počas aktivít s učebnými cieľmi, dostávame nad rámec stanovených učebných cieľov. Študenti majú chuť dozvedieť sa niečo nové, avšak si neuvedomujú, že ide o učenie sa.

2.2 Formálne vzdelávanie

Formálne vzdelávanie sa deje v škole, počas kurzov, na pracovisku. Jednotlivé výučbové aktivity sú navrhnuté tak, aby obsahovali učebné ciele. Študenti sa zúčastňujú výučby s explicitným cieľom získať vedomosti, zručnosti alebo iné kompetencie [Werqiun, 2007]. Podľa Sirualu [2004] je formálne vzdelávanie charakteristické štruktúrovanosťou a hierarchiou. Často sa kladie dôraz na učiteľa, vzdelávacie ciele a na memorovanie informácií, ako spôsob získavania vedomostí.

Uspokojovanie túžob ľudí po vzdelaní a súčasne ich uplatnenie na trhu práce je snahou každej spoločnosti. Vytváranie uceleného systému vzdelávania je základom pre formálne vzdelávanie. Pri jeho vytváraní sa dbá na obsah, metódy, prostriedky, cieľové požiadavky, merateľné výstupy a podobne. Charakteristická je aj nadväznosť stupňov vzdelávania, ktorá je striktne definovaná [Kireš a kol., 2016]. Typickým miestom realizovania formálneho vzdelávania je škola.

Formálne vzdelávanie vo fyzike: Najčastejšie sa jedná o vyučovanie fyziky v školách. Medzi formálne vzdelávanie patria aj kvalifikované kurzy, školenia a iné doplnkové vzdelanie s fyzikálnym a prírodovedným obsahom. Po ukončení formálneho vzdelávania študent získava vysvedčenie, certifikát alebo iný doklad o absolvovaní vzdelávania.

2.3 Neformálne vzdelávanie

Pri neformálnom vzdelávaní ide o prístup založený na dobrovoľnej účasti. Snahou je, aby toto vzdelávanie bolo viacej zamerané na prax. Siurala [2004] sa zmieňuje o neformálnom vzdelávaní, že vychádza z analýzy a porozumenia skutočnosti a využíva sa ako spôsob, ako sa stať aktívnym občanom prostredníctvom činnosti občianskej spoločnosti. Môžeme ho považovať za doplnkové vzdelávanie ku formálnemu vzdelávaniu.

Jednotlivci sa môžu vzdelávať aj počas voľnočasových aktivít, ktoré nemajú jasné učebné ciele. Zúčastnení sú si vedomí, že sa učia. Ich úmysel je stať sa kvalifikovanejšími, viac informovanými a/alebo kompetentnejšími [Werqiun, 2007]. Aj keď by sa mohlo zdať, že neformálne vzdelávanie veľmi nezávisí od konkrétnych inštitucionálnych a právnych opatrení, avšak jeho spoločenská akceptácia a profesionálne uznanie zjavne závisí od nich. [Popa, 2012].

Neformálne vzdelávanie vo fyzike: Fyzikálne, vedecké a prírodovedné krúžky na školách sú bežnou formou neformálne vzdelávanie vo fyzike. Ďalej sú to rôzne neziskové organizácie, ktorých cieľom je popularizácia vedy a ponúkajú pre deti zaujímavý fyzikálny obsah. Na Slovensku sú rozšírené korešpondenčné fyzikálne semináre, interaktívne vedecké výstavy, sústredenia a fyzikálne tábory. Vedúci alebo animátori sa venujú deťom jednotlivo alebo v menších skupinkách. Pri realizovaní neformálneho vzdelávania nie je nevyhnutné, aby vedúci mali kvalifikované vzdelanie z fyziky, často postačuje viac vedomostí a skúseností. Medzi neformálne vzdelávanie môžeme zaradiť aj rôzne doučovania a nekvalifikované kurzy z fyziky.

2.4 Informálne vzdelávanie

Vlastný záujem človeka a jeho vnútorná motivácia sú hlavnými dôvodmi realizácie informálneho vzdelávania. „Informálne vzdelávanie je laikmi chápané skôr ako zábava a relax. Jeho výsledkom môže byť prevažne široko zameraný súbor vedomostí a zručností, v niektorých témach výrazne ovplyvnený mierou záujmu.“ [Kireš 2016] Informálne vzdelávanie alebo niekedy nazývané aj nekonvenčné vzdelávanie sa odohráva mimo školských osnov. Stretáme sa s ním v každodennom živote; v rodine, v rovesníckych skupinách, vplyvom médií a pod. Takéto vzdelávanie nie je vedomé, ani organizované [Siurala, 2004]. Realizovanie činností bez učebných cieľov a bez vedomia učenia sa môže byť teda tiež vzdelávaním.

Informálne vzdelávanie vo fyzike: Rozvíjanie fyzikálnych vedomostí v rámci informálneho vzdelávania je možné napríklad sledovaním fyzikálnych a prírodovedných dokumentov v televízii, čítaním popularizačných vedeckých článkov, vedením rozhovorov na fyzikálne témy. Pre mnohých mladých je používanie internetu každodennou súčasťou života a práve internet je zdrojom mnohých informácií, ktoré mladí ľudia získavajú. V súčasnosti veľmi obľúbeným a rozšíreným spôsobom ako sa dozvedieť nové vedomosti je aj pozeranie pútavých videí na YouTube. Medzi informálne vzdelávanie môžeme zaradiť aj vtipné fyzikálne obrázky a krátke texty, ktoré sa najčastejšie šíra sociálnymi sieťami na internete.

2.5 Vzájomné porovnanie foriem vzdelávania

Pri definovaní pojmov sa ukázali byť užitočnými nasledujúce tri vlastnosti:

- či vzdelávanie zahŕňa výučbové ciele,
- či je zámerné,
- či vedie ku kvalifikácii/osvedčeniu.

Ukázalo sa osožným nevymedzovať pojmy samostatne, ale vo vzájomnom kontraste. Porovnanie formálneho a neformálneho vzdelávania poskytuje Popa [2012]. Podľa neho formálne vzdelávanie predpokladá zámernosť a vzdelávacie ciele, zatiaľ čo neformálne vzdelávanie nie. Na rozdiel od formálneho vzdelávania, neformálne vzdelávanie nevedie k získaniu kvalifikácie. Neformálne vzdelávanie zahŕňa istý stupeň organizovanosti a zámernosti. Vzdelávacie ciele pri neformálnom vzdelávaní nie sú natoľko striktné ako pri formálnom vzdelávaní. Pri neformálnom vzdelávaní sa taktiež dosahujú validné výsledky vzdelávania.

Charakteristiky foriem vzdelávania sa líšia vzhľadom na osobitosť každej spoločnosti alebo kultúry. Definovať pojmy na medzinárodnej úrovni je veľmi náročné, priam nemožné. Pri definíciách neformálneho a informálneho vzdelávania z rôznych zdrojov nastávajú mierne odchýlky. Je náročné dosiahnuť konsenzus. Rozdiely sú badateľné v závislosti od krajiny a času. Bolo by vhodné definovať jednotlivé pojmy vo vzájomnom vzťahu, čím by sa vyzdvihli rozdiely medzi formami vzdelávania [Werquin, 2008].

2.6 Práca s mládežou v oblasti neformálneho vzdelávania

V práci sa zameriavame hlavne na prácu s deťmi a mládežou v rámci neformálneho vzdelávania. Tejto problematike sa venuje aj Lenčo [2012] v kapitole Výchova a voľný čas. Načrtáva históriu a vývoj neformálneho vzdelávania. Rozoznáva zmenu vo filozofii práce s mládežou od 90. rokov 20. storočia. Do popredia sa dostáva výrazné prepojenie so zamestnaním. Práca s mládežou by mala napomáhať ich celoživotnému vzdelávaniu a uplatneniu sa na trhu práce. Ďalej Lenčo [2012] dodáva, že „výchovno-vzdelávací rozmer práce s mládežou ustupuje čoraz viac dominujúcej sociálnej práci, v ktorej je prístup ku klientovi viac individualizovaný (mladí ľudia sú kategorizovaní, ako napr. mladý násilník, mladý užívateľ drog, mladistvá matka atď.).“ Aj napriek rozšírenosti sociálnych služieb naďalej fungujú záujmové aktivity pre mládež a dobrovoľnícke mládežnícke organizácie, ktoré svojim poslaním napomáhajú mladým k osobnostnému a sociálnemu rozvoju.

Práca s mládežou v oblasti neformálneho vzdelávania je podľa Európskeho rámca pre politiku charakterizovaná ako vedomá výchovno-vzdelávacia práca s mladými ľuďmi. Je definovaná ako dobrovoľná práca, ktorej cieľom je zameriavať sa na aktívne občianstvo mladých ľudí a ktorá podporuje ich začleňovanie do spoločnosti. Práca s mládežou sa môže vykonávať v rámci mládežníckych organizácií alebo iných skupín mladých ľudí a na miestnej a regionálnej úrovni. Kvalitu práce s mládežou možno zvýšiť cez vhodné vzdelávanie pracovníkov s mládežou [Siurala, 2004].

2.7 Neformálne prostredie

Pod neformálnym prostredím v tejto práci rozumieme prostredie, v ktorom sa realizuje neformálne vzdelávanie. Ide o „pozitívne učebné prostredie, ktoré je založené na aktívnej participácii, tvorivosti a radosti.“ [Fudaly, Lenčo, 2008] Prostredie je pre žiakov ústretové a bezpečné. Okrem získavania vedomostí a zručností musia žiaci pociťovať prijatie a priateľskú atmosféru vytvárania dobrých vzťahov. Takéto prostredie sa často nazýva aj bezpečné prostredie. Pešek a kol. [2020] uvádzajú, že v bezpečnom prostredí

sa účastníci neboja robiť chyby, sú pripravení jeden od druhého sa učiť, sú navzájom voči sebe otvorení a ochotní poskytovať si spätnú väzbu.

3 Formy vzdelávania na diaľku

Súčasní žiaci základných škôl už od narodenia vyrastajú v dobe, kedy sú digitálne technológie bežnou súčasťou života ľudí. Od malička sú konfrontovaní s televíziou, internetom, mobilnými telefónmi, smartfónmi, počítačmi, tabletmi a ďalšími technologickými vymoženosti. Mládež vo veku žiakov základných škôl nezažila dobu, v ktorej digitálne technológie neboli každodennou pomôckou ľudí. Môžeme sa stretnúť s viacerými označeniami týchto mladých ľudí; napríklad N-generácia (ang. net generation) alebo D-generácia (ang. digital generation). Pransky [2001] označuje túto mládež ako digitálni domorodci (ang. digital natives). A druhú skupinu tvoria ľudia, ktorí sa nenarodili v digitálnom svete, ale sa adaptovali a digitálne technológie sa naučili používať až neskôr, tých nazýva digitálnymi prisťahovalcami (ang. digital immigrants). V oboch prípadoch môžu ľudia nadobúdať rôznu úroveň práce s digitálnymi technológiami, rôzne digitálne kompetencie. Avšak nielen vek zohráva úlohu pri nadobúdaní zručností práce s digitálnymi technológiami, ale aj dostupnosť digitálnych zariadení a možnosti pripojenia sa k internetu. Pretože nie všetci ľudia majú dostatočné sociálne zabezpečenie, aby dokázali udržať krok s rýchlo sa rozmáhajúcim vplyvom digitalizácie. Každý človek má rôznu schopnosť komunikovať online a pracovať s informáciami pomocou digitálnych technológií. Lousada [2013] uvádza, že digitálne kompetentným sa človek stáva, ak je schopný porozumieť a zhodnotiť aké možnosti a výhody prinášajú digitálne technológie.

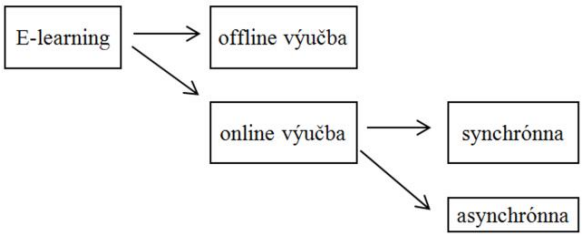
Dištančné vzdelávanie

Vzhľadom na pandemickú situáciu koronavírusu, má už väčšina súčasných žiakov druhého stupňa základných škôl, na ktorých sa v tejto práci zameriame, skúsenosti s *dištančným vzdelávaní*, alebo inak nazývaným – vzdelávaním na diaľku. Jedná sa o „diaľkové vzdelávanie prostredníctvom korešpondencie, telekomunikačných médií a iných prostriedkov, pri ktorých spravidla nedochádza k priamym kontaktom medzi pedagogickým zamestnancom a samostatne študujúcim žiakom.“ [Zákon 245/2008, § 54, ods. 10]

E-learning

Ak sa pri vzdelávaní využívajú digitálne technológie, tak hovoríme o E-learningu alebo o elektronickom vzdelávaní. Ako uvádza Čapek [2015], tak E-learning je vzdelávanie, ktoré je realizované pomocou digitálnych technológií, spravidla aj s využitím internetu. Môžeme sa stretnúť aj s názvami e-learning alebo web-based traning.

E-learning môžeme rozdeliť podľa toho, v akej miere a akým spôsobom sa využívajú digitálne technológie (tabuľka 2).



Tabuľka 2: Formy E-learningu.
[Zdroj: Kopecký In: Burgerová, Adamkovičová, 2006]

Pri *offline výučbe* nie je potrebné, aby bol počítač pripojený k internetu. Učebné materiály sú študentom poskytnuté na pamäťových médiách (napr. USB-kľúč, pevný disk). Tento spôsob vzdelávania je v súčasnosti na ústupe. [Burgerová, Adamkovičová, 2006]

Online výučba predstavuje vzdelávanie, ktoré využíva internet. Rozoznávame synchrónnu a asynchrónnu online výučbu.

Synchrónna výučba vyžaduje, aby boli študenti a učiteľ pripojení k internetu v rovnakom čase, nemusia sa však nachádzať na rovnakom mieste. Vďaka tomu môže prebiehať komunikácia s možnosťou okamžitej odpovede, spätnej väzby. Do synchrónnej online výučby zaraďujeme aj vzdelávanie formou videohovorov. V ideálnom prípade takáto výučba v čo najväčšej miere simuluje klasický vyučovací proces v škole. Nezmeneným by malo byť aj poskytovanie potrebných učebných zdrojov, spätnej väzby alebo zabezpečenie dostatočnej podpory zo strany učiteľa [Bednárik, 2020].

Asynchrónna podoba online vzdelávania si nevyžaduje časové zladenie účastníkov. Tento spôsob sa najčastejšie využíva pri komunikácii cez hromadnú mailovú korešpondenciu, diskusné fóra a podobne. Účastníci môžu čítať správy a reagovať na ne kedykoľvek, bez ohľadu na ostatných účastníkov komunikácie. [Frk, 2010] Študijné materiály si môžu študenti stiahnuť do počítača a v štúdiu pokračovať aj offline formou.

3.1 Neformálne vzdelávanie vo fyzike v online priestore

Práca žiakov v online priestore môže byť rôznorodá. Na rozvíjania fyzikálnych vedomostí a zručností je na internete ponúkané veľké množstvo materiálov, článkov, videí, animácií, appletov a podobe. My sa v tejto práci zamierame

na prácu žiakov v malých skupinách, uskutočňovanú pomocou videohovorov. Priebeh videohovorov nadobúda všetky charakteristiky neformálneho vzdelávanie. Jediným zásadným rozdielom je, že žiaci nie sú fyzicky v kontakte. Neformálnym prostredím sa stáva spoločný online videohovor a izba každého zúčastneného žiaka.

4 Výber zo zbierky pokusov

Vytvorili sme zbierku pokusov, ktorej spoločným prvkom všetkých experimentov bolo využite vody. Nižšie uvádzame tri experimenty, ktoré boli podľa nás vhodné aj pre experimentovanie realizované online formou videohovorov. K experimentom sme vypracovali pracovné listy pre žiaka a prikladáme aj niekoľko praktických odporúčaní pre animátora, vedúceho neformálneho vzdelávania. Ako napríklad návrh na realizáciu a stručné fyzikálne vysvetlenie fyzikálneho javu. Nie je nutné, aby mal animátor vyššie fyzikálne vzdelanie, postačuje porozumenie fyzikálnemu problému a schopnosť priblížiť ho žiakom na ich úrovni.

4.1 Pracovný list – Kvety na vode

Je to možné, aby sme vytvorili kvety, ktoré rozkvitnú bez ohľadu na ročné obdobie? Alebo aby sme vytvorili hviezdy, ktoré zažiaria aj počas dňa?

Pomôcky:

- tenký papier,
- hrubý papier
- ceruzka,
- nožnice,
- nádoba na vodu,
- voda.

Postup:

1. Na tenký papier si nakreslíme kvet, alebo hviezdu, ako na obrázku 1, s priemerom 5 až 10 cm.
2. Vystrihneme.
3. Lupene kvetu alebo cípy hviezdy zahneme dovnútra.
4. Do nádoby nalejeme vodu.
5. Po ustálení hladiny vody v nádobe, opatrne položíme poskladaný kvet alebo hviezdu na hladinu.
6. Pozorujeme.
7. Pokus zopakujeme s tvrdým papierom.

Spracované podľa: [Senćanski, 2013].



Obrázok 1: Papierové kvety na vode

Odpovedz na otázky:

1) Pokús sa vysvetliť, že prečo sa kvety položené na vode otvárajú?
2) Čo sa dialo, ak sme použili tvrdý papier? Aké rozdiely pozorujeme pri kvete z tenkého a z hrubého papiera. Čo by sa dialo, ak by sme kvety vystrihli z vreckovky?
3) Pokús sa vymyslieť iné vhodné tvary, ktoré by sa správali na hladine rovnako.

4.2 Praktické informácie pre animátora k experimentu Kvety na vode

Vopred je potrebné informovať žiakov o pomôckach, ktoré si majú pripraviť k experimentovaniu. Odporúčame upozorniť žiakov, že nepotrebujú veľa vody, aby zbytočne nerozlievali.

Ešte pred samotným experimentovaním podnecujeme diskusiu, aby sa žiaci zamysleli nad tým čo sa podľa nich udeje. Po zrealizovaní pokusu sa snažíme spolu so žiakmi prísť k fyzikálnemu vysvetleniu pozorovaného javu. Môžeme navrhnúť aj alternatívy, napr. kvety z hrubého papiera, zo servítky a diskutovať o týchto prípadoch. Odporúčame, aby si každý žiak vyrobil aspoň 1 kvet.

Stručné fyzikálne vysvetlenie: Papier je vyrobený z tenkých vlákien, ktoré sú natlačené k sebe. Vlákna obsahujú malé „trubičky“ – kapiláry. Pri kontakte papiera s vodou začne voda prenikať do kapilár, papier nasáva vodu a postupne sa voda dostáva až do lupeňov a kvet sa roztvára. Tento jav sa nazýva kapilarita. Spôsob vyrovnávania lupeňov by sme mohli prirovnať k zalomenej záhradnej hadici. Keď cez ňu začne prúdiť voda, tak sa hadica začne vyrovnávať. V prípade hrubšieho papiera je zlisovaných viacej vlákien, takže vode trvá dlhší čas, kým sa dostane až do lupeňov kvetu.

4.3 Pracovný list – Neobyčajný čln

Pokús sa vyrobiť čln bez plachiet a bez motora a vyhrať s ním preteky!

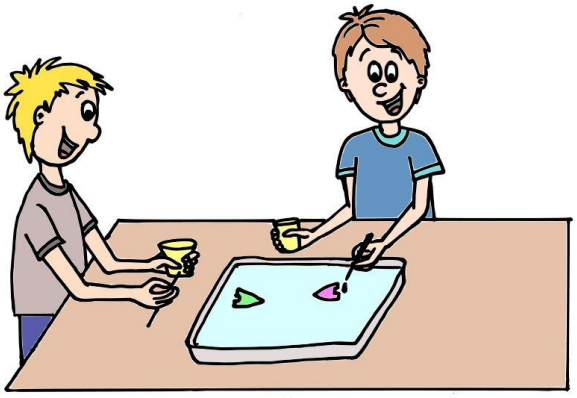
Pomôcky:

- nádoba na vodu (plech na pečenie/tácka),
- tvrdý lesklý papier (napr. stará pohľadnica),
- zopár kvapiek saponátu na riad v nádobke,
- špáradlo/špajdľa,
- nožnice,
- ceruzka,
- pravítko,
- voda.

Postup:

1. Z tvrdého lesklého papiera vystrihneme čln, ako na obrázku 2, dĺžky cca 4 cm.
2. Do plytkej nádoby nalejeme vodu.
3. Vedľa nádoby (alebo aj do nej) si nastavíme pravítko.
4. Čln položíme na vodu.
5. Namočíme špáradlo v saponáte a vložíme ho do vody za člnom tak, aby sme sa s ním nedotkli člna, iba vody (obr. 2).
6. Pozorujeme pohyb člna a odmeriame dĺžku, ktorú prešiel po kvapnutí jednej kvapky saponátu do vody.
7. Čln podobným spôsobom dopravíme na druhú stranu nádoby.
8. Ak chceme pokus zopakovať, tak musíme vymeniť vodu v nádobe.

Spracované podľa: [Sikirica, 2019]



Obrázok 2: Člny na vode

Odpovedz na otázky:

1) Pokús sa vysvetliť, prečo sa čln pohybuje.
2) Prečo je potrebné vymeniť vodu, ak chceme pokus zopakovať?
3) Skús vymyslieť a vyrobiť nové tvary člnov. S akým tvarom člnu by si vyhral preteky? Odmeraj časy jednotlivých člnov.

4.4 Praktické informácie pre animátora k experimentu Neobyčajný čln

Vopred je potrebné informovať žiakov o pomôckach, ktoré si majú pripraviť k experimentovaniu. Odporúčame upozorniť žiakov, že nepotrebujú veľa vody, aby zbytočne neporozlievali.

Ešte pred samotným experimentovaním podnecujeme diskusiu, aby žiaci zamysleli nad tým čo sa podľa nich bude diať. (Napr. Bude čln po položení na vodu plávať, alebo sa potopí? Čo spôsobí saponát vo vode?) Po zrealizovaní pokusu sa snažíme spolu so žiakmi prísť k fyzikálnemu vysvetleniu pozorovaného javu.

Stručné fyzikálne vysvetlenie: Sila medzi molekulami na vodnej hladine je väčšia ako pod hladinou, hovoríme o povrchovom napätí vody. Čln na vode drží vďaka povrchovému napätiu. Saponáty sa nazývajú aktívnymi látkami a spôsobujú zníženie povrchového napätia vody. Keď sa dotkneme saponátom vody, tak v tom mieste sa hladina pokryje molekulami saponátu. Príťažlivé sily medzi molekulami saponátu sú slabšie ako medzi molekulami vody, preto sa povrchové napätie zníži. Z jednej strany bude teda na čln pôsobiť menšia sila ako z druhej, čo bude mať za následok, že čln sa pohne smerom preč od saponátu. Po čase sa povrchové napätie v celej nádobe zníži na hodnotu povrchového napätia saponátu a čln sa prestane pohybovať. Preto, ak by sme chceli pokus opakovať, tak je potrebné vymeniť vodu v nádobe.

4.5 Pracovný list – Záhadná šípka

Šípka smerujúca vľavo bude smerovať zrazu vpravo, bez toho, že by sme s ňou hýbali alebo sa jej akokoľvek dotkli. Kúzlo alebo optický klam? Nie, predsa fyzika.

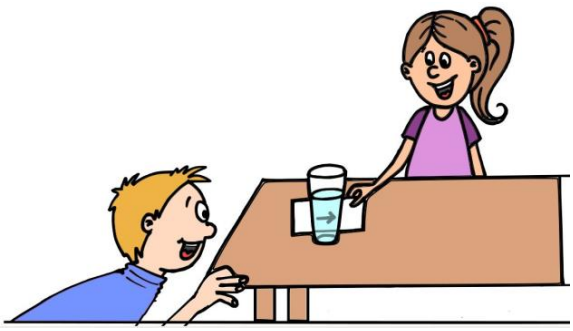
Pomôcky:

- sklenený rovný pohár,
- papier,
- pero/fixka,
- voda.

Postup:

1. Na papier nakreslíme šípku smerujúcu do jednej strany.
2. Papier so šípkou umiestnime približne 10 cm za prázdny pohár.
3. Do pohára nalejeme vodu.
4. Ak pohár nastavíme do správnej vzdialenosti (cca 10 cm) od papiera so šípkou, tak môžeme pozorovať, že šípka smeruje do opačnej strany. Pri pozorovaní máme oči na úrovni pohára a šípky (obr. 3). Pre lepšie pozorovanie si môžeme zavrieť jedno oko.

Spracované podľa: [Lacey, 2015].



Obrázok 3: Pozorovanie šípky za pohárom s vodou

Odpovedz na otázky:

1) A akými fyzikálnymi vlastnosťami súvisí pozorovaný jav?
2) Čo sa zmenilo na šípke okrem toho, že smeruje do druhej strany?
3) Nakreslite iné obrázky alebo vzory, umiestnite ich miesto šípky a pozorujte.
4) Skúste obrázok umiestniť za pohár tak, aby časť z neho siahala vyššie ako voda. Čo pozorujete teraz?

4.6 Praktické informácie pre animátora k experimentu Záhadná šípka

Vopred je potrebné informovať žiakov o pomôckach, ktoré si majú pripraviť k experimentovaniu.

Ešte pred samotným experimentovaním podnecujeme diskusiu, aby žiaci zamysleli nad tým čo sa podľa nich bude diať. Po zrealizovaní pokusu sa snažíme spolu so žiakmi prísť k fyzikálnemu vysvetleniu pozorovaného javu.

Stručné fyzikálne vysvetlenie: Na rozhraní rôznych materiálov dochádza k lomu svetla. Keď sa na šípku pozeráme cez pohár naplnený vodou, tak svetlo vidíme prechádzať cez rozhrania vzduch – voda – vzduch, pričom zakaždým dochádza k lomu svetla. Po naliatí vody do pohára pozorujeme, že šípka smeruje do opačnej strany. Tento jav je spôsobený lomom svetla a zakrivením pohára. Okrem zmeny orientácie šípky môžeme pozorovať aj zmenu jej rozmerov.

5 Prieskum zameraný na online neformálne vzdelávanie formou videohovorov

5.1 Úloha prieskumu

Úlohou prieskumu bolo overiť, či je možné realizovať neformálne vzdelávanie vo fyzike v online priestore, formou videohovorov. Ďalej identifikovať výhody a nevýhody neformálneho vzdelávania takouto formou.

5.2 Výskumné otázky a hypotéza prieskumu

Predpokladáme, že realizovanie neformálneho vzdelávania z fyziky formou videohovorov v online priestore bude možné. Ďalej predpokladáme, že žiaci budú mať iba minimálne problémy s technickým zabezpečením videohovoru. Vychádzame zo skutočnosti, že žiaci druhého stupňa základných škôl majú skúsenosti s dištančným vzdelávaním aj formou videohovorov. Predpokladáme, že pri vhodne zvolených pokusoch budú mať žiaci v domácom prostredí k dispozícii potrebné pomôcky a experimenty budú bezpečné. Bude nás zaujímať, či je experimentovanie dobre viditeľné cez webkameru aj pre animátora, aj pre ostatných žiakov.

5.3 Metódy prieskumu

V rámci prieskumu sme zvolili kvalitatívnu metódu – prípadovú štúdiu a javovú analýzu. Vybrali sme tri experimenty, ktoré sme zrealizovali so skupinkami žiakov druhého stupňa formou videohovorov. Všetci žiaci sa nachádzali doma, boli pripojení cez internet a mali zapnuté kamery. Väčšina žiakov experimentovala samostatne, ojedinele aj v dvojiciach, v prípade súrodencov. Prieskum bol realizovaný v priebehu februára 2021. Celý priebeh videohovorov sme si nahrali a následne postupne analyzovali.

5.4 Charakteristika súboru

Vybrané experimenty a zostavené pracovné listy boli určené pre žiakov druhého stupňa základnej školy, ktorí sa už učia v škole fyziku, teda pre 6. až 9. ročník. Experimenty boli realizované v dvoch skupinkách po 8 ľudí. Teda celkovo sa zúčastnilo 16 žiakov, z toho 8 dievčat a 8 chlapcov. Presné počty žiakov z jednotlivých ročníkov uvádzame v tabuľke č. 3. Žiaci, ktorí sa zúčastnili prieskumu, navštevujú rôzne školy, a to základnú školu v obci Hul a viaceré základné školy v Šali.

Ročník ZŠ	D	CH	Spolu
6	5	2	7
7	2	1	3
8	1	4	5
9	0	1	1

Tabuľka 3: Počty žiakov zúčastnených prieskumu

5.5 Postup a realizácia

Zvolili sme tri experimenty tak, aby neboli náročné na priestor a dali by sa realizovať aj na stole pri počítači. A taktiež, aby všetky potrebné pomôcky k pokusom boli ľahko dostupné v domácnostiach. Pri výbere sme dbali aj na to, aby sa pokusy dali realizovať žiakom samostatne a aby boli bezpečné. Po oslovení žiakov sme im zaslali pokyny k priebehu realizácie videohovorov. Žiaci si mali vopred pripraviť potrebné pomôcky k experimentovaniu, ktoré sme im spísané zaslali do mailu aj spolu s linkom na pripojenie k videohovoru. Informovali sme ich, aby si pripojili aj webkameru. Žiaci boli cielene rozdelení do dvoch videohovorov tak, aby sa v rámci tejto skupiny poznali, aj keď boli z rôznych ročníkov. Nikto zo žiakov zapojených do prieskumu nemal technické problémy s pripojením sa. Po spustení videohovoru sme sa stručne zoznámili, povedali sme si niekoľko technických pokynov a prešli sme k experimentovaniu. Ako prvý pokus sme zvolili pokus s názvom Kvety na vode. Žiakom sme zazdieľali na obrazovku pripravený pracovný list a aj slovne sme komentovali celý priebeh experimentu. Neposielali sme žiakom pracovné listy vopred, aby si žiaci náhodou nezrealizovali niektoré pokusy už dopredu. Zaslali sme im ich po skončení experimentovania, aby sa v prípade záujmu mohli vrátiť k zrealizovaným pokusom. Ďalej si žiaci z pripravených materiálov vybrali tie pomôcky, ktoré boli potrebné k tomuto pokusu. Každý si u seba pri počítači zostavoval experiment a na kamere sme mohli vidieť, kto ako postupuje. Žiaci reagovali na kladené otázky a v prípade nejasností sa spýtali. Po zrealizovaní experimentu nasledovala spoločná diskusia. Žiaci spoločne prichádzali na vysvetlenie pozorovaného javu, na prípadné vylepšenia, alebo sme pomocou myšlienkového experimentu uvažovali, čo by sa dialo v prípade zmenených podmienok. Na záver boli žiaci schopní vysvetliť fyzikálny princíp uskutočneného pokusu na ich úrovni. Ako druhý nasledoval pokus s názvom Neobyčajný čln, v ktorom sme využili niektoré pomôcky z predošlého experimentu (napr. nádobu s vodou). Potom nasledovala 10 minútová prestávka, ktorú väčšina žiakov využila na spoločné rozprávanie sa v prebiehajúcom videohovore. Posledný pokus s názvom Záhadná šípka bol zrealizovaný po prestávke. Priebeh druhého aj tretieho pokusu bol obdobný ako pri prvom pokuse.

5.6 Javová analýza

Vytvorenie neformálneho prostredia malo výrazný vplyv na priebeh celého experimentovania. Žiaci boli v psychickej pohode, nebáli sa pýtať, skúšať, experimentovať, robiť chyby, povedať myšlienky, o ktorých pravdivosti si neboli celkom istí. Bezpečné prostredie bolo vytvorené aj vďaka tomu, že všetci zúčastnení videohovoru sa poznali a vládla priateľská atmosféra. O tom svedčí aj fakt, že počas prestávky sa žiaci radšej spoločne rozprávali, akoby sa na ten čas odpojili. Pri analyzovaní uskutočnených videohovorov sme identifikovali niekoľko výhod a nevýhod v porovnaní s klasickým neformálnym vzdelávaním uskutočňovaným v bezprostrednom fyzickom kontakte. Pri porovnaní vychádzame aj z výsledkov a skúseností nadobudnutých pri realizovaní prieskumu zverejneného v práci Aplikácia fyzikálnych poznatkov v neformálnom vzdelávaní [Krajmerová, 2020]. V spomenutom prieskume bolo neformálne vzdelávanie uskutočňované klasickou formou, nie online.

V online neformálnom vzdelávaní vo fyzike uskutočneného formou videohovoru sme identifikovali nasledovné výhody. Nenáročnú dostupnosť (s prihliadnutím na potrebu komunikačného média s internetom) pokladáme za hlavnú výhodu tejto formy vzdelávania. Toho istého neformálneho vzdelávania sa môžu zúčastniť žiaci z rôznych obcí, nie je nutné cestovať, čím sa šetrí čas. Ďalej takéto vzdelávanie považujeme za vhodnú alternatívu v prípade nemožnosti realizovania klasického neformálneho vzdelávania. Do istej miery je možné simulovať takmer všetky jeho prvky. Taktiež sme si všimli obmedzenie konfliktov medzi žiakmi. Výhodou sú aj rôzne vymoženosti, ktoré poskytujú aplikácie, cez ktoré videohovory prebiehajú. Napríklad, vedúci, ale aj účastníci hovoru môžu jednoducho zdieľať textové a obrazové materiály alebo videá. V prípade potreby je nahrávanie celého procesu na video oveľa jednoduchšie ako pri klasickom vzdelávaní.
Diskutabilnou by sa mohla zdať otázka, či je výhodou alebo nevýhodou, že sa žiaci počas vzdelávania nachádzajú v domácom prostredí. Pre niektorých žiakov to môže byť výhodou, pre iných nie. Pokiaľ majú žiaci doma vytvorený priestor na vzdelávanie, ktorý je rešpektovaný a podporovaný ostatnými členmi domácnosti, tak sa žiaci cítia bezpečne a môžu sa naplno venovať vzdelávaniu. V prípade nedostačujúcich domácich podmienok na vzdelávanie môžu byť žiaci vyrušovaní a nevedia sa sústrediť na vzdelávanie. Podobne to je aj v prípade, ak žiaci nemajú možnosť byť pripojení k stabilnému internetu pomocou vhodných digitálnych technológií. Počas nášho prieskumu sme nepostrehli nevhodnosť domáceho prostredia alebo nedostatočné technické zabezpečenie.

Na úvod sme ako nevýhodu pociťovali užší výber pokusov, ktoré môžu žiaci realizovať samostatne, pri počítači a s jednoduchými domácimi pomôckami. Za nevýhody, ktoré sme postrehli počas priebehu videohovorov považujeme absentovanie spolupráce medzi žiakmi a možnosti

skupinovej práce pri experimentovaní. Síce niektoré aplikácie na videohovory umožňujú aj rozdeľovanie účastníkov do skupín, avšak zväčša sa jedná o platené verzie, ktoré sme my pri prieskume nemali k dispozícii. Taktiež pri videohovore nemôže do experimentovania fyzicky zasiahnuť učiteľ, takže výber experimentov musí zohľadňovať maximálnu bezpečnosť žiakov aj pri samostatnej práci. Zaregistrovali sme, že žiaci sa ťažšie sústredili na porozumenie zadaniu alebo problému. Napríklad niektorí žiaci si zle prečítali pomôcky pre daný experiment, čo postupne zisťovali až počas priebehu experimentovania. Toto by pri klasickom neformálnom vzdelávaní zrejme zistili skôr, ešte pred začatím experimentovania, pretože by si buď všimli pripravené pomôcky ostatných žiakov, alebo by ich niekto so spolužiakov na to skorej upozornil. Snímanie pomocou webkamery má taktiež svoje obmedzenia a to hlavne také, že vidíme iba malé zorné pole. Takže buď môžeme vidieť tvár žiaka, alebo ak otočí webkameru, tak vidíme jeho aparatúru k experimentu. Preto ak sme chceli zistiť, že čo už žiaci majú pripravené, ako postupujú v experimente, tak bolo potrebné sa každého postupne spýtať. Tento proces nám zabral viac času ako keby sme naživo, fyzicky v kontakte, vtedy by sme vedeli jedným pohľadom zistiť stav všetkých žiakov.

5.7 Diskusia k výsledkom prieskumu

Predpoklad, že neformálne vzdelávanie vo fyzike formou online videohovorov bude možné, sa potvrdil. Do uskutočneného prieskum sa zapojili žiaci druhého stupňa základných škôl. Toto vzdelávanie formou online videohovorov bolo dobrovoľné, úmyselné, realizované mimo školy, v neformálnom prostredí, a taktiež rozširovalo vedomosti žiakov a prepájalo ich s praxou. Žiaci nezískavali za svoje výkony sumatívne hodnotenie. Z uvedeného usudzujeme, že realizovať neformálne vzdelávanie vo fyzike je možné aj formou online videohovorov.

Jednoduchá dostupnosť digitálnych technológií a internetu so sebou prináša mnohé vymoženosti. Aplikácie, cez ktoré sa dajú uskutočňovať online videohovory poskytujú užívateľom čoraz väčší komfort. Technologické zabezpečenie všetkých zúčastnených žiakov bolo bezproblémové. Žiaci už majú skúsenosti s online vzdelávaním a v prostredí aplikácie poskytujúcej videohovor sa veľmi rýchlo zorientovali. Ako výhodu video-aplikácií považujeme napríklad možnosť zdieľania obrazovky, textových a obrazových materiálov. Žiakom nebolo potrebné vytlačiť žiacke pracovné listy, ale boli im premietnuté na obrazovke. Za hlavnú výhodu online videohovorov považujeme nenáročnú dostupnosť (s prihliadnutím na potrebu pripojenia sa k internetu). Žiaci nemuseli nikam cestovať, iba sa pomocou počítača alebo mobilu pripojili k videohovoru. Takže sa toho istého neformálneho vzdelávania mohli zúčastniť žiaci z rôznych obcí, čo sme pri našom prieskume aj využili.

Identifikovali sme aj niekoľko nevýhod, a to hlavne absentovanie fyzického kontaktu. Nemožnosť experimentovania v dvojiciach alebo skupinkách. Vedúci neformálneho vzdelávania v prípade potreby nemôže fyzicky zakročiť alebo pomôcť pri realizácii pokusu. Takže je potrebné si vopred dobre premyslieť predkladané experimenty, aby nenastali nehodové situácie. Niektorí žiaci mali problém sa dostatočne sústrediť, čo pripisujeme vplyvom domáceho prostredia, v ktorom sú obklopení rôznymi podnetmi, ktoré odtŕhajú ich pozornosť od predkladaného problému. Taktiež bolo potrebné sa často pýtať žiakov, v akom štádiu experimentovania sa nachádzajú, pretože na webkamerách nie je vidieť dostatočne veľké zorné pole. Aj keď niektorí žiaci posúvali svoje webkamery na zobrazenie aparatúry experimentu, nebolo to možné na všetkých zariadenia. Kvôli vyššie spomenutým nevýhodám usudzujeme, že na zrealizovanie tých istých experimentov by sme pri klasickom neformálnom vzdelávaní potrebovali menej času, ako pri ich realizovaní formou videohovoru.

Na základe zistených výhod a nevýhod tejto formy vzdelávania sme dospeli k záveru, že neformálne vzdelávanie z fyziky uskutočnené formou online videohovorov je vhodnou náhradou klasického neformálneho vzdelávania, pokiaľ nepriaznivé okolnosti nedovoľujú realizovať neformálne vzdelávanie naživo, v bezprostrednom fyzickom kontakte.

6 Záver

Vzhľadom na aktuálnu situáciu, v ktorej je celá spoločnosť zasiahnutá pandémiou, obmedzujúcou zabehnuté spôsoby výučby žiakov, sme sa zamerali na neformálne vzdelávanie vo fyzike v online priestore. Pomocou prieskumu so žiakmi druhého stupňa základných škôl sme zistili, že je možné viesť neformálne vzdelávanie z fyziky formou videohovorov. Naše stanovené predpoklady sa potvrdili. Indentifikovali sme nasledovné výhody a nevýhody tejto formy vzdelávania.

Výhody:

- dostupnosť pre žiakov z rôznych regiónov,
- absencia potreby poskytovať materiály v tlačenej podobe,
- alternatíva ku klasickému neformálnemu vzdelávaniu,
- absencia konfliktov medzi žiakmi,

- vymoženosti digitálnych technológií (napr. jednoduché nahrávanie procesu experimentovania).

Nevýhody:

- užší výber vhodných pokusov,
- náročnejšie sústredenie sa žiakov,
- absencia spolupráce žiakov a skupinovej práce,
- nedostatočné zobrazovanie webkamerou.

Síce neformálne vzdelávanie v online priestore má viacero výhod aj nevýhod, pokladáme za prospešné, ak žiaci môžu naďalej rozvíjať svoje vedomosti a zručnosti z fyziky aj počas súčasnej situácie, kedy nie je možné realizovať prezenčné stretávanie v rámci fyzikálnych krúžkov.

Poďakovanie

Chcela by som sa poďakovať doc. PaedDr. Kláre Velmovskej, PhD. za odbornú pomoc, poskytnuté rady a usmernenia pri vypracovávaní tohto príspevku. Moje poďakovanie patrí aj žiakom, ktorí sa zúčastnili prieskumu.

Literatúra

[Ainsworth, Eaton, 2010] Ainsworth, H., Eaton, S. E. (2010). Formal, non-formal and informal learning in the sciences. [online]. Canada, 2010. 48 s. [cit. 21-01-2021]. Dostupné na: https://bit.ly/2P3D9Xy

[Bednárik a kol. 2020] Bednárik, M. a kol. (2020). Ako v čase krízy zabezpečiť prístup k vzdelávaniu pre všetky deti. [online]. Inštitút vzdelávacej politiky Ministerstvo školstva, vedy, výskumu a športu SR. 2020. [cit. 08-03-2021]. Dostupné na: https://bit.ly/3tzbw7D

[Burgerová, Adamkovičová, 2014] Burgerová, J; Adamkovičová, M. (2014). Vybrané aspekty komunikačnej dimenzie e-learningu. [online]. Prešov : Pedagogická fakulta Prešovskej univerzity v Prešove, 2014. 160 s. ISBN 978-80-555-1146-7. [cit. 14-03-2021]. Dostupné na: https://bit.ly/3qUnhE6

[Čapek, 2015] Čapek, R. (2015). Moderní didaktika – lexikon výukových a hodnoticích metod. Praha : Grada Publishing, a. s., 2015. 608 s. ISBN 978-80-247-3450-7.

[Fudaly, Lenčo, 2008] Fudaly, P., Lenčo, P. (2008). Neformálne vzdelávanie detí a mládeže. [online]. Bratislava : Iuventa, 2008. [cit. 05-03-2021]. Dostupné na: https://bit.ly/2O54IzE

[Frk, 2010] Frk, B. (2010). E-learning a online vzdelávanie dospelých. [online]. In: PEDAGOGIKA.SK, ročník 1, č. 2: s. 107-122. Trnava : Slovenská pedagogická spoločnosť pri SAV, 2010. ISSN 1338 – 0982. [cit. 14-03-2021]. Dostupné na: https://bit.ly/3r06GyQ

[Chisholmová, 2005] Chisholmová, L. (2005). Terms and What do we mean when. [online]. In: Bridges for Recognition:Promoting Recognition of Youth Work across Europe. Brussel : SALTO-YOUTH Inclusion Resource Centre, 2005. 88 s. [cit. 21-01-2021]. Dostupné na: https://bit.ly/3pbni6s

[Kireš a kol. 2016] Kireš, M., a kol. (2016). Bádateľské aktivity v prírodovednom vzdelávaní, časť A. [online]. Bratislava : Štátny pedagogický ústav, Bratislava, 2016. 127 s. ISBN 978-80-8118-155-9. [cit. 05-06-2020]. Dostupné na: https://bit.ly/361P3Hg

[Krajmerová, 2020] Krajmerová, B. (2020). Aplikácia fyzikálnych poznatkov v neformálnom vzdelávaní. [online]. [cit. 13-03-2021]. Dostupné na: https://bit.ly/3bTfli2

[Lacey a kol. 2015] Lacey, M. a kol. 2015. 365 výskumných úloh. Bratislava : Svojtka & Co., s. r. o., 2015. 128 s. ISBN 978-80-8107-912-2.

[Lenčo, 2012] Lenčo, P. (2012). Voľný čas a výchova. In: Kudláčová, B., Rajský, A. [eds.]. Európske pedagogické myslenie (od moderny k postmoderne po súčasnosť). Trnava : Typi Universitatis Tyrnaviensis, 2012. 293 s. ISBN 978-80-8082-574-4.

[Lousada, 2013] Lousada, L. (2013). E-learning Tools in Non-formal Education Environments. [s. 184 – 187] [online]. In: Conference poceeding – ICT for language learning, 6th conference edition. Florence [Italy], 2013. 530 s. ISBN: 978-88-6292-423-8. [cit. 06-03-2021]. Dostupné na: https://bit.ly/3eiHcK7

[Pešek a kol. 2020] Pešek, T. a kol. (2020). Šlabikár neformálneho vzdelávania v práci s mládežou. 2. vydanie. [online]. Bratislava : YouthWatch, 2020. 198 s. ISBN: 978-80-973031-9-8. [cit. 05-03-2021]. Dostupné na: https://bit.ly/3cJkpox

[Popa, 2012] Popa, F. (2012). Recognition of non-formal learning in Europe: Challenges and opportunities. [online]. Bonn [Germany] : SALTO Training & Cooperation Resource Centre, 2012. 16 s. [cit. 22-01-2021]. Dostupné na: https://bit.ly/3sVYx0u

[Prensky, 2001] Prensky, M. (2001). Digital Natives, Digital Immigrants. [online]. In: *On the Horizont*. MCB University Press, Vol. 9 No. 5, 2001. ISSN: 1074-8121. [cit. 06-03-2021]. Dostupné na: https://bit.ly/38fbUjA

[Senćanski, 2013] Senćanski, T. 2013. Malý vedec. 2. vydanie. Brno : Edika, 2013. 63 s. ISBN 978-80-266-0363-4.

[Sikirica, 2019] Sikirica, M. 2019. Pokusy pre mladých výskumníkov. Bratislava : Perfekt, 2019. 176 s. ISBN 978-80-8046-921-4.

[Siurala, 2004] Siurala, L. (2004). A European framework for youth policy. [online]. Strasbourg : Council of Europe Publishing, 2004. [cit. 21-01-2021]. Dostupné na: https://bit.ly/2XZMJvV

[Velmovská a kol., 2021] Velmovská, K., Trúsiková, A., Kiss, T. Aspekty rozvoja

kritického myslenia vo vyučovaní fyziky. Bratislava : Knižničné a edičné centrum FMFI UK, 2021. s. 125. ISBN 978-80-8147-100-1.

[Werquin, 2007] Werquin, P. (2007). Terms, concepts and models for analysing the value of recognition programmes. [online]. Viedeň : Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD], 2007. [cit. 06-02-2019]. Dostupné na: https://bit.ly/2rNGMmb

[Werquin, 2008] Werquin, P. (2008). Recognition of non-formal and informal learning in OECD countries: A very good idea in jeopardy? [online]. In: LIFELONG LEARNING IN EUROPE – 3/2008. [cit. 22-01- 2021]. Dostupné na: https://bit.ly/3rZS43v

[Zákon 245/2008] Zákon 245/2008 Z.z. o výchove a vzdelávaní [školský zákon] a o zmene a doplnení niektorých zákonov. [online]. [cit. 08-03-2021]. Dostupné na: https://bit.ly/2OMcpuT

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 263–271
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Tatiana Sukeľová, Klára Velmovská

Využitie pojmových komiksov vo fyzike v kontexte uplatnenia komunikačných schopností žiakov

Tatiana Sukeľová[1*] Klára Velmovská[1†‡]
[1] Katedra didaktiky matematiky, fyziky a informatiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstrakt

Pojmové komiksy majú rôzne využitie pri zaradení do vyučovacej hodiny. Učiteľ ich môže využiť ako nástroj na hodnotenie vedomostí žiakov, rozvoj diskusie, predstavenie myšlienok, názorov žiakov, rozvoj spôsobilostí vedeckej práce, mapovanie nesprávnych predstáv žiakov. Keďže cieľom vyučovania fyziky na základnej škole je okrem iného aj rozvíjať verbálnu komunikáciu, v tomto príspevku sme sa preto zamerali na komunikačné schopnosti žiakov. Zaujímalo nás, do akej miery žiaci uplatňujú schopnosť komunikovať, aké vyjadrenia používajú pri verbálnom prejave v rámci diskusie. Realizovali sme preto prieskum so žiakmi 7. ročníka základnej školy zameraný na porovnanie častí vyučovacích hodín z hľadiska uplatnenia komunikačných schopností žiakov v rámci diskusie bez a s použitím pojmových komiksov.

Kľúčové slová: pojmové komiksy, komunikačné schopnosti žiakov, vyučovanie fyziky

1 Úvod

V tomto príspevku sa venujeme pojmovým komiksom a ich zaradeniu do vyučovacej hodiny. V práci sme sa zamerali na využitie pojmových komiksov na podnecovanie diskusie na hodinách fyziky. Preto sme v prieskume pozorovali, aké vetné konštrukcie žiaci pri diskusii používajú a do akej miery sú správne. Naším hlavným cieľom pri tvorbe pojmových komiksov a ich aplikácií bolo rozvíjať komunikačné schopnosti žiakov, tak ako je aj uvedené v dokumente ISCED [ŠPÚ, 2015a, s. 3] v cieľoch predmetu:

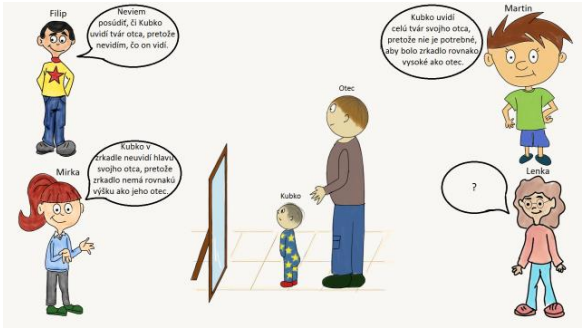
- „Žiaci komunikujú verbálnou aj písomnou formou, ovládajú symbolickú, tabelárnu, grafickú komunikáciu.“
- „Žiaci pracujú v tíme, vedia kooperovať a diskutovať, sú zodpovední za výsledky svojej práce a zverené pomôcky.“

V prvom rade sme realizovali prieskum, v ktorom sme porovnávali v jednotlivých skupinách odpovede žiakov v kontexte komunikačných schopností a taktiež v závere uvádzame percentuálne zastúpenie holých viet vo vyučovacích sekvenciách bez a s použitím pojmových komiksov.

2 Vymedzenie pojmu pojmové komiksy

Pojmové komiksy nie sú na Slovensku až tak známe ako je to v anglicky hovoriacich krajinách, ale pomaly sa táto výuková metóda dostáva aj k nám. V anglicky hovoriacich krajinách sa používa termín Concept Cartoons. Za prvých autorov pojmových komiksov sa považujú autori Keogh a Naylor. Oni charakterizujú pojmové komiksy ako „kresby, ktoré poskytujú množstvo rôznych uhlov pohľadov na vedu v každodenných situáciách.“ [Keogh and Naylor, 2000]

Domnievame sa, že presnejším vymedzením pojmu pojmový komiks je vymedzenie od autorov Demirtas, Kiyici a Yigit, ktorý uvádzajú, že „pojmové komiksy môžu byť definované ako náučné prostriedky, v ktorých vedecké udalosti sú vysvetľované pomocou kreslených postáv alebo inými slovami sú to prostriedky, v ktorých dve alebo viaceré kreslené postavy sú vložené do témy a zaoberajú sa vedeckými situáciami. Tieto postavy nastolia nápady o situáciách v záujme začatia diskusie. Témy v pojmových komiksoch sú situácie, s ktorými sa môžeme opakovane stretávať v bežnom živote. Preto žiaci môžu prostredníctvom týchto nástrojov spájať vedu a každodenný život. Možno konštatovať, že pojmové komiksy sú efektívnymi nástrojmi pre socializáciu a popularizáciu vedy. Pojmové komiksy zahŕňajú minimálne množstvo textu. Preto sa odvolávajú na všetky vekové skupiny žiakov.“ [Demirtas el al., 2012]



Obr. 1: Pojmový komiks – Odraz svetla.

* tatianasuklik@gmail.com
† Klara.velmovska@fmph.uniba.sk
‡ Školiteľ

My sa venujeme prepojeniu pojmových komiksov a výučby fyziky. Na obr. 1 je ukážka pojmového komiksu zo zbierky pojmových komiksov, ktoré sme vytvorili. No pojmové komiksy majú svoje uplatnenie aj v iných prírodovedných odboroch, ako je biológia, chémia, ale aj matematika. Pojmové komiksy sa vo vyučovaní môžu vyskytovať vo forme hodnotenia žiakov, rozvoja bádateľskej činnosti, rozvoj diskusie mapovania nesprávnych žiackych predstáv. Aby mali pojmové komiksy želaný efekt, ktorý chce učiteľ dosiahnuť, tak sa preferuje ich aplikácia vo forme skupinového vyučovania.

2.1 Charakteristické prvky pojmových komiksov

Slovo komiks v názve môže vyvolávať u žiakov predstavu, že vyučovanie bude prebiehať hravou formou a realita sa od ich predstavy veľmi nevzďaľuje. Pričom pojmové komiksy nemajú humorný charakter, ale svojím vzhľadom sa približujú žiakom, predovšetkým v nižších ročníkoch. Okrem svojho vzhľadu majú ďalšie prvky, ktoré sú im charakteristické [Keogh and Naylor, 2013]:

- **Každodenné situácie** – zaoberajú sa každodennými problémami, preto sa skôr približujú k žiakom. Pri takýchto pojmových komiksoch sa žiaci vedia lepšie oboznámiť s problematikou riešenou daným pojmovým komiksom. Žiaci si tak dokážu vizualizovať daný problém. Dodávajú odvahu aj žiakom, ktorí sa boja vysloviť svoje názory, myšlienky. Pomocou pojmových komiksov, ktoré riešia problémy z každodenného života, sa učiteľom pri prezentovaní, kladení potrebných otázok na nasmerovanie žiaka správnou cestou a vysvetľovaní daného fyzikálneho javu jednoduchšie spolupracuje so žiakom.
- **Alternatívne stanoviská** – v pojmovom komikse sú prevažne tri alebo viac stanovísk, z ktorých je jedno vedecky akceptovateľné a zvyšné stanoviská sú vytvorené na základe nesprávnych predstáv žiakov, ktoré autori získali zo svojich vlastných skúseností.
- **Prístupný text** – text v bublinách je prijateľný žiackym predstavám, je písaný žiackou rečou a tým sa žiaci jednoduchšie stotožňujú s nastolenými alternatívami v bublinách. Je potrebné rozoznávať už nadobudnuté žiacke skúsenosti, vedomosti a zručnosti, za účelom správneho aplikovania pojmových komiksov.
- **Rovnosť názorov** – aj nesprávne vysvetlenie javu má rovnaký status ako vedecky podložená alternatíva v bubline. Menej sebavedomým žiakom pomáhajú pojmové komiksy uľahčiť ich vyjadrovanie, pretože nemusia vyjadrovať svoje vlastné myšlienky, ale stotožnia sa s názormi kreslenej postavy.
- **Prázdne bubliny** – na základe prázdnych bublín alebo bublín s otáznikom učitelia podnecujú a vyzývajú žiakov, aby formulovali svoje vlastné názory, myšlienky, postoje k nastolenej situácii.
- **Nesprávne predstavy** – textové bubliny zahŕňajú aj nesprávne predstavy. Môže sa stať, že žiak uverí týmto nesprávnym predstavám, no je na učiteľovi, aby tieto nesprávne predstavy sa snažil vyvrátiť, poprípade potlačiť, pretože nesprávne predstavy nedokážeme odstrániť z myslenia žiakov. Preto je dôležité, aby učiteľ tieto nesprávne predstavy poznal a bral ich do úvahy pri zavádzaní nových fyzikálnych pojmov [Kiss, Velmovská, 2020, s. 9]. Taktiež je dôležité objasnenie vedecky správnych koncepcií, aby si žiak osvojil správne nazeranie na fyzikálne javy.Keogh and Naylor, 2000

3 Zaradenie pojmových komiksov do vyučovacieho procesu

Pojmové komiksy môžu byť použité ako štart do vyučovacej hodiny, ako záverečné opakovanie hodiny alebo ako nástroj na hodnotenie vedomostí žiakov, rozvoj diskusie, spôsobilostí vedeckej práce. Zavádzanie pojmových komiksov do vyučovania môže učiteľ nastoliť na základe vlastných preferencií. Pričom Dabell [Dabell, 2008] odporúča zachovať túto postupnosť:

1. Učiteľ predstaví žiakom pojmový komiks, ktorý sa zaoberá daným problémom.
2. Učiteľ nechá každého žiaka samostatne rozmýšľať nad daným problémom, aby sa stotožnil s danou problematikou.
3. Učiteľ rozdelí žiakov do menších skupín a nechá ich, nech vzájomne diskutujú v skupine.
4. Učiteľ vyzve žiakov, aby vyjadrili svoju spätnú väzbu o alternatívach.
5. V skupine by mali žiaci dospieť k dohode.
6. Ak nedochádza v skupine k dohode, tak učiteľ so skupinou diskutuje, aby zistil viac.
7. Žiaci si v skupine vyberú hovorcu. Po výbere hovorcu, hovorca z každej skupiny odprezentuje výber alternatívy a odôvodni výber skupiny.
8. Učiteľ podnieti žiakov k spoločnej diskusii triedy.
9. Učiteľ vyvráti žiakom nesprávne predstavy a odôvodní správne alternatívy.

My sme sa pri zavádzaní pojmových komiksov do vyučovania, snažili držať tejto odporúčanej postupnosti, ale podarilo sa nám to dodržať len

v niektorých bodoch. Z dôvodu celosvetovej pandémie Covid-19 nám bolo umožnené pozorovanie len online hodiny, keďže školy prešli na dištančnú výučbu. S cieľom dosiahnuť požadované výsledky na online hodine sme museli pristúpiť k zmenám v postupnosti zavádzania pojmových komiksov. Postupovali sme takto:

1. Učiteľ predstaví stručne žiakom, čo je pojmový komiks, ak sa s ním žiaci ešte nestretli.
2. Následne učiteľ predstaví situáciu, ktorá sa v pojmovom komikse odohráva.
3. Učiteľ nechá každého žiaka samostatne rozmýšľať nad daným problémom, aby sa stotožnil s danou problematikou.
4. Učiteľ rozdelí žiakov do skupín ešte pred začiatkom vyučovacej hodiny.
5. Učiteľ menovite vyzve žiakov, aby vyjadrili, čo si myslia, aký majú názor, s ktorým názorom sa stotožňujú alebo môžu navrhnúť vlastný názor.
6. Učiteľ nasmeruje žiakov k diskusii a tým sa snaží, čo najmenej zasahovať do diskusie a neprezrádza správnu alternatívu.
7. V závere by sa žiaci mali zhodnúť na výbere spoločnej alternatívy.

4 Prieskum zameraný na hodnotenie komunikačných schopností žiakov s použitím pojmového komiksu.

4.1 Úloha prieskumu

V dokumente ŠVP je deklarovaná požiadavka, že zámermi nižšieho sekundárneho vzdelávania sú očakávania od žiaka „nadobudnúť primeranú úroveň komunikačných spôsobilostí a spolupráce.“ Taktiež podľa rôznych autorov [Demirtas et al, 2012, Kabapinar, 2009] vznikne medzi žiakmi diskusia po zaradení pojmových komiksov. Preto sme si za hlavnú úlohu prieskumu stanovili:

Porovnať, aká bude verbálna komunikácia pri použití pojmových komiksov a aká bude pri riešení štandardne zadaného problému.

Myslíme si, že pojmové komiksy pomáhajú žiakom odbúravať nesprávne predstavy žiakov. Učiteľom poskytujú pojmové komiksy spätnú väzbu o vedomostiach, kritickom myslení ale aj správnom používaní odbornej terminológie žiakov.

Očakávame, že z prieskumu vyplynú nasledovné zistenia:

1. Diskusia žiakov bude bohatšia pri práci s pojmovými komiksami.
2. Žiaci pri práci s pojmovým komiksom budú nahrádzať jednoslovné odpovede na otázky učiteľa rozvitými vetami.
3. Žiaci budú vedieť odôvodniť svoje tvrdenia odbornou terminológiou.

4.2 Metódy prieskumu a charakteristika súboru

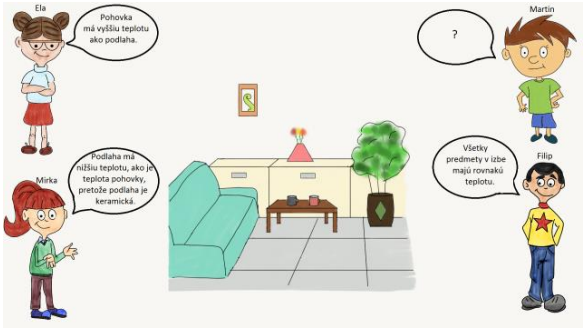
Prieskum sme realizovali ako pozorovanie vyučovacích hodín. Prieskumu sa zúčastnilo 15 žiakov 7. ročníka ZŠ na hodinách fyziky. Žiaci boli rozdelení do 3 skupín, pretože autorky Alexopoulou a Driver [Alexopoulou and Driver, 1996] uvádzajú, že optimálna skupina na diskusiu je 4 – 6 žiakov. Skupiny sme pomenovali takto:

1. Skupina A, v ktorej žiaci komunikovali primerane, ale na požiadanie učiteľky. Počet žiakov v prvej skupine bolo 7.
2. Skupina B, v ktorej žiaci na vyučovacích hodinách nemali priestor vyjadriť svoj názor, iba v momente, kedy boli o to vyzvaní učiteľkou. V tejto skupine boli 3 žiaci.
3. Skupina C, v ktorej žiaci diskutujú samostatne, väčšinou žiaci v tejto skupine nedávajú spolužiakom priestor na vyjadrenie. Do tejto skupiny sme zaradili 4 žiakov.

V prieskume sme vyučovaciu hodinu rozdelili do dvoch sekvencií. V prvej sekvencii žiaci riešili problémovú úlohu z učebnice fyziky pre 7. ročník ZŠ a 1. ročník gymnázií s osemročným štúdiom [Lapitková et al., 2010], týkajúcu sa zmien spôsobených zohrievaním a následným ochladzovaním rôznych telies (kovový valček, vzduch v balóne a voda v banke).
Žiaci mali odpovedať na otázky:

1. Zmení sa zohrievaním teplota telies?
2. Môže kovový valec alebo voda v banke zohrievaním zmeniť skupenstvo?
3. Aké zmeny môžeme pozorovať na jednotlivých telesách, keď ich ochladíme na teplotu napríklad 0 °C?
4. Zmenia telesá zohrievaním svoju hmotnosť?
5. Zmenia telesá zohrievaním svoj objem?
6. Zmení sa zohrievaním hustota látok, z ktorej sú telesá zložené?

V druhej sekvencii vyučovacej hodiny sme použili nami vytvorený pojmový komiks (Obr. 2) zameraný na tému Teplo.



Obr. 2: Pojmový komiks – Teplo.

Žiaci, ktorí sa zúčastnili prieskumu sa ešte na hodinách fyziky nezoznámili s pojmami tepelný vodič a tepelný izolant.

Nosná téma tohto pojmového komiksu sa opiera o poznanie žiakov, že rôzne materiály sa líšia svojou teplotou. Materiál, ktorý vyzerá *chladne* má nižšiu teplotu ako vec vyrobená z materiálu, ktorý pôsobí na človeka *teplejšie.* Pritom všetky predmety sú umiestnené v jednej izbe, kde predpokladáme, že je izbová teplota. V alternatívach sa explicitne vynecháva pojem izbová teplota alebo neudávame teplotu danú číselne, pretože by žiaci mohli namietať, že takúto informáciu nemajú odkiaľ získať.

Prvou alternatívou je mylná predstava, že pohovka má vyššiu teplotu, ako podlaha. Pri tvorbe tejto alternatívy sme vychádzali z mylnej predstavy žiakov, že podlaha je chladnejšia ako pohovka. V druhej alternatíve sa opierame o rovnaký poznatok ale z iného pohľadu, kde zvýrazňujeme, že podlaha má nižšiu teplotu. V tejto alternatíve sme pridali aj tvrdenie, ktoré môže žiakov utvrdiť ich predstave, že podlaha má nižšiu teplotu. Pridaním tvrdenia, že je podlaha keramická, sme dodali žiakom oporný pilier v ich úvahe. Do tohto pojmového komiksu sme zaradili bublinu s otáznikom, ktorá dáva žiakom možnosť vyjadriť svoj názor. Poslednou alternatívou zobrazenou v pojmovom komikse je správna alternatíva, v ktorej uvádzame, že všetky predmety v izbe majú rovnakú teplotu.

4.3 Spracovanie a interpretácia výsledkov

Najprv sme porovnali komunikačné schopnosti žiakov zvlášť v každej skupine a na základe toho sme vyvodili niekoľko záverov, ktoré sme spozorovali a zdali sa nám zaujímavé nielen z hľadiska diskusie, ale aj z fyzikálneho hľadiska. V závere prieskumu sme naše zistenia potvrdili percentuálnym zastúpením holých viet voči všetkým odpovediam žiakov, ktoré zazneli, či už pri práci pri problémovej úlohe, ale aj vo vyučovacej sekvencii s pojmovými komiksami.

Vyučovacia sekvencia bez pojmového komiksu

V skupine A sme pozorovali, že žiaci vo väčšine prípadov odpovedali učiteľke na otázky týkajúce sa problémovej úlohy stručne, používali slovesá, napr. zvyšovať, môže, bude sa znižovať,...

Vybrali sme najčastejšie sa vyskytujúce odpovede na otázky v problémovej úlohe. V prvej otázke: Zmení sa zohrievaním teplota telies? žiaci odpovedali:

„Áno.“

„Tá teplota bude väčšia.“

„Bude sa zvyšovať.“

Na otázku Môže kovový valec alebo voda v banke zohrievaním zmeniť skupenstvo? žiaci odpovedali:

„No, tak kovový valček nie, ale voda sa bude vyparovať.“

„Voda môže.“

Na pomocnú otázku učiteľky, či kovový valček nemôže, žiaci odpovedali:

„Ale môže, môže sa roztopiť.“

„Áno, môže sa roztaviť.“

Na otázku učiteľky, čo sa stane, keď zohrejeme vodu na 100 °C žiaci odpovedali:

„Vyparí sa.“

„Vyparuje sa.“

Na otázku, aké zmeny môžeme pozorovať na jednotlivých telesách, keď ich ochladíme na teplotu napríklad 0 °C, žiaci odpovedali:

„Nič.“

„Bude studený.“

Pre vodu v banke žiaci odpovedali:

„Trošku zamrzne.“

„Zamrzne.“

Na otázku či zmenia telesá ohrievaním svoju hmotnosť žiaci odpovedali:

„Voda áno, keď sa to bude vyparovať.“

„Kovový valček nie.“

„Vzduch v balóne nie.“

V zapätí ich učiteľka naviedla k správnej odpovedi, v ktorej im oznámila, že keď nebudeme vodu zohrievať až do extrémov, tak či sa zmení hmotnosť. Žiaci potom opravili svoju odpoveď.

Na otázku či zmenia telesá svoj objem zohrievaním, žiaci odpovedali:

„Voda áno.“

„Zmenší sa.“ Tu zaznela nesprávna odpoveď, ktorá nastala len neporozumením otázky. Žiak si myslel, že ochladzujeme teleso. Následne sa opravil:

„Áno, áno, Zväčšoval sa objem.“

Žiaci odpovedali na poslednú otázku: Zmení sa zohrievaním hustota látok, z ktorej sú telesá zložené? najslabšie. Žiaci dlho premýšľali, neboli si istí svojou odpoveďou:

„Rozmýšľame.“

„Asi, áno.“ „No neviem to vysvetliť.“

Učiteľka im v zapätí pripomenula, že robili experiment, týkajúci sa hustoty telies, ale žiaci si nepamätali.

Všimli sme si, že žiaci odpovedali len na otázky učiteľky. Odpovedali vo väčšine prípadov holými vetami, poprípade krátkymi vetami. V žiackych odpovediach v skupine A by sme zvýraznili pár poznatkov, ktoré vyplynuli z ich diskusie:

- Žiaci očakávali, že voda pri 0 °C sa ešte len „pripravuje“ zamrznúť, ale nezamrzne úplne.
- Žiaci nepoužívali správnu terminológiu, používali vyjadrenia napr. „bude studený“ namiesto „bude mať nižšiu teplotu“.
- Žiaci si zamieňali pojmy vyparovanie a var.

V skupine B žiaci boli skôr vyvolávaní učiteľkou. Teda diskusia medzi žiakmi nebola plynulá. Odpovede skupiny B na otázku Zmení sa zohrievaním teplota telies?:

„Áno.“

„Bude to teplejšie.“

„Teplota bude vyššia.“

Na otázku Môže kovový valec alebo voda v banke zohrievaním zmeniť skupenstvo? žiaci odpovedali:

„Voda v banke nemôže zmeniť skupenstvo a ani ten kovový valec by nemal zmeniť“

„Voda sa začne meniť na plyn, bude sa vyparovať.“

Učiteľka položila otázku: Môže mať voda v banke 110 °C?

„Asi áno.“

Následne prebehla diskusia medzi učiteľkou a žiakom, v ktorej žiaci si pripomenuli, že voda vrie pri 100 °C.

Odpovede na otázku Môže kovový valec alebo voda v banke zohrievaním zmeniť skupenstvo? žiaci odpovedali:

„Asi nie.“

„Ja si tiež myslím, že asi nie.“

„Ani podľa mňa.“

Keďže žiaci odpovedali nesprávne, učiteľka im položila pomocnú otázku: Spomeniete si, že či môžete železo uvariť v cínovej nádobe? Na túto otázku už žiaci vedeli odpovedať, že sa cín roztopí skôr, pretože takúto otázku už mali v písomke.

Na otázku, čo môžeme pozorovať na jednotlivých telesách, keď ich ochladíme na teplotu napríklad 0 °C? žiaci odpovedali:

„Na kovovom valčeku sa nestane nič.“

„Vzduch v balóne bude taký chladnejší.“

„S vodou sa tiež nič nestane.“

Opäť pri tejto nesprávnej odpovedi nasledovala pomocná otázka od učiteľky, že pri akej teplote mrzne voda. Kvôli času sa k ostatným otázkam nedostali. V skupine B by sme zdôraznili, že:

- Žiaci odpovedali len veľmi stručne.
- Aj keď si žiaci vyberali alternatívy s nesprávnymi tvrdeniami, tak žiaci používali odbornú terminológiu.
- Žiaci svojimi odpoveďami si neboli úplne istí.

V skupine C ako sme už spomínali boli žiaci, ktorí viac diskutovali, nebolo potrebné, aby ich učiteľka vyvoláva, teda ich odpovede na prvú otázku Zmení sa zohrievaním teplota telies? žiaci odpovedali:

„Áno, zmení lebo ich zohrejeme.“

Odpovede na doplňujúcu otázku (Ako sa zmení teplota, keď ich zohrejem?) od učiteľky:

„Na vyšší stupeň teploty.“

„Zvýši sa teplota.“

Odpovede na druhú otázku či môže kovový valec alebo voda v banke zohrievaním zmeniť skupenstvo? žiaci odpovedali takto:

„Môže.“

„Nie.“

Pri tejto nesprávnej odpovedi nastala diskusia medzi dvoma žiakmi:

„Prečo nie? Veď keď budeš vodu zohrievať, tak sa vyparí, kov keď budeš, tak sa roztopí.“

„Tak môže, ale pri veľa stupňoch sa ten kov môže rozpustí.“

Pri tretej otázke opäť nastala diskusia medzi žiakmi:

„Kovový valček zostane, aj balón zostane a voda určite nie.“

„Voda zamrzne.“

„No, ale počkaj. Pri 0 °C?“

„Vtedy začína mrznúť voda.“

„Ale nenastane to hneď.“

„Keď bude stále 0 °C, tak to zamrzne po čase.“

„A môžeme pozorovať ochladzovanie a mrznutie.“

„Balón možno iba tak stuhne, že keď sa úplne zamrazí, tak už sa nebude dať naťahovať.“

„Áno, stuhne.“

„Vzduch v balóne začne kondenzovať alebo tak by sa mal premeniť na ľad. Nie na vodu. Vzduch sa potom zmení na vodu.“

Učiteľka ho usmernila, či to čo tvrdí nastáva pri 0 °C? odpovedal, že „to ešte nie.“

Ďalej pokračovala diskusia medzi žiakmi:

„Vzduch sa len ochladí.“

„Podľa mňa len ten balón bude studený.“

V otázke, či zmenia telesá zohrievaním svoju hmotnosť žiaci odpovedali skôr neisto, neboli si istí svojou odpoveďou. Učiteľka spojila túto otázku s nasledujúcou, či zmenia telesá zohrievaním svoj objem:

„Zohrievaním zmenia svoj objem, to sme sa učili. A je to aj všade, ale hmotnosť??“

„Keď sa voda vyparí, tak môže zmeniť svoju hmotnosť, lebo jej tam bude menej.“

Opäť pri tejto odpovedi spolužiak chcel protirečiť spolužiakovi, pretože nesúhlasil s jeho odpoveďou:

„Nie, bude tam jej toľko isto.“ Následne učiteľka vysvetlila, že ak budú krátkodobo pozorovať

vyparovanie tak zmena hmotnosti nebude taká evidentná.

„Pri kovovom valčeku sa nezmení hmotnosť."

„Objem sa zmení."

Ďalej si od neho učiteľka vyžiadala, že odkiaľ vie, že sa zmení objem pri kvapalinách. Žiak odpovedal:

„No máme ortuť a keď si ju dáte pod pazuchu, tak sa objem zvýši vplyvom tepla. Tak potom logicky vplyvom zimy sa zmenší objem."

Ešte vysvetlil, že to platí aj pri kovovom valčeku:

„To isté, čo ste ukazovali, že tú guľu ste dávali cez taký krúžok a potom keď už bola zahriatá, tak už potom neprešla cez ten krúžok."

Na poslednú otázku (Zmení sa zohrievaním hustota látok, z ktorej sú telesá zložené?) žiaci odpovedali:

„Podľa mňa nie."

„Podľa mňa sa zmení, ale neviem to vysvetliť."

„Podľa mňa sa vzduch v balóne zmení."

„Aj vo vode." „Vo vode áno."

„Aj v kovovom valčeku."

„Nie, tam podľa mňa nie."

„Kovový valček, keď zohrejete bude plávať na vode? Nebude. Potopí sa."

„No podľa mňa nie, lebo už sme sa to učili o tých studených prúdoch morských a tam to bolo nejako popísané."

„Že teplý prúd ostane hore a chladný prúd ostane dole."

„Takže keby bol valček už moc teplý, tak sa bude v tej vode znášať, teda bude mať tú hustotu menšiu alebo väčšiu, už som sa stratil."

„Ale pri vode a vzduchu to môžeme pozorovať."

V skupine C by sme zdôraznili, že:

- Je viditeľné, že žiaci používali viac rozvitých viet ako v predchádzajúcich skupinách.
- Žiaci vo väčšej miere používali správnu terminológiu, no niekedy sa nevyjadrovali správne, napr. teplota zostane, balón zostane – pričom sme sa pýtali na vzduch v balóne.
- Žiaci v tejto skupine dávali učiteľke doplňujúce otázky, napr. „čo sa stane, ak sa na balóne z vnútra vytvorí námraza", „prečo sa ortuťový teplomer musí vytriasť?"
- Bolo viditeľné, že žiaci odpovedali na jednotlivé otázky tak, že spomínali na pokusy, experimenty, ktoré robili na hodinách.

Vyučovacia sekvencia s pojmovým komiksom

Po sekvencii bez pojmových komiksov učiteľka plynule zaradila pojmový komiks do vyučovania. Pri tejto sekvencii by sme zvýraznili zaujímavé výroky, názory žiakov, ktoré odzneli, pretože žiaci sa väčšinou prikláňali k nejakej postavičke, ale svoje tvrdenia nevedeli odôvodniť. Odpovede skupiny A:

„Podľa mňa Ela má pravdu lebo záleží od toho z čoho je to vyrobené."

„Podľa mňa je to kvôli tomu, že lebo tá pohovka neprepúšťa ten chlad."

„Aj Filip môže byť, ale záleží od toho aká je teplota v miestnosti."

„Aj to by sa dalo, že aká je teplota v miestnosti tak budú tie veci mať rovnakú teplotu."

Spolužiak mu oponoval svojou odpoveďou:

„No určite, že predmety nebudú mať rovnakú teplotu. Určite nie. Keď je podlaha dlaždicová, tak je studená sama o sebe a gauč je teplý, veď tak to je."

„Dokáž to."

„Podľa mňa by mala mať Ela pravdu lebo z podlahy ide furt studený vzduch a ten teplý sa vždy drží hore, preto má Ela pravdu."

Žiaci sa mali dohodnúť ako skupina:

„Všetky predmety nemôžu byť, lebo pohovka je vyrobená na to, aby udržiavala teplo v sebe a podlaha na to nie je prispôsobená. Teda nemôžu mať tú istú."

„No ale ako je tá izba, miestnosť, tak Ela má pravdu podľa toho z čoho je to vyrobené, tak to udržiava teplotu nie?"

„Studený vzduch ide zospodu do podlahy a ten teplý vzduch ide smerom hore do stropu, tak tá podlaha bude studenšia, bude najstudenšia v izbe, takže z toho mi vyplýva, že buď Ela alebo Mirka bude mať pravdu, ale pohovka je teplejšia od podlahy takže podľa mňa Ela má pravdu."

„Mne sa zdá, že ako keby mali všetci pravdu, ale Filip nie."

Nakoniec sa zhodli, že Ela a Mirka majú pravdu. Filipovu odpoveď po čase zamietli a označili ju za nepravdivú. Žiaci považovali alternatívu otáznika v bubline, za tvrdenie, že Martin nevie správnu odpoveď a preto nechceli uznať, že vlastne hovoria za Martina teda, že majú vlastný názor na fyzikálny jav.

- Žiaci brali do úvahy rôzne vplyvy, ktoré môžu nastať, napr. počítali s tým, že v izbe môže byť podlahové kúrenie.
- Pri práci s pojmovými komiksami nastal okamih, kedy žiaci vyžadovali dokazovať tvrdenia pokusom.
- Odpovede žiakov sú viac rozvinuté ako pri problémových úlohách.

Vyjadrenia skupiny B:

„Podľa mňa ten Filip nemá pravdu lebo napr. keď je tam váza a nalejeme do nej studenú vodu, tak bude iná teplota tej vázy ako sedačky alebo pohovky."

„Podľa mňa ten Filip nemá pravdu lebo v tej izbe je aj možno čaj alebo káva a to je horúce a nemá takú teplotu ako napr. obraz alebo tá pohovka."

„Podľa mňa má Mirka pravdu." Následne sa učiteľka spýtala žiaka, či má skúsenosť s tým alebo prečo si je istý, že má Mirka pravdu:

„Ja aj áno lebo u nás v kuchyni sú tiež také kachličky a to je vždy také chladnejšie ako pohovka, ale keď majú podlahové kúrenie, tak by to mohlo byť aj rovnaké."

„Keby sme vedeli, že tam nemajú to podlahové kúrenie, tak by Ela mala pravdu, ale ak nevieme, tak nevieme zistiť či má vyššiu teplotu pohovka ako podlaha."

„Podľa mňa to, čo hovorí Ela a Mirka je rovnaké, lebo Ela hovorí, že pohovka má vyššiu teplotu ako podlaha a Mirka hovorí to isté. A podľa mňa to závisí aj od toho či to podlahové kúrenie majú alebo nemajú."

Nakoniec sa mali zhodnúť na jednej alternatíve alebo vymyslieť vlastnú. Žiaci vymysleli vlastný a zhodli sa na ňom:

„Všetky predmety majú inú teplotu."

Zhrnuli sme z pozorovania najdôležitejšie body:

- Odpovede žiakov sú viac rozvinuté ako pri problémovej úlohe ale nebolo ich mnoho. Častejšie sa vyskytovali prípady, kedy len súhlasili s postavičkou, ale nevedeli to odôvodniť, prečo s ňou súhlasia.
- Žiaci v tejto skupine sa nezameriavali na fyzikálnu pravdivosť tvrdení postavičiek, ale skôr sa zameriavali na situácie, ktoré by mohli nastať, ale nemáme o nich žiadnu informáciu, či nastali, napr. podlahové kúrenie v miestnosti, horúci čaj.

V skupine C prebiehala takmer plynulá diskusia medzi žiakmi, preto sme vybrali len vyjadrenia žiakov, ktoré nás zaujali najmä z fyzikálneho hľadiska:

„Podľa mňa Filip má tiež pravdu, ale aj tá Ela lebo keď ležíš na pohovke tak sa ti zohreje."

„Ale vidíš, že tam niekto leží? Nikto tam neleží."

„Áno, lebo čím ideš vyššie, tým je teplejšie lebo teplota stúpa hore. Takže podlaha bude studená, teda bude mať nižšiu teplotu a pohovka bude mať o niečo vyššiu."

„Podľa mňa záleží aj od toho, z čoho sú tie predmety vyrobené."

„Podlaha je studená, lebo veď je keramická."

„Podľa mňa má Filip pravdu, lebo keď majú podlahové kúrenie alebo aj nemajú podlahové kúrenie, tak všetka zima ide dole, čiže celá podlaha bude musieť mať jednu teplotu a všetko ostatné bude mať rovnakú teplotu, lebo studený vzduch sa šíri smerom dole a všetko musí mať rovnakú teplotu, ale tam, kde už nemôže ísť, tak tam bude najvyššia. Keby mali podlahové kúrenie, tak všetko bude jednou teplotou a vrch, plafón bude najteplejší lebo sa tam usadí teplo. Preto má Filip pravdu."

„Podľa mňa nie, podľa mňa máš pohovku, tak tá je látka, podľa mňa je teplejšia ako podlaha."

„Oni vlastne hovoria to isté (Ela a Mirka), lebo keď má určite Ela pravdu, tak aj Mirka. Pohovka má určite vyššiu teplotu ako podlaha."

„Lebo keramika je studená, taniere čo ješ lebo to musí byť studené, keď je to z keramiky."

„Podľa mňa majú tie dievčatá pravdu, ale neviem prečo. Alebo Martin, ale ten Filip nemá."

„Ale ako môžu mať všetky predmety rovnakú teplotu? Napr. aj ten kvet ako podlaha."

Odpoveď spolužiaka:

„Teplo to je jedno, či to ide cez železo alebo nejakú keramiku. Prečo by malo na tom záležať?"

V závere vyučovacej sekvencie sa žiaci rozdelili na 2 menšie skupiny. Prvá skupina tvrdila, že Filip má pravdu:

„Keď zohrieva jedna vec, tak má taký istý vplyv na jedno aj na druhé, tak budú obidve tej istej teploty. Keď je tam železo a drevo a zohreješ to s tou istou teplotou, má taký istý vplyv. Tak za taký istý čas to bude mať takú istú teplotu."

Druhá skupina tvrdila, že Ela a Mirka majú pravdu a Filip určite nemá pravdu:

„Keď bude podlaha keramická tak bude studená a keď je pohovka z kože a keď som išiel niekam a bola koža na sedačke a nikto tam nesedel, tak bola chladná. Keď máme látkovú sedačku tak nie je taká chladná."

- Žiaci v tejto skupine si protirečili. Snažili sa vyvrátiť argumentami tvrdenia svojich spolužiakov, keď s nimi nesúhlasili.
- Žiaci, ktorí si vybrali nesprávne alternatívy, sa pri svojom argumentovaní odvolávali na situácie z bežného života, že s tým majú skúsenosť. Ale nezamýšľali sa už nad fyzikálnym odôvodnením, ale len na to, že s tým majú skúsenosť.
- Až v tejto skupine zvolili pravdivú alternatívu a to len dvaja žiaci z celej skupiny.
- V tejto skupine bola diskusia veľmi bohatá a myšlienky žiakov boli súvislé. Zásahy učiteľky do diskusie boli minimálne, len v prípadoch, keď žiaci vyžadovali od učiteľky odpovede na ich otázky.

4.4 Zhrnutie výsledkov prieskumu

Na základe pozorovania vyučovacích hodín v jednotlivých skupinách a taktiež aj vyššie spomínaných odpovediach žiakov sme usúdili, že pojmové komiksy nielen rozvíjajú diskusiu v triede, ale žiaci pomocou pojmových komiksov majú potrebu viac odôvodňovať svoje tvrdenia, dokazovať spolužiakom, že majú pravdu a preto používajú rozvité vety, neboja sa vyjadriť svoj názor a boli viac ponorení do riešeného fyzikálneho problému. Pri pozorovaní sekvencie vyučovacej hodiny, v rámci ktorej žiaci slovne riešili zadané problémy, sme všetky odpovede žiakov rozdelili na holé a rozvité vety. Rovnako sme postupovali aj

pri pozorovaní diskusie žiakov pri probléme zadanom pomocou pojmového komiksu. Percentuálne zastúpenie holých viet v jednotlivých skupinách sme stručne zhrnuli v Tabuľke 1:

Sekvencia bez pojmového komiksu	**Skupina A**	**Skupina B**	**Skupina C**
Počet holých viet (H)	33	15	25
Počet rozvitých viet (R)	10	12	34
Počet všetkých viet (V)	43	27	59
Percentuálne zastúpenie (H/V)	**77 %**	**56 %**	**42 %**
Sekvencia s pojmovým komiksom	**Skupina A**	**Skupina B**	**Skupina C**
Počet holých viet (H)	14	8	14
Počet rozvitých viet (R)	24	11	31
Počet všetkých viet (V)	38	19	45
Percentuálne zastúpenie (H/V)	**37 %**	**42 %**	**31 %**

Tabuľka 1: Počet viet v diskusiách podľa zloženia

Za holé vety sme považovali jednoslovné odpovede žiakov, vety tvorené len 1-3 slovesami (napr. Bude sa zvyšovať.), vety pozostávajúce len z mien postavičiek, citoslovcia, ale zahrnuli sme tu aj takéto vety: Podľa mňa má Ela pravdu. Medzi rozvité vety sme zahrnuli všetky rozvité vety, opytovacie vety, tiež sme zaradili aj súvetia.

V ďalšom kroku sa pozrieme na fyzikálnu správnosť jednotlivých vyjadrení žiakov. Žiaci vo všetkých skupinách argumentovali tým, že teplota predmetu závisí od materiálu, z ktorého je vyrobený, čo sme aj predpokladali. Preto sme pri príprave pojmového komiksu vložili túto alternatívu. Musíme uviesť, že žiakom bol nastolený pojmový komiks na tému teplo, vedenie tepla z dôvodu, že sa ešte nestretli s pojmami ako sú tepelný vodič a tepelný izolant. Preto sme odpozorovali dva tábory žiakov. V jednom tábore žiaci argumentovali skúsenosťami, ktoré majú z bežného života, že teleso je chladnejšie na dotyk, no pri tom si neuvedomovali (a vlastne ani nemali ako, keďže sa s fyzikálnym vysvetlením vedenia tepla ešte nestretli), že teleso, ktoré je lepší vodič tepla skôr odoberie teplo z ruky pri dotyku a preto majú pocit, skúsenosť, že je teleso chladnejšie.

V druhom tábore a vlastne aj v menšom počte žiakov, žiaci argumentovali prúdením teplého a chladného vzduchu. Keďže teplý vzduch prúdi nahor, tak aj telesá umiestnené navrchu izby budú mať vyššiu teplotu ako telesá pri zemi. Keďže navrchu izby neboli predmety, tak žiaci usúdili, že v izbe budú mať všetky predmety rovnakú teplotu. Ďalej toto tvrdenie žiaci spojili s tvrdením postavičky Filipa, že všetky predmety budú mať rovnakú teplotu, pretože teplota predmetov nezávisí od materiálu, z ktorého sú vyrobené, pričom na vyučovacej hodine nezaznel pojem izbová teplota.

5 Záver

Našim cieľom bolo porovnať komunikačné schopnosti žiakov na vyučovaní bez a s použitím pojmových komiksov. Preto sme realizovali prieskum, v ktorom sme využili nami vytvorený pojmový komiks a aplikovali ho na hodine fyziky 7. ročníka ZŠ. Vo vyučovacej sekvencii bez pojmového komiksu žiaci riešili problémové úlohy. Následne riešili problém nastolený pomocou pojmového komiksu. Za najdôležitejší aspekt celého prieskumu považujeme to, že sa potvrdili naše očakávania, že žiaci pomocou pojmových komiksov majú potrebu viac diskutovať, odôvodňovať svoje tvrdenia, dokazovať spolužiakom, že majú pravdu a preto používajú rozvité vety, neboja sa vyjadriť svoj názor a boli viac ponorení do riešenia fyzikálneho problému.

Poďakovanie

V prvom rade by som sa poďakovala doc. PaedDr. Kláre Velmovskej, PhD. za odborné rady, korekcie a za čas, ktorý mi venovala. Takisto patrí moja vďaka učiteľke PaedDr. Monike Vanyovej, PhD., že mi umožnila uskutočniť pozorovanie na jej hodinách fyziky.

Taktiež by som sa chcela poďakovať žiakom 7. ročníka ZŠ, ktorí sa zúčastnili môjho pozorovania.

Literatúra

[Alexopoulou and Driver, 1996] Alexopoulou, E., Driver, R. (1996). Small-Group Discussion in Physics: Peer Interaction Modes in Pairs and Fours. In Journal of Research in Science Teaching, [online], vol. 33, p. 1099-1114.

[Dabell, 2008] Dabell, J., (2008).Using concept cartoons. In Mathematics teaching incorporating micromath, vol. 209, p. 34-36. ISSN 0025-5785.

[Demirtas et al., 2012] Demirtas, Z., Kiyici, F., and Yigit, E. (2012). Concept cartoons in science education: availability and students´ opinions about the cartoons. In Energy Education Science and Technology Part B: Social and Educational Studies [online], vol. 4, p. 861-865.

[Kabapinar, 2009] Kabapinar, F., (2009). What Makes Concept Cartoons More Effective? Using Research to Inform Practice. In Education and Science [online], vol. 34, p. 104-118.

[Keogh and Naylor, 2000] Keogh, B. and Naylor, S. (2000). Concept Cartoons in Science Education. pages 1, Millgate House Publishers.

[Keogh and Naylor, 2013] Keogh, B. and Naylor, S. (2013). Concept cartoons: What hav ewe learnt?. In Journal of turkish science education. Millgate House Education [online], p. 3-11. ISSN 1304-6020.

[Kiss, T., Velmovská, K., 2020] Kiss, T., Velmovská, K. (2020). The Level of Understanding of Selected Concepts in Physics of Students from Different Countries. In The Beauty and Pleasure of Understanding: Engaging with Contemporary Challenges through Science Education (Proceedings of ESERA 2019). Bologna : Università di Bologna, 2020. s. 9-14. ISBN 978-88-945874-0-1.

[Lapitková, et al., 2010] Lapitková, V., Koubek, V., Maťašovská, M., Morková, Ľ. (2010). Fyzika pre 7. ročník ZŠ a 1. ročník gymnázia s osemročným štúdiom. Didaktis, p. 112. ISBN 978-80-89160-79-2.

[ŠPÚ (Štátny pedagogický ústav), 2015a.] Štátny vzdelávací program: Fyzika – nižšie stredné vzdelávanie. [online]. Bratislava : ŠPÚ, 2015. [cit. 29.3.2021]

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 272–280
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Júlia Barabasová, Klára Velmovská

Možnosti dištančného vzdelávania vo vyučovaní fyziky

Júlia Barabasová[1]* Klára Velmovská[1‡§]
[1] Katedra didaktiky matematiky, fyziky a informatiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstrakt

Práca je zameraná na analýzu dištančného vyučovania fyziky. Zozbieraním a spracovaním údajov od učiteľov na rôznych typoch škôl a stupňoch vzdelávania sme zistili, čo opýtaní učitelia ku kvalitnému dištančnému vyučovaniu fyziky potrebujú. V príspevku predstavíme platformy, weby a aplikácie, ktoré učitelia využívali na realizáciu, alebo ozvláštnenie online hodín. Taktiež sme vytvorili aktivitu, ktorú učitelia môžu využiť na dištančných hodinách fyziky.

Kľúčové slová: dištančné vzdelávanie, online vyučovanie

1 Vymedzenie pojmov

S príchodom dištančného vyučovania sa stretávame s novými pojmami. Samotný pojem dištančného vzdelávania sa v našej komunikácii pred pandémiou takmer nevyskytoval. Jeho definíciu nájdeme napríklad v školskom zákone. § 54 ods. 10 zákona č. 245/2008 Z. z. školský zákon hovorí: „Dištančné vzdelávania je diaľkové vzdelávanie prostredníctvom korešpondencie, telekomunikačných médií a iných prostriedkov, pri ktorých spravidla nedochádza k priamym kontaktom medzi pedagogickým zamestnancom a samostatne študujúcim žiakom.“ [S-EPI, 2021] Počas dištančného štúdia učitelia využívajú rôzne formy komunikácie a realizácie hodín. Základné delenie foriem vzdelávania hovorí o asynchrónnom a synchrónnom vzdelávaní. Asynchrónna podoba vzdelávania podľa Pasiara „nevyžaduje časové zladenie účastníkov vzdelávania. Toto riešenie komunikácie využíva väčšinou diskusné fóra, hromadnú mailovú korešpondenciu, prípadne rôzne formy virtuálnych násteniek a pod.“ [Pasiar, 2019]. Pri synchrónnej forme vzdelávania, majú žiaci a učitelia dohodnutý konkrétny čas, kedy sa vyučovanie realizuje a využívajú sa najmä „audio a video konferencie, instant messaging, spoločne využívané (zdieľané) aplikácie a pod.“ [Pasiar, 2019]. Synchrónnu a asynchrónnu podobu vzdelávania definovala vo svojom článku aj Milena Tetřevová Maťašovská:

- „synchrónna (všetci účastníci môžu komunikovať v rovnakom čase, interakcia pedagóga a študentov prebieha v rovnakom, t.j. „reálnom” čase), ide napríklad o počítačové konferencie, IRC, interaktívna TV ap.;
- asynchrónna (študenti nemusia byť v rovnakom čase na rovnakom mieste, resp. virtuálnom mieste, neštudujú v rovnakom okamihu, interakcia neprebieha v rovnakom čase, študenti si volia čas prístupu k vzdelávacím materiálom, je flexibilnejšia). Napríklad korešpondenčné kurzy, e-mail, diskusné skupiny, WWW ap.“ [Tetřevová Maťašovská, 2002]

Autorka chápe IRC (Internet Relay Chat) ako jednu z prvých možností komunikácie v reálnom čase cez internet.

Okrem pojmu dištančného vzdelávania sa často stretávame aj s označením online vzdelávanie, čo vo svojom článku taktiež definovala Milena Tetřevová Maťašovská: „Pod pojmom online vzdelávanie rozumieme vzdelávanie, ktoré vyžaduje zapojenie pracovnej stanice do počítačovej siete (intranet, internet). Distribúcia učebných materiálov a komunikácia medzi účastníkmi výučby sa deje prostredníctvom sieťových komunikačných prostriedkov. Príkladom je vzdelávanie cez internet.“ [Tetřevová Maťašovská, 2002] Z vyššie uvedených definícií vyplýva, že synchrónna forma dištančného vyučovania je špeciálna podoba online vzdelávania, keďže pri synchrónnom vyučovaní musia byť žiaci a učitelia pripojení na internet. Vzhľadom na to, že učitelia aj žiaci tieto pojmy chápu ako synonymá, budeme ich ďalej v práci tiež používať takto.

2 Situácia na Slovensku

V online dotazníku, ktorý sme v priebehu februára 2021 rozposlali učiteľom fyziky na rôznych typoch škôl na Slovensku sme zisťovali, akú podobu dištančného vzdelávania preferujú učitelia na Slovensku a aké aplikácie a weby využívajú. Podarilo sa nám získať 28 odpovedí, vďaka ktorým sme získali prehľad o situácii v dištančnom vzdelávaní fyziky na slovenských školách. Informácie, ktoré sme z dotazníka získali, neskôr využijeme na výber možností dištančného vzdelávania, ktoré učiteľom v tejto práci predstavíme a taktiež tieto poznatky zohľadníme

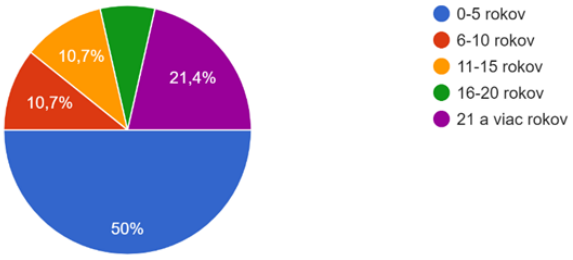
* barabasova8@uniba.sk
‡ klara.velmovska@fmph.uniba.sk
§ Školiteľ

pri tvorbe vhodných aktivít, ktoré budú môcť učitelia na dištančnom vyučovaní využiť.

2.1 Všeobecné informácie o respondentoch

Dotazník vyplnili učitelia najmä zo západného Slovenska (23), 15 odpovedí bolo priamo z Bratislavy. Našli sa však aj učitelia zo stredného Slovenska (4), konkrétne z Banskej Bystrice, Valaskej, Brezna a Slovenskej Ľupče a jedna odpoveď z východného Slovenska, zo Starej Ľubovne.

Vo všeobecnej časti dotazníka sme sa ďalej pýtali na typ školy, v ktorej učitelia učia a dĺžku ich praxe. Keďže učitelia môžu učiť na viacerých rôznych školách naraz, v otázke o školách bolo možné označiť viac odpovedí. Najviac učiteľov, až 16, označilo vo svojej kombinácií škôl aj základnú školu. Rozdelenie dĺžky praxe respondentov zobrazuje nasledujúci diagram (graf 1):



Graf 1: Počet rokov praxe opýtaných.

2.2 Prvá vlna pandémie

V ďalšej časti dotazníka sme sa pýtali, akým spôsobom vyučovali učitelia počas prvej vlny pandémie, od marca 2020 do júna 2020. Zisťovali sme, aké podmienky mali na vyučovanie, čo využívali ako platformu na vyučovanie, ale aj aké aplikácie počas vyučovania používali.

Platforma a množstvo online hodín

Polovica opýtaných vyučovala v prvej vlne cez MS Teams, druhá najpočetnejšia skupina vyučovala cez ZOOM. Väčšina opýtaných vyučovala počas prvej vlny podľa upraveného rozvrhu, prípadne časť hodín z pôvodného rozvrhu vyučovali online a na zvyšných hodinách zadávali žiakom samostatnú prácu.

Podpora zo strany škôl

Prekvapením pre nás boli odpovede na otázku, či škola poskytla učiteľom nejaké technológie, alebo financie na zakúpenie technológií potrebných na dištančnú výučbu. Až 16 opýtaných odpovedalo, že od školy dostali podporu. Jednalo sa najmä o technické pomôcky, ako sú napríklad grafické tablety, notebooky, vizualizér, ale aj licencie na rôzne programy ako Webex, Multimediálna učebnica fyziky od Beňušku, alebo školenia na programy, ktoré využívali na realizáciu hodín. Okrem podpory, ktorú dostali zo strany škôl, niektorí si potrebovali kúpiť vybavenie aj za vlastné prostriedky. Rovnako ako v predchádzajúcej možnosti išlo aj o technické vybavenie, ako grafický tablet, notebook, výkonnejší router, slúchadlá a podobne. Viac ako technické vybavenie sa tu ale vyskytovali pomôcky na realizáciu improvizovaných pokusov.

Realizácia pokusov

Keďže učitelia, ktorých sme sa pýtali, vyučujú fyziku, zaujímalo nás aj to, či žiaci počas dištančného vzdelávania realizovali na hodinách, alebo mimo nich nejaké pokusy, merania alebo experimenty. 15 respondentov odpovedalo, že ich žiaci na hodinách experimenty robili. Išlo najmä o jednoduché experimenty s pomôckami, ktoré sú bežne dostupné v domácnosti, čiže učitelia nezasielali žiakom špeciálne pomôcky a ani rodičia nemuseli hľadať špeciálne pomôcky pre svoje deti. Okrem experimentov, ktoré realizovali žiaci sami, mali od svojich vyučujúcich k dispozícii aj videá, alebo fotopostupy, ktoré vytvárali učitelia. Úlohou žiakov v tomto prípade potom bolo zrealizovať videomeranie pomocou rôznych programov, ako je napríklad Tracker.

Väčší podiel kladných odpovedí, konkrétne 20, bolo pri otázke, či učitelia na dištančných hodinách realizovali demonštračné experimenty. Tí, čo vyučovali zo školy, alebo mali prístup k pomôckam v škole, realizovali demonštračné experimenty zrovnateľné s tými, ktoré sa realizujú počas prezenčnej výučby. Ostatní, ktorí takúto možnosť nemali, využívali videá dostupné na internete, alebo jednoduché experimenty s dostupnými pomôckami.

2.3 Druhá vlna pandémie

Učitelia počas prvej vlny pandémie postupne získavali skúsenosti a metódou pokus – omyl zisťovali, čo funguje lepšie a čo horšie. V septembri 2020 sa čím ďalej tým viac nerozprávalo o tom, či sa vrátime k dištančnému vyučovaniu, ale kedy sa tak stane. Naplnilo sa to a všetci sa postupne vrátili k vyučovaniu z domu. Keďže už mali všetci skúsenosti s takouto formou výučby, opätovný návrat na dištančné vzdelávanie už nebol taký nečakaný a zložitý ako v marci 2020. Školy, ale aj jednotliví učitelia po skúsenostiach z prvej vlny mnohé zmenili. Ukázalo sa to aj v odpovediach na otázku, čo sa zmenilo vo vyučovaní, oproti prvej vlne pandémie, kde mnohí uviedli veľa zmien, ktoré oni, alebo aj ich škola zrealizovali. Najmä išlo o zmenu v pomere synchrónnych (online) hodín a samostatnej práce, ale aj v spôsobe výkladu učiva. Celkovo bola výučba organizovanejšia a prebiehalo vo všeobecnosti viac online hodín, na ktoré vyučujúci kládli väčší dôraz ako v prvej vlne, kde sa všetci len prispôsobovali novej situácii.

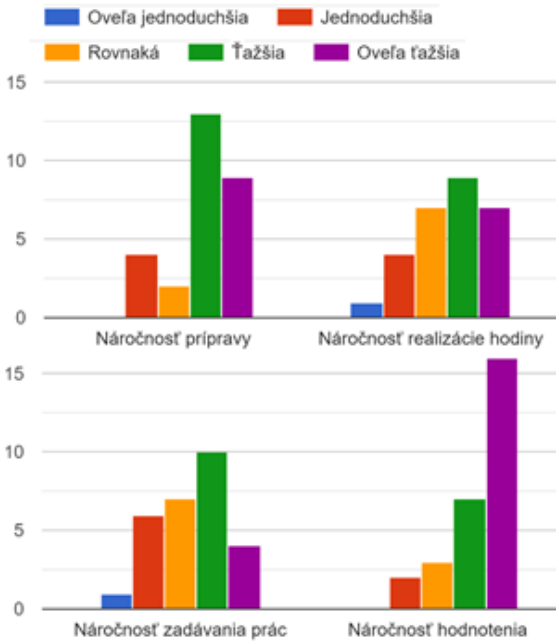
Zmenilo sa aj technické vybavenie učiteľov, ktorí si sami, alebo zo školských financií zadovážili najmä grafické tablety, ktoré im umožnili lepšie realizovať hodiny, keďže mohli písať priamo na virtuálnu tabuľu. Objavili aj mnohé nové applety a iné pomôcky, či spôsoby vyučovania. Môžeme teda konštatovať, že online vyučovanie počas druhej vlny pandémie sa zlepšilo, učitelia aj žiaci boli viac pripravení na prechod z prezenčného na dištančné vyučovanie, boli viac zorganizovaní a hodiny boli lepšie naplánované aj realizované.

2.4 Záver dotazníka

V závere sme položili ešte 2 otázky a učiteľom sme dali priestor na ich postrehy, návrhy a čokoľvek, čo by ešte chceli napísať ohľadom dištančnej výučby.

Náročnosť dištančnej výučby

V prvej otázke nás zaujímal pohľad učiteľov na náročnosť dištančnej výučby. Keď ich odpovede zhrnieme, môžeme konštatovať, že celkovo dištančná výučba, príprava, hodnotenie a realizácia je pre učiteľov náročnejšia, ako prezenčné vyučovanie. Rozdelenie ich odpovedí ukazuje aj nasledujúci diagram (graf č. 2):



Graf 2: Náročnosť dištančnej výučby.

Efektivita dištančnej výučby

Druhá otázka sa týkala často preberanej témy a to efektivita dištančnej výučby. Konkrétne nás zaujímalo, čo si opýtaní myslia, či sa žiaci naučia viac, menej alebo rovnako ako počas klasickej prezenčnej výučby. Väčšina odpovedala, že sa žiak naučí menej ako v triede, ale veľa odpovedí poukazovalo aj na individuálny prístup žiakov k učeniu. Žiaci, ktorí sa chcú učiť a majú vnútornú motiváciu, sa naučia porovnateľné množstvo učiva, alebo aj viac, ale tí, čo sa im učiť nechce, hľadajú možnosti na podvod, ktoré sú v dištančnom vyučovaní oveľa rozšírenejšie ako v prezenčnej výučbe. Vyskytli sa aj názory, že sa žiaci naučia iné veci, získajú viac technických poznatkov ako praktických zručností.

Vyjadrenia učiteľov

Z vyjadrení učiteľov, ktorí napísali svoje postrehy vyplýva, že ich mrzí prístup spoločnosti k učiteľom a vyjadrenia, že sedia už rok doma, nič nerobia a všetko nechali na rodičov. Je jasné, že takéto vyjadrenia trápia učiteľov, ktorí sa svedomite pripravujú na vyučovanie a trávia aj 10 až 12 hodín denne pri počítači, aby pripravili čo najlepšie podklady pre svojich žiakov, skontrolovali úlohy, ktoré im žiaci zasielajú, často v rôznych formách. Mnohým chýba interakcia so žiakmi a tešia sa na návrat do škôl. Nájdu sa ale aj takí, ktorým takéto vyučovanie vyhovuje a šetrí im čas.

2.5 Zhrnutie

Dištančné vyučovanie zvláda každý učiteľ aj každý žiak rôzne. V prvej vlne boli všetci vystavení nečakanej, novej situácii. Každý bojoval ako vedel a vyučovanie prechádzalo veľkými zmenami. Učitelia hľadali najvhodnejší spôsob komunikácie, zadávania úloh, realizácie hodín. Nie každému sa to podarilo hneď, ale každý svoje poznatky a skúsenosti uplatnil pri prípravách na vyučovanie v druhej vlne, kedy už vyučovanie prebiehalo oveľa organizovanejšie, premyslenejšie a najmä viac orientované na online hodiny.

Vyučujúci využívali rôzne platformy na realizáciu hodín, podľa svojich potrieb. Rôzne aplikácie, weby a applety na obohatenie a ozvláštnenie hodín. Keďže príprava hodín, realizácia hodín, zadávanie úloh ale aj hodnotenie žiakov je pre učiteľov zložitejšie ako pri prezenčnej výučbe, učitelia potrebujú veľa trpezlivosti a dobrú organizáciu času, aby všetko zvládali.

Okrem finančnej a technickej podpory zo strany škôl, učitelia potrebujú aj morálnu podporu zo strany svojich blízkych a najmä rodičov svojich žiakov. Mnohí obetujú svoj čas, ktorý by za normálnych okolností trávili so svojimi najbližšími, alebo pri svojich koníčkoch na to, aby ich žiaci mali kvalitnú výučbu v rámci možností dištančného vyučovania a kvalitnú spätnú väzbu.

Prieskum podobný nášmu vytvorila v júni 2020 aj Nadácia Dionýza Ilkoviča. [Nadácia Dionýza Ilkoviča, 2020] V prieskume sa pýtali učiteľov prírodovedných predmetov, nie len učiteľov fyziky. Výsledky ich prieskumu sa v otázkach využívania technológií, náročnosti realizácie dištančného vyučovania a porovnania efektivity dištančného a klasického vyučovania zhodujú s našimi výsledkami. Ostatné otázky nemôžeme porovnávať, keďže náš prieskum podobné veci nezisťoval.

3 Realizácia online hodín

V tejto časti sa budeme venovať platformám, cez ktoré učitelia realizovali svoje online hodiny. Bližšie ich charakterizovala napríklad IT Akadémia [IT Akadémia, 2020]. Priblížime tie z dostupných platforiem, ktoré učitelia podľa dotazníka využívali najviac.

3.1 ZOOM

ZOOM je aplikácia na vytváranie online stretnutí, či už bez použitia kamery alebo s použitím kamery. Základný balík, ktorý je dostupný zadarmo, dovoľuje vytvárať stretnutia pre maximálny počet 100 účastníkov, na maximálnu dĺžku stretnutia 40 minút. Tento základný balík preto nie je úplne vhodný pre vyučovanie, keďže štandardné vyučovacie hodiny majú 45 minút a počas dištančnej výučby mnoho škôl hodiny predlžovalo na 1 hodinu, alebo aj na hodinu a pol. Dostupné sú však aj viaceré platené balíčky, v ktorých je už dĺžka stretnutia neobmedzená. Na to, aby sme mohli vytvoriť stretnutie v ZOOMe, musíme byť zaregistrovaní na stránke zoom.us a z rovnakej stránky aj stiahnuť a nainštalovať softvér. Žiaci, ktorí sa na stretnutia iba pripájajú a nevytvárajú ich, nemusia byť registrovaní, ale softvér musia mať nainštalovaný.

V rámci hovoru, ktorý sa dá aj nahrávať, v platenej, ale aj v bezplatnej verzii, sú dostupné rôzne typy prístupu obrazovky žiakom. Je možné zdieľať konkrétne okno, ktoré máte v počítači otvorené, napríklad prezentáciu v PowerPointe, alebo video, uložené v počítači. Ďalšou možnosťou je zdieľať webový prehliadač, kde žiaci vidia všetko, čo na internete práve vyhľadávame a pozeráme, ako napríklad rôzne články, online simulácie, alebo videá dostupné na internete. Počas zdieľania obrazovky je možné priamo na obrazovke v aplikácii ZOOM písať, kresliť a označovať. K dispozícii je aj tabuľa, na ktorú môžu vyučujúci aj žiaci písať, kresliť a podobne. Počas hovoru je možné aj posielať správy, pričom sa dá zvoliť, či správu pošleme všetkým, alebo konkrétnemu žiakovi. Žiaci si počas hodiny môžu tiež pýtať slovo funkciou „zdvihnúť ruku“, čo obmedzí skákanie do reči.

Učiteľ, ktorý hovor vytvoril, môže dokonca upravovať mená žiakov, ak by žiaci pri pripojení použili prezývky, alebo niečo nevhodné, taktiež môže zapínať a vypínať mikrofón, alebo vypnúť kameru jednotlivým žiakom. Učiteľ môže nastavovať aj chat a to tak, že ho môže buď úplne zakázať, dovoliť chat iba s učiteľom, dovoliť chat iba verejný, alebo dovoliť chat verejný aj súkromný, kde si môžu písať aj žiaci medzi sebou bez toho, aby to učiteľ videl.

Nevýhodami tejto aplikácie sú hlavne časové obmedzenia stretnutí v bezplatnej verzii, isté bezpečnostné riziká, ako možnosť pripojiť sa na schôdzu aj nepozvaným hosťom, alebo prístup chatu rôznym osobám a pod., ktoré sa ale ZOOM postupne snaží eliminovať. Istou nevýhodou je aj neexistencia slovenskej verzie.

3.2 Microsoft Teams

Kým vyššie spomínaný ZOOM je vytvorený len pre videohovory s možnosťou chatu a zdieľania súborov v rámci hovoru, Microsoft Teams je komplexnejšia aplikácia, v ktorej je okrem videohovoru možné vytvárať triedy, prideľovať žiakom úlohy, vytvoriť rozvrh v kalendári a podobne, dokonca je dostupná aj v slovenčine. Na využívanie MS Teams je potrebné, aby mala škola k dispozícii balík MS Office 365.

Videohovory

Počas videohovorov, ktoré sa dajú aj nahrávať, je dostupný chat pre celú skupinu v hovore, taktiež je možné zdieľať obrazovku, kde je viacej možností. Zdieľať sa dá celá obrazovka, čo znamená, že žiaci uvidia všetko, čo na obrazovke počítača učiteľ robí, aj keď prepína medzi rôznymi oknami, ako napríklad z internetového prehliadača na prezentáciu, alebo naopak, zjednodušene, žiaci vidia to isté, čo vidí učiteľ na svojom počítači. Taktiež je možné zdieľať konkrétne okno, ktoré má učiteľ práve na svojom počítači otvorené, napríklad video v prehrávači videí, alebo súbor so zadaním úlohy. Pri zdieľaní videa so zvukom je potrebné povoliť zdieľanie zvuku z počítača, aby zvuk videa počuli aj žiaci. Tí môžu tiež zdieľať obrazovky svojich počítačov, pričom túto možnosť môže učiteľ žiakom povoliť aj zakázať. Tak môžu žiaci prezentovať napríklad svoje projekty, alebo výsledky meraní. Rovnako ako ZOOM aj MS Teams má k dispozícii nekonečnú bielu tabuľu, na ktorú ale môžu písať aj žiaci aj učiteľ súčasne. Treba ale žiakov upozorniť, že pokiaľ učiteľ alebo spolužiak posunie tabuľu, lebo už nemá na zobrazenej časti dosť miesta, žiaci si tabuľu musia presunúť sami tam, kde práve píše učiteľ alebo spolužiak.

Učiteľ, ako administrátor hovoru má možnosť zapínať a vypínať nahrávanie, taktiež vypínanie mikrofónov žiakov. Tiež môže vytvoriť skupinky, v ktorých budú žiaci pracovať. MS Teams mu dá na výber, či chce žiakov rozdeliť do skupín sám, alebo ich podľa zadaného počtu skupín systém sám náhodne rozdelí. Žiaci majú možnosť sa prepínať medzi svojou skupinkou a hlavným hovorom, pričom sa ale nemôžu dostať do iných skupiniek. Učiteľ však túto možnosť má a môže postupne prechádzať zo skupinky do skupinky a počúvať, alebo pozorovať prácu žiakov. Žiaci sa počas hodín môžu hlásiť o slovo funkciou „zdvihnutie ruky“.

Medzi nevýhody videohovorov v MS Teams patrí, podľa našich skúseností, nie dobré fungovanie zdieľania jedného okna, je lepšie zdieľať celú obrazovku, taktiež je nevýhodou to, že sa v nahrávke hovoru neukladá zdieľaná tabuľa, ktorá sa ukladá samostatne do špeciálneho priečinku v office, s názvom Whiteboard. Tabuľa sa uloží v rovnakom formáte, v akom je prístupná počas hovoru, čo okrem iného znamená, že ak nejakú časť poznámok z tabule učiteľ vymaže, na uloženej tabuli tieto poznámky žiaci nenájdu. Pokiaľ sa vyučovacej hodiny zúčastňuje viac učiteľov, pri rozdelení žiakov do skupín sa medzi skupinami môže pohybovať len jeden z učiteľov.

Prideľovanie úloh

Učiteľ má možnosť prideľovať žiakom úlohy tak, že pošle všetkým žiakom rovnaké zadanie, alebo sa rozhodne, ktoré zadanie zašle ktorým žiakom, ak má zadania rôzne. Žiaci vidia priradené, nevypracované úlohy buď všetky naraz, alebo v jednotlivých skupinách predmetov. Vypracovanú úlohu zasielajú priamo pod zadaním úlohy, čo zjednodušuje prácu žiakom aj učiteľom. Tí si riešenia žiakov nemusia sťahovať do počítača, ale môžu si ich pozrieť aj priamo v aplikácii Teams, kde môžu k danej úlohe aj prideliť body, alebo napísať spätnú väzbu.

Zdieľanie súborov

Učitelia môžu žiakom zasielať súbory s poznámkami, úlohami a inými materiálmi v rôznych formátoch. Žiaci môžu tiež zdieľať svoje projekty so spolužiakmi. V každej triede je k dispozícii záložka súbory, do ktorej sa ukladajú všetky súbory, ktoré boli poslané v chate počas hovoru, ale súbory sa tam dajú aj priamo nahrať. Učiteľ, alebo žiaci si môžu vytvoriť priečinky so svojimi menami, alebo s názvami tém, do ktorých budú nahrávať súbory jednotliví žiaci alebo učiteľ.

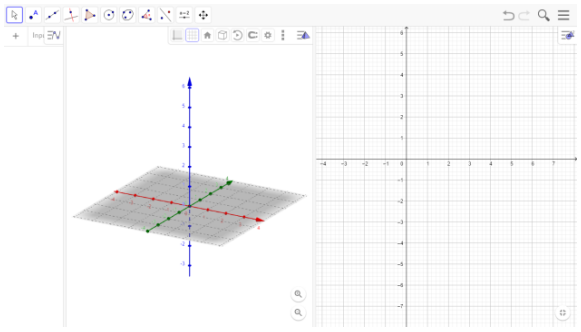
4 Aplikácie a weby

V dotazníku sme sa pýtali, aké aplikácie, weby, applety učitelia na dištančných hodinách využívali. Vybrali sme niektoré z nich a tie predstavíme a priblížime, ako sa s nimi pracuje, prípadne ako sa dajú využiť na hodinách.

4.1 GeoGebra

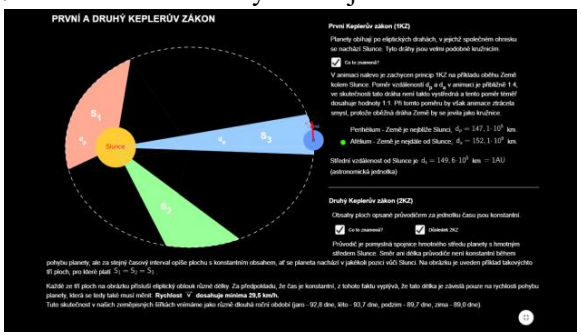
GeoGebra je voľne dostupná skupina aplikácií, v ktorej nájdeme grafickú kalkulačku, 3D grafy, geometriu a CAS kalkulačku. Taktiež tu nájdeme aj aplikáciu, v ktorej sú dostupné funkcie zo všetkých ostatných aplikácií a to GeoGebra Klasik (obr. 1). Aplikáciu si môžeme stiahnuť a pracovať v nej aj mimo internetového pripojenia, alebo môžeme použiť online verziu aplikácie.

Na stránke www.geogebra.org [International GeoGebra Institute, 2013], kde nájdeme online verziu aj aplikácie na stiahnutie, vieme vytvoriť triedu, v ktorej môžeme žiakom a študentom pridávať úlohy, animácie, ale aj testy. Na testy je vytvorený špeciálny mód „Exam mode“, ktorý zabezpečí, aby žiaci a študenti neotvárali počas testu iné aplikácie, alebo web stránky, keďže to aplikácia zaznamená a po skončení testu to učiteľ zistí. Oficiálna stránka aplikácie je dostupná v českom jazyku, avšak nevýhodou je, že návody na obsluhu aplikácie už preložené nie sú, teda sú k dispozícii len v anglickom jazyku.



Obr. 1: Prostredie GeoGebra Klasik 6

Na stránke je aj niekoľko už vopred pripravených aktivít v rôznych jazykoch, ktoré sa väčšinou týkajú rôznych odvetví matematiky, ale nájdeme tam napríklad aj animácie pohybu cyklistu a chodca, alebo animáciu pohybu planét, kde sú zobrazené Keplerove zákony (obr. 2), pozícia Zeme voči Slnku v rôznych častiach roka, zdanlivý pohyb Slnka po oblohe a podobne, ktoré sú dokonca v češtine. Môžeme si vytvoriť aj vlastnú aktivitu.



Obr. 2: Simulácia v prostredí GeoGebra

4.2 Videá dostupné na internete

S príchodom dištančnej výučby sa na internete, ale aj vo vysielaní televízií začali objavovať rôzne videá a relácie, podporujúce dištančné vyučovanie. Česká televízia zverejnila videá na stránke edu.ceskatelevize.cz [Česká televize, 2019]. Na tejto stránke sa nachádza 559 voľne dostupných videí z 23 rôznych tém fyziky. Videá sú väčšinou pomerne krátke (do 10 min), aj keď nájdeme aj videá s dĺžkou približne 20 min, preto sú vhodné na

využitie na hodinách. Videá obsahujú pokusy, ale aj vysvetlenia, ktoré po skončení videa môžeme so žiakmi prediskutovať. Nevýhodou tohto zdroja videí je to, že niektoré videá nie sú v našej krajine dostupné.

Ďalšie zaujímavé videá nájdeme aj na YouTube kanáli Slovenskej akadémie vied (SAV) [SAV, 2020]. Videá sú tvorené skôr ako zaujímavosti z fyziky, než ako výukové videá, preto sú vhodné viac pre žiakov, ktorých fyzika zaujíma a chceli by sa dozvedieť niečo nové.

Nie len videá, ale aj jednoduché úlohy k nim nájdeme na stránke www.fenomenysveta.sk [AGEMSOFT, 2021]. Tu je potrebné zaregistrovať sa, aby sme sa dostali k videám a materiálom na stránke. Niekoľko videí je sprístupnených bezplatne, ale pokiaľ chceme mať k dispozícii celú videoknižnicu, musíme požiadať školu o zakúpenie prístupu, alebo si ho môžeme zakúpiť ako balíček pre rodinu. Voľne prístupné videá, ktoré sú prístupné po zaregistrovaní a prihlásení, nám pomôžu rozhodnúť sa, či je táto videoknižnica niečo, čo dokážeme na hodinách využiť.

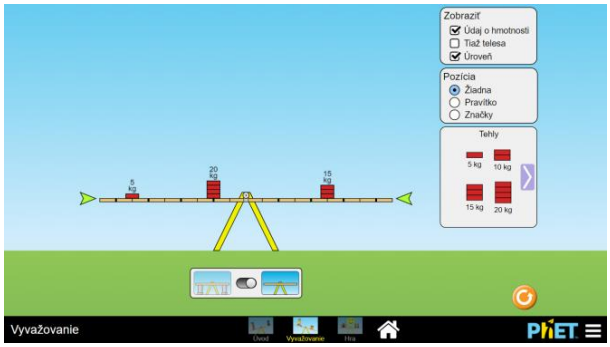
Na YouTube [Beňuška, 2020], alebo na stránke vynimocneskoly.sk [Nadácia ZSE, 2021] sú dostupné krátke videá od Jozefa Beňušku, v ktorých nájdeme námety na jednoduché experimenty pre žiakov v domácom prostredí, námety na demonštračné experimenty, alebo videá, z ktorých žiaci vedia získať údaje fyzikálnych veličín. V týchto videách sa nenachádza postup ďalšieho výpočtu hľadaných vzťahov a veličín, žiaci z videí iba odčítajú hodnoty, ktoré vidia napríklad na displeji digitálnych váh, alebo výšku hladiny v odmernom valci. Z toho ďalej počítajú, podobne, ako keby experiment realizovali v škole. Rozdiel je len v tom, že si žiaci dané pomôcky nechytia do ruky. Rovnako ako v škole však musia vedieť zapísať si správnu hodnotu z konkrétneho meradla. Na stránke vynimocneskoly.sk sú videá doplnené aj o pracovné listy pre žiakov.

Ministerstvo školstva, vedy, výskumu a športu taktiež vytvorilo niekoľko vzdelávacích videí, ktoré sú dostupné na stránke viki.iedu.sk [MŠVVaŠ, 2021]. Všetky videá, ktoré sú rozdelené podľa ročníkov, sú určené pre žiakov základných škôl. Vo videách pre siedmy ročník sa nachádzajú témy ako var, tvorba meteorologickej stanice, pojem teplo a výmena tepla. Pre ôsmy ročník sú spracované témy šošovky, sila, ťažisko a tlak v kvapalinách, pričom pre deviaty ročník je dostupné momentálne iba jedno video o sériovom zapájaní spotrebičov do elektrického obvodu.

Tieto videá ale obsahujú chyby a preto ich neodporúčame využívať na dištančné vzdelávanie. Žiakov by mohli viesť k nesprávnemu pochopeniu a chybnému používaniu fyzikálnych zákonov a pojmov, ktoré sú v týchto videách mnohokrát používané nesprávne. Ako napríklad vo videu pre ôsmy ročník s názvom *Telesá na seba pôsobia silou. Účinky sily (pohybové, deformačné)*, kde vyučujúca povie, že „krabici udelí silu“, alebo vo videu pre siedmy ročník s názvom *Var. Tlak vzduchu a var.* vyučujúca používa pre dve rôzne veličiny, teplota a čas, v tabuľke rovnaké označenie „t“. Počas zapisovania nameraných teplôt do tabuľky, niekedy nameranú teplotu zaokrúhli, inokedy ju zapíše presne takú, akú namerala, čiže ako desatinné číslo. Ďalšia vec, ktorá vo videu môže pôsobiť mätúco, je spôsob zápisu do tabuľky, kde vyučujúca nezaznamenáva čas, v ktorom meranie vykonala, ale zapisuje časový interval medzi dvoma meraniami. Je zvykom, že ak meranie robíme 2 minúty a zaznamenávame hodnoty po každých 30 sekundách, tak do tabuľky postupne píšeme hodnoty času napríklad v minútach 0,0; 0,5; 1,0; 1,5 a 2,0, pričom vo videu vidíme v tabuľke hodnoty 0; 0,5; 0,25; 0,25 a 0,25. Ďalšia zvláštna informácia je teplota varu, ktorú v tomto experimente namerala vyučujúca 103 °C, čo môže byť spôsobené spôsobom merania teploty, nakoľko bol využitý bezkontaktný teplomer, ktorý mohol odmerať teplotu vyhrievaného dna kanvice a nie teplotu vody. Toto je len pár príkladov chýb v týchto videách, pričom žiaci, pre ktorých sú tieto videá určené nemajú vedomosti na to, aby chyby vo videách spozorovali a sami sa im vyvarovali.

4.3 Simulácie

Projekt PhET [University of Colorado, 2014a] je internetová stránka, na ktorej nájdeme simulácie z rôznych oblastí fyziky. Na ilustráciu uvádzame príklad aktivity *Vyvažovanie* (obr. 3). Vďaka týmto simuláciám môžu žiaci objavovať fyzikálne zákonitosti vlastným bádaním. „Simulácie sú navrhnuté a testované tak, aby nútili študentov k objavovaniu a uvažovaniu. Napísaný návod môže potlačiť aktívne myslenie, čo následne vedie k zameraniu sa na pokyny v návode a na správne odpovede na otázky.“ [University of Colorado, 2014b] Preto je vhodné pri využívaní týchto simulácií nechať žiakov objavovať súvislosti skúšaním simulácií. Pri hľadaní vhodnej simulácie môžeme využiť prehľadávanie aktivít podľa zadaných parametrov, konkrétne: simulácie – výber simulácie podľa témy aktivity; typy – typ aktivity ktorú hľadáme (DÚ, laboratórium, atď.); predmety – vyučovací predmet, ktorého sa má aktivita týkať; úroveň – stupeň školy, pre ktorý by mala byť hľadaná simulácia vhodná (SŠ, ZŠ, VŠ, atď.); jazyky a ľubovoľný hľadaný text – kľúčové slová, ktoré môže aktivita obsahovať. Vďaka tomuto nástroju jednoducho nájdeme simuláciu, ktorá bude vhodná na konkrétnu vyučovaciu hodinu. Fyzikálnych simulácií v slovenskom jazyku na tejto stránke nájdeme 106.



Obr. 3: Simulácia hojdačky

5 Aktivita

V rámci prieskumu a následne v teoretickej časti sme sa zorientovali v možnostiach, ktoré majú učitelia pri dištančnom vyučovaní. Ukázalo sa, že problémom na vyučovaní fyziky je realizácia experimentov. Tento problém sa učitelia snažili riešiť zaradením pokusov, ku ktorým žiak nájde pomôcky v domácnosti. Nie všetky pokusy sa dajú realizovať takýmto spôsobom, čo neumožňuje žiakom samostatne objavovať. Ako jedno z možných riešení sa javí simulácia PhET.

Model hojdačky je jedným z príkladov pokusu, ktorý žiaci v domácich podmienkach len ťažko presnejšie napodobnia. Môžu si zostaviť jednoduchý model, napríklad z pravítka a valčeka, ale práca s takýmto modelom nemusí žiakom ukazovať dostatočne presné výsledky, ktoré by ich doviedli k objaveniu vzťahu medzi hmotnosťou závažia, ktoré na ramená ukladajú a vzdialenosťou umiestnenia závažia od osi otáčania. Preto sme sa rozhodli vytvoriť aktivitu, v ktorej žiaci využijú dostatočne presný model, simuláciu *Vyvažovanie* [Perkins, Paul et al., 2014], ktorá sa skladá z častí úvod, vyvažovanie a hra.

5.1 Vyvažovanie úvod

V ôsmom ročníku základnej školy sa žiaci stretávajú s pojmom rovnováha na páke. Predpokladáme, že žiaci majú skúsenosti s hojdaním sa na preklápacej hojdačke, ktorá je dobrým príkladom dvojzvratnej páky. Cieľom aktivity bude, aby si žiaci osvojili pojmy páka a rovnováha na páke a vlastným bádaním objavili princíp momentovej vety.

Pred začiatkom aktivity diskutujeme o ich skúsenostiach a pozorovaniach. Zisťujeme, v akých prípadoch sa im hojdalo dobre a v akých zle, koho si budú hľadať do dvojice, aby sa im hojdalo čo najľahšie, alebo či skúšali dosiahnuť to, že sa nedotýkali zeme nohami a hojdačka ostala rovnobežne so zemou. Spoločnou diskusiou dôjdeme k záveru, že najlepšie sa žiakom hojdalo vtedy, keď na druhej strane hojdačky sedel žiak, ktorý mal podobnú hmotnosť ako oni. V tejto fáze môžeme spustiť úvodnú časť simulácie, ktorá je dostupná na stránke https://phet.colorado.edu/sims/html/balancing-act/latest/balancing-act_sk.html a využitím funkcie úroveň, ukázať žiakom, čo znamená, že je páka v rovnováhe. Pomocou závaží v podobe hasiacich prístrojov a odstránením podpier demonštrujeme rovnováhu, o akú sa mohli snažiť aj žiaci na hojdačke. Odstránime z hojdačky hasiace prístroje a aktivujeme podpery. Na jednu stranu, približne do stredu ramena páky, umiestnime iné závažie v podobe odpadkového koša a žiakov sa opýtame, či si myslia, že dokážeme dosiahnuť rovnakú rovnováhu ako predtým, s dvoma rovnakými hasiacimi prístrojmi, aj keď na jednej strane hojdačky bude odpadkový kôš s hmotnosťou 10kg a na druhej strane hasiaci prístroj s hmotnosťou len 5kg. Riešenie tejto otázky necháme na žiakov a spolu s touto otázkou zadáme žiakom aj ďalšie úlohy.

5.2 Úloha pre žiakov

Úlohou žiakov bude využitím simulácie zistiť vzťah medzi vzdialenosťou od osi otáčania a hmotnosťou telesa. Každý žiak sformuluje svoju hypotézu pri pokusoch v úvodnej časti simulácie, kde sú k dispozícii iba 3 telesá. Svoju hypotézu potom overuje v časti vyvažovanie, kde už je k dispozícii oveľa viac telies s rôznymi hmotnosťami.

Využitím záverov, ku ktorým žiaci dospeli pri overovaní svojej hypotézy, zistia hmotnosti neznámych objektov, v časti simulácie nazvanej vyvažovanie. Nakoniec si svoje zručnosti overia v časti hra, kde v prvých troch úrovniach sú v zadaní vždy len dve telesá, pričom úroveň 4 je už pokročilejšia a v úlohách sa nachádzajú aj tri telesá. Svoje výsledky v hre môžu odfotiť a poslať učiteľovi. V tomto prípade môžu žiaci hrať hru dovtedy, kým nebudú so svojím výsledkom spokojní a až vtedy poslať výsledok učiteľovi. Našim zámerom nie je testovať žiakov, ale docieliť, aby rozumeli učivu a dokázali aplikovať momentovú vetu. Žiaci, ktorí pošlú hru so zlým hodnotením, buď úlohu neurobili poctivo, alebo zvolili zlú hypotézu, ktorú nedostatočne overili. To, o ktorú z týchto možností pri konkrétnom žiakovi ide, vie učiteľ zistiť z výstupu, ktorý daný žiak odovzdá, poprípade z ďalšej diskusie na hodine. Pointou celého zadania je, nedať žiakom konkrétny návod na prácu so simuláciou, len otázky a úlohy, ktoré ich motivujú k bádaniu. Tým naplno využijeme potenciál simulácie PhET.

5.3 Zadanie úlohy

Postup riešenia úlohy si zapisuj a výsledky svojej práce odovzdaj. Otvor si stránku https://phet.colorado.edu/sims/html/balancing-

act/latest/balancing-act_sk.html a prejdi do časti úvod.

1. Zisti odpoveď na otázku z hodiny: Dokážeme vyvážiť hojdačku aj s využitím odpadkového koša s hmotnosťou 10kg a hasiaceho prístroja s hmotnosťou 5kg?
2. Skús nájsť iné umiestnenia objektov tak, aby bola hojdačka v rovnováhe. Vyslov hypotézu, kedy sa tak deje.

V spodnej časti obrazovky klikni na časť vyvažovanie.

3. Svoju hypotézu over v časti „vyvažovanie" s využitím viacerých rôznych objektov.
4. Vyber si aspoň 4 z 8 neznámych objektov (darčeky s označením A, B, C, D, E, F, G a H) a využitím výsledkov z časti 3 zisti ich hmotnosť.

V spodnej časti obrazovky klikni na časť hra.

5. Prejdi všetkými 4 úrovňami hry a svoj výsledok zdokumentuj snímkou obrazovky, ktorú pošli spolu s riešením ostatných úloh. Hru môžeš hrať dovtedy, kým nebudeš so svojím výsledkom spokojná/spokojný a až ten výsledok zdokumentuj a pošli.

Záver

Pandémia a následné dištančné vyučovanie zaskočilo všetkých učiteľov nepripravených. Výsledky z dotazníka nám pomohli vytvoriť tento článok, aby sa učitelia vedeli ľahšie zorientovať v možnostiach online výučby. Vytvorili sme aj návrh aktivity, ktorú je možné využiť pri dištančnom vzdelávaní. V budúcnosti by sme chceli doplniť viacej aktivít, vhodných na online vyučovanie.

Poďakovanie

Ďakujem doc. PaedDr. Kláre Velmovskej, PhD. za trpezlivosť, ochotu, pomoc a obetovaný čas pri tvorbe príspevku na ŠVK.

Literatúra

[AGEMSOFT, 2021] AGEMSOFT, 2021. *Fenomény sveta*. [online]. 2021. [cit. 22-3-2021]. Dostupné na: https://www.fenomenysveta.sk/

[Beňuška, 2020] BEŇUŠKA, J. 2020. *Jozef Beňuška*. [online]. 2020. [cit. 23-3-2021]. Dostupné na: https://www.youtube.com/c/JozefBe%C5%88u%C5%A1ka/featured

[Česká televize, 2019] ČESKÁ TELEVIZE, 2019. *ČT edu*. [online]. 2019. [cit. 15-3-2021]. Dostupné na: https://edu.ceskatelevize.cz/

[International GeoGebra Institute, 2013] INTERNATIONAL GEOGEBRA INSTITUTE, 2013. *GeoGebra matematické aplikace*. [online]. 2013. [cit. 16-3-2021]. Dostupné na: https://www.geogebra.org/

[IT Akadémia, 2020] IT AKADÉMIA. 2020. *Učíme online. Digitálne nástroje pre podporu online vzdelávania*. [online]. 2020. [cit. 16-3-2021]. Dostupné na: http://itakademia.sk/wp-content/uploads/2020/08/Digitalne_nastroje_pre_podporu_online_vzdelavania.pdf.

[MŠVVaŠ, 2021] MŠVVaŠ, 2021. *Centrálne úložisko digitálneho edukačného obsahu*. [online]. 2021. [cit. 22-3-2021]. Dostupné na: viki.iedu.sk.

[Nadácia Dionýza Ilkoviča, 2020] NADÁCIA DIONÝZA ILKOVIČA. 2020. *Učitelia online výuku zvládli, no museli si pomôcť, ako vedeli – vychádza z prieskumu počas pandémie COVID 19*. [online]. 2020. [cit. 22-3-2021]. Dostupné na: https://www.nadaciadi.sk/lepsie-skolstvo/ucitelia-online-vyuku-zvladli-no-museli-si-pomoct-ako-vedeli-vychadza-z-prieskumu-pocas-pandemie-covid-19/.

[Nadácia ZSE, 2021] ZSE. 2021. *Výnimočné školy a výnimočný učitelia.* [online]. 2021. [cit. 23-3-2021]. Dostupné na: https://vynimocneskoly.sk/?vyraz&predmet=31&rocnik=38#search_form.

[Pasiar, 2019] PASIAR, L. 2019. Využitie IKT pri riešení problémov vo vyučovaní. In: *Schola nova, quo vadis?*. [online]. 2019. s. 104. [cit. 23-3-2021]. Dostupné na: http://www.extrasystem.com/9788087570449.pdf#page=104.

[Perkins, Paul et al., 2014] PERKINS K., PAUL A. et al. 2014. *Vyvažovanie*. [online]. 2014. [cit. 29-3-2021]. Dostupné na: https://phet.colorado.edu/sims/html/balancing-act/latest/balancing-act_sk.html

[SAV, 2020] SAV, 2020. *SAV vzdeláva žiakov – FYZIKA*. [online]. 2020. [cit. 23-3-2021]. Dostupné na: https://www.youtube.com/playlist?list=PLnoxuocIGZfQdqK_MaeQOAqz_RiiptkFV

[S-EPI, 2021] S-EPI. 2021. *Zákon o výchove a vzdelávaní (školský zákon) a o zmene a doplnení niektorých zákonov*. [online]. 2021. [cit. 16-3-2021]. Dostupné na: https://www.zakonypreludi.sk/zz/2008-245#p54-10.

[Tetřevová Maťašovská, 2002] TETŘEVOVÁ MAŤAŠOVSKÁ, M. 2002. *Vzdelávanie v digitálnom svete: Vybrané "e – pojmy" a ich charakteristika.* [online]. 2002. [cit. 30-3-2021]. Dostupné na: https://itlib.cvtisr.sk/clanky/clanek2173/.

[University of Colorado, 2014a] UNIVERSITY OF COLORADO. 2014. *Interactive Simulations for Science and Math.* [online]. 2014. [cit. 8-3-

2021]. Dostupné na: https://phet.colorado.edu/cs/

[University of Colorado, 2014b] UNIVERSITY OF COLORADO. 2014. *Vytvorenie aktivít pre PhET interaktívne simulácie*. [online]. 2014. [cit. 8-3-2021]. Dostupné na: https://phet.colorado.edu/sk/teaching-resources/activity-guide

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 281–290
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Linda Valkovičová, Klára Velmovská

Využitie súpravy pomôcok vo vyučovaní fyziky v 9. ročníku ZŠ

Linda Valkovičová[1]*
Školiteľ: Klára Velmovská[1‡]
[1] Katedra didaktiky matematiky, fyziky a informatiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstrakt

Vo vzdelávacích štandardoch je vyučovanie fyziky koncipované tak, že sa kladie veľký dôraz na aktívnu činnosť žiakov a na tvorbu, či realizáciu experimentov, čo si vyžaduje isté materiálne zabezpečenie. Keďže v súčasnosti neexistuje centrálna dodávka pomôcok na školy, učiteľ si ich musí zabezpečovať sám, čo môže byť časovo, ale aj finančne náročné. V rámci našej práce sme sa preto rozhodli urobiť analýzu a poskytnúť všetky potrebné informácie na zabezpečenie pomôcok. Vypracovali sme návrh súpravy pomôcok pre učiteľa a skupinu žiakov potrebných na realizáciu všetkých experimentov z učebnice fyziky pre 9. ročník, zoskupili sme informácie o možnosti zabezpečenia súpravy – buď o kúpe jednotlivých pomôcok alebo o ich výrobe a vytvorili sme reálnu súpravu pomôcok. V príspevku opíšeme skúsenosti s využívaním tejto súpravy na vyučovaní fyziky v 9. ročníku.

Kľúčové slová: súprava pomôcok, vyučovanie fyziky

Úvod

Vyučovanie fyziky je v súčasnej dobe orientované na aktívne zúčastnenie žiaka, dbá sa dôraz na vlastné konštruovanie poznatkov, rozvíjanie zručností [ŠPÚ, 2015]. V rámci vyučovania fyziky by učiteľ žiakom nemal predkladať len hotové poznatky. Jeho úlohou je zabezpečiť žiakom podmienky na aktívne osvojovanie vedomostí. Teda také, kde by žiaci mohli manipulovať s predmetmi, pozorovať javy, merať, experimentovať a vzájomne diskutovať, riešiť otvorené úlohy, praktické a teoretické problémy. Pri budovaní fyzikálnych poznatkov je dôraz kladený na vlastnú žiacku skúsenosť s fyzikálnymi javmi a objektmi prostredníctvom žiackych pokusov, reálnych demonštrácií, priamych meraní a ich spracovaní [Velmovská et al., 2021, s. 76]. Z toho dôvodu je materiálne zabezpečenie nevyhnutnou súčasťou fyzikálneho vzdelávania. Vzhľadom k tomu, že v súčasnej dobe neexistuje centrálna dodávka pomôcok a na trhu učebných pomôcok sa vyskytujú súpravy, ktoré nie sú kompatibilné s aktuálne platným štátnym vzdelávacím programom, v rámci našej bakalárskej práce [Valkovičová, 2020] sme vytvorili súpravu pomôcok pre vyučovanie vybranej časti fyziky, konkrétne pre 9. ročník ZŠ. Pri výrobe súpravy pomôcok sme kládli dôraz aj na cenovú dostupnosť. Našou prácou chceme uľahčiť prácu začínajúcim učiteľom a školám, ktoré nemajú dostatočné zabezpečenie a zároveň chceme, aby každý žiak mal možnosť experimentovať.

V rámci príspevku predstavíme súpravu pomôcok, opíšeme proces jej výroby a skúsenosti spojené s využitím súpravy na vyučovaní fyziky v 9. ročníku.

2 Opis súpravy pomôcok

Po dôkladnej analýze učebnice fyziky pre 9. ročník a po zvážení praktického využitia a uskladnenia pomôcok, sme sa rozhodli nami vytvorenú súpravu pomôcok rozdeliť na tri časti: na základnú súpravu pomôcok, na rozšírenú súpravu pomôcok a na externé pomôcky. V uvedených súpravách sa nachádzajú takmer všetky pomôcky potrebné na prevedenie pokusov a úloh.

V učebnici fyziky pre 9. ročník sa stretáme s pomôckami, ktoré si majú žiaci v rámci domácej prípravy na vyučovanie [Lapitková et al., 2012, s. 21, 25, 47, 88] vyrobiť alebo zaobstarať sami. Sú to pomôcky: vyrobený elektroskop, plechovka s pripevnenými prúžkami z alobalu, stará 4,5 V plochá batéria, ovocie a zelenina (jablko, citrón a zemiak) a medené a hliníkové mince. Myslíme si, že takéto aktívne zapojenie žiakov prinesie úžitok, a preto sme im prenechali priestor na prípravu pomôcok a nezaraďovali sme ich do súpravy pomôcok. Žiaci si ich však po prinesení môžu uložiť k ostatným pomôckam, aby ich mohli, kedykoľvek to bude nutné, použiť. Pomôcky, ako papier, ceruzka, gumička, hodvábna šatka či iný kus oblečenia, ktoré si žiaci bežne počas školského dňa nosia so sebou, sme do súpravy nezaraďovali a pri niektorých sme zvolili alternatívne pomôcky. Voľba

* valkovicova18@uniba.sk
‡ velmovska@fmph.uniba.sk

alternatívnych pomôcok je bližšie definovaná v odseku 3. Jedinú pomôcku, ktorá sa v učebnici vyskytuje a my sme ju, takpovediac, odignorovali je spínač. Urobili sme tak preto, že hoci je napísaná v pomôckach, nie je použitá ani v pokusoch na ilustračných obrázkoch a vieme ju jednoducho nahradiť tým, že manuálne prerušíme elektrický obvod. Zároveň sa domnievame, že žiaci si tak hlbšie uvedomia, akú funkciu má spínač v elektrickom obvode, než keby len stlačili tlačidlo a že uzavretý obvod je nutnosťou k vedeniu elektrického prúdu.

2.1 Základná súprava pomôcok

Základná súprava (Obr. 1) obsahuje všetky pomôcky potrebné k aktívnemu zúčastneniu sa žiaka na vyučovaní, teda k prevedeniu pokusov, úloh a rieš úlohy, ktoré sú uvedené v učebnici. So základnou súpravou budú pracovať žiaci v skupinách. Optimálna veľkosť skupiny je 4 žiaci.

Zoznam pomôcok patriacich do základnej súpravy pomôcok:

- dlhé pravítko z plastu 30 cm
- vreckovky
- plochá batéria 4,5 V
- držiak na batérie
- batéria 1,5 V AA
- žiarovka 3,5 V
- žiarovka 4,5 V
- stojanček na žiarovku
- tyčový magnet
- krabička špendlíkov
- oceľová skrutka DIN 931 M 10 x 65
- ihla na šitie 6 – 7 cm (oceľová)
- kompas
- hrebeň
- balón
- guľôčka z polystyrénu
- sklenená tyč
- tenký medený drôt 30 cm
- polystyrénový izolant (tvrdený polystyrén) 16 cm x 10 cm x 5 cm
- vodič zakončený krokosvorkami
- vodič zakončený banánikom a krokosvorkou
- vodič zakončený banánikmi (BAN)
- upravený vodič z multimetra
- krokosvorka
- drôtenka na riad
- kovová špirálka z pera
- multimeter
- batéria 1,5 V AAA (do multimetra)
- súprava rezistorov (multirezistor)
- tuhy do verzatilky
- izolované držiaky
- cievka 400 závitov
- oceľová skrutka DIN 931 M 16 x 110
- izolovaný medený drôt
- oceľový klinec 100 mm
- držiaky z drevených štipcov
- destilovaná voda
- kuchynská soľ
- plastová nádoba s vrchnákom a vyznačeným meradlom
- tenký medený drôt 10 cm
- tenký medený drôt 4 cm



Obr. 1 : základná súprava pomôcok uložená v kufríku

2.2 Rozšírená súprava pomôcok

Rozšírená súprava je určená pre učiteľa a je vlastne obohatením základnej súpravy o pomôcky, ktoré využije len učiteľ na demonštračné experimenty, alebo o pomôcky, ktoré využijú aj žiaci pri experimentoch, ale z ekonomického hľadiska je výhodnejšie, ak boli zakúpené vo väčšom množstve. Učiteľ ich potom jednoduchým spôsobom rozdelí a rozdistribuuje žiakom. Niektoré pomôcky ako polystyrén alebo drôtik je tiež výhodnejšie kupovať vo väčšom množstve, ale na ich rozdelenie sú potrebné pomôcky ako kliešte alebo nôž. Preto sme ich, už rozdelené, zaradili do základnej súpravy. Do rozšírenej súpravy sme zaradili aj pomôcky, ktoré sú potrebné na prevedenie pokusov, ktoré sú v učebnici spracované len ako myšlienkové experimenty, napr. znázornenie magnetických indukčných čiar a elektrických siločiar.

Zoznam pomôcok patriacich do rozšírenej súpravy pomôcok

- alobal
- niť
- nožnice
- polyetylénové vrecká
- špajdle
- plastelína
- teplomer
- lepiaca páska
- injekčná striekačka 20 ml
- infúzna súprava (hadička a regulátor prietoku)
- kryštalická sóda na zmäkčenie vody do práčky
- tenký drôt 20 cm
- batéria 9 V
- plastová lyžička
- špongiová utierka
- nádoba s kovovými pilinami
- ricínový olej
- plastový krúžok na sprchový záves
- čajové vrecúško



Obr. 2: rozšírená súprava pomôcok uložená v kufríku

2.3 Externé pomôcky

Niektoré pomôcky ako napr. elektroskop, ktoré by bolo nepraktické uskladňovať a prenášať v našich súpravách, sme špeciálne vyčlenili a tie sa budú stabilne nachádzať v učebni (resp. v kabinete učiteľa) a v našom príspevku ich budeme označovať názvom externé pomôcky.

Zoznam externých pomôcok

- stojany
- držiak
- svorky
- elektroskop
- kanvica
- váhy
- vandlík

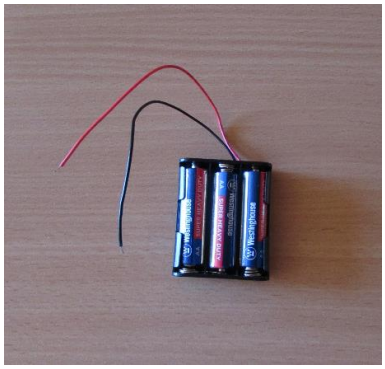
3 Alternatívne pomôcky

Po hlbšej analýze rôznych dostupných obchodov sme sa rozhodli pre alternatívu niektorých pomôcok. Nie všetky pomôcky, ktoré sa nachádzajú v učebnici fyziky pre 9. ročník je v súčasnej dobe možné kúpiť alebo požadované pomôcky sú cenovo nedostupné z pohľadu učiteľa fyziky.

V nasledujúcich odsekoch uvedieme, ktorú pomôcku sme za akú inú pomôcku nahradili aj spolu s informáciou, v ktorých pokusoch je možné ju využiť.

3.1 4,5 V plochá batéria

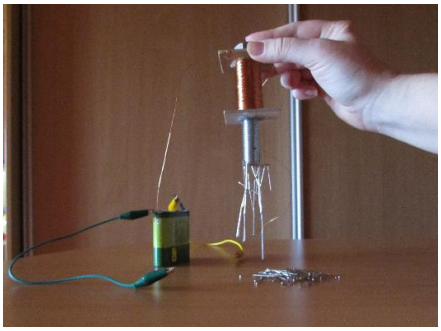
V mnohých pokusoch a úlohách v učebnici fyziky pre 9. ročník sa stretáme so 4,5 V plochou batériou. Je možné, že jedna dvojica batérií nebude postačujúca pre žiakov na celý rok a bude potrebná ich výmena. Je preto možné použiť alternatívu. Držiak na batérie a tri 1,5 V AA batérie (Obr. 3). Ich výmena je lacnejšia a v prípade zakúpenia nabíjateľných batérií aj ekologickejšia. Túto alternatívu však odporúčame urobiť až od úlohy na s. 57 [Lapitková et al., 2012], pretože v predošlej časti učebnice nechávame žiakom priestor na rozobratie starej plochej batérie a preskúmanie faktu, že plochá batéria sa skladá z troch monočlánkov. A zároveň upozorňujeme na fakt, že v držiaku sa nedá postupným prikladaním batérií vyrobiť zdroj napätia postupne 1,5 V, 3 V a 4,5 V, ale je nutné vložiť všetky batérie súčasne, a teda využívať len 4,5 V zdroj napätia.



Obr. 3: držiak na batérie – alternatívne pomôcky

3.2 Jadro z magneticky mäkkej ocele

Úlohou žiakov je okrem iného „preskúmať magnetické účinky cievky s prúdom“ [Lapitková et al., 2012, s. 77]. Je preto potrebné, aby vkladali jadro do cievky. My sme sa v našej súprave rozhodli pre vlastnoručnú tvorbu cievky, ktorá má okrúhly otvor. Na trhu sa nachádzajú jadrá len s hranatým tvarom. Preto sme ako jadro z magneticky mäkkej ocele použili oceľovú skrutku, ktorá sa zmestí do cievky (Obr. 4). V našom prípade je to konkrétne oceľová skrutka DIN 931 M16 x 110.

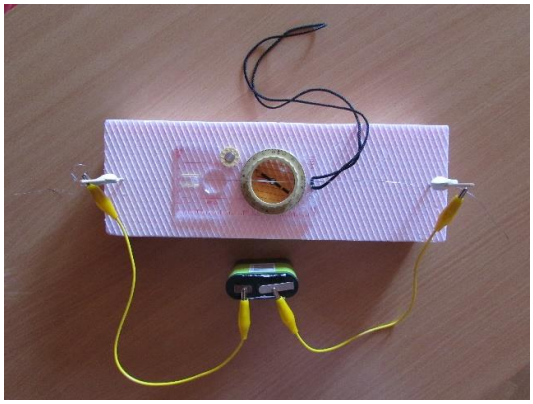


Obr. 4: elektromagnet – alternatívne pomôcky

3.3 Holcove svorky

Holcove svorky sú izolované držiaky, ktoré sa využívajú v Oerstedovom pokuse. V starších laboratóriách alebo aj v učebnici fyziky pre 9. ročník s. 74 [Lapitková et al., 2012] môžeme vidieť, ako pomôcka vyzerá, no v súčasnej dobe sme ju nenašli v žiadnom dostupnom obchode. Preto sme sa rozhodli túto pomôcku vyrobiť. Na výrobu sme použili tvrdený polystyrén s rozmermi 30 cm x 10 cm x 5 cm a dve špajdle, dlhé asi 10 cm, ktoré sme zapichli na konce polystyrénu. Výhodou tvrdeného polystyrénu je, že špajdle zostanú po zapichnutí pevne na svojom mieste a nevychyľujú sa. Na takto vyrobené izolované držiaky už môžeme pripevniť drôtik z kuchynskej drôtenky (musí byť tenký, aby sa dokázal vychýliť) tak, že ho navinieme na špajdle. Ak sa nám nepodarí drôtik pripevniť o špajdle, môžeme si pomôcť plastelínou, ktorá sa nachádza v rozšírenej súprave pomôcok. Ďalej môžeme pokračovať podľa postupu uvedeného v učebnici fyziky pre 9. ročník.

Výhodou nami vyrobených izolovaných držiakov (Obr. 5) sú nízke náklady, cena celej dosky tvrdeného polystyrénu v rozmeroch 1200 mm x 650 mm x 50 mm sa pohybuje okolo 6 € a špajdle sú súčasťou súpravy kvôli iným pokusom, a fakt, že magnet alebo kompas už nemusíme podkladať na podložku, ale môžeme ho položiť rovno pod drôtik na tvrdený polystyrén.



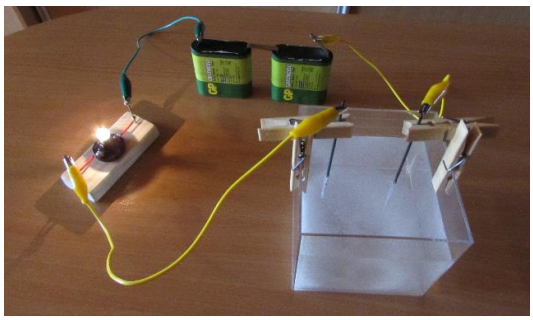
Obr. 5: Oerstedov pokus – alternatívne pomôcky

3.4 Stojany, uhlíkové tyčinky a jedna 4,5 V plochá batéria

V učebnici fyziky pre 9. ročník sa na s. 85 [Lapitková et al., 2012] nachádza pokus, v ktorom žiaci skúmajú elektrolýzu. V pomôckach uvedeného pokusu sa nachádzajú stojany, do ktorých sa uchytia uhlíkové tyčinky. Do našej súpravy sme ako stojany zaradili lacnejšiu alternatívu – držiaky z drevených štipcov a uhlíkové tyčinky sme nahradili tuhami do verzatilky, ktoré sa už využívajú v predošlých pokusoch.

Ak zostavíme obvod podľa uvedeného obrázka v učebnici fyziky pre 9. ročník na s. 85 a postupne prisypeme dostatočné množstvo soli (cca 200 g na 0,7 l vody), obvodom bude tiecť prúd veľkosti 70 mA (veľkosť prúdu je priamo úmerná množstvu soli). Žiarovka však potrebuje na rozsvietenie prúd veľkosti okolo 200 mA. Preto budeme realizovať experiment s dvomi 4,5 V plochými batériami (Obr. 6).

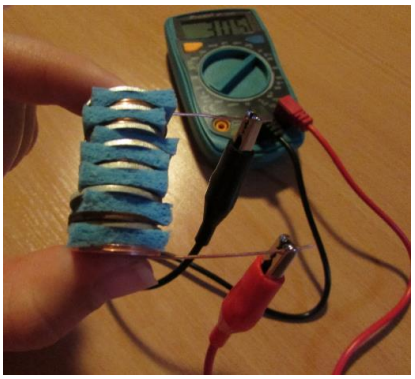
Inou možnou alternatívou by bolo zameniť žiarovku za LED diódu, pre ktorú je postačujúci menší prúd na rozsvietenie. Pri LED dióde však vznikajú problémy s tým, že sa rozsvieti pri minimálnych prúdoch, t. j. 0,01 mA a svieti skôr než do destilovanej vody prisypeme soľ. Preto takúto zmenu pomôcky neodporúčame.



Obr. 6: elektrolýza vo vode – alternatívne pomôcky

3.5 Vreckovka

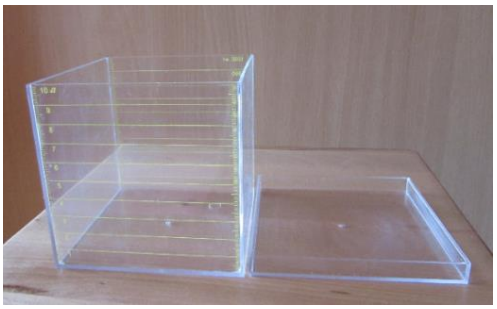
V úlohe na s. 89 a v rieš úlohy na s. 90 [Lapitková et al., 2012] majú žiaci použiť vreckovku namočenú do elektrolytu a pomocou namočenej vreckovky a medených a hliníkových mincí zostrojiť zdroj elektrického napätia. Namočená vreckovka sa však ľahko trhá a manipulácia s ňou nie je príjemná. Preto sme do súpravy pomôcok zaradili špongiovú utierku (Obr. 7), ktorá sa vyznačuje svojou savosťou a aj po namočení si zachová svoj tvar.



Obr. 7: zdroj elektrického napätia – alternatívne pomôcky

3.6 Odmerný valec, kadička a Petriho miska

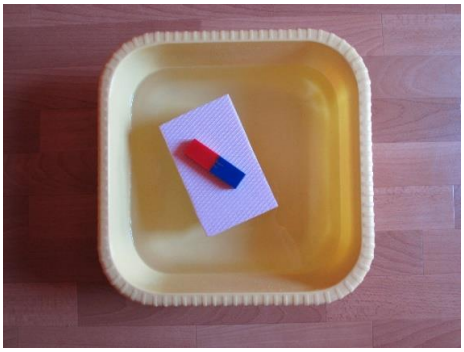
S odmerným valcom sa stretáme len v rieš úlohy na s. 79 [Lapitková et al., 2012], kde potrebujeme určiť objem vody. Môžeme však použiť aj inú nádobu, s ktorou dokážeme dostatočne presne určiť objem. Kadičku využívame v pokusoch s elektrostatikou alebo magnetizmom ako stojan a v rieš úlohy s. 87 [Lapitková et al., 2012]. Petriho misku zase na demonštračnú úlohu na dokázanie prítomnosti elektrických siločiar. Do našej súpravy sme zaradili, predovšetkým, pre šetrenie priestoru a financií, štvorcovú plastovú nádobu s vrchnákom a vyznačeným meradlom (Obr. 8). Nádobu použijeme podľa potreby ako odmerný valec alebo ako kadičku a vrchnák ako Petriho misku.



Obr. 8: plastová nádoba s vrchnákom a vyznačeným meradlom – alternatívne pomôcky

3.7 Nádoba

Ďalšou úlohou, s ktorou sa žiaci v učebnici fyziky pre 9. ročník stretajú, je overiť „princíp a podmienky určovania severo-južného smeru na zemskom povrchu“ [Lapitková et al., 2012, s. 14]. Žiaci majú vykonať pokus tak, aby sa nejaký predmet, ktorý sa voľne otáča okolo svojej osi, natočil v smere pôsobenia magnetického poľa Zeme. Voľné otáčanie tyčového magnetu môžeme docieliť napr. tak, že do veľkej nádoby – vandlíka, ktorý sa nachádza v externých pomôckach, nalejeme vodu a na voľnú hladinu vody položíme polystyrénový izolant. Na takto pripravený polystyrénový izolant môžeme položiť magnet a sledovať jeho otáčanie spôsobené magnetickým poľom Zeme (Obr. 9).

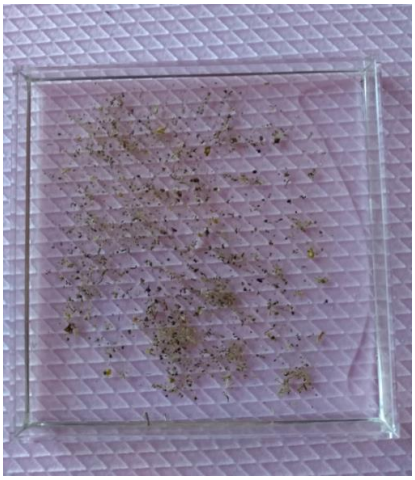


Obr. 9: určovanie severo-južného smeru na zemskom povrchu – alternatívne pomôcky

3.8 Hrubá krupica a kovový pliešok

V učebnici fyziky pre 9. ročník sa na s. 26 [Lapitková et al., 2012] stretáme s opisom pokusu na znázornenie elektrických siločiar. Pokus je v učebnici znázornený obrázkovo, ale podľa uvedeného postupu je možné ho realizovať. Na zelektrizovanie kovového pliešku je však nutný vysokonapäťový zdroj s napätím niekoľko kV, napr. Van de Graffov generátor, ktorého cenové zabezpečenie môže byť pre mnohé školy náročné.

Ak by sme však kovový pliešok zamenili za plastový krúžok na sprchový záves, je oveľa jednoduchšie ho zelektrizovať. Plastový krúžok zelektrizujeme trením o vlasy a položíme ho na polystyrénový izolant. Do vrchnáku (zo štvorcovej plastovej nádoby, ktorá sa nachádza v základnej súprave pomôcok) rovnomerne nalejeme ricínový olej, asi 15 ml, a posypeme jemnou vrstvou čajových pomrvených lístkov z neprevareného čajového vrecúška (Obr. 10). Vrchnák položíme na plastový krúžok a pozorujeme znázornené elektrické siločiary (Obr. 11).



Obr. 10: ricínový olej posypaný čajom z vrecúška – alternatívne pomôcky



Obr. 11: znázornenie elektrických siločiar – alternatívne pomôcky

4 Výroba vybraných pomôcok

Pri výbere pomôcok vhodných na prevedenie pokusov a úloh z učebnice fyziky pre 9. ročník majú učitelia na výber z dvoch možností. Prvou z nich je zakúpiť pomôcky, ktoré sú primárne označované ako školské potreby a slúžia žiakom i učiteľom na prevedenie pokusov. Pre naše potreby ich budeme označovať názvom učebné pomôcky dostupné na trhu. Druhou možnosťou je, že učiteľ sa rozhodne vytvoriť si vybrané pomôcky vlastnoručne.

Za hlavné výhody učebných pomôcok dostupných na trhu považujeme ich nenáročné zaobstaranie a to, že sa nachádzajú na obrázkoch a ilustráciách v učebnici. Vyrobené pomôcky však majú tiež svoje výhody. Ak by do výroby boli zapojení aj žiaci, učiteľ by tak mohol prehĺbiť záujem žiakov o fyziku a rozvíjať ich zručnosti. Výroba pomôcok nie je náročná a v rámci našej bakalárskej práce [Valkovičová, 2020] sme predložili jeden z možných postupov výroby vybraných pomôcok. Pomôcky sú vyrábané zo súčiastok slúžiacich prevažne v inžinierskom a strojárskom priemysle.

Hlavné kritérium, ktoré odlišuje učebné pomôcky dostupné na trhu od vyrobených pomôcok, je cenová dostupnosť. Ak by sme napr. porovnali učebnú pomôcku dostupnú na trhu skladajúcu sa zo štyroch rezistorov, na kúpu potrebujeme 46,67 € [Škola.sk, s. r. o.], no na vyrobenie tejto pomôcky by nám postačilo 0,72 €.

V rámci našej súpravy pomôcok sme sa rozhodli pre výrobu vybraných pomôcok, a to konkrétne stojanček na žiarovku, úpravu vodiča z multimetra resp. iného vodiča tak, aby bol z jednej strany zakončený krokosvorkou, výrobu súpravy rezistorov (multirezistora), cievky a držiakov potrebných k prevedeniu pokusu elektrolýzy vo vode.

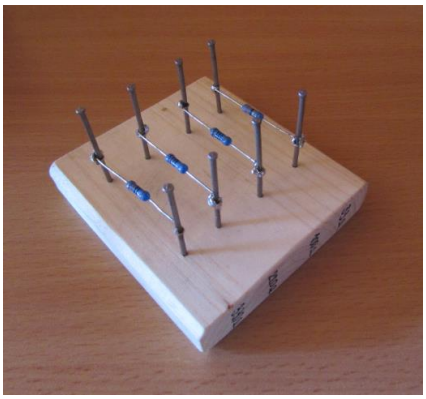
V nasledujúcom odseku uvedieme návod na výrobu už spomínanej pomôcky – súpravu rezistorov (multirezistor). Všetky návody sú dostupné v našej bakalárskej práci [Valkovičová, 2020, s. 33 – 39].

Návod na výrobu pomôcky „súprava rezistorov (multirezistor)“

Pomôcky: drevená doštička (90 mm x 82 mm x 18 mm), metalizované rezistory do 1 W s odpormi 33 Ω, 100 Ω, 220 Ω a 330 Ω, osem oceľových klincov (40 mm), kladivo, spájkovačka a čierna fixka.

Postup:

1. Na drevenú doštičku pribijeme postupne všetky klince v dvoch radoch.
2. Na klince pripevníme rezistory obmotaním drôtika okolo klinca v poradí od najmenšej hodnoty odporu po najväčšiu.
3. Obmotané drôtiky pricínujeme spájkovačkou.
4. Zboku, na jednu stranu doštičky, napíšeme odpory rezistorov pre jednoduchšiu manipuláciu a orientáciu.



Obr. 12: súprava rezistorov (multirezistor)

5 Cenové náklady na zabezpečenie súpravy pomôcok

Pre lepšiu predstavu a kvôli lepšej orientácii na trhu pomôcok uvádzame výšku finančných nákladov potrebných na nami zostrojenú súpravu pomôcok. Výpočet nákladov je približný a mal by pokryť náklady na zabezpečenie súpravy pre jednu štandardnú triedu, t. j. 16 žiakov a jeden učiteľ. Budeme preto počítať s piatimi základnými súpravami (štyri súpravy pomôcok pre štyri štvorčlenné skupiny žiakov a jedna pre učiteľa), jednou rozšírenou súpravou a externými pomôckami, ktorých počet sme prispôsobili množstvu základných súprav.

Na jednu základnú súpravu je potrebná suma 78,46 €, na rozšírenú súpravu 20,97 € a na externé pomôcky 307,94 €. Suma za externé pomôcky sa môže zdať na prvý pohľad vysoká, ale je to kvôli tomu, že je tam zarátaných 5 stojanov s držiakmi a svorkami. Tieto pomôcky sa využívajú aj v nižších ročníkoch na hodinách fyziky. Je preto možné, že pomôcka sa na škole nachádza a nie je nutné ju zabezpečovať. Po zrátaní a vynásobení uvedených súm sme dospeli k finálnej sume potrebnej na zabezpečenie súpravy pomôcok pre celý ročník a to 721,21 €. V uvedenej sume nie sú zarátané kufríky, v ktorých uskladňujeme a prepravujeme základnú a rozšírenú súpravu pomôcok. Po prerátaní je to 814,15 €.

6 Skúsenosti s využitím súpravy pomôcok vo vyučovaní fyziky

Z pohľadu začínajúceho učiteľa je príprava na vyučovanie časovo náročná. Vyžaduje si starostlivú voľbu vyučovacích stratégií a metód, ale vo vyučovaní fyziky aj prípravu pomôcok potrebných na žiacke experimentovanie. Za čiastočné odbremenenie povinností učiteľa považujeme využívanie navrhnutej súpravy pomôcok – t. j. kufríky so základnou a rozšírenou súpravou pomôcok a externé pomôcky, v ktorých sú všetky pomôcky potrebné na prevedenie pokusov a úloh z učebnice fyziky pre 9. ročník ZŠ.

Súpravu pomôcok v súčasnosti využívame a overujeme jej praktické využitie pri vyučovaní fyziky v dvoch triedach 9. ročníka základnej školy. Vzhľadom k aktuálne prebiehajúcemu dištančnému vzdelávaniu sme si prispôsobili jej využitie a počas vyučovacieho procesu so súpravou pomôcok (základnou aj rozšírenou súpravou a niektorými externými pomôckami) manipuluje učiteľ. V učebniciach fyziky pre 6., 7. a 8. ročník sa nachádzajú pokusy, na ktorých realizáciu sa v domácom prostredí nájdu niektoré pomôcky. Pre aktivity z 9. ročníka sú pomôcky špecifické, ktoré sa v domácnostiach obyčajne nenachádzajú.

Keďže vo vyučovaní fyziky sa kladie veľký dôraz na vlastné konštruovanie poznatkov, rozvíjanie zručností ako napríklad pozorovanie, tvorbu hypotéz, meranie, zber dát, či tvorbu záverov [Demkanin, 2018, s. 65, Sawyer, 2014, s. 277], aj v súčasnej situácii sa ich snažíme implementovať do vyučovania. Učiteľ využitím pomôcok zo súpravy pomôcok v domácom prostredí vykoná pokus a zaznamená ho pomocou videozáznamu alebo fotodokumentácie. S danými materiálmi potom pracujú žiaci na hodine a vykonávajú zvyšné činnosti, napr. pozorovanie, spracovanie a analýzu dát a tvorbu záverov.

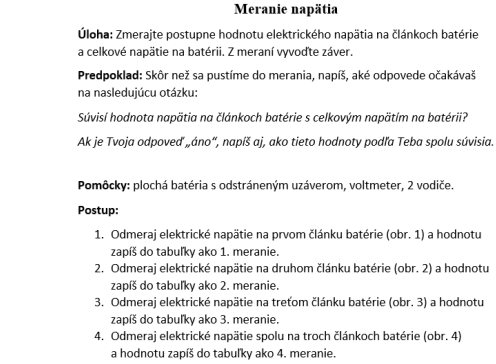
V nasledujúcich odsekoch uvedieme ukážku dvoch rôznych aktivít s využitím pomôcok z nami navrhnutej súpravy, ktoré sme použili počas dištančného vzdelávania. Prvá aktivita je vhodná na samostatnú a individuálnu prácu žiakov a je realizovaná formou pracovného listu, ktorý obsahuje všetky inštrukcie pre žiaka aj spolu s fotodokumentáciou merania. V druhej aktivite ilustrujeme využitie pomôcok priamo počas online hodiny – počas experimentovania. Pričom učiteľ opäť poskytne žiakom fotodokumentáciu merania.

6.1 Využitie pracovného listu

Na hodinách fyziky počas rôznych experimentov žiaci používajú ako zdroj napätia 4,5 V plochú batériu. V učebnici fyziky je preto zaradená aktivita, počas ktorej majú žiaci rozobrať starú plochú batériu a preskúmať, čo tvorí jej obsah [Lapitková et al., 2012, s. 47].

Plochú batériu si môžu žiaci rozobrať aj doma, ale na úplné preskúmanie rozobratej batérie a overenie predpokladu, že plochá batéria sa skladá z troch monočlánkov, potrebujú žiaci voltmeter. Preto sme vytvorili pracovný list (Obr. 13, 14 a 15) obsahujúci okrem iného aj fotodokumentáciu merania. Úlohou žiakov je napísať svoj predpoklad a na základe obrázkov z merania vyplniť tabuľku a odpovedať na otázky v závere.

Takto pripravenú aktivitu sme realizovali v tzv. asynchrónnej výučbe – žiaci vyplnili pracovný list v rámci prípravy na vyučovanie a odovzdali ho na kontrolu.



Meranie napätia

Úloha: Zmerajte postupne hodnotu elektrického napätia na článkoch batérie a celkové napätie na batérii. Z meraní vyvoďte záver.

Predpoklad: Skôr než sa pustíme do merania, napíš, aké odpovede očakávaš na nasledujúcu otázku:

Súvisí hodnota napätia na článkoch batérie s celkovým napätím na batérii?

Ak je Tvoja odpoveď „áno“, napíš aj, ako tieto hodnoty podľa Teba spolu súvisia.

Pomôcky: plochá batéria s odstráneným uzáverom, voltmeter, 2 vodiče.

Postup:

1. Odmeraj elektrické napätie na prvom článku batérie (obr. 1) a hodnotu zapíš do tabuľky ako 1. meranie.
2. Odmeraj elektrické napätie na druhom článku batérie (obr. 2) a hodnotu zapíš do tabuľky ako 2. meranie.
3. Odmeraj elektrické napätie na treťom článku batérie (obr. 3) a hodnotu zapíš do tabuľky ako 3. meranie.
4. Odmeraj elektrické napätie spolu na troch článkoch batérie (obr. 4) a hodnotu zapíš do tabuľky ako 4. meranie.

Obr. 13: pracovný list – meranie napätia (s. 1)

Fotodokumentácia merania:



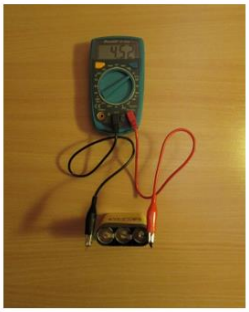
Obr. 1 – napätie na prvom článku



Obr. 2 – napätie na druhom článku



Obr. 3 – napätie na treťom článku



Obr. 4 – napätie na celej batérii

Obr. 14: pracovný list – meranie napätia (s. 2)

Výsledky merania:

Tabuľka: Meranie elektrického napätia na článkoch batérie

Číslo merania	Meranie na	Počet zapojených článkov batérie	Napätie [V]
1.	prvom článku		
2.	druhom článku		
3.	treťom článku		
4.	celej batérii		

Záver:

1. Porovnaj odmerané napätie na jednotlivých článkoch a vyslov záver.

2. Potvrdil sa Tvoj predpoklad?

Obr. 15: pracovný list – meranie napätia (s. 3)

6.2 Využitie pomôcok počas hodiny

Na predošlých hodinách fyziky žiaci zistili, že meniť veľkosť elektrického prúdu v obvode môžeme tak, že budeme meniť napätie na zdroji alebo pridávať spotrebiče do obvodu. Takáto zmena elektrického prúdu si však vyžaduje manuálne prerušenie obvodu a pridanie alebo zmenu súčiastky. V technických zariadeniach je však možná aj plynulá zmena elektrického prúdu. Cieľom aktivity je zistiť, ako je možné dosiahnuť plynulú zmenu elektrického prúdu, čo by malo následne viesť k pochopeniu princípu fungovania reostatu.

Aktivitu sme realizovali v rámci synchrónnej výučby – žiaci sa počas hodiny aktívne zapájali. Učiteľ zdieľal prezentáciu, v ktorej bola postupne zobrazená celá aktivita – formulovanie úlohy, navrhnuté pomôcky potrebné na realizáciu merania, postup merania, fotodokumentácia merania a záver s otázkami.

Zároveň si učiteľ vopred pripravil zdieľanú tabuľku (Obr. 16), do ktorej potom každý žiak, priamo počas hodiny, vpisoval výsledky merania. Záver bol sformulovaný spoločne.

Tabuľka: Hodnoty odporu tuhy s rôznou dĺžkou a prúdu prechádzajúceho žiarovkou

Meno a priezvisko žiaka	Dĺžka tuhy *l* [cm]	Odpor tuhy *R* [Ω]	Prúd *I* [mA]	Pozorovanie jasu
Žiak 1	3			
	6			
	9			
	12			
Žiak 2	3			
	6			
	9			
	12			
Žiak 3	3			
	6			
	9			
	12			

Obr. 16: ukážka zdieľanej tabuľky

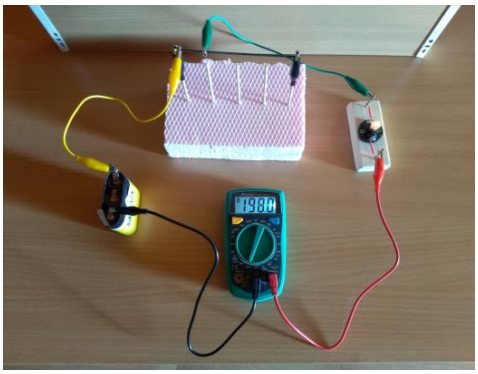
Ukážka priebehu hodiny:

Úloha: Odmerajte prúd prechádzajúci žiarovkou pri rôznych dĺžkach tuhy zapojenej do elektrického obvodu.

Pomôcky: tuha do verzatilky (12 cm), multimeter, krokosvorky, vodiče, polystyrénová podložka so špajdľami, batéria 3 V, stojanček na žiarovku so žiarovkou.

Postup:

1. Pomocou krokosvoriek pripevnite tuhu na špajdle.
2. Odmerajte odpor tuhy ohmmetrom pri uvedených dĺžkach tuhy v tabuľke (Obr. 18). Hodnoty odporu zapíšte do tabuľky (Obr. 16).
3. Zapojte elektrický obvod podľa obrázka (Obr. 17).

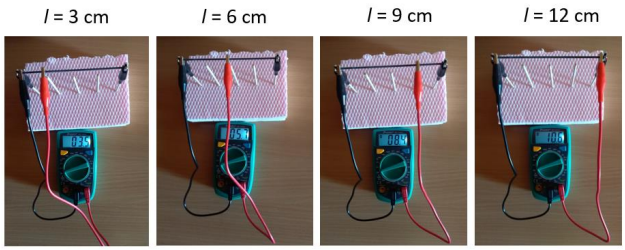


Obr. 17: zapojenie elektrického obvodu

4. Pri uvedených dĺžkach tuhy v tabuľke odmerajte prúd prechádzajúci elektrickým obvodom a pozorujte jas žiarovky (Obr. 19 – 23). Hodnoty zapíšte do tabuľky (Obr. 16).

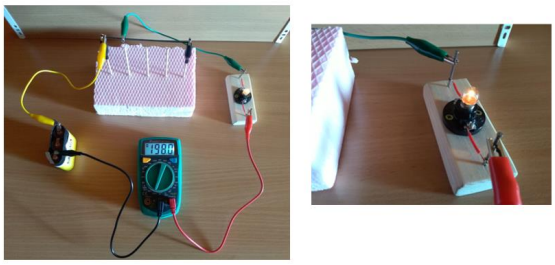
Obrázky, z ktorých žiaci počas hodiny odčítavajú hodnoty:

Odčítaj odpor tuhy, ak dĺžka tuhy je:



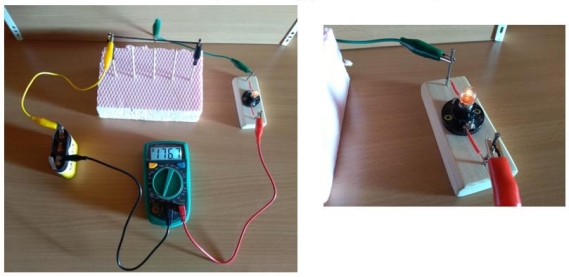
Obr. 18: meranie odporu tuhy pri rôznych dĺžkach tuhy

Odmeraj prúd prechádzajúci obvodom pri dĺžke tuhy 3 cm a pozoruj jas žiarovky



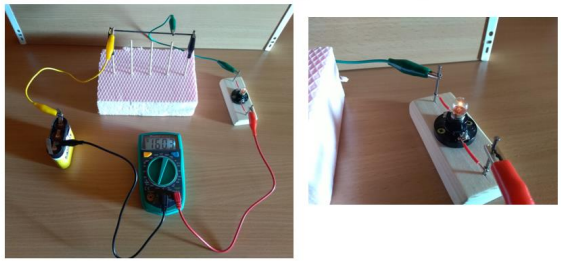
Obr. 19: meranie elektrického prúdu a pozorovanie jasu žiarovky pri dĺžke tuhy 3 cm

Odmeraj prúd prechádzajúci obvodom pri dĺžke tuhy 6 cm a pozoruj jas žiarovky



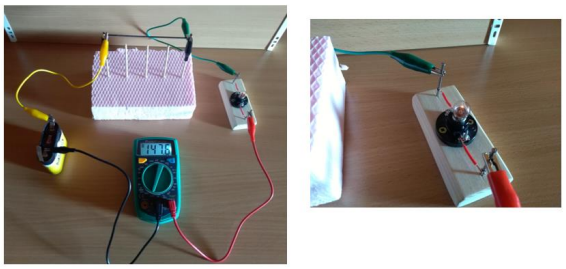
Obr. 20: meranie elektrického prúdu a pozorovanie jasu žiarovky pri dĺžke tuhy 6 cm

Odmeraj prúd prechádzajúci obvodom pri dĺžke tuhy 9 cm a pozoruj jas žiarovky



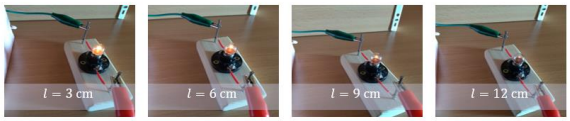
Obr. 21: meranie elektrického prúdu a pozorovanie jasu žiarovky pri dĺžke tuhy 9 cm

Odmeraj prúd prechádzajúci obvodom pri dĺžke tuhy 12 cm a pozoruj jas žiarovky



Obr. 22: meranie elektrického prúdu a pozorovanie jasu žiarovky pri dĺžke tuhy 12 cm

Pozoruj ešte raz jas žiaroviek pri rôznych dĺžkach tuhy



Obr. 23: pozorovanie jasu žiaroviek pri rôznych dĺžkach tuhy

Tabuľka s ukážkou žiackych odpovedí (Obr. 24) a náhľad na žiakmi sformulovaný záver:

Tabuľka: Hodnoty odporu tuhy s rôznou dĺžkou a prúdu prechádzajúceho žiarovkou

Dĺžka tuhy l [cm]	Odpor tuhy R [Ω]	Prúd I [mA]	Pozorovanie jasu
3	3,5	198,0	4 – najväčší jas
6	5,7	176,7	3 – menší jas
9	8,4	160,3	2 – ešte menší jas
12	10,6	147,6	1 – najmenší jas

Obr. 24: tabuľka s ukážkou žiackych odpovedí

Záver:

1. Ako sa menila veľkosť elektrického prúdu pri zmenách odporu tuhy?
   Čím väčší bol odpor tuhy, tým menší bol elektrický prúd prechádzajúci obvodom.

2. Ako sa menil jas žiarovky pri zmenách odporu tuhy v elektrickom obvode?
   Jas hovorí o veľkosti elektrického prúdu.
   Čím väčší bol odpor tuhy, tým menší bol jas.

Záver

V rámci práce sme vytvorili kufrík s pomôckami na realizáciu aktivít z učebnice fyziky pre 9. ročník – základnú a rozšírenú súpravu pomôcok. Pri niektorých pomôckach sme navrhli alternatívne verzie, aby sa pomôcky stali cenovo dostupnejšími. Súprava pomôcok nám umožnila realizovať experiment aj počas dištančného vyučovania. Ako príklad uvádzame dve aktivity, ktoré síce žiakom neumožnili manipuláciu s pomôckami, ale mohli

vysloviť hypotézu, zaznamenať, spracovať a analyzovať dáta a vysloviť záver.

Poďakovanie

Touto cestou by som sa chcela poďakovať doc. PaedDr. Kláre Velmovskej, PhD. za jej pomoc, ochotu, cenné a odborné rady a usmernenia, ktoré mi poskytla pri tvorbe príspevku.

Literatúra

[Demkanin, 2018] Demkanin, P. (2018). Didaktika fyziky pre študentov magisterského štúdia a učiteľov v praxi. Bratislava : Univerzita Komenského v Bratislave, 2018. 156 s. ISBN 978-80-223-4374-9.

[Lapitková et al., 2012] Lapitková, V., Morková, Ľ. (2012). Fyzika pre 9. ročník základnej školy a 4. ročník gymnázia s osemročným štúdiom. Bratislava : Expol pedagogika, 2012. s. 104. ISBN 978-80-8091-268-0.

[Sawyer, 2014] Sawyer, R. K. (2014). The Cambridge Handbook of the Learning Sciences. 2nd ed. New York : Cambridge University Press, 2014. 776 p. ISBN 978-1-107-03325-2.

[Škola.sk s. r. o.] ŠKOLA.SK, s. r. o. MULTIRESIST 4® púzdro s rezistormi. [online]. [školská pomôcka]. [cit. 7. marca 2020]. Dostupné na: < https://bit.ly/2vR6ifu>.

[ŠPÚ, 2020] ŠPÚ (Štátny pedagogický ústav). (2015). Inovovaný štátny vzdelávací program, Fyzika – nižšie stredné vzdelanie. [online]. Bratislava : ŠPÚ, 2015. [cit. 11. februára 2020]. Dostupné na: < https://bit.ly/3bVRHi8>.

[Valkovičová, 2020] Valkovičová, L. (2020). Tvorba súpravy pomôcok pre vyučovanie vybranej časti fyziky. Bakalárska práca. Bratislava : FMFI UK, 2020. s. 48.

[Velmovská et al., 2021] Velmovská, K., Trúsiková, A., Kiss, T. (2021). Aspekty rozvoja kritického myslenia vo vyučovaní fyziky. Bratislava : FMFI, 2021. s. 125. ISBN 978-80-8147-100-1.

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 291–298
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Jaroslava Slavkova, Peter Horváth

Skleníkový efekt vo vyučovaní fyziky na základnej a strednej škole

Jaroslava Slavkova[1]* Peter Horváth[2†‡1]
[1] Katedra astronómie, fyziky zeme a meteorológie, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava
[2] Katedra didaktiky matematiky, fyziky a informatiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstrakt

Antropogénny skleníkový efekt patrí dnes medzi najväčšie globálne problémy. Napriek tomu sa tento pojem v štátnom vzdelávacom programe pre fyziku nenachádza. Výskumy na maďarských žiakoch druhého stupňa základných škôl, či českých študentoch doktorandského štúdia didaktiky fyziky poukazujú, že ako samotní žiaci, tak aj učitelia fyziky neraz nerozumejú fyzikálnu podstatu globálneho otepľovania. Téma globálneho otepľovania zaujíma veľké percento mladých ľudí, ale zároveň je aj častým terčom konšpiračných teórií. V príspevku preto uvádzame nami navrhnuté možnosti, ako vyučovať skleníkový efekt v rámci výučby fyziky na strednej škole. Ide o postupné poznávanie javov ako žiarenie absolútne čierneho telesa, rozptyl a absorpcia svetla, žiarenie Zeme a Slnka, či pojmov ako albedo a solárna konštanta, ktoré vyvrcholí pochopením fyzikálnej podstaty skleníkového efektu a následnou diskusiou o tomto probléme. Študenti robia postupne kroky v poznávaní cez hry, súťaže, online applety, aktivity rozvíjajúce teoretické poznávanie, či diskusie vedené študentmi samotnými alebo učiteľom.

Kľúčové slová: skleníkový efekt, žiarenie absolútne čierneho telesa, absorpcia žiarenia, stredná škola, didaktika fyziky

1 Úvod

Dôsledky antropogénneho skleníkového efektu a globálneho zvyšovania teploty sú evidentné aj na území Slovenska (častejšie a intenzívnejšie sucho, zmeny vo frekvencii, intenzite a skupenstve zrážok, skôr začínajúce a dlhšie trvajúce vegetačné obdobie, atď.) [Barát, Pecho a kol., 2020]. Ide teda o podstatnú tému, ktorá je aj v kruhoch slovenských teenagerov vysoko aktuálna. Nasvedčuje tomu napríklad množstvo združení a iniciatív zameraných na klimatickú zmenu do ktorých sa mladí ľudia v súčasnosti zapájajú alebo ich aj vedú (Fridays for future Slovensko, Mladí za klímu, everyindividualmatters, atď.).

Podľa Štátneho pedagogického ústavu sa žiaci na základných a stredných školách so skleníkovým efektom môžu stretnúť na hodinách chémie, či biológie. V štátnom vzdelávacom programe pre fyziku sa pojem skleníkový efekt aktuálne nenachádza ([Štátny pedagogický ústav, 2015a]; [Štátny pedagogický ústav, 2015b]). Vzhľadom na veľkú popularitu je táto téma terčom mnohých konšpiračných teórií a časté sú aj miskoncepcie, ktoré vychádzajú z nedostatočného pochopenia fyziky tohto javu. Medzi časté mylné predstavy patrí napríklad to, že ozónová diera má podstatný vplyv na zvyšovanie globálnej teploty, či chápanie antropogénnej zložky skleníkového efektu ako celkový skleníkový efekt (zanedbanie prirodzeného skleníkového efektu) ([Tasnádi, 2013]; [Miléř, Hollan a kol., 2013]). Je preto potrebné viesť študentov k pochopeniu tohto javu do hĺbky aj z pohľadu fyziky a podávať im pravdivé informácie.

Problematiku skleníkového efektu je vzhľadom na akútnosť súčasnej situácie potrebné preberať už od prvého stupňa základnej školy. Prípadne, na vhodnej kognitívnej úrovni, je možné hovoriť o skleníkovom efekte už aj s predškolákmi. Na úplné pochopenie tohto javu je však potrebné chápať procesy absorpcie a rozptylu svetla, či žiarenie absolútne čierneho telesa. Výučba o skleníkovom efekte, ktorú uvádzame v ďalšom texte je preto vhodná po absolvovaní vyučovania o svetle a elektromagnetickom žiarení. Ide teda o výučbu určenú primárne na záver vyučovania fyziky na strednej škole alebo do maturitného ročníka. Pri dôslednejšom vysvetlení neznámych pojmov je možné využiť ju aj pri druhom stupni základnej školy.

Navrhnuté vyučovanie môžeme rozdeliť do 4 vyučovacích sekvencií:

- elektromagnetické žiarenie,
- žiarenie absolútne čierneho telesa,
- absorpcia žiarenia,

[1] * Jaroslava.Slavkova@fmph.uniba.sk
† Peter.Horvath@fmph.uniba.sk
‡ školiteľ

• diskusia o antropegénnom skleníkovom efekte ako globálnom probléme.

Pri každej sekvencii (okrem poslednej) uvádzame na začiatku kognitívne ciele danej sekvencie. Text zvýraznený tučným písmom predstavuje kľúčové vedomosti, ktoré by si študenti mali vytvoriť a na ktoré sa bude v ďalšom vyučovaní stavať. Pri niektorých aktivitách budeme používať online applety. V článku sú tieto applety očíslované, pričom na konci článku uvádzame zoznam všetkých appletov s priradenými odkazmi na webové stránky. Na úvod vyučovania je dobré opýtať sa študentov čo vedia o skleníkovom efekte (prípadne, aký majú na túto problematiku názor). Študentov tým nasmerujeme na tému, ku ktorej budeme počas ďalšej výučby smerovať a zároveň zistíme stav vedomostí a názorov na danú tému v triede

2 Elektromagnetické žiarenie

2.1 Kognitívne ciele

Študent si zopakuje že:

- elektromagnetické žiarenie môže mať rôznu vlnovú dĺžku
- vlnová dĺžka elektromagnetického žiarenia určuje o aký typ žiarenia ide (gama, röntgenové, UV, viditeľné svetlo, infračervené, mikrovlnné, rádiové…)
- každá farba má svoju vlnovú dĺžku

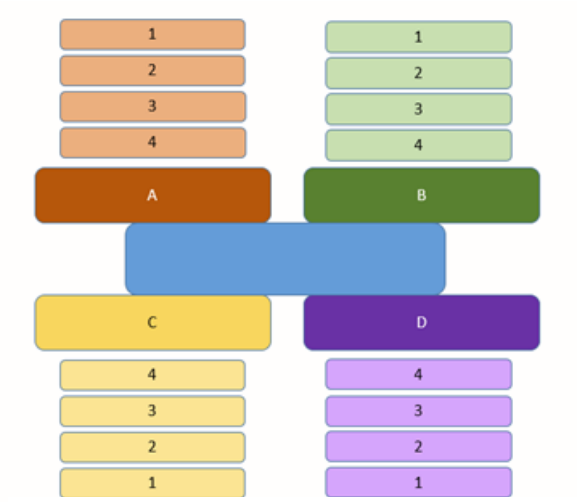
2.2 Hra „asociácie“ na zopakovanie si typov elektromagnetického žiarenia

Pravidlá:

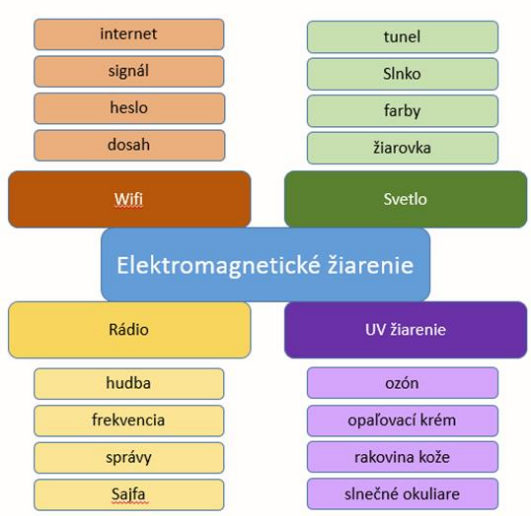
- na tabuli bude nakreslené, príp. vysvietené hracie pole (Obrázok 2);
- študenti sa rozdelia do skupín po 3,4;
- jedna za druhou si bude každá skupina vyberať pole, ktoré chce odokryť (napr. pole A1, D3, B4, atď.) (Obrázok 1). Po odokrytí pojmu dostane skupina možnosť hádať čiastkové alebo hlavné riešenie. Pokiaľ skupina uhádne čiastkové riešenie, má možnosť hádať ďalší stĺpec, príp. hlavné riešenie. Po uhádnutí hlavného riešenia sa hra končí.
- Bodovanie pre uhádnuté čiastkové alebo hlavné riešenia je nasledovné (Tabuľka 1):

Odokrytých polí/ uhádnutých čiastkových riešení	Body za uhádnuté čiastkové riešenie	Body za uhádnuté hlavné riešenie
1	4	8
2	3	7
3	2	6
4	1	5

Tabuľka 1: Bodovanie hry asociácie



Obrázok 2: hracie pole



Obrázok 1: vyriešené hracie pole

Po úspešnom vylúštení políčok sa učiteľ opýta študentov čo je to elektromagnetické žiarenie a aké druhy elektromagnetického žiarenia poznajú.

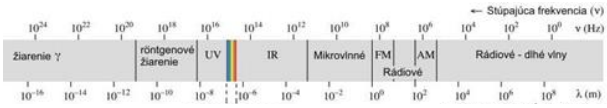
2.3 Hra rýchla pamäť na precvičenie si priraďovania správnej vlnovej dĺžky (frekvencie) k danému typu elektromagnetického žiarenia

Pravidlá:

- Študenti sa rozdelia do skupín po 3.
- Každá skupina dostane stupnicu s vlnovými dĺžkami a frekvenciami elektromagnetického žiarenia. Na stupnici **nebude** vyznačené o aký typ žiarenia ide pre prislúchajúce vlnové dĺžky/frekvencie. Spolu so stupnicou dostanú študenti aj papieriky na ktorých budú napísané konkrétne druhy elektromagnetického

žiarenia (gama žiarenie, röntgenové žiarenie, UV, viditeľné spektrum, infračervené, mikrovlnné, FM rádiové, AM rádiové, rádiové – dlhé vlny). Študenti zatiaľ budú mať papier so stupnicou otočený opačne (tak, aby nevideli, čo je na papieri).

- Učiteľ na pol minúty ukáže stupnicu vlnových dĺžok a frekvencií elektromagnetického žiarenia spolu s označením jednotlivých typov žiarenia (Obrázok 3). Úlohou bude zapamätať si za pol minúty čo najviac informácií zo stupnice (aké vlnové dĺžky zodpovedajú mikrovlnnému, röntgenovému, gama žiareniu...)
- Následne budú študenti mať 5 minút na to, aby v skupinách priradili typy elektromagnetického žiarenia (papieriky) na vhodné miesto na stupnici vlnových dĺžok/frekvencií.
- Za každý správne priradený druh žiarenia dostane skupina 1 bod.



Obrázok 3: spektrum elektromagnetického žiarenia a prislúchajúce vlnové dĺžky a frekvencie jednotlivých typov elektromagnetického žiarenia

3 Žiarenie absolútne čierneho telesa

3.1 Kognitívne ciele

Študent bude vedieť/zopakuje si, že

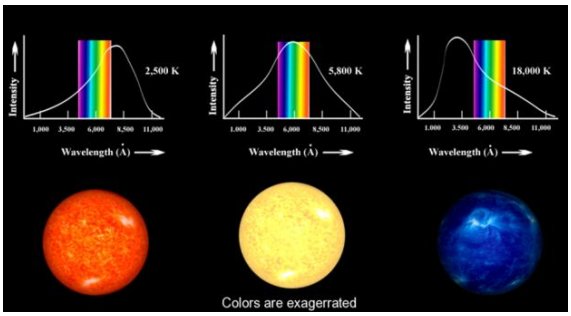
- každé teleso, ktoré má teplotu vyššiu ako absolútna nula vyžaruje elektromagnetické žiarenie. To, akú vlnovú dĺžku bude najviac vyžarovať závisí od teploty.

3.2 Opakovanie

Predpokladáme, že študenti sú oboznámení s pojmom absolútne čierne teleso a poznajú Planckov zákon vyžarovania, Wienov posuvný zákon a Stefan – Boltzmanov zákon (stačí aby vedeli interpretovať tieto zákony v grafickej podobe). Pokiaľ tak nie je, môžeme študentov priviesť k poznatku o tom, že **každé teleso s teplotou vyššou ako absolútna nula vyžaruje a spektrum tohto vyžarovania závisí od teploty telesa** napríklad cez niektorú z nasledovných aktivít:

meranie spektra žiarenia rôznych zdrojov svetla školským spektrometrom [Horváth a Horváthová 2013] HORVÁTH, Peter a Martina HORVÁTHOVÁ, 2013. Vlnová optika interaktívne. Šoltésove dni 2012 a 2013, Zborník príspevkov z odbornej konferencie. 2013, s. 93–103.

- [Hruška, 2012] , či spektrometrom vyrobeným z CD-čka [Horváth a Horváthová 2013]**Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.**
- diskusia o farbe hviezd (Obrázok 4) otázka pre študentov: od čoho by mohla závisieť farba hviezd?



Obrázok 4: závislosť farby hviezdy od jej teploty [Mutlaq, no date]

- práca s appletom 1 o vyžarovaní absolútne čierneho telesa

Pred ďalšou aktivitou je dobré zopakovať a vypísať na tabuľu vzťahy pre Stefan – Boltzmanov zákon a Wienov posuvný zákon:

$I=\sigma T^4$

$\lambda_{max}=const/T$

I – intenzita celkového žiarenia

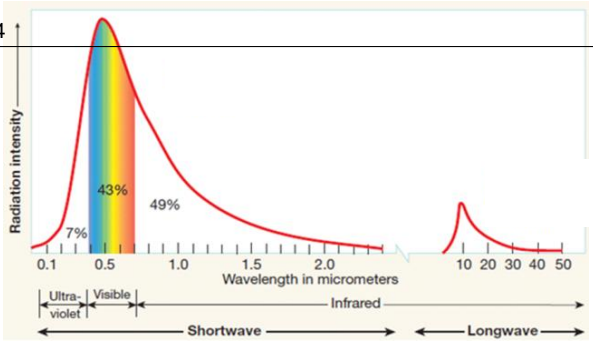
σ – Stefan-Boltzmanova konštanta

T – teplota telesa

λ_{max} – vlnová dĺžka pri ktorej je najväčšia intenzita žiarenia

Ďalej študentom ukážeme **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.**. Sú na ňom zobrazené spektrá žiarenia dvoch absolútne čiernych telies. Teleso vľavo má teplotu 6000K a teleso vpravo 288K. Maximum žiarivej energie (radiation intensity) telesa vľavo je vo viditeľnom spektre (s vlnovou dĺžkou 0,5 μm) a vynáša 2000 $Wm^{-2}\mu m^{-1}$; maximum žiarivej energie telesa vpravo je 300 $Wm^{-2}\mu m^{-1}$ (pri vlnovej dĺžke 10 μm). Študentom zatiaľ neprezradíme teploty telies, ale opýtame sa ich nasledovné otázky:

- Ktoré z telies vyžiari väčšie množstvo energie? (teleso vľavo)
- Ktoré teleso má vyššiu teplotu? (teleso vľavo)
- Budeme žiarenie týchto telies vidieť voľným okom? (Iba žiarenie telesa vľavo, keďže toto teleso žiari aj vo viditeľnom spektre.)

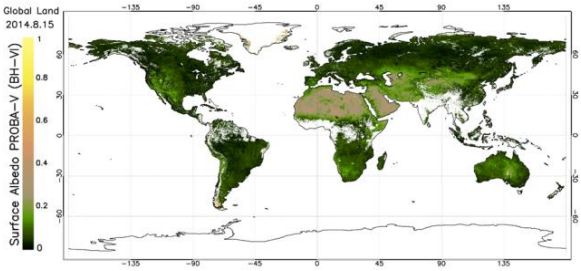


Obrázok 5: Žiarenie absolútne čierneho telesa s teplotou približne 6000K (vľavo) a telesa s teplotou 288K (vpravo); [Lutgens a Tarbuck, 2013]

3.3 Príklad: určenie teploty zemského povrchu

Pred samotným príkladom študentov oboznámime s pojmami albedo a solárna konštanta:

- **Albedo**: pomer medzi odrazeným a prichádzajúcim žiarením na zemskom povrchu. Albedo konkrétnych povrchov sa v súčasnosti môže merať albedometrom (prístrojom, ktorý svojou hornou časťou meria žiarenie prichádzajúce zo Slnka a dolnou časťou žiarenie prichádzajúce zo Zeme). V rámci stredoškolskej fyziky možno pojem albeda priblížiť študentom cez meranie albeda viditeľného žiarenia zvolených povrchov pomocou luxmetra. Luxmeter najprv otočíme tak, aby na neho dopadali lúče zo Slnka a následne rovnako zmeriame aj žiarenie prichádzajúce zo Zeme. Po porovnaní týchto dvoch žiarení môžeme vypočítať albedo pre zvolené povrchy [Hollan a Miléř 2014]. Albedo vo väčšej mierke sa meria pomocou satelitov (Obrázok 6) alebo lietadiel. Pri tejto téme môžeme so študentmi tiež hovoriť o tom, že roztápanie ľadovcov má značný vplyv na zmenu albeda Zeme. Prípadne môžeme hovoriť o albede materiálov v stavebníctve v kontexte adaptácie miest na zmenu klímy. Funkciu albeda môžeme demonštrovať jednoduchým experimentom: 2 rovnaké plechovky obalíme jednu do čierneho a druhú do bieleho papiera. Obe plechovky ožarujeme žiarovkou tak aby obe dostali približne rovnaké množstvo žiarenia. Do vnútra oboch plechoviek vložíme teplomer a sledujeme ako sa bude meniť teplota.
- Pokiaľ by sme na hornej hranici atmosféry otáčali pomyselný štvorec s dĺžkou 1x1m tak, aby lúče Slnka na štvorec vždy dopadali kolmo, v priemere by tento štvorec každú sekundu prijal energiu 1367 J. Konštantu 1367 Wm^{-2} (Js^{-1}=W) nazývame **solárna konštanta**.



Obrázok 6: Albedo zemského povrchu z družice PROBA-V, 15. augusta 2014 [COPERNICUS, 2014])

Príklad: Predpokladajme, že jediným zdrojom energie na Zemi je Slnko. Albedo Zeme je v priemere približne 0,3 (čiže približne jedna tretina prichádzajúceho žiarenia na zemský povrch sa od neho odrazí späť do atmosféry). Množstvo žiarenia, ktoré naša Zem absorbuje môžeme vyjadriť nasledovne: (1-a)πr^2 S, kde S je solárna konštanta a r je polomer Zeme (pre lepšie pochopenie toho, prečo používame obsah kruhu s polomerom Zeme a nie objem, odporúčame zakresliť si skicu). Keďže Zem je v termálnej rovnováhe, všetko žiarenie, ktoré prijme bude aj vyžiarené. Pokiaľ by žiarila ako absolútne čierne teleso môžeme prenásobením Stefan – Boltzmanovho zákona povrchom Zeme určiť celkové množstvo energie, ktoré by vyžiarila: 4r^2 πσT^4. Po tom, ako dáme uvedené dva vzorce do rovnosti môžeme určiť teplotu akú má naša Zem [Tasnádi, 2013].

$$(1-a)\pi r^2 S = 4r^2\pi\sigma T^4$$

$$\Rightarrow T^4 = \frac{(1-a)\pi r^2 S}{4r^2\pi\sigma} = \frac{0.7 * 1367\,\frac{W}{m^2}}{4 * 5.67 * 10^{-8}\,\frac{W}{m^2 K^4}} = \frac{956.9}{22.68} * 10^8 K^4 = 42.19 * 10^8 K^4$$

$$\Rightarrow T = 2.55 * 100K = 255K \approx -18°C$$

Po vypočítaní príkladu sa učiteľ opýta: Prekvapil vás výsledok? Je to reálne? Aký výsledok ste očakávali/aká je podľa vás priemerná teplota Zeme? Keďže vzorce sú správne, v čom inom môže byť problém? Je ešte niečo, čo by sme mali do toho vzorcu pridať? Viete ako sa nazýva jav, ktorý spôsobuje, že na našej Zemi je o čosi teplejšie než -18°C? Vedeli by ste ho popísať? Viete uviesť niektoré skleníkové plyny, prípadne ich zdroj? Aký je rozdiel medzi prirodzeným a antropogénnym skleníkovým efektom?

Očakáva sa, že výsledkom debaty bude nasledovné: priemerná teplota zemského povrchu je 15°C. Pri výpočte sme zanedbali existenciu atmosféry. Keby naša Zem nemala atmosféru skutočne by bola taká chladná (dokonca ešte chladnejšia, keďže pri mínusových teplotách by zamrzli vodné plochy a tým pádom by bolo viac bielych povrchov→ viac odrazeného žiarenia –

vyššie albedo. Pri takomto vyššom albede by teplota zemského povrchu mohla byť aj o 100℃ nižšia [Tasnádi, 2013]. Za to, že na našej planéte sú o čosi príjemnejšie podmienky vďačíme tomu, že v atmosfére sa nachádzajú plyny, ktoré pohlcujú žiarenie zo Zeme a následne ho vyžiaria do rôznych strán, a aj späť k povrchu. Tento jav sa nazýva skleníkový efekt. **Bez skleníkového efektu by naša planéta mala menej ako -18℃.** V poslednom období sa však pojem skleníkový efekt spája skôr s negatívnymi dôsledkami. Ide totiž o to, že uvedený ohrev o 33℃ (z -18 na +15℃) je prirodzený skleníkový efekt, ktorý na našej planéte pretrváva už dlhodobo a zaručuje nám vhodné podmienky pre život. Teraz sa táto rovnováha narúša tým, že ľudstvo svojimi bežnými aktivitami pridáva do ovzdušia ďalšie množstvo skleníkových plynov a tým sa ku povrchu vracia viac žiarenia, čo má priamy vplyv na zvyšovanie sa globálnej teploty. Toto umelé pridávanie skleníkových plynov a s ním súvisiaci ohrev sa nazýva antropogénny skleníkový efekt. O tom, akým spôsobom atmosféra pohlcuje žiarenie zo Zeme bude ďalšia výučbová sekvencia.

4 Absorpcia žiarenia

4.1 Kognitívne ciele

Študent bude vedieť:

- čo je to absorpcia žiarenia
- vysvetliť svojimi slovami princíp skleníkového efektu
- aký je rozdiel medzi celkovým a antropogénnym skleníkovým efektom
- že medzi skleníkové plyny patria (okrem iných aj) nasledovné plyny: oxid uhličitý (CO2), metán (CH4), vodná para (H2O) a ozón (O3)

4.2 Absorpcia a rozptyl v atmosfére

Študentom ukážeme obrázok 7 a upozorníme ich na to, že **Slnko vyžaruje približne ako absolútne čierne teleso s teplotou 6000 K a podľa Wienovho zákona sa maximum energie zo Slnka vyžiari približne o vlnovej dĺžke 470 nm.** Na našu Zem však zo Slnka dopadá žiarenie, ktoré je viac posunuté do dlhších vlnových dĺžok. Otázka pre študentov: čím to je spôsobené? Ako to súvisí s farbou oblohy? Kratšie vlnové dĺžky sú v atmosfére viac rozptylované, preto je maximum žiarivej energie slnečného žiarenia pri zemskom povrchu posunuté viac do dlhších vlnových dĺžok. Práve vďaka intenzívnejšiemu rozptylu modrého svetla v porovnaní so svetelnými lúčmi dlhších vlnových dĺžok sa nám obloha cez deň javí ako modrá.

Ďalej si všimneme zúbkatý charakter krivky spektrálneho rozdelenia hustoty toku slnečného žiarenia na hornej hranici atmosféry (Obrázok 7). Je to dôsledkom absorpcie tohto žiarenia v slnečnej koróne. Toto žiarenie však pri prechode atmosférou dostáva ďalšie zúbky, čím je to spôsobené? Absorpciou plynmi v atmosfére. Okrem rozptylu teda v atmosfére prebieha aj proces absorpcie, ktorý je detailnejšie popísaný v nasledovnom odstavci.

Elektróny v atómoch sa môžu dostať na vyššiu energetickú hladinu. Na tento proces je potrebné dodať elektrónom diskrétnu hodnotu energie, ktorá zodpovedá danému prechodu. Atómy si teda z celkového žiarenia vyberajú práve to, ktoré zodpovedá prechodu ich elektrónov medzi energetickými hladinami. **Rôzne plyny absorbujú žiarenie rôznych vlnových dĺžok.** Po tom ako častica absorbuje žiarenie a dostane sa do excitovaného stavu (AB*) môže nastať 5 procesov na ktoré sa spotrebuje energia prijatá zo žiarenia:

a) Fotoionizácia: $AB^* \rightarrow AB^+ + e^-$

Časť energie, ktorú častica prijme absorpciou žiarenia sa spotrebuje na vytrhnutie elektrónu z elektrónového obalu, pričom z pôvodnej častice sa tým stane kladne nabitý ión. Žiarenie, ktoré je schopné v atmosfére vyvolať fotoionizáciu má vlnovú dĺžku menšiu než 100 nm. Takéto žiarenie prakticky nepreniká pod mezosféru.

b) Fotodisociácia: $AB^* \rightarrow A + B$

Vďaka prijatej energii častica prekoná chemické väzby, ktorými sú viazané atómy v nej. Tento proces hrá podstatnú úlohu napríklad pri tvorbe ozónu. Dvojatomová molekula kyslíka (O_2) podlieha pod vplyvom absorpcie UV žiarenia fotodisociácii, pričom vzniknú z molekuly dva jednoduché atómy kyslíka. Tieto atómy kyslíka potom reagujú s ďalšími dvojatómovými molekulami kyslíka a tým vzniká ozón (O_3).

c) Fluorescencia: $AB^* \rightarrow AB + h\mathbf{h}$

Pri návrate z excitovaného do pôvodného stavu častica vyžiari vo forme fotónu veľkú časť prijatej energie. Vyžiarený fotón môže byť nasmerovaný rôznymi smermi – aj späť ku zdroju prijatého žiarenia (napríklad ku Zemi).

c) Quenching: $AB^*+M \rightarrow AB + M^*$

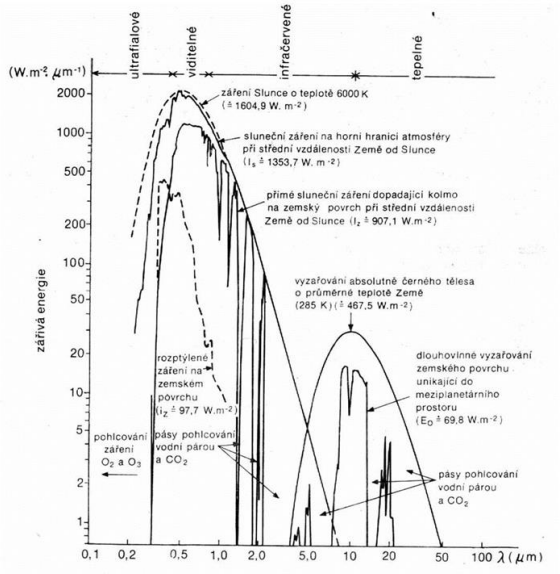
Pri tomto procese prijatá energia väčšinou končí ako kinetická energia.

e) Chemická reakcia: $AB^*+C \rightarrow A + BC$

Excitácia častice sa taktiež môže stať podnetom na interakciu s inou časticou, pričom nastane chemická reakcia a vznikne nová molekula.

Teplota povrchu Zeme je oveľa menšia ako teplota povrchu Slnka a preto energia, ktorú vyžaruje Zem spadá do infračervenej časti spektra (3000 až 24 000 nm) s maximom energie v oblasti vlnovej dĺžky okolo 10 000 nm. Podľa Obrázok 7 vidíme, že aj toto žiarenie zo Zeme má zúbkovitý charakter. Mnohé plyny v atmosfére totiž absorbujú žiarenie práve v oblasti infračerveného

spektra. Práve vďaka fluorescencii po absorpcii žiarenia sa môže stať, že žiarenie Zeme je aj niekoľkokrát odrazené späť k zemi predtým než sa mu „podarí“ uniknúť do vesmíru. Kvôli takémuto zadržiavaniu žiarenia sú na našej planéte vhodné podmienky na život.



Obrázok 7: spektrum slnečného žiarenia a žiarenia Zeme

4.3 Úloha

Zadanie pre študentov: Vo vzduchu sa bežne nachádzajú molekuly nasledovných plynov: dusík (N_2), kyslík (O_2), oxid uhličitý (CO_2), metán (CH_4), vodná para (H_2O), oxid uhoľnatý (CO), oxid dusičitý (NO_2), ozón (O_3). Na základe appletu 2 urči, ktoré z týchto látok sú skleníkovými plynmi – tj. ktoré z nich absorbujú práve žiarenie, ktoré emituje Zem (infračervené žiarenie).

Riešenie: z uvedených plynov sú skleníkovými plynmi: oxid uhličitý, metán, vodná para, oxid uhoľnatý, oxid dusičitý a ozón.

Otázka na zamyslenie: sú medzi týmito časticami aj také, ktoré spôsobujú opačný skleníkový efekt? Tj. také, ktoré absorbujú žiarenie prichádzajúce zo Slnka a teda týmto znižujú množstvo energie, ktoré zo Slnka dopadne na zemský povrch (odpoveď: áno, z uvedených plynov ozón a oxid dusičitý interagujú s ultrafialovým žiarením).

Úlohu je možné modifikovať aj do podoby, bez použitia appletu. Študentom sa poskytne tabuľka s plynmi a prislúchajúcimi vlnovými dĺžkami pri ktorých daný plyn absorbuje žiarenie (Tabuľka 2) ([Thompson, Genuis a kol. 2019]; [Sokolik, 2009]; [Dhaniyala, 2011]). Pre zjednodušenie môžeme za krátkovlnné – slnečné žiarenie považovať žiarenie s vlnovými dĺžkami 100 – 3000 nm a pre dlhovlnné žiarenie zo Zeme vlnové dĺžky 3000 – 24000 nm. Zadanie zostáva rovnaké: vybrať z ponúknutých plynov tie, ktoré sú skleníkovými plynmi (vodná para, metán, oxid dusný, oxid uhličitý a ozón).

názov	značka	vlnová dĺžka (nm)
dusík	N_2	<100
voda (vodná para)	H_2O	650, 6000, 6700
metán	CH_4	3200, 7500
oxid dusný (rajský plyn)	N_2O	4500, 8000, 17000
oxid uhličitý	CO_2	2600, 4200, 15000
ozón	O_3	100-300, 400, 9000
kyslík	O_2	<250

Tabuľka 2: názvy častíc, ich značky a charakteristické vlnové dĺžky elektromagnetického žiarenia, ktoré s veľkou pravdepodobnosťou vyvolajú excitáciu danej častice. Vzhľadom na odlišnosť presných hodnôt vlnových dĺžok pri porovnaní viacerých zdrojov, upozorňujeme, že uvedené hodnoty sú zaokrúhlené a teda iba približné. Zároveň je možné, že niektoré plyny majú absorpčné pásy ešte aj v iných oblastiach spektra. Uvedenú tabuľku teda neodporúčame používať ako exaktný zdroj informácií o absorpčných spektrách jednotlivých látok. Tabuľka slúži skôr na pochopenie princípu fungovania skleníkového efektu.

5 Diskusia o antropogénnom skleníkovom efekte ako globálnom probléme

V nasledovnej časti uvádzame niektoré námety na diskusiu o skleníkovom efekte. Diskusia môže byť vedená učiteľom, ale aj študentmi. Ak sú na to možnosti, môže byť na túto hodinu pozvaný aj externý hosť – meteorológ alebo klimatológ (napríklad z SHMÚ alebo z Fakulty matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského), prípadne si študenti môžu vypočuť rozhovor s takýmto odborníkom na videu, či pozrieť dokument týkajúci sa globálneho otepľovania. Podobne, táto vyučovacia sekvencia môže mať aj formu študentských projektov, referátov, prezentácií.

Takýto záver vyučovania považujeme za kľúčový a neodporúčame ho vynechať. Ide tu jednak o zodpovedanie častej študentskej otázky: „Aký význam má, že sa o tomto učíme?“, ale aj prepojenie získaných vedomostí s praktickým životom, či inými predmetmi v škole. Študenti zároveň budú mať možnosť rozvíjať si komunikačné a prezentačné schopnosti, schopnosť vyjadriť svoj názor, klásť otázky, atď.

Námety na diskusiu/študentské projekty:

- Ktorá látka v atmosfére má najväčší vplyv na radiačné zosilnenie (ohrev spôsobený skleníkovým efektom)? (vodná para)
- Aké plyny sú zodpovedné za antropogénny skleníkový efekt a akými procesmi sa dostávajú do atmosféry? (oxid uhličitý, metán,

oxidu dusný, ozón, hydrofluorkarbóny (HFC), fluorizované uhľovodíky (PFC))
- Čo je to Global warming potential?
- Čo je to uhlíková stopa Zeme/jednotlivých krajín a čo uhlíková neutralita?
- Môžeme my, ako jednotlivci urobiť niečo pre zlepšenie situácie?
- Existujú nejaké možné riešenia globálneho otepľovania? (Napríklad umelé zasírenie atmosféry je jedným z návrhov. Tento nápad však so sebou nesie aj množstvo rizík)
- Ovplyvňuje ozónová diera skleníkový efekt? (podstatne nie)
- Prečo je antropogénny skleníkový efekt hrozbou pre našu planétu? Spôsobí nárast globálnej teploty o 3℃ do konca 21. storočia veľké zmeny oproti súčasnosti? (Aké sú dôsledky globálneho otepľovania?)
- Nie je nárast globálnej teploty spôsobený skôr inými faktormi než nárastom skleníkových plynov? (zvýšenou slnečnou aktivitou, prirodzeným kolísaním klímy, odvodňovaním pôdy...)
- Greenwashing
- Klimatická úzkosť
- Vplyv textilného priemyslu na globálne otepľovanie

6 Diskusia a záver

Pri vyučovaní o skleníkovom efekte je dobré spomenúť aj pôvod samotného názvu tohto javu. Často panuje mylná predstava, že procesy v atmosfére a skleníku sú fyzikálne rovnaké, len inej mierky. Kým pri skleníkoch podstatnú úlohu v zadržiavaní tepla majú steny skleníka, ktoré mechanicky zabraňujú premiešavaniu vzduchu a tým aj jeho ochladeniu, pri skleníkovom efekte hrá podstatnú úlohu proces absorpcie žiarenia.

Zároveň je pri vyučovaní o skleníkovom efekte potrebné dávať pozor na množstvo nesprávnych grafík, ktoré sa v literatúre bežne vyskytujú a môžu študentov viesť k budovaniu miskoncepcií. Často sa napríklad skleníkové plyny zobrazujú iba v jednej vrstvičke atmosféry (napríklad ako obruč okolo Zeme). Ďalej, mnohé ilustrácie napríklad zanedbávajú žiarenie, ktoré prenikne z atmosféry do vesmíru. Viac o problematike nesprávnych grafík, ako aj vhodné ilustrácie možno nájsť v [Miléř, Hollan a kol., 2013].

Výučba skleníkového efektu navrhnutá v tomto článku zatiaľ nebola vyskúšaná v praxi.

Zoznam použitých appletov:

Applet 1: žiarenie absolútne čierneho telesa
- https://phet.colorado.edu/sims/html/blackbody-spectrum/latest/blackbody-spectrum_en.html

Applet 2: skleníkový efekt
- https://phet.colorado.edu/sims/html/molecules-and-light/latest/molecules-and-light_en.html

Literatúra

[Barát, Pecho a kol., 2020] BARÁT, Andrej, Jozef PECHO a Slovensko GREENPEACE, 2020. Dopady klimatickej krízy na Slovensko [online]. Dostupné na: https://storage.googleapis.com/planet4-slovakia-stateless/2020/02/54e4fe6f-gp-dopady-klimat-krizy-slovensko-screen-2.pdf

[COPERNICUS, 2014] COPERNICUS, 2014. Surface Albedo PROBA-V [online]. Dostupné na: https://land.copernicus.eu/global/products/sa

[Dhaniyala, 2011] DHANIYALA, Suresh, 2011. Blackbody radiation and greenhouse effect [online]. Dostupné na: https://www.clarkson.edu/sites/default/files/2018-11/Greenhouse_effect_unit.pdf

[Hollan a Miléř 2014] HOLLAN, Ján a Tomáš MILÉŘ, 2014. Klima a koloběhy látek: jak funguje klimatický systém Země, proč a jak se klima mění. Brno: Masarykova Univerzita, Pedagogická fakulta. ISBN 978-80-210-7109-4.

[Horváth a Horváthová 2013] HORVÁTH, Peter a Martina HORVÁTHOVÁ, 2013. Vlnová optika interaktívne. Šoltésove dni 2012 a 2013, Zborník príspevkov z odbornej konferencie. 2013, s. 93–103.

[Hruška, 2012] HRUŠKA, Martin, 2012. Počítačom podporované experimenty z oblasti meteorológie-využitie školského spektrometra pri experimentálnej činnosti žiakov. V: Meteorológia a klimatológia vo vyučovaní III: Slnko a vzduch [online]. Stará Lesná: Geofyzikálny ústav SAV, s. 115–119. ISBN 978-80-85754-25-4. Dostupné na: https://www.yumpu.com/xx/document/read/28703399/zbornik-prispevkov-astronomicky-ustav-sav

[Lutgens a Tarbuck, 2013] LUTGENS, F. K. a E. J. TARBUCK, 2013. The Atmosphere: An Introduction to Meteorology. 12. editio. B.m.: Pearson Education, Inc, USA.

[Miléř, Hollan a kol., 2013] MILÉŘ, Tomáš, Ján HOLLAN a Jindřiška SVOBODOVÁ, 2013. Climate Change Education for Physics Teachers. ICPE-EPEC [online]. 2013, s. 561–569. Dostupné na: http://amper.ped.muni.cz/~jhollan/gw/activities/ClimChange_Education.pdf?fbclid=IwAR016rI

MAA4fk03uH8tKOxRDpbn2ULLmYU41eaN6dtwKyD82n0H4zghG1Fg

[Mutlaq, no date] MUTLAQ, Jasem, no date. Star colors and temperatures. The KStars handbook.

[Sokolik, 2009] SOKOLIK, N. Irina, 2009. Absorption by atmospheric gases in the IR, visible and UV spectral regions [online]. Dostupné na: http://irina.eas.gatech.edu/EAS8803_Fall2009/Lec6.pdf

[Tasnádi, 2013] TASNÁDI, Anikó, 2013. Energy, Power and Climate Changein Physics Lessons. Physics Competitions [online]. 2013, roč. 15, č. 1 & 2, s. 65–75. Dostupné na: http://wettbewerbe.ipn.uni-kiel.de/ipho/wfphc/data/journal/PhysicsCompetitions_Vol_15_No_1u2_2013_10.pdf?fbclid=IwAR144gQ_gPzKPNnwRKM5oXmZxMp24djdBOhqOBNdQQEMY-I-eRbt93JRicc

[Thompson, Genuis a kol. 2019] THOMPSON, Amanda, Katrina GENUIS, Joseph ZONDERVAN, Rachel HISLOP-HOOK, Mckenzie OLIVER, Shawn RITTER, Peter MAHAFFY a Brian MARTIN, 2019. IR Windows for Greenhouse Gases [online]. 2019. B.m.: Kings center for visualisation in science. Dostupné na: http://www.kcvs.ca/site/projects/chemistry_files/CO2/co2new.swf

[Štátny pedagogický ústav, 2015a] Štátny pedagogický ústav, 2015a. Inovovaný štátny vzdelávací program pre 2. stupeň ZŠ [online]. 2015. Dostupné na: https://www.statpedu.sk/sk/svp/inovovany-statny-vzdelavaci-program/inovovany-svp-2.stupen-zs/

[Štátny pedagogický ústav, 2015b] Štátny pedagogický ústav, 2015b. Inovovaný Štátny vzdelávací program pre gymnáziá [online]. 2015. Dostupné na: https://www.statpedu.sk/sk/svp/inovovany-statny-vzdelavaci-program/inovovany-svp-gymnazia-so-stvorrocnym-patrocnym-vzdelavacim-programom/

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 299
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Silvia Novotná, Peter Demkanin

Kontext voda v dizajne vyučovacích hodín fyziky osemročného gymnázia

Silvia Novotná[1*] Peter Demkanin[1‡§]
[1] KDMFI, FMFI UK, Mlynská Dolina, 842 48 Bratislava

V tejto práci sa zaoberáme využívaním kontextu voda vo fyzikálnom vzdelávaní. Vychádzame z prístupov opísaných tímom okolo Sawyera (2014). Využívame celostný (holistický) pohľad na žiaka a model osobnosti Cloningera (Moreira a kol, 2021). Nezameriavame sa len na množstvo získaných vedomostí, ale aj na rozvíjanie jeho schopností, na rozvoj prírodovednej gramotnosti. Sústreďujeme sa na zlepšovanie schopnosti získavať poznatky sám, kedy učiteľ usmerňuje činnosti žiaka a skupiny žiakov a nielen ako ten, ktorý odovzdáva hotové informácie.

V praktickej časti našej práce najviac priestoru venujeme rozvoju schopností žiaka pozorovať a komunikovať výsledky pozorovania. Výskum sme realizovali na vzorke 38 študentov 1. ročníka prírodovedne zameraných odborov VŠ, teda študentov pol roka po maturite. Študenti dostali nasledovné zadanie: „*Prázdnu plastovú fľašu uzatvoríte, odfotíte a vložíte do mrazničky. Po 24 hodinách ju vyberiete a odfotíte. Pozriete sa, ako sa menila fľaša počas jej zohrievania späť na izbovú teplotu.*“



Obr.1: fľaša pred a po vybratí z mrazničky

Odpovede sme podrobne analyzovali a vybrali sme 10 najrôznejších, ktoré sme aj ohodnotili podľa nami zostavených kritérií.

Zo získaných odpovedí sme zistili, že študenti pravdepodobne neboli zvyknutí na takýto typ úlohy a nevedeli, ako by odpoveď na takéto zadanie mohla približne vyzerať. Niektorí to poňali veľmi stručne, iní sa rozpísali. Po analýze sme usúdili, že študentov by bolo vhodné nasmerovať pomocou otázok, ktoré by sme im ďalej kládli a naviedli ich tak k tomu, aby si všimli viacej detailov a kvalitnejšie ich opísali. Mali by naviesť študenta na ešte podrobnejšiu analýzu celej pozorovanej situácie. Cieľom týchto otázok nie je len to, aby študenti napísali viacej detailov, ktoré spozorovali, ale to, aby sa naučili lepšie vykonávať úlohy zamerané na pozorovanie a aby vedeli zapisovať výsledky merania. Kladené otázky môžu do značnej miery zlepšiť schopnosti študentov aj mimo úloh zameraných na pozorovanie. Získané skúsenosti môžu aplikovať aj pri fyzikálnych experimentoch a dokonca aj na iných predmetoch (na biológii, chémii).

Ukážka niekoľkých smerujúcich otázok:

- *Odkiaľ sa zobral ľad na fľaši?*
- *Môžeme pozorovanie vykonávať aj inak ako očami?*
- *Prečo sa fľaša zdeformovala?*
- *Čo sa dialo vo vnútri fľaše po vybratí z mrazničky?*

Pri tvorbe smerujúcich otázok sme použili metódu skefoldingu. Využili sme najmä prístup výskumníčky Van de Pol a kol. (2010).

Otázky je možné použiť aj v rámci formatívneho hodnotenia, t.j. hodnotenia, ktoré sa nezapočítava do celkového (sumatívneho) hodnotenia ovplyvňujúceho výslednú klasifikáciu. Opäť by to slúžilo na to, aby sa študenti naučili lepšie robiť pozorovania, primeranejšie zapisovať, čo vidia a všímať si viacej drobností, ktoré sa pri danom pozorovaní dejú.

Literatúra

Van de Pol, J., Volman, M. & Beishuizen, J. Scaffolding in Teacher–Student Interaction: A Decade of Research. *Educ Psychol Rev* **22,** 271–296 (2010). https://doi.org/10.1007/s10648-010-9127-6

Sawyer, R. K. *The Cambridge Handbook of The Leaning Sciences,* Cambridge University Press (2014)

Moreira, P.A.S., Inman, R.A., Cloninger, K. & Cloninger, C.R. (2021), Student engagement with school and personality: a biopsychosocial and person-centred approach. *Br J Educ Psychol* e12388. https://doi.org/10.1111/bjep.12388

* silvia.novotna@icloud.com
‡ peter.demkanin@uniba.sk
§ Školiteľ

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 300
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Daša Červeňová, Peter Demkanin

Aktivizácia žiakov na hodinách fyziky

Daša Červeňová[1]* Peter Demkanin[1‡§]
[1] KDMFI, FMFI UK, Mlynská Dolina, 842 48 Bratislava

Počas štúdia na univerzite sa ako budúci učitelia fyziky, na dennom poriadku dostávame pred neľahkú úlohu – stať sa plnohodnotnými začínajúcimi učiteľmi, každý z nás so svojim s unikátnym vyučovacím štýlom. Súčasťou našej cesty k tomuto cieľu sú okrem poznatkov odborníkov na didaktiku aj rozhovory, či diskusie na rôzne témy, ktorých spoločným centrom je školstvo. Je prirodzené, že sa všetci snažíme o to, aby naši budúci žiaci boli na našich hodinách aktívni. Za poslednú dobu sa čoraz viac pri problematike aktívnej práce žiakov stretávame s výrokom: „Na školách je málo hodín fyziky.“ Je to však správny postoj? Je možné považovať tento argument za dôvod, prečo žiaci slovenských škôl na hodinách fyziky nemajú dostatočný priestor na aktívnu prácu?

V našom príspevku prezentujeme plány, ako sa ďalej venovať problematike aktivizácie žiakov. Zameriavame sa najmä na rozvoj jednej z foriem bádateľsky orientovaného vyučovania, konkrétne riadenému žiackemu bádaniu podporovanému skefoldingom. Počas tohto druhu vyučovania učiteľ pomáha študentom im blízkym jazykom formulovať argumentami podložené tvrdenia pomocou otázok a aktívneho počúvania. Počas objavovania a bádania učiteľ vedie žiakov k metakognitívnej činnosti, ktorá rozvíja ich vedecké zdôvodňovanie a jazykové schopnosti. Prírodovedné bádanie takisto podporuje kritické a kreatívne zmýšľanie o výskume a návrhu jeho realizácie, takisto ako aj identifikáciu predpokladov a alternatívnych vysvetlení. Študenti by sa mali naučiť oceniť a rešpektovať nápady iných, nadobudnúť schopnosť reagovať na problémy aj na úrovni etických otázok, rozvíjať ich zmysel pre zodpovednosť ako členov lokálnych a globálnych komunít.

Tromi základnými charakteristikami skefoldingu sú reagovanie na aktuálnu situáciu (contingency), slabnúca, postupne odbúdajúca podpora žiaka a prenos zodpovednosti. Počas skefoldovania žiak/študent postupne preberá zodpovednosť za svoje učenie, pričom zodpovednosť chápeme ako schopnosť a kompetenciu vykonávať kognitívnu a metakognitívnu aktivitu. Pod pojmom kontingentnosť (contingency) rozumieme neustále sa meniaci smer vyučovacej hodiny, ktorý je v každom okamihu určený aktuálnymi reakciami a potrebami študentov.

Ďalej sa plánujeme venovať aplikácii šiestich základných princípov a dvadssaťjeden zásad učenia vychádzajúcich z neurovied v prepojení na kontingentnosť ako jednu z troch charakteristík skefoldingu. Medzi šesť základných princípov učenia sa radia unikátnosť, rozličné spôsobilosti, predchádzajúca skúsenosť, neustále zmeny v mozgu plasticita mozgu a kombinácia pamäte a pozornosti ako učenie. Zásady učenia sú konštrukty zaznamenané v procese učenia charakteristické vysokou variabilitou pre každého človeka. Sú nimi motivácia, emócie a kognícia, stres, úzkosť, depresia, výrazy tváre, tón hlasu, pozornosť, fyzická aktivita, a ďalšie.

V ďalšej činnosti sa okrem iného plánujeme zamerať na implementovanie vyššie spomenutých princípov, zásad učenia a spolu s nimi spojenými poznatkami do výučby fyziky, ako aj objasnenie prepojenia týchto princípov s charakteristikami skefoldingu a ich následnú aplikáciu do vyučovacieho procesu realizovaného v rámci programov International Baccalaureate.

Literatúra

Demkanin P. 2018 *Didaktika fyziky*, Bratislava: Univerzita Komenského v Bratislave, ISBN 978-80-223-4374-9

International Baccalaureate Organization 2014 *Middle Years Programme Science Guide*, Cardiff: Ineternational Baccalaureate Organization (UK) Ltd

Tokuhama–Espinosa, T. 2021 *Bringing the Neuroscience of Learning to Online Teaching: : An Educator's Handbook* Teachers College Press

Demkanin P., Novotná S. 2021 *Selected aspects of tutoring and scaffolding pre-service physics teacher*, EDULEARN21 Proceedings, DOI: 10.21125/inted.2021.1814

* cervenovadaska@gmail.com
‡ peter.demkanin@uniba.sk
§ školiteľ

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 301
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Michaela Mrníková, Peter Demkanin

Niekoľko pohľadov na fyzikálne vzdelávanie na slovenských základných a stredných školách

Michaela Mrníková[1]* Peter Demkanin[1‡]
[1] KDMFI, FMFI UK, Mlynská Dolina, 842 48 Bratislava

Ministerstvo školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky vydáva pre všetky stupne vzdelávania Štátny vzdelávací program (ŠVP), v ktorom sú stanovené všeobecné ciele a kompetencie, ku ktorým má smerovať vzdelávanie jednotlivých vyučovacích predmetov v konkrétnych stupňoch vzdelávania. Cieľmi fyzikálneho vzdelávania na základných a stredných školách podľa ŠVP je napríklad dokázať vysvetliť fyzikálne javy, posudzovať ich užitočnosť pre rozvoj spoločnosti a aplikovať nadobudnuté vedomosti pri riešení fyzikálnych úloh. Ďalším z cieľov ŠVP pre predmet fyzika, a pre našu prácu veľmi záchytným, je, aby žiak vedel nájsť súvislosti medzi fyzikálnymi javmi, ktoré súvisia s lokálnymi a globálnymi problémami spoločnosti.

Ciele fyzikálneho vzdelávania uvedené v ŠVP sú jasne stanovené a mali by byť splnené po ukončení konkrétneho stupňa (konkrétne ISCED 2 a 3). Nastáva však otázka, ako chce učiteľ dospieť k ich dosiahnutiu.

Mnoho javov školskej fyziky sa dá opísať jednoduchými fyzikálnymi zákonmi a učiteľ ich môže demonštrovať na zaujímavých experimentoch a meraniach. Preto sú experimenty povinnou súčasťou vyučovania fyziky, nie len istou formou spestrenia. Na hodinách fyziky sa dá taktiež rozvíjať žiacka kreativita. Jednou z takýchto aktivít, ktoré môže učiteľ využiť, je aj zaradenie žiakom plánovaného experimentu (ŽPE) do procesu vyučovania. ŽPE je forma vyučovania, kedy je zadaná konkrétna téma, na ktorú má žiak vytvoriť experiment, pomocou dostupných pomôcok – či už doma, alebo aj vo fyzikálnom laboratóriu. ŽPE sa zvyčajne rieši niekoľko dní, a žiak si teda môže naplánovať aj použitie pomôcok a materiálov, ktoré sú častokrát ľahko dostupné.

Ciele našej budúcej práce sú orientované aj na zistenie porozumenia jednotlivým pojmom a javom v aplikáciách do rôznych kontextov bežného života.

Táto problematika je úzko spojená s pojmami ako motivácia alebo záujem. Čo sa týka motivácie, tú musia mať aj učitelia a aj žiaci, aby vyučovací proces prebiehal tak, ako má a aby boli splnené všetky ciele (nielen) fyzikálneho vzdelávania podľa ŠVP. Zo strany učiteľa musí byť motivácia žiakov nielen niečo naučiť, ale im aj dané učivo podať takou formou, aby bolo pre nich zaujímavé a v čo najpraktickejšej a najvyužiteľnejšej forme. Každý učiteľ by mal byť totiž okrem svojich aprobačných predmetov vzdelaný aj v oblasti pedagogicko-psychologických vied. Na základe týchto poznatkov by mal byť schopný viesť žiakov tak, aby aj videli zmysel v tom, čo v rámci fyzikálneho vzdelávania robia a aby vytvoril v triede tvorivé prostredie na rozvoj potenciálu žiakov správnym smerom.

Ďalšou časťou, ktorú by sme chceli v rámci našej budúcej práce rozoberať je aj tvorivosť učiteľa. Podľa Abrahama Maslowa je výkon ľudí možné zvyšovať až na hranice možností, ak budú uspokojené okrem materiálnych aj sociálne potreby, medzi ktoré patrí sebarealizácia a sebaaktualizácia (potreby, ktoré sú na vrchu Maslowovej pyramídy). Sebaaktualizácia je častokrát definovaná ako realizácia vlastných potenciálnych schopností a zručností. Maslow chápe sebaaktualizáciu ako naplnenie človeka svojím vlastným zmyslom. Sebaaktualizáciu môžeme opísať aj ako potrebu stať sa lepším a tvorivejším človekom. Učiteľ by mal mať primerane naplnené všetky potreby, včítane sebaaktualizácie v oblastiach potrebných pre výkon povolania učiteľ fyziky.

Za základ našich plánov okrem štúdia teoretických východísk k téme pokladáme aj zistenie pohľadu žiakov a učiteľov na fyzikálne vzdelávanie na základných a stredných školách – v čom vidia najslabšie stránky fyzikálneho vzdelávania, čo by sa dalo zlepšiť alebo upraviť, a čo by sa malo podľa ich názoru úplne vylúčiť. Údaje chceme získavať z dotazníkov (rozdielnych pre učiteľov a žiakov). V žiackych dotazníkoch budú otázky zamerané na zistenie záujmu, nadšenia, postojov a motivácie na predmete fyzika.

Literatúra

Tokuhama-Espinosa, T. 2019 *Five Pillars of the Mind: Redesigning Education to Suit the Brain 1st Edition* W. W. Norton & Company

Demkanin P. 2018 *Didaktika fyziky*, Bratislava: Univerzita Komenského v Bratislave, ISBN 978-80-223-4374-9

* michael.mrnikova@gmail.com
‡ peter.demkanin@uniba.sk

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 302–307
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Lucia Regulyová, Monika Dillingerová

Geometrické miskoncepcie žiakov ZŠ

Lucia Regulyová[1]* Monika Dillingerová[1‡§]

[1] Katedra didaktiky matematiky, fyziky a informatiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstrakt

Miskoncepcie sú považované za jedny z najdôležitejších bariér pri učení sa matematiky. V našom príspevku sa zaoberáme témou miskoncepcií v geometrii na základnej škole. V práci sme najprv na základe rozhovorov s dvoma vyučujúcimi matematiky identifikovali 8 častých miskoncepcií u žiakov navštevujúcich 9. ročník alebo kvartu. Ďalej sme použili dotazníkovú metódu na zistenie troch najčastejších miskoncepcií. Na jednu z nich sme navrhli pracovný list ako prostriedok jej odstránenia.

Kľúčové slová: miskoncepcia, odstránenie miskoncepcie, geometria, pracovný list

1 Miskoncepcia

Miskoncepcia je bežný jav, ktorý sprevádza výučbu nielen matematiky. S týmto pojmom sme sa stretli aj v spojení s výučbou fyziky, biológie či chémie. V literatúre sa nachádza mnoho definícií pojmu *miskoncepcia*. Pre účely našej práce sa stotožňujeme s nasledovnou definíciou: „miskoncepcia je nesprávne pochopená, zapamätaná informácia, ktorú si žiak taktiež nesprávne zaradil do hierarchického systému, a tak sa zmenil jeho pohľad na fungovanie sveta“ (Bystrianska a Čerňanský, 2013). Podľa nich do kategórie miskoncepcií zapadá aj nesprávne zapamätaná či naučená informácia.

2 Identifikácia miskoncepcií v geometrii na ZŠ

Jedným z cieľov našej práce je zistiť, aké sú najčastejšie miskoncepcie v geometrii na ZŠ. Identifikáciu častých miskoncepcií v geometrii sme určili nielen medzi žiakmi 2. stupňa ZŠ ale aj u žiakov 1. – 4. ročníka gymnázia s osemročným vzdelávacím programom. Náš výskum sme uskutočnili v školskom roku 2019/2020. Na základe neštruktúrovaných rozhovorov s dvoma učiteľkami matematiky s dlhoročnými skúsenosťami, ktoré učia na 2. stupni ZŠ (učiteľka matematiky pôsobiaca na ZŠ Márie Medveckej v Tvrdošíne) a 8-ročnom gymnáziu (učiteľka matematiky pôsobiaca na Gymnáziu Martina Hattalu v Trstenej), sme identifikovali oblasti geometrie spôsobujúce žiakom najväčšie ťažkosti. Konkrétne nás zaujímali oblasti, na ktoré sa žiaci často pýtajú lebo učivu neporozumeli a v ktorých majú žiaci najväčšiu chybovosť napr. v písomných prácach, pri ústnych odpovediach... . Brali sme do úvahy výkonový a obsahový štandard celého tematického okruhu Geometria a meranie podľa inovovaného štátneho vzdelávacieho programu pre 2. stupeň ZŠ a pre 1. – 4. ročník gymnázia s osemročným vzdelávacím programom.

2.1 Metódy zberu dát

Na základe analýzy rozhovorov sme urobili prienik miskoncepcií, ktoré nám ponúkli obe vyučujúce matematiky. V prieniku sme celkovo získali osem častých žiackych miskoncepcií v tematickom okruhu Geometria a meranie. Tie sme použili a vytvorili dotazník pre učiteľov. Pre dotazník, ako metódu zberu dát, sme sa rozhodli najmä preto, lebo je to „výskumný nástroj, vďaka ktorému môžeme pomerne rýchlo a jednoducho získať údaje od veľkého počtu respondentov. Môže sa však využiť aj v prípade výskumu realizovaného na menšom počte respondentov.“ (Bačíková a Janovská, 2018)

Položky nami vytvoreného dotazníka pozostávali z ôsmich zistených miskoncepcií sformulovaných do oznamovacích viet. Všetky položky boli doplnené o grafickú percentuálnu škálu, no respondenti mohli uviesť číselný údaj v percentách mimo tejto škály. Úlohou respondentov bolo podľa vlastných skúseností na vyobrazenej percentuálnej škále označiť (príp. napísať) takú hodnotu percent, ktorá reprezentuje približné zastúpenie žiakov priemernej triedy 9. ročníka príp. kvarty vykazujúcich uvedenú miskoncepciu. Cieľom dotazníka bolo zistiť 3 najčastejšie miskoncepcie žiakov, aby sme sa ďalej mohli venovať návrhu postupu ich odstránenia.

* lucia.zuffova359gmh@gmail.com
‡ monika.dillingerova@gmail.com
§ Školiteľka

2.2 Výskumný súbor

O vyplnenie dotazníka sme požiadali učiteľov matematiky na troch rôznych školách. Z toho boli dve základné školy – ZŠ s MŠ v Nižnej a ZŠ Márie Medveckej v Tvrdošíne, a jedno gymnázium s osemročným vzdelávacím programom – Gymnázium Martina Hattalu v Trstenej. Celkovo nám dotazník vyplnilo 9 učiteľov matematiky vyučujúcich na 2. stupni ZŠ a 6 učiteľov vyučujúcich v 1. – 4. ročníku gymnázia s osemročným vzdelávacím programom. Respondentov sme vyberali z dostupného výberu učiteľov matematiky na 2. stupni ZŠ a 1. – 4. ročník gymnázia s osemročným vzdelávacím programom.

V tab. 1 uvádzame názov školy s počtom respondentov.

Tabuľka 1: Zoznam škôl zúčastnených vo výskume s počtami respondentov

názov školy	počet respondentov
ZŠ s MŠ Nižná	4
ZŠ Márie Medveckej Tvrdošín	5
Gymnázium Martina Hattalu Trstená	6
spolu	**15**

Nízky počet respondentov sa nám zdal pre účely našej práce postačujúci. Každý z učiteľov má niekoľkoročnú prax vo vyučovaní matematiky. Počas týchto rokov všetci respondenti vyučovali matematiku veľké množstvo žiakov. Na základe týchto skúseností majú náležitý obraz o priemernej triede 9. ročníka alebo kvarty. Navyše dotazníkom sme sa snažili iba vybrať tie miskoncepcie, ktoré sú podľa učiteľov medzi žiakmi zastúpené najväčšmi.

2.3 Metódy spracovania a vyhodnotenia dát

Dáta získané z dotazníkov sme spracovali s využitím softvéru MS Excel. Na vyhodnotenie dotazníka sme použili výpočet aritmetického priemeru. Aritmetický priemer získaných dát pre percentuálne zastúpenie žiakov v triede vykazujúcich danú miskoncepciou sme vypočítali osobitne pre ZŠ a osobitne pre gymnázium s osemročným vzdelávacím programom. Taktiež sme vypočítali aritmetický priemer zo všetkých získaných dát. Takto vypočítaný aritmetický priemer bol pre nás adekvátnym prostriedkom na výber troch najčastejšie zastúpených miskoncepcií u žiakov.

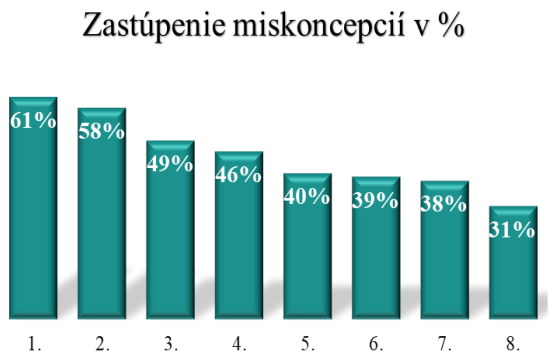
3 Výsledky práce a diskusia

Na základe výsledkov (výpočtu aritmetického priemeru %) sme vybrali spomedzi nami zistených ôsmich miskoncepcií tri najčastejšie sa vyskytujúce medzi žiakmi. Zoznam nami zistených miskoncepcií, ktoré boli použité v dotazníku pre učiteľov, zoradené podľa výsledkov od najčastejšie sa vyskytujúcich medzi žiakmi:

1. Žiaci na otázku „Čo hovorí Pytagorova veta?“ odpovedajú $c^2 = a^2 + b^2$ (pre žiakov znamená Pytagorova veta uvedenú rovnosť aj pri zmenenom značení napr. a – prepona, b, c – odvesny).
2. Žiaci zlyhávajú v úlohách, v ktorých výška útvaru neleží v jeho vnútri (tupouhlý trojuholník). Nie je im jasné, že výška má tri významy: vzdialenosť, úsečka, priamka.
3. Žiaci považujú za 4-uholníky len útvary: štvorec, obdĺžnik, príp. rovnobežník, lichobežník.
4. Žiaci vždy pri riešení úloh očakávajú ostrouhlý trojuholník, príp. pravouhlý trojuholník.
5. Žiaci zlyhávajú v úlohách na výpočet obvodu a obsahu. Nie je im jasný rozdiel a zlyhávajú v slovných úlohách, v ktorých sú zadané údaje navyše.
6. Pri riešení úloh ich tupouhlý trojuholník prekvapí (žiaci majú problém s tupým uhlom).
7. Žiaci robia chyby pri premenách jednotiek (nie je im jasný koncept premieňania jednotiek dĺžky, obsahu či objemu).
8. Žiaci majú problém s rozlíšením polomeru a priemeru a pletie sa im aj ich označenie.

Pre jednoduchosť a prehľadnosť v ďalšom texte budeme používať číselné označenie miskoncepcií z predchádzajúceho zoznamu.

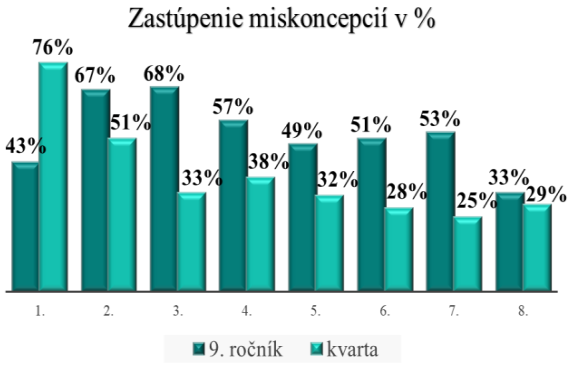
Ako prvý sme vypočítali aritmetický priemer percent zastúpenia miskoncepcií v triede 9. ročníku príp. kvarte zo všetkých získaných dát (bez rozdielu či respondent učil na 2. stupni ZŠ alebo osemročnom gymnáziu). Nasledovný graf zobrazuje výslednú situáciu.



Obr. 1: Zastúpenie jednotlivých miskoncepcií u žiakov v priemernej triede 9 ročníka príp. kvarty v %.

Ak sa pozrieme bližšie na graf, môžeme si všimnúť, že podľa vyučujúcich matematiky na 2. stupni ZŠ a osemročnom gymnáziu prvé tri miskoncepcie v priemere vykazuje približne polovica žiakov v triede a viac. Na grafe môžeme sledovať, že miskoncepciu, ktorá z dotazníka vyšla ako najmenej častá, má v priemernej triede 9. ročníka príp. kvarty takmer tretina žiakov. Táto miskoncepcia sa týka koncepcie priemeru a polomeru kružnice a kruhu, ktorá sa učí už v 4. ročníku ZŠ. Je pre nás zaujímavé, že podľa výsledkov z dotazníka je tento koncept u tretiny žiakov bežnej triedy 9. ročníka príp. kvarty ešte nepochopený a problematický. Na základe tohto výsledku sa domnievame, že výskyt miskoncepcií u žiakov v geometrii na ZŠ je pomerne častý jav, ktorý sa vekom a ani opakovaným štúdiom nezmení u mnohých žiakov.

V nasledujúcom kroku našej práce sme počítali aritmetický priemer percent osobitne podľa dát zo ZŠ a osobitne podľa dát získaných z osemročného gymnázia. To nám dáva priestor na porovnanie situácie na ZŠ a osemročnom gymnáziu.



Obr. 2: Porovnanie zastúpenia jednotlivých miskoncepcií u žiakov v priemernej triede 9. ročníka a kvarty v %.

Ako prvé si môžeme na grafe všimnúť, že, až na miskoncepciu č. 1 (týkajúca sa konceptu Pytagorovej vety), priemerné hodnoty % podľa dát získaných od učiteľov ZŠ sú vyššie ako podľa dát z osemročného gymnázia. Porovnanie nám tak napovedá rozsiahlejšie zastúpenie miskoncepcií u žiakov navštevujúcich priemernú triedu 9. ročníka ako kvartu. V súčasnosti sa na väčšine gymnázií s osemročným programom robí výberové konanie formou písomných prijímacích skúšok zo slovenského jazyka a aj z matematiky. Výberové konanie slúži na to, aby škola získala tých najlepších žiakov spomedzi všetkých uchádzačov. Predpokladáme, že učitelia preto na žiakov navštevujúcich osemročné gymnázium kladú vyššie nároky ako na žiakov navštevujúcich ZŠ. Žiaci navštevujúci osemročné gymnázium boli vybraní spomedzi ostatných uchádzačov aj na základe ich matematických vedomostí a zručností. Mohli by sme ich považovať za žiakov inteligentnejších, s lepšou pamäťou alebo s viac rozvinutým logickým myslením či viac vytrénovaných v riešení rôznych matematických úloh a problémov, čo by mohlo vplývať na nižší výskyt matematických miskoncepcií. Hlbšie porovnanie žiakov v oblasti matematiky navštevujúcich ZŠ a osemročné gymnázium by mohlo byť predmetom ďalšieho skúmania.

Najväčší percentuálny rozdiel medzi hodnotami % zastúpenia žiakov s miskoncepciou navštevujúcich priemernú triedu 9. ročníka a kvarty má miskoncepcia č. 3. Táto miskoncepcia sa týka konceptu štvoruholníkov. Rozdiel si vysvetľujeme tak, že zatiaľ čo na ZŠ žiaci riešia v drvivej väčšine typicky školské úlohy a pri nich operujú výlučne s útvarmi štvorec, obdĺžnik, rovnobežník a lichobežník, na osemročnom gymnáziu učitelia radia do procesu vyučovania okrem typicky školských úloh aj problémové úlohy. V porovnaní so ZŠ riešia širšiu paletu úloh, v ktorých sa môžu stretnúť aj so všeobecnými štvoruholníkmi. Pri tejto domnienke opäť vzniká priestor na porovnanie vzdelávacieho procesu matematiky na ZŠ a osemročnom gymnáziu.

4 Návrh postupu odstránenia miskoncepcií

Ďalším z cieľov našej práce je navrhnúť postup odstránenia jednej zo zistených najčastejších miskoncepcií. V našej práci sme ako prostriedok odstraňovania zvolili pracovný list.

V súčasnosti sa od učiteľa vyžaduje, aby pre žiakov vytvoril vo vyučovacom procese také prostredie, vďaka ktorému si žiaci osvoja vedomosti vlastnou aktivitou. Na podporu aktivity žiakov na vyučovaní slúži napríklad aj pracovný list. „Pracovné listy sú všetky tlačené a písané texty, ktoré sa vo vyučovacom procese používajú alebo tvoria, aby reprezentovali predmet učenia. Je to učebná pomôcka, v ktorej žiak dopisuje údaje, vystrihuje, dokresľuje, prípadne odpovedá na položené otázky a rieši zadané úlohy. Pracovné listy

obsahujú súbory úloh, ktoré slúžia nielen na precvičenie a upevnenie učiva.“ (Osvaldová, 2017)

Podľa Osvaldovej (2017) využitie pracovných listov je bežný prostriedok aktivizácie žiakov. Učiteľ by si mal vopred premyslieť či pracovný list využije na samostatnú alebo skupinovú prácu, v ktorej časti vyučovacej hodiny ho aplikuje alebo ako si budú žiaci kontrolovať vypracované úlohy (s pomocou učiteľa, samostatne, so spolužiakom v lavici...). Žiaci si pri práci s pracovným listom rozvíjajú svoju samostatnosť či kreativitu. Pracovný list taktiež zvyšuje atraktivitu vyučovacieho predmetu u žiakov a poskytuje rýchlu spätnú väzbu učiteľom a aj samotným žiakom.

Navrhli sme pracovný list zameraný na odstránenie miskoncepcie č. 1. Naším zámerom bolo vypracovať taký pracovný list, ktorý by sme dokázali vyskúšať aj na vyučovaní. Nazvali sme ho *Pytagorova veta*. Pri návrhu pracovného listu sme sa zamerali najmä na jeho obsahovú stránku. Grafická stránka pracovného listu sa môže podľa potreby upraviť a vylepšiť. Na ilustráciu všetkých obrázkov s geometrickými útvarmi sme použili interaktívnu aplikáciu GeoGebra. V pracovnom liste *Pytagorova veta* sme pri odvodzovaní všeobecného tvrdenia použili induktívny prístup. Tóthová (2014) uvádza nasledovné výhody induktívneho prístupu vo výučbe:

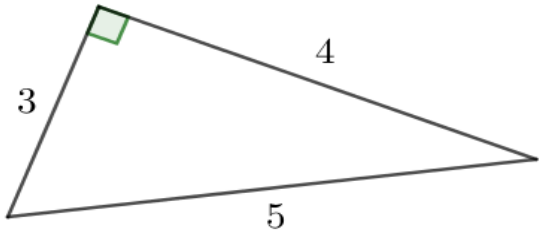
- žiakov povzbudzuje k aktivite a tým ho motivuje
- od žiakov vyžaduje vyššie myšlienkové procesy ako napr. analýza, syntéza, tvorivosť či hodnotenie
- je vhodný najmä pre žiakov, ktorí sa nachádzajú na úrovni konkrétnych operácií (podľa Piagetovej teórie kognitívneho vývinu ide o žiakov vo veku 10-14 rokov, resp. žiakov 2. stupňa ZŠ)

Učiteľ by mal pri vypracovaní pracovného listu plniť podpornú funkciu a žiaka sprevádzať – klásť doplňujúce otázky, diskutovať so žiakmi o ich riešeniach a snažiť sa žiakov nasmerovať správnym smerom. Počas štúdia na vysokej škole aj počas našej praktickej činnosti sme sa stretli s dobrými príkladmi praxe induktívneho vyučovania. Mali sme možnosť sledovať, že žiaci boli pri takomto vedení hodín aktívnejší a prejavovali väčší záujem o vyučovanie. Aj na základe spomenutých výhod sme sa rozhodli odvodiť všeobecné tvrdenie Pytagorovej vety indukciou. Veríme, že induktívny prístup rozvíja u žiakov kompetencie, ktoré sú kľúčové pre ich ďalšie vzdelávanie a budúci život.

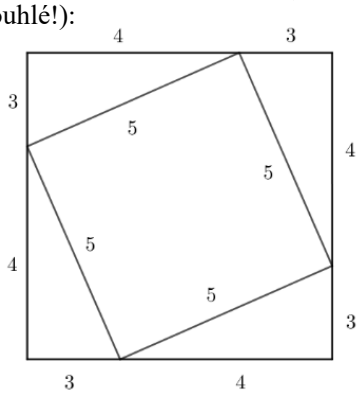
4.1 Pracovný list Pytagorova veta

1. **Úloha:** Daný je pravouhlý trojuholník s dĺžkami strán:

- odvesna $o_1 = 3\ cm$
- odvesna $o_2 = 4\ cm$
- prepona $p = 5\ cm$



Zo štyroch rovnakých pravouhlých trojuholníkov s týmito rozmermi vytvoríme štvorec vyobrazený na Obrázku 1 (aby vznikol štvorec, trojuholníky musia byť pravouhlé!):



Obrázok 1

Chceli by sme vypočítať obsah tohto štvorca. Napadli nás 2 rôzne spôsoby. Doplň chýbajúce pojmy a číselné údaje:

1. **spôsob:**

Obsah štvorca vypočítame ako súčet obsahov útvarov, z ktorých sa štvorec skladá. Štvorec sa skladá zo 4 zhodných _____ _____ a jedného _____, ktorého strana má dĺžku prepony.

Obsah _____ _____ je $S_1 = \frac{\square \cdot \square}{2}$

Obsah _____ je $S_2 = (\square)^2$

Obsah štvorca skladajúceho sa z týchto útvarov je

$$S = 4 \cdot S_1 + S_2$$

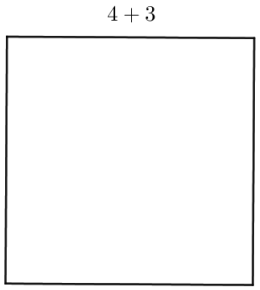
$$S = 4 \cdot \frac{\square \cdot \square}{2} + (\square)^2$$

$$S = 2 \cdot \square \cdot \square + (\square)^2$$

2. **spôsob:**

Obsah tohto štvorca vypočítame podľa vzťahu

$$S = a^2$$



V našom prípade strana a je $a =$ ▢ + ▢.
Preto obsah tohto štvorca je

$$S = (▢ + ▢)^2$$

$$S = (▢ + ▢) \,.\, (▢ + ▢)$$

Roznásobením zátvoriek vieme obsah štvorca zapísať v tvare

$$S = (▢)^2 + 2 \,.\, ▢ \,.\, ▢ + (▢)^2$$

Keďže 1. aj 2. spôsob vyjadrujú obsah toho istého štvorca na Obrázku 1, tieto obsahy sa musia rovnať. Preto platí:

$$2 \,.\, ▢ \,.\, ▢ + (▢)^2 = (▢)^2 + 2 \,.\, ▢ \,.\, ▢ + (▢)^2 \qquad /-2 \,.\, ▢ \,.\, ▢$$

$$(▢)^2 = (▢)^2 + (▢)^2$$

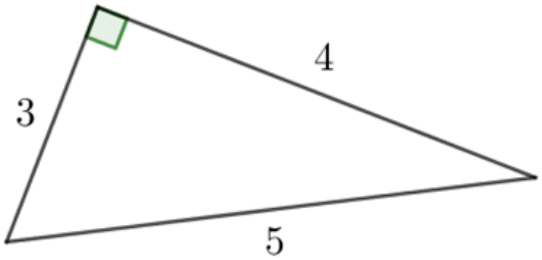
Z tohto tvaru rovnosti vyplýva:
Obsah štvorca s hranou dĺžky __ cm sa rovná súčtu obsahov štvorcov s hranami dĺžky __ cm a __ cm.
Pripomeňme si rozmery nášho zadaného trojuholníka:

- odvesna $o_1 = 3\ cm$
- odvesna $o_2 = 4\ cm$
- prepona $p = 5\ cm$

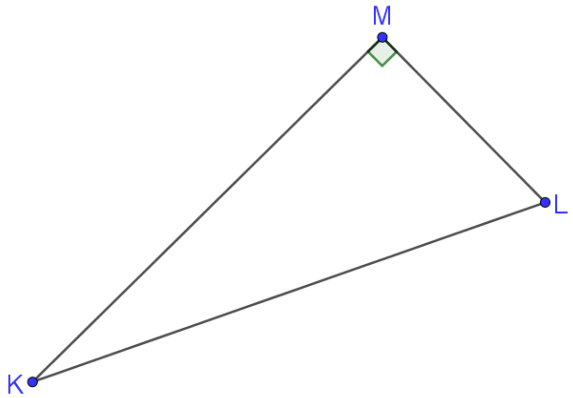
Porovnaním predchádzajúcej vety s rozmermi daného trojuholníka vidíme, že platí:
Obsah štvorca nad _____ sa rovná súčtu obsahov štvorcov nad _____ .

Toto tvrdenie poznáme ako slávnu ***Pytagorovu vetu***.

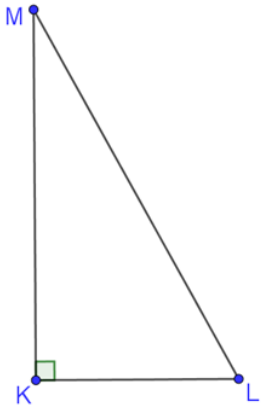
Podľa tvrdenia dokresli do obrázka jednotlivé štvorce, o ktorých Pytagorova veta hovorí:



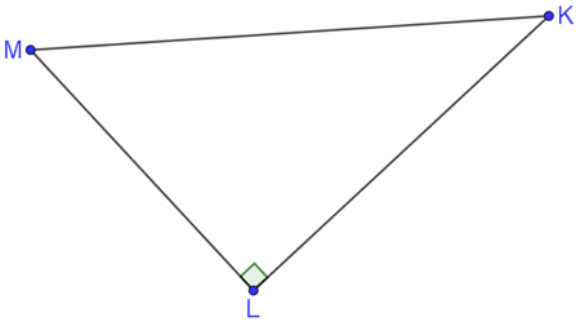
2. Úloha: Je daný trojuholník ΔKLM. K jednotlivým stranám trojuholníka napíš ich pomenovanie.



Prepona je _KL (príp. m)_
Odvesny sú _____ a _____

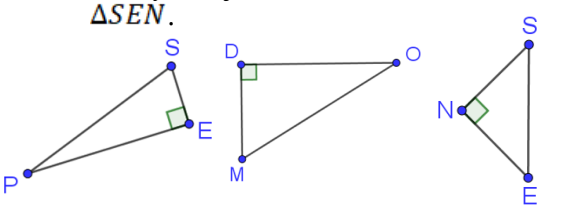


Prepona je _____
Odvesny sú _____ a _____



Prepona je _____
Odvesny sú _____ a _____

3. Úloha: Napíš vzťah Pytagorovej vety k daným trojuholníkom $\Delta PES, \Delta DOM, \Delta SEN$.



_____ _____ _____

4.2 Zhodnotenie pracovného listu

Pracovný list *Pytagorova veta* sme zostavili so zámerom odstrániť miskoncepciu č. 1. Pracovný list obsahuje 3 úlohy. Na pochopenie koncepcie Pytagorovej vety je najdôležitejšia 1. úloha. Z riešenia tejto úlohy žiak dostane najprv konkrétne a následne aj všeobecné tvrdenie Pytagorovej vety. Úloha je navrhnutá tak, aby žiak postupoval induktívnym myšlienkovým postupom a na základe vlastnej činnosti pochopil koncepciu Pytagorovej vety.

V prvej úlohe sa venujeme tomu, ako platnosť tohto tvrdenia zdôvodniť a upozorňujeme na pravouhlosť. V ďalších dvoch úlohách sa snažíme upriamiť pozornosť žiaka na dôležitosť zmeneného pomenovania vrcholov a strán pravouhlého trojuholníka (rôzneho od ΔABC s pravým uhlom pri vrchole C). V druhej úlohe musí žiak zvládnuť prepojiť pojem prepona a odvesna s obrázkom. V tretej úlohe musí zvládnuť prepojiť obrázok s korektným vzťahom. Tieto modely by mali pomôcť nabúrať stereotyp a prepojiť vzťah s vlastnosťou pravouhlosti a správnym označením.

5 Záver

Všeobecným cieľom matematiky, pre nás najdôležitejším, je, aby si žiak osvojil vedomosti a dokázal ich zmysluplne využiť vo svojom každodennom živote. Úloha geometrie v bežnej praxi je podstatná. Je neoddeliteľnou súčasťou mnohých aspektov života a to z nej robí matematickú disciplínu, ktorú by mali žiaci zvládnuť a rozumieť jej. Požiadavky na jej zvládnutie sú kladené napríklad v odvetviach staviteľstva, umenia, histórie, astronómie, geografie či dizajnu a vplýva taktiež na naše estetické cítenie.

Jedným z cieľov našej práce bolo identifikovať najčastejšie miskoncepcie v geometrii ZŠ. V rámci nášho výskumu sme najprv formou rozhovoru s vyučujúcimi matematiky zmapovali tematický okruh Geometria a meranie a jeho problémové oblasti naprieč 2. stupňom ZŠ a 1. – 4. ročníkom na gymnáziu s osemročným programom. Identifikovali sme tak osem miskoncepcií. Následne sme použili dotazníkovú metódu na zistenie troch najčastejších miskoncepcií v geometrii, čím sa nám podarilo naplniť cieľ. Tento výber sme uskutočnili, aby sme sa im venovali v ďalšom výskume. Najčastejšia miskoncepcia sa týka Pytagorovej vety, druhá najčastejšia miskoncepcia súvisí s výškou v tupouhlom trojuholníku a posledná miskoncepcia sa vzťahuje na štvoruholníky.

Druhým cieľom našej práce bolo navrhnúť postup odstránenia zistených miskoncepcií. Aby sme naplnili tento cieľ, vytvorili sme pracovný list, ktorý slúži na odstránenie miskoncepcie č. 1, s názvom *Pytagorova veta*.

Veríme, že naša práca svojím výskumom a vlastnými návrhmi obohatila čitateľa. Našou snahou bolo upozorniť na to, aby učitelia v praxi kládli dôraz na lepšie porozumenie u žiakov a tým ovplyvňovali aj ich postoj k matematike. Taktiež dúfame, že vnukne čitateľom nové nápady na odstránenie miskoncepcií nielen v geometrii.

Poďakovanie

Chcela by som sa veľmi pekne poďakovať vedúcej mojej záverečnej práce RNDr. Monike Dillingerovej, PhD. za odborné vedenie, cenné rady, ochotný prístup a čas, ktorý mi venovala počas konzultácií.

Taktiež by som sa chcela poďakovať všetkým učiteľom, ktorí sa svojou účasťou podieľali na výskume.

Literatúra

[Bačíková and Janovská, 2018] Bačíková, M. and Janovská, A. (2018). Základy metodológie pedagogicko-psychologického výskumu. Sprievodca pre študentov učiteľstva. *Košice: ŠafárikPress*, 2018. 154 s. ISBN 978-80-8152-695-4

[Bystrianska and Čerňanský, 2013] Bystrianska, M., and Čerňanský, P. (2013). Diagnostika miskoncepcií pri téme hustota. [online] [cit. 2020-10-01] Dostupné z: https://ufv.science.upjs.sk/_projekty/smolenice/pdf_13/09_bystrianska_cernansky.pdf

[Osvaldová, 2017] Osvaldová, Z. (2017). Pracovné listy ako prostriedok aktivizácie žiakov vo vyučovacom procese. In *Edukácia*. [online] [cit. 2021-02-14] Roč. 2, č. 1, s. 194 – 201. ISSN 1339-8725. Dostupné z: https://www.upjs.sk/public/media/15903/Osvaldova_1.pdf

[Tóthová, 2014] Tóthová, R. (2014). Konštruktivistický prístup vo výučbe ako možnosť rozvoja myslenia žiakov. [online] [cit. 2021-03-14] Bratislava: Metodicko-pedagogické centrum, 2014. 90 s. ISBN 978-80-565-0004-0. Dostupné z: https://archiv.mpc-edu.sk/sites/default/files/projekty/vystup/tothova.pdf

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 308–314
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Barbora Kubinová, Monika Dillingerová

Didaktické hry vo vyučovaní matematiky na druhom stupni ZŠ

Barbora Kubinová[1]* Monika Dillingerová[2]‡

[1] Katedra didaktiky prírodných vied, PriF UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava
[2] Katedra didaktiky matematiky, fyziky a informatiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstrakt

V príspevku predkladáme návrhy nových didaktických hier vhodných na zaradenie do vyučovania matematiky na druhom stupni ZŠ. Hry sú venované tematickým celkom percentá a záporné čísla, nakoľko tieto celky sú podľa nášho názoru najťažšími z okruhu *Čísla, premenná a počtové výkony s číslami.* Nami vytvorené hry môžu byť použité v rámci propedeutiky týchto tematických celkov alebo môžu slúžiť ako prostriedok opakovania a upevňovania učiva.
Kľúčové slová: propedeutika, didaktická hra, hra, záporné čísla, zlomky

1 Úvod

Táto práca vznikla odvolávajúc sa na výrok J. A. Komenského, aby sme hľadali spôsoby ako menej učiť a pri tom žiakov naučiť viac. Prvotným impulzom pre vytvorenie tejto práce teda bola myšlienka a snaha učiť žiakov matematiku inak. Prostredníctvom konštruktivizmu učiteľ nepodáva žiakom hotové poznatky, ale dáva žiakom priestor na bádanie a objavovanie. Pri písaní tejto práce sme chceli nadviazať tiež na prirodzené vlastnosti detí, a to hravosť, súťaživosť a zvedavosť.

2 Didaktická hra

V pedagogickom slovníku je didaktická hra definovaná ako „analógia spontánnej činnosti detí, ktorá sleduje (pre žiakov nie vždy zjavným spôsobom) didaktické ciele. Môže sa odohrávať v učebni, v telocvični na ihrisku, v obci, v prírode. Má svoje pravidlá, vyžaduje priebežné riadenie, záverečné vyhodnotenie. Je určená jednotlivcom aj skupinám žiakov, pričom úloha pedagogického vedúceho máva široké rozpätie od hlavného organizátora až po pozorovateľa. Jej prednosťou je stimulačný náboj, pretože prebúdza záujem, zvyšuje angažovanosť žiakov na vykonávaných činnostiach, podnecuje ich tvorivosť, spontánnosť, spoluprácu aj súťaživosť, núti ich využívať rôzne poznatky a schopnosti, zapájať životné skúsenosti. Niektoré didaktické hry sa blížia modelovým situáciám z reálneho života.“ [Průcha, 1998].

Vymedzenie pojmu hra v matematike nie je ustálené a jednotné. Burjan (1991) navrhol nasledovnú terminológiu:

- matematický hlavolam
- solitér
- matematická súťaž
- matematická hra.

Aby sme lepšie porozumeli pojmu hry v matematike, je žiaduce zadefinovať si aj zvyšné vyššie spomenuté pojmy. Pod pojmom matematický hlavolam rozumieme nejakú hádanku, záhadu, ktorú treba vyriešiť (napr. Rubikova kocka). Pod pojmom solitér rozumieme hru, ktorá vyžaduje, aby sme vopred danými a presne predpísanými ťahmi premiestnili predmety z počiatočnej pozície do cieľovej pozície. Solitér je určený pre jedného hráča (napr. Pasiáns). Matematická súťaž obsahuje sériu úloh, ktoré žiaci riešia nezávisle od seba. Ten najlepší z nich je vyhlásený za víťaza (napr. Pytagoriáda). Konečne sa dostávame k pojmu matematická hra. Tá je určená pre aspoň dvoch hráčov, ktorí sa striedajú v ťahoch, pričom sa snažia dosiahnuť vopred stanovený cieľ. Pri matematickej hre dochádza k bezprostrednému ovplyvňovaniu sa hráčov navzájom. Ťah hráča je ovplyvnený ťahom hráča pred ním. Každý tento ťah musí byť samozrejme v súlade s pravidlami hry. Za matematickú hru môžeme považovať každú hru, ktorej pravidlá obsahujú matematické vzťahy, na vykonávanie ťahov hráčov je potrebné osvojenie určitých matematických znalostí a určité kombinačné a kauzálne úlohy umožňujú žiakom nájsť výhernú stratégiu. [Burjan, 1991].

Didaktické hry nie je vhodné do vyučovania zaraďovať všelijako. Ich realizácia a implementácia musí byť vopred dobre premyslená a naplánovaná. Lazorová (2015) rozdelila zaradenie didaktickej hry do vyučovania do 3 fáz. V prvej – **prípravnej fáze**, musí učiteľ zvážiť viacero faktorov. Najdôležitejšie

* barbora.kubinova1995@gmail.com
‡ Monika.Dillingerova@fmph.uniba.sk

je určiť si správny didaktický cieľ a zaradenie do iŠVP. Takisto táto fáza zahŕňa aj záležitosti týkajúce sa realizácie – napr. časová náročnosť, náročnosť na výrobu, náročnosť na vybavenie školy, počet hráčov a iné. Druhou fázou je **aplikačná fáza**. V tejto fáze dochádza k hraniu hry. Pred začiatkom by mala nasledovať krátka motivácia žiakov k hraniu hry a takisto vysvetlenie pravidiel. Učiteľ by si mal ešte pred začiatkom hry overiť, či všetci žiaci pravidlám rozumejú. Takisto by mal byť pripravený zodpovedať otázky zo strany žiakov. Počas hrania by mal byť učiteľ žiakom k dispozícii, aby im mohol prípadne pomôcť, ak sú ešte nejaké nejasnosti v pravidlách. Učiteľ počas hrania hry môže do priebehu hry zasahovať, ale takisto môže byť aj pozorovateľ. Poslednou fázou je **hodnotiaca fáza**. Po skončení hry sa žiada zhodnotiť hru samotnú, jej priebeh a prácu žiakov. Žiaduce je aj odmeniť víťazov. Dôležité je však pochváliť aj slabších žiakov za ich snahu. Veľmi dôležitá je aj samotná spätná väzba od žiakov. Učiteľ tak na základe tejto spätnej väzby môže hru modifikovať a upraviť tak, aby bola vhodným nástrojom do vyučovania. [Lazorová, 2015].

Ako nič v živote, ani didaktické hry nie sú dokonalé. Klady však prevyšujú nad zápormi. Keďže je didaktická hra aktivizujúcim prvkom vo vyučovaní, značne podporuje priaznivú klímu na hodinách matematiky a zbavuje žiakov stresu a strachu z matematiky. Pozitívne ovplyvňuje aj vzťah žiaka k predmetu. Hra rozvíja myslenie žiakov, logické uvažovanie, schopnosť riešiť problémové situácie, hľadať súvislosti medzi javmi, objavovať zákonitosti a stratégie. Podnecuje ich k súťaživosti. Vďaka prítomnosti pravidiel učí žiakov rešpektovať pravidlá, učí ich disciplíne, čestnosti a spravodlivosti. Keďže sú hry pre minimálne dvoch hráčov, dochádza medzi žiakmi k sociálnym interakciám, vďaka ktorým sa žiaci naučia pracovať v tímoch, rešpektovať sa navzájom a komunikovať medzi sebou. V neposlednom rade je hra vhodným prostriedkom na to, aby učiteľ spoznal svojich žiakov aj z inej stránky a vytvoril si s nimi hlbší vzťah. Medzi najväčšie negatívum jednoznačne patrí, ak hra nespĺňa didaktický cieľ. V prípade hry pre skupiny často dochádza v triede k hluku, čo môže vyrušovať ostatné triedy. Takisto sa môže stať, že hra aj napriek všetkým snahám učiteľa žiakov nezaujme alebo je pre nich príliš komplikovaná. Naopak, ani jednoduché hry nie sú vhodné na zaradenie do vyučovania. [Lazorová, 2015].

3 Teoretické východiská

Aj napriek tomu, že matematika na základnej škole je pomerne ľahká, stále sa v nej nachádzajú tematické celky, ktoré sú pre žiakov ťažko pochopiteľné a náročné. Z nášho pohľadu sú to hlavne záporné čísla a zlomky. Práve pre svoju náročnosť by nemali tieto tematické celky vstupovať do vyučovania náhle, ale žiaci by mali byť na ich osvojovanie pripravovaní postupne v rámci propedeutiky. Takisto aj ich osvojovanie by malo byť realizované zážitkovou formou, napríklad pomocou didaktických hier.

Záporné čísla vstupujú podľa iŠVP do vyučovania v 8. ročníku ZŠ, resp. v 3. ročníku osemročných gymnázií, a to v nasledovnom rozsahu:

- vymenovať príklady použitia kladných a záporných čísel v bežnom živote
- čítať a zapisovať čísla z čítaného a počutého textu, z tabuliek a grafov
- určiť opačné číslo k ľubovoľnému číslu
- vymenovať dvojice navzájom opačných čísel
- porovnávať celé a racionálne čísla a usporadúvať ich do radov vzostupne alebo zostupne
- zobrazovať celé, desatinné kladné a záporné čísla na číselnej osi
- pracovať s absolútnou hodnotou celého, desatinného a racionálneho čísla
- sčitovať, odčitovať, násobiť a deliť celé a desatinné čísla (kladné aj záporné)
- riešiť slovné úlohy s kladným a zápornými číslami.

Zlomky vstupujú podľa iŠVP do vyučovania v 7. ročníku ZŠ, resp. v 2. ročníku osemročných gymnázií, a to v nasledovnom rozsahu:

- správne chápať, prečítať a napísať zlomok
- chápať, že každé racionálne číslo treba napísať v tvare zlomku
- uviesť príklad rovnakého zlomku v inom tvare
- posúdiť, kedy sa zlomok rovná jednej, nule alebo nemá zmysel
- graficky znázorniť a zapísať zlomkovú časť celku
- vypočítať zlomkovú časť z celku
- previesť zlomok na desatinné číslo a opačne
- previesť zlomok na zmiešané číslo a opačne
- znázorniť zlomok na číselnej osi
- porovnávať a usporadúvať zlomky do radov podľa veľkosti
- krátiť a rozširovať zlomky daným číslom
- upravovať zlomky na základný tvar
- upraviť zlomky na spoločného menovateľa
- sčitovať, odčitovať, násobiť a deliť zlomky
- riešiť slovné úlohy so zlomkami.

4 Autorské hry

4.1 Didaktická hra Zlomky

Prvá autorská didaktická hra, ktorú sme vytvorili sa zameriava na Zlomky. Podľa iŠVP sú zlomky zaradené do 7. ročníka základnej školy, resp. 2. ročníka gymnázií s osemročným štúdiom. Vzhľadom na toto odporúčame hru zaradiť do tohto ročníka v rámci precvičovania alebo opakovania práce so zlomkami. Nakoľko hra predpokladá určité znalosti z tematického celku zlomky a práce s nimi, neodporúčame hru zaraďovať skôr. Táto hra teda nie je vhodná ako propedeutický prostriedok.

Hra	**Zlomky**
Zaradenie do iŠVP	7. ročník ZŠ Zlomky, počtové výkony so zlomkami, kladné racionálne čísla
Počet hráčov	2
Trvanie jednej hry	5 – 10 minút
Učebné ciele	počítanie zlomkovej časti z celku osvojenie si práce s kmeňovými zlomkami

Tabuľka 1: Hra zlomky

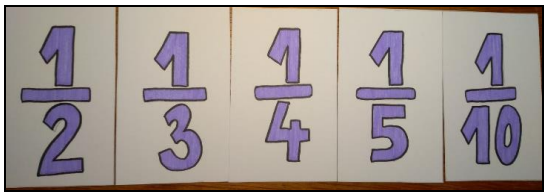
Didaktická hra zlomky môže byť výmenou kartičiek so zlomkami za kartičky s percentami modifikovaná na didaktickú hru Percentá.

4.1.1 Pravidlá hry Zlomky

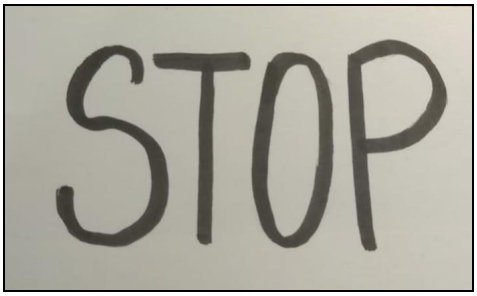
Hra Zlomky je určená pre 2 hráčov. Hra je pomerne dynamická, rýchla, dá sa vyhrať už hneď v prvom vyložení kariet (závisí od náhody, kariet na ruke a aj práce s percentami). Ak ťahy hráčov nesmerujú k víťazstvu, stále hru môže ukončiť karta STOP. Tí menej šikovní žiaci možno budú mať problém prerátať a analyzovať svoje karty v hlave, čo v konečnom dôsledku môže viesť k spomaleniu hry a naťahovaniu hracieho času. Nami vytvorená hra obsahuje 46 hracích kariet: 40 kariet s číselnými hodnotami (2 sady s číselnými hodnotami 1 – 20, obrázok č. 1), 5 kariet so zlomkami ($\frac{1}{2}$; $\frac{1}{3}$; $\frac{1}{4}$; $\frac{1}{5}$ a $\frac{1}{10}$, obrázok č. 2), 1 STOP kartu (obrázok č. 3) a Pravidlá hry. Karty s číselnými hodnotami sú dvojhlavé, preto môžu žiaci sedieť oproti sebe a obidvaja uvidia čísla na kartách normálne.



Obrázok 1: Hracie karty



Obrázok 2: Karty so zlomkami



Obrázok 3: STOP karta

Pred začiatkom hrania poriadne premiešame karty s číselnými hodnotami (40 kariet). Každý z hráčov dostane 5 kariet. Z tohto balíčka kariet vyberieme 2 karty, ktoré budú slúžiť ako začiatky kôpok. V tomto momente zamiešame do zvyšných kariet aj STOP kartu a balíček odložíme bokom tak, aby si z neho žiaci mohli brať karty. Z 5 kariet so zlomkami vyberieme náhodne jednu kartu. Učiteľ môže určiť celej triede jednu kartu (takto bude celá trieda precvičovať takú istú časť z celku alebo môže mať každá dvojica inú (v triede sa precvičuje rátanie s rôznou časťou z celku). Ak sú karty rozdané, karta STOP zamiešaná v balíčku a každá dvojica má vytiahnutú kartu určujúcu zlomkovú časť, hra môže začať. Hráč, ktorý hru začína vyloží z kariet na ruke 2 karty na kôpku/y. Vyložením kariet sa snaží dosiahnuť, aby hodnota na jednej kôpke v porovnaní s druhou zodpovedala vytiahnutej karte so zlomkom. Môže si vybrať, či vyloží na každú kôpku jednu kartu alebo dá obidve karty na jednu kôpku. Po vyložení kariet na kôpky si z balíčka so zvyšnými kartami vytiahne ďalšie 2

karty, aby dorovnal počet kariet na ruke do 5. Ak sa mu nepodarilo vyložením kariet dosiahnuť cieľ, ide na rad druhý hráč. Ten zopakuje presne to isté, čo urobil prvý hráč. Takto sa v ťahoch striedajú až kým dosiahnu cieľ hry alebo jeden zo žiakov nepotiahne STOP kartu, ktorá ukončuje hru bez víťaza. Kompletné pravidlá, ktorú sú aj súčasťou hry uvádzame v prílohe A.

4.2 Didaktická hra Najväčší vyhráva

Druhá autorská didaktická hra, ktorú sme vytvorili sa zameriava na Záporné čísla. Podľa iŠVP sú záporné čísla zaradené do 8. ročníka základnej školy, resp. 3. ročníka gymnázií s osemročným štúdiom. Našu hru odporúčame zaradiť až po prebratí tohto tematického celku. Hra je vhodná na opakovanie. V tematickom celku Záporné čísla nie je propedeutická, nakoľko predpokladá schopnosť pracovať so zápornými číslami. Môže však slúžiť ako propedeutická hra k tematickému celku Premenná, výrazy.

Hra	**Najväčší vyhráva**
Zaradenie do iŠVP	8. ročník ZŠ Kladné a záporné čísla, počtové výkony s celými a desatinnými číslami, racionálne čísla
Počet hráčov	2 – 8
Trvanie jednej hry	10 - 15 minút
Učebné ciele	určenie opačného čísla k ľubovoľnému číslu práca s absolútnou hodnotou čísla porovnávanie celých čísel násobenie, delenie kladných a záporných čísel určovanie hodnoty výrazu

Tabuľka 2: Hra Najväčší vyhráva

4.2.1 Pravidlá hry Najväčší vyhráva

Hra s názvom Najväčší vyhráva je navrhnutá pre 2 – 8 hráčov. Vyšší počet hráčov v jednej skupine minimalizuje počet hracích sad do jednej triedy, čím značne zjednoduší prípravu hry učiteľa. Je časovo veľmi nenáročná. Aj napriek tomu, že má viac hracích kôl, je rýchla. Súčasťou hry je 41 hracích kariet s číselnými hodnotami od – 20 po 20, kartu s číslom 0 (obrázok č. 4), jedna špeciálna hracia kocka (obrázok č. 5). Samozrejme žiaci pred začiatkom hry dostanú aj pravidlá hry v písomnej forme.



Obrázok 4: Hracie karty



Obrázok 5: Hracia kocka

Na začiatku sa karty s číselnými hodnotami dobre zamiešajú a následne na to sa rozdajú medzi hráčov. Každý dostane 5 kariet. Zvyšné karty sa odložia bokom. Hráč, ktorý ide prvý hodí kockou. Kocka určí matematickú operáciu. Následne na to, hráč za premennú x na stene hracej kocky dosadí všetky číselné hodnoty z kariet na ruke. Vyberie tú, ktorá dáva najväčšiu hodnotu. Nasleduje ďalší hráč, ktorý urobí presne to isté. Takto sa vystriedajú všetci hráči. Kolo sa uzavrie tým, že sa porovnajú výsledky, ktoré žiaci oznamovali. Po každom takomto kole musí vypadnúť z hry aspoň jeden hráč. Je to ten, ktorého výsledok bol najmenší. Ak sa stane, že viac hráčov má najmenší výsledok, potom vypadávajú všetci títo hráči. Hráči, ktorí nevypadli, postupujú do ďalšieho kola. V tomto kole hráči dostanú nové karty, opäť 5 kusov. Postup hry je v tomto kole úplne identický s prvým kolom. Takto sa hracie kolá opakujú, kým nezostane jeden hráč. V prípade, že má v poslednom hracom kole viacero hráčov rovnakú najvyššiu hodnotu, hracie kolo sa opakuje s novými kartami. Hráča, ktorý

v poslednom kole získa po matematickej operácii najvyššiu hodnotu, prehlásime za víťaza. Týmto je hra ukončená. Cieľom hry je teda získať najvyššiu hodnotu v poslednom kole. Cieľ hry sa dá veľmi ľahko upraviť aj na iné verzie, v ktorých nemusí vyhrávať hráč, ktorý bude mať najvyššiu hodnotu. Cieľom hry môže byť napríklad získať najmenšie číslo, najmenšie kladné číslo, najväčšie záporné číslo, alebo sa čo najviac priblížiť k číslu 0 a iné verzie. Kompletné pravidlá, ktoré sú súčasťou hry, uvádzame v prílohe B.

4.3 Didaktická hra Hľadači pokladov

Keďže podľa nášho názoru tematický celok Záporné čísla je zo všetkých tematických celkov z matematiky na základnej škole pre žiakov najnáročnejší, rozhodli sme sa vytvoriť ďalšiu hru. Ako sme už spomenuli v predchádzajúcich kapitolách, záporné čísla sú podľa iŠVP zaradené do 8. ročníka základnej školy (tercie osemročného gymnázia). Hru, ktorú opíšeme v tejto kapitole odporúčame zaradiť pred samotným učivom Záporné čísla, či už v 8. ročníku alebo skôr. Táto hra môže slúžiť ako propedeutický prostriedok k tomuto tematickému celku.

Hra	**Hľadači pokladov**
Zaradenie do iŠVP	8. ročník ZŠ Kladné a záporné čísla, počtové výkony s celými a desatinnými číslami, racionálne čísla
Počet hráčov	2 – 6
Trvanie jednej hry	20 minút
Učebné ciele	sčítanie, odčítanie a násobenie celých kladných a záporných čísel

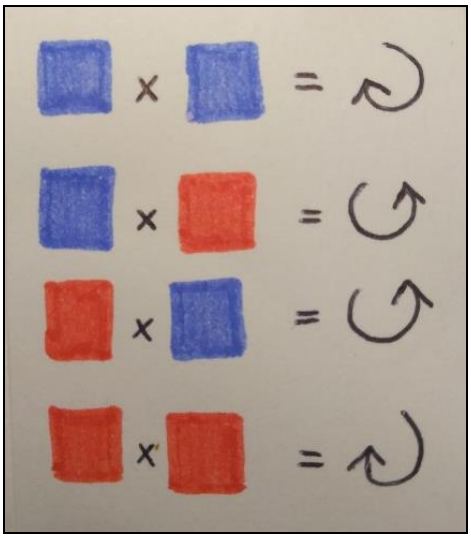
Tabuľka 3: Hra Hľadači pokladov

4.3.1 Pravidlá hry Hľadači pokladov

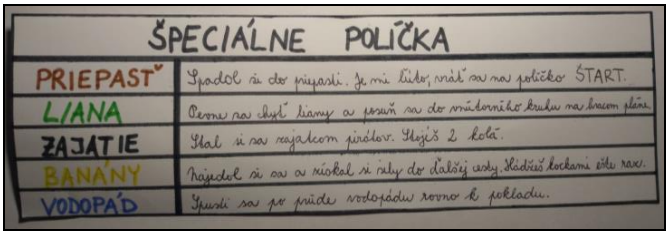
Hra Hľadači pokladov je navrhnutá pre minimálne dvoch a najviac šiestich hráčov. Základná verzia tejto hry obsahuje: hrací plán (obrázok č. 6), kartička s pravidlami pre násobenie (obrázok č. 7), kartička s pokynmi pre špeciálne políčka (obrázok č. 8), 6 rôznofarebných panáčikov (obrázok č. 9), 2 špeciálne hracie kocky (obrázok č. 10) a pravidlá hry v písomnej podobe.



Obrázok 6: Herný plán



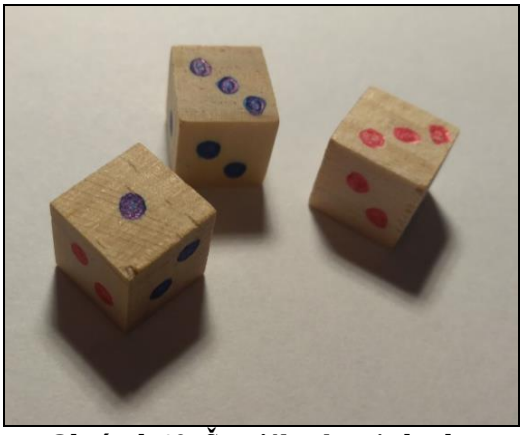
Obrázok 7: Pravidlá pre násobenie



Obrázok 8: Pokyny pre špeciálne políčka



Obrázok 9: Hrací panáčikovia



Obrázok 10: Špeciálne hracie kocky

Každý hráč sa na začiatku hry postaví so svojím panáčikom na políčko ŠTART a hráči si určia poradie, v ktorom sa budú striedať v ťahoch. Prvý hráč hodí dvomi kockami. Čísla (počet bodiek na stenách kocky) na kockách vynásobí podľa pravidiel pre ich násobenie (násobenie dvoch čísel rovnakej farby znamenajú posun v smere hodinových ručičiek na hracom pláne, násobenie dvoch čísel rôznej farby znamenajú posun proti sme hodinových ručičiek). Pravidlá pre násobenie majú hráči pred sebou na kartičke, ktorá im poslúži ako ťahák. Nasleduje ďalší hráč, ktorý zopakuje to isté čo prvý. Takto sa v ťahoch striedajú. Hra začne byť zaujímavá, keď niektorý z nich stúpi so svojím panáčikom na špeciálne políčko. V tom momente sa riadi pokynmi pre špeciálne políčka. Aj tieto pokyny majú hráči pred sebou ako ťahák. Pri vstupe na políčko Priepasť (označené hnedou farbou) sa hráč musí vrátiť na políčko ŠTART a začať odznova. Pri vstupe na políčko Liana (označené zelenou farbou) sa hráč posúva z vonkajšieho radu políčok do vnútorného a tým sa priblíži k pokladu. Pri vstupe na políčko Zajatie (označené čiernou farbou a obrázkom kostry) musí hráč stáť 2 kolá. Pri vstupe na políčko Banány (označené žltou farbou a obrázkom banánov) ide hráč dvakrát za sebou. Pri vstupe na políčko Vodopád (označený tyrkysovou farbou) sa hráč po prúde vodopádu dostane rovno k pokladu a vyhrá celú hru.

Hra obsahuje tri špeciálne hracie kocky. Napriek tomu sme však hovorili, že hráči hádžu len dvomi kockami. Je to preto, že základná verzia tejto hry sa hrá len s dvomi kockami. Tretia kocka je potrebná až v rozšírenej verzii, kedy hráč hádže tromi kockami a vyberá si z nich dve, ktoré použije a čísla na nich vynásobí podľa pravidiel, ktoré sme spomínali vyššie. Tieto pravidlá majú žiaci aj na pomocnej kartičke. Pridaním jednej kocky a možnosti výberu vznikajú príležitosti na vznik stratégií a taktizovanie. Kompletné pravidlá základnej aj rozšírenej verzie hry sú uvedené v prílohách C a D.

5 Záver

K spracovaniu tejto témy sme sa rozhodli preto, lebo sme chceli učiť matematiku inak. Chceli sme nájsť spôsob, ktorý by bol rovnako kvalitný ako transmisívne vyučovanie, ale navyše by žiakov nadchol, bavil a prinášal im radosť. Vyučovanie matematiky sme obohatili o hry. Hra je prirodzenou súčasťou života detí, prostredníctvom hry si môžu aj žiaci osvojiť nové poznatky alebo precvičiť už nadobudnuté poznatky novým a zaujímavejším spôsobom ako len písomným precvičovaním do zošita.

Cieľom práce bolo vytvorenie didaktických hier na rôzne tematické celky, ktoré sa preberajú na druhom stupni základnej školy v predmete matematiky. Vytvorili sme 3 didaktické hry, ktoré sú zamerané na najproblematickejšie tematické celky z okruhu Číslo, premenná a počtové výkony s číslami. Podľa nášho názoru k týmto problematickým celkom patria predovšetkým záporné čísla a zlomky. Na prácu so zápornými číslami sme vytvorili 2 hry (Hľadači pokladov a Najväčší vyhráva). Jedna z týchto hier sa dá použiť aj pri učive Premenná, výraz (Najväčší vyhráva). Na prácu so zlomkami sme vytvorili jednu hru (hra Zlomky). Niektoré z týchto hier sa dajú upraviť aj na iné verzie. Niektoré hry majú rovno uvedených viac verzií v pravidlách. Tieto didaktické hry sú navrhnuté tak, aby sa dali použiť na rôznych typoch hodín. Niektoré z nich sú propedeutické, iné by mohli učiteľovi poslúžiť pri precvičovaní učiva alebo na konci tematického celku ako nástroj opakovania. V práci sme takisto detailne vysvetlili aj pravidlá hier. Kompletné pravidlá všetkých hier sú aj súčasťou príloh.

Všetky nami vytvorené hry však, bohužiaľ, zatiaľ neboli vyskúšané na hodinách matematiky so žiakmi kvôli nepriaznivej pandemickej situácii.

Dúfame, že sa to však čoskoro zmení a nami vytvorené hry si nájdu svoje miesto vo vyučovaní matematiky na druhom stupni ZŠ, resp. v nižších triedach osemročných gymnázií.

Poďakovanie

Rada by som poďakovala svojej školiteľke RNDr. Monike Dillingerovej, PhD. za odborné vedenie, vecné pripomienky, cenné rady, poskytnutú literatúru a čas, ktorý mi venovala počas písania tejto práce.

Literatúra

[BURJAN, 1991] BURJAN, V., BURJANOVÁ, Ľ. *Matematické hry*. Bratislava : Pytagoras, 1991. ISBN 80-85409-00-3.

[LAZOROVÁ, 2015] LAZOROVÁ, Ľ. *Využitie didaktických hier na hodinách biológie.* [online]. Prešov : Metodicko-pedagogické centrum, 2015. [cit. 2021-03-27]
Dostupné na internete: <https://mpc-edu.sk/sites/default/files/projekty/vystup/13_ops_lazorova_ludmila_-_vyuzitie_didaktickych_hier_na_hodinach_biologie.pdf>

[PRŮCHA, 1998] PRŮCHA, J., WALTEROVÁ, E., MAREŠ, J. *Pedagogický slovník*. Praha : Portál, 1998. ISBN 80-7178-252-1.

[ŠPÚ, 2014] ŠPÚ. *Inovovaný štátny vzdelávací program – MATEMATIKA (Vzdelávacia oblasť: Matematika a práca s informáciami) PRÍLOHA ISCED 2.* [online]. Bratislava : ŠPÚ, 2014. [cit. 2021-03-27].
Dostupné na internete: <http://www.statpedu.sk/files/articles/dokumenty/inovovany-statny-vzdelavaci-program/matematika_nsv_2014.pdf>

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 315–321
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Kristián Kolčák, Zuzana Kubincová

Vzájomné hodnotenie a sebahodnotenie vo vyučovaní informatiky

Kristián Kolčák[1]*
Školiteľ: Zuzana Kubincová[1†]
[1] KDMFI, ODI, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstrakt

Techniky vzájomného hodnotenia a sebahodnotenia môžu pomôcť učiteľovi pri hodnotení tímových projektov v škole. Môžu však byť užitočné aj pre žiakov samotných. V tejto práci sa snažíme preskúmať, čo ich využitie vo vyučovaní informatiky na strednej škole môže žiakom priniesť. Navrhli sme tímové aktivity so zapojením týchto techník hodnotenia a skúmame, ako žiaci dokážu hodnotiť svojich spolužiakov v tíme, aké spoločné prvky majú jednotlivé hodnotenia, čo si žiaci pri práci v tíme na svojich spolužiakoch všímajú, ako vedia zhodnotiť ich aj svoje silné a slabé stránky, a pod. V práci uvádzame zatiaľ len predbežné výsledky získané z prvej fázy projektového vyučovania, ktoré však dávajú základ k prípadným zmenám nástrojov na získanie kvalitnejších výsledkov v ďalších fázach nášho výskumu.
Kľúčové slová: vzájomné hodnotenie, sebahodnotenie, stredná škola, tímové projekty, programovanie.

1 Úvod

Tímové vyučovanie (angl. team-based learning alebo TBL) je na rozdiel od tradičného vyučovania silným nástrojom v oblasti vzdelávania, ktorý dokáže pomôcť nie len učiteľovi, ale aj samotným žiakom. Jednou z fáz správne realizovaného tímového vyučovania je vzájomné hodnotenie (angl. peer-assessment alebo peer-evaluation). [1]
Vzájomné hodnotenie je súčasťou učenia sa, pri ktorom sa žiaci stávajú samostatnejšími, zodpovednejšími a participovanejšími, čo v praxi znamená, že nikto v triede nie je do vyučovacieho procesu nezapojený, a tým sa zvyšuje efektivita výučby. Výskumy naznačujú, že počas procesu tímového vyučovania sa žiaci hlbšie pozorujú, čím sa nie len učia novým poznatkom, ale zvyšuje sa ich vnútorná motivácia k učeniu sa a empatia. Hodnotenie žiaka žiakom môže tiež prispieť k presnejšej a spravodlivejšej klasifikácii jednotlivých členov tímu. [2]

Väčšina realizovaných výskumov v oblasti tímového vyučovania zameraných na vzájomné hodnotenie bola skúmaná v prostrediach vysokých škôl [3,4]. Motiváciou k tomu, aby sme zaradili vzájomné hodnotenie a sebahodnotenie do vyučovania informatiky na strednej škole bolo pre nás zistenie, že sa na slovenských stredných školách výskumy takýchto aktivít nerealizovali, alebo ich výsledky neboli publikované vo vedeckej sfére. V tomto článku prinášame čiastkové výsledky prvej fázy nášho výskumu. Výskumu vzájomného hodnotenia a sebahodnotenia sa budeme naďalej venovať.

2 Realizácia výskumu

Cieľom výskumu bola prvotná analýza toho, či sú žiaci schopní komplexnejšieho hodnotenia svojich spolužiakov v tíme počas projektového vyučovania, a či vlastnosti, ktoré si na nich všímajú, korelujú so sebahodnotením hodnoteného žiaka. Výskum bol realizovaný v školskom roku 2020/2021 na strednej odbornej škole elektrotechnickej v rámci predmetov programovania a výpočtovej techniky, ktoré mali časovú dotáciu v rozsahu dvoch vyučovacích hodín za týždeň a to bezprostredne za sebou (dvojhodinové vyučovacie hodiny) technikou projektovo-tímového vyučovania. Pre nepriaznivú epidemiologickú situáciu na Slovensku, v súvislosti s pandémiou COVID-19, boli školy zväčša zatvorené a žiaci sa vzdelávali dištančnou formou. Všetky aktivity preto neboli realizované v bežných podmienkach prezenčného vyučovania v škole, ale v online priestore.

Výskum v tomto školskom roku bol rozdelený na dve časti, obe postavené na projektovom vyučovaní. Prvá časť prebiehala od decembra 2020 do januára 2021. Druhá časť sa bude realizovať koncom školského roka. V tomto článku uvádzame len predbežné výsledky z prvej časti výskumu.

2.1 Výskumná vzorka

Výskumnú vzorku tvorili žiaci prvého a tretieho ročníka, ktorých bolo spolu 57.

- Žiaci prvého ročníka sa delia do dvoch skupín, ktoré sme označili 1C1 a 1C2. Počet žiakov v skupine 1C1 bol 16, z toho 15 chlapcov a 1 dievča. Žiakov v skupine

* kolcak4@uniba.sk
† zuzana.kubincova@fmph.uniba.sk

1C2 bolo pôvodne 15, z toho 14 chlapcov a 1 dievča. Jeden žiak na prelome prvého a druhého polroku prestúpil na iný odbor.
- Žiaci tretieho ročníka sa rovnako delia do dvoch skupín. V prvej skupine, označenej 3A1, sa výskumu zúčastnilo 14 žiakov. V skupine 3A2 bolo žiakov 13. V oboch skupinách sú len chlapci.

2.2 Metodika

Tímové hodnotenie a sebahodnotenie žiakov bolo realizované až v samotnom závere celého projektového vyučovania, ktoré malo nasledujúce fázy.

2.2.1 Fázy projektového vyučovania

- **Rozdelenie do tímov.** Žiakov sme rozdelili do tímov, pričom počet členov tímu bol v prvom ročníku dva až tri, a pri žiakoch tretieho ročníka to boli dvojice. Dvaja žiaci tretieho ročníka pracovali sami. U žiakov prvého ročníka sme zvolili náhodný výber členov tímu, naopak v treťom ročníku sme žiakom nechali v rozdeľovaní voľnú ruku (ďalej chceme takéto rozdeľovanie vymeniť a sledovať zmeny).
- **Výber projektu.** Vybrať si projekt žiaci mohli buď zo zoznamu projektov, alebo si žiaci mohli vymyslieť vlastný projekt, ktorý bol konzultovaný s učiteľom. Všetky projekty boli na tému hier, pretože takéto programovanie žiakov baví. Príklad projektu je na obrázku 1.
- **Písanie dokumentácie.** Žiakom tretieho ročníka sme ako súčasť projektu zadali úlohu napísať krátku špecifikáciu k projektu. Keďže ide o odbornú školu, cieľom bolo naučiť ich formu práce, ktorá sa približuje práci v IT sektore. Navyše tento dokument poslúži aj na posúdenie, či projekt spĺňa prvotnú špecifikáciu projektu. U žiakov prvého ročníka sme túto fázu preskočili.
- **Programovanie projektu.** Na projektoch žiaci pracovali zväčša mimo vyučovacích hodín. Keďže rozdelenie tém sa podarilo zrealizovať ešte pred vianočnými prázdninami, väčšina žiakov ich využila práve k naprogramovaniu projektu. Projektom bola venovaná aj dvojhodinová vyučovacia hodina, ktorá slúžila na konzultácie k projektu. Fáza samotnej realizácie projektu trvala (aj s prázdninami) tri týždne.
- **Odovzdávanie projektu.** Nakoľko sme nenašli softvér alebo webovú stránku na odovzdávanie, náhodné prerozdelenie a zber projektov, žiaci svoje práce odovzdávali učiteľovi mailom. Stačilo, ak poslal projekt jeden člen tímu.
- **Recenzovanie projektov.** Po odovzdaní projektov sme žiakom poslali iný projekt, na ktorý mali napísať recenziu. Aj recenzovanie cudzieho projektu bola tímová práca, t.j. aj ak bol tím dvoj- alebo viacčlenný, odovzdával len jednu recenziu na pridelený projekt. V tejto fáze sme vytvorili dva typy šablón, ktoré sme poskytli žiakom, aby podľa nich recenzovali projekty. Prvý variant bol založený na podrobných inštrukciách, čo si žiaci mali všímať na projektoch. Celú šablónu sme rozdelili na niekoľko častí – *funkčnosť programu, programový kód, estetická stránka programu* a *celkový dojem*. V každej časti sme žiakom pripravili ešte niekoľko podrobnejších návodov, ktoré im mali pomôcť k recenzii. V druhom variante sme základné body nemenili, ale vynechali sme podrobné poznámky o tom,, čo by si pri jednotlivých častiach žiaci mali všímať. Tento spôsob rozdelenia inštrukcií budeme ďalej vo výskume analyzovať. Recenzovanie projektov trvalo jeden týždeň a bolo anonymné – žiaci nevedeli, komu recenzujú projekt a ani kto recenzuje ich projekt
- **Úprava projektu.** Recenzie, ktoré tímy odovzdali prostredníctvom mailu sme poslali pôvodným skupinám. V tejto časti projektového vyučovania mali žiaci upraviť svoj program podľa recenzie, ktorú dostali od spolužiakov. Fáza úpravy projektov trvala jeden týždeň.
- **Tímové hodnotenie a sebahodnotenie.** Po odovzdaní finálnych projektov mali žiaci za úlohu vyplniť dotazník, ktorý sa týkal hodnotenia spolužiakov v tíme a sebahodnotenia. V dotazníku sme používali otvorené otázky a jednu otázku s výberom odpovede. Štruktúru dotazníka uvádzame v samostatnej podkapitole.

2.2.2 Vzájomné hodnotenie

Časť dotazníka venovanú tímovému hodnoteniu sme rozdelili na tri kategórie:

- **Rozdeľ 100%:** V tejto časti mali žiaci za úlohu rozdeliť 100% práce na projekte medzi seba a ostatných spolužiakov. Napríklad: „*V tíme sme boli ja, Evka a Igor. Igor spravil väčšiu časť projektu ale ja som mu pomohla pri riešení problémových častí. Evka sa podieľala len na recenzovaní. Preto moje rozdelenie je takéto:*
  - *Ja: 25%*
  - *Igor: 65%*

- *Evka: 10%*

Spolu je to 100%“.

- **Otázky k tímovému hodnoteniu.** Otázky k tímovému hodnoteniu boli otvorené. Cieľom bolo zistiť, ako sú jednotliví žiaci schopní zhodnotiť svojich spolužiakov a či si na nich všímajú len vlastnosti a zručnosti v oblasti informatiky, alebo si počas práce na projekte všímali aj iné charakteristiky. Presné znenia otázok boli nasledovné:
  - Čo chcem vedieť tak ako môj spolužiak? (Pozn. nemusí sa to nutne týkať programovania ale musí to súvisieť s prácou na projekte).
  - Čo by mal spolužiak zmeniť/zlepšiť na svojej tímovej práci? (Pozn. Ak ste boli traja, napíš jednotlivo pre oboch).
  - Čo spravil spolužiak na projekte najlepšie? (Pozn. Môže to byť najlepší nápad ako niečo naprogramovať, dobrá myšlienka).
  - Kto bol "šéf" skupiny? (Pozn. Kto riadil skupinu? Kto bol taký manažér?).
- **Vzťahy v tíme.** Posledná otázka v dotazníku v časti tímového hodnotenia bola uzavretá a pýtali sme sa v nej, aké boli vzťahy v tíme. Na výber mali žiaci zo štyroch možností:
  - *Nie dobré* - v tomto tíme som sa necítil dobre.
  - *Pracovné* - nie sme síce najlepší kamaráti ale nemali sme problém spolupracovať.
  - *Priateľské* - nemali sme problém, nepohádali sme sa a vedeli sme spolu fungovať.

2.2.3 Sebahodnotenie

Okrem tímového hodnotenia nás zaujímalo ako sú žiaci schopní sebahodnotenia. Keďže sa žiaci so sebahodnotením vo vyučovaní vo všeobecnosti nestretávajú, zvolili sme len tri otázky:

- Čo mi pri práci na projekte išlo dobre a čo som spravil pre tím to najlepšie?
- Čo mi pri práci na projekte nešlo a mohol by som na sebe popracovať/zmeniť/zlepšiť?
- Čo som spolužiakov v tíme naučil/čo si myslím že sa odo mňa naučili?

2.2.4 Metóda spracovania dát

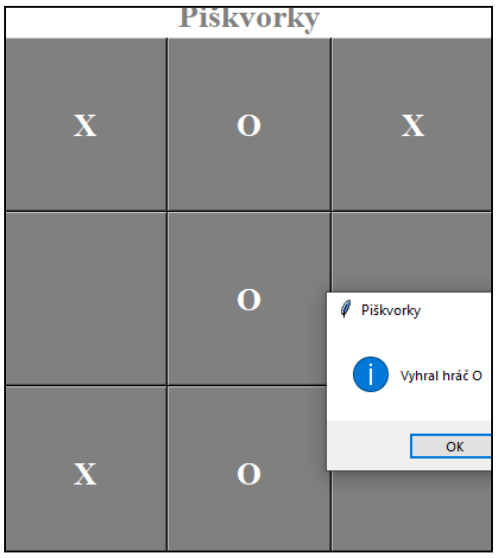
Pri spracovávaní dát sme použili zmiešaný prístup. Využili sme kvalitatívne metódy obsahovej analýzy dotazníkov a niektoré výsledky sme spracovali aj kvantitatívnymi metódami.

3 Analýza dát

Po realizácii prvej fázy projektového vyučovania sme začali analyzovať dáta, ktoré sme z tohto výskumu získali. V práci uvádzame predbežné výsledky.

3.1 Samotná realizácia projektov v tímoch

Počas fázy programovania projektov sme sa snažili sledovať, ako sa žiakom darí a ako postupujú pri programovaní projektov. Ak mali žiaci s prácou na projekte problém, poskytli sme im krátke konzultácie, počas ktorých sme dávali rady, ako problém pri programovaní vyriešiť. Najskôr sme zvolili dlhšie konzultácie. Ak však žiaci v tíme mali väčšie problémy, snažili sme sa im podať iný nápad riešenia alebo sme časť, ktorú nedokázali naprogramovať v projekte, nahradili inou časťou, alebo sme tému projektu zmenili na jednoduchšiu.



Obr. 1 - Ukážka tretiackeho projektu

3.2 Recenzovanie projektov

Pri analyzovaní recenzií projektov sme sa zameriavali na to, ako žiaci hodnotia projekty. Keďže sme zvolili dva typy šablón k recenzovaniu, zameriavali sme sa aj na to, ako sa recenzie líšia vo formulácii, rozsahu a kvalitatívnej stránke recenzie.

Predpokladali sme, že recenzie tímov, ktoré dostali šablónu s návodmi budú obsahovo kvalitnejšie a prepracovanejšie oproti tímom, ktoré dostali len strohú šablónu. Náš predpoklad sa po analýze nepotvrdil, pretože sa recenzie od seba vo väčšine prípadov nelíšili. Niektoré tímy, ktoré dostali šablónu s podrobnejšími návodmi ako recenzovať sa vyjadrovali v skratkách alebo len slovami „áno-nie-neviem posúdiť“.

Vo všeobecnosti si žiaci v tímoch na recenziách dali záležať, čo naznačuje aj fakt, že niektoré recenzie boli v rozsahu takmer dvoch strán A4. Žiaci sa snažili vyjadriť z hľadiska rozsahu ku všetkým bodom recenzie približne rovnako. Prekvapili nás recenzie, v ktorých žiaci program zanalyzovali až tak, že našli v kóde chyby, ktoré sme si pri prvom odovzdávaní projektov nevšimli ani my.

Niektoré tímy si všímali aj originalitu projektov a to najmä pri tých, kde si žiaci zvolili vlastný projekt. Niektorí žiaci mali podozrenie, že projekt je plagiát, k čomu sa nakoniec aj samotný tím priznal.

V poslednej kategórii s názvom „celkový dojem“ mali žiaci priradiť známku k projektu. Všimli sme si, že aj napriek tomu, že niektoré tímy boli voči projektom, ktoré recenzovali pomerne kritické, udelili priaznivé hodnotenie. Priemer známok, ktoré udeľovali tímy bol 1,42. Rozdiel medzi výsledkami žiakov prvého a tretieho ročníka nebol veľmi výrazný:

- Žiaci prvého ročníka: 1,33.
- Žiaci tretieho ročníka: 1,47.

3.3 Úprava projektov

Úpravu projektov sme nechali na zváženie v tímoch. Žiakom sme povedali, že ak si myslia, že recenzia na ich projekt nemá žiadne výhrady alebo nápady na zlepšenie, tak projekt nemusia opravovať a zaslú pôvodnú verziu. Tímy taktiež nemuseli upravovať projekt ak usúdili, že výhrady k ich projektu sú príliš náročné alebo by nápady zmenili celkový zmysel projektu.

Po takomto zadaní opravilo projekt 14 tímov z celkového počtu 26.

3.4 Vzájomné hodnotenie

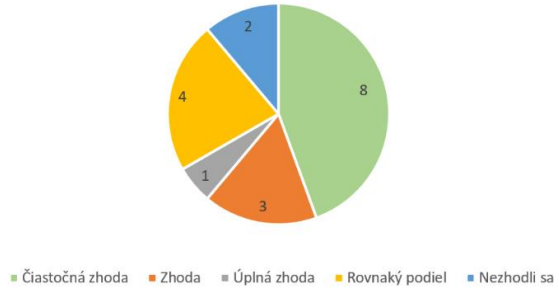
Pri tímovom hodnotení sme sa najviac zamerali na to, či nájdeme zhody v hodnoteniach medzi žiakmi v tíme. Niektoré tímy boli jednočlenné (nevedeli sme pre nich vytvoriť dvojicu alebo trojicu), takíto žiaci vzájomné hodnotenie nemohli vyplniť. Preto sa uvádzané výsledky vzťahujú len k odpovediam osemnástich tímov. Pre lepšiu čitateľnosť uvádzame výsledky v jednotlivých podkapitolách.

3.4.1 Rozdeľ 100%

V časti rozdeľ 100% sme výsledky rozdelili do piatich kategórií:

- **Čiastočná zhoda:** žiaci sa v rámci tímu zhodli na princípe „tebe viac, mne menej a naopak“ – napríklad: *žiak1* dal sebe 60% a spolužiakovi 40%. *Žiak2* dal sebe 30% a spolužiakovi 70% - zhodli sa spoločne na tom, kto spravil na projekte viacej.
- **Zhoda:** Žiaci sa v rozdelení percent zhodli s odchýlkou +/- 5%.
- **Úplná zhoda:** Žiaci sa v rozdelení percent zhodli. Nezaradili sme tu zhody typu 50/50.
- **Rovnaký podiel:** Žiaci si v tíme rozdelili percentá rovnakým dielom (50/50 alebo 33/33/33).
- **Nezhodli sa:** Žiaci sa v tíme pri rozdeľovaní percent nezhodli.

Na obrázku 2 sú znázornené súhrnné výsledky časti rozdeľ 100%. Môžeme konštatovať, že v tejto kategórii sa žiaci vo väčšine prípadov v tímovom hodnotení zhodli (čiastočná zhoda, zhoda, úplná zhoda). Kategóriu „rovnaký podiel“ sme nezaradili do úplnej zhody nakoľko nevieme určiť, či sa žiaci medzi sebou pri vyplňovaní dotazníka nedohodli.



Obr. 2 - Celkové výsledky *Rozdeľ 100%*

3.4.2 Vzťahy v tíme

Predpokladali sme, že žiaci prvého ročníka, ktorí boli rozdelení do tímov náhodne, budú vykazovať *pracovné* alebo *nie dobré* vzťahy vo väčšom počte ako žiaci tretieho ročníka. Ukázalo sa, že žiaci v jednej skupine prvého ročníka zadávali *pracovné* a *nie dobré* vzťahy v tíme viackrát v porovnaní s ostatnými skúmanými skupinami. Z celkového počtu žiakov prvého ročníka (30 žiakov) uviedlo:

- Pracovné vzťahy: 3 žiaci
- Nie dobré vzťahy: 1 žiak
- Neuviedli / iné: 5 žiakov

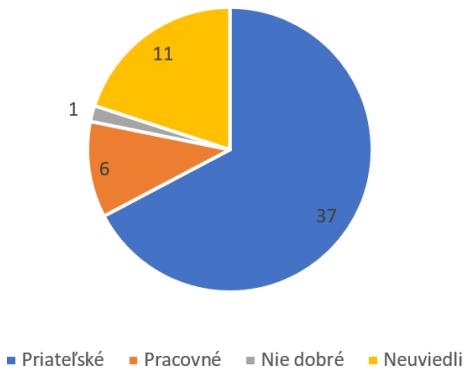
V možnosti neuviedli / iné žiaci zadávali:

- *„projekt som spravil sám, nemali sme žiadne vzťahy“*
- *„celý kód som spravil sám, takže tak“*

Myslíme si, že k tomu prispela aj situácia, že sa žiaci prvého ročníka po roku zatvorených škôl takmer nepoznajú a tým pádom nemusia dobre spolupracovať. Naopak, z celkového počtu žiakov tretieho ročníka (27 žiakov) uviedlo:

- Pracovné vzťahy: 3 žiaci
- Nie dobré: 0 žiakov

Celkové výsledky v tejto kategórii sú zobrazené na obrázku 3.



Obr. 3 – Vzťahy v tímoch

3.4.3 Otvorené otázky k tímovému hodnoteniu

Pri analyzovaní otvorených otázok určených k tímovému hodnoteniu sme sledovali, čo si žiaci na svojich spolužiakoch všímajú.

V otázke *Čo chcem vedieť tak ako môj spolužiak* si žiaci všímali najmä vlastnosti v oblasti programovania. Opakovali sa slová ako *programovanie, logické myslenie* a *rýchlosť programovania.* Žiaci tretieho ročníka označovali aj *písanie* v zmysle tvorby špecifikácie k projektu:

- *„Dobre vypracoval tú špecifikáciu, ja by som ju asi nevedel urobiť tak dobre“.*

V časti *Čo by mal spolužiak zmeniť/zlepšiť na svojej tímovej práci* sme pozorovali, že žiaci prvého ročníka sú kritickejší voči svojim spolužiakom v tíme. Vyskytovali sa tu tvrdenia ako *dochvíľnosť, komunikácia, pozornosť* a *programovanie:*

- *„Podľa mňa by mal dodržiavať deadline a nerobiť všetko na poslednú chvíľu“.*

Vo všeobecnosti väčšina žiakov tretieho ročníka nevedela uviesť, čo by mal spolužiak na sebe zmeniť. Občas sa opakovali slová *time management* a *prístup k povinnostiam.*

Na otázku *Čo spravil spolužiak na projekte najlepšie* odpovedalo najviac žiakov slovami *dobrý nápad*. Takáto odpoveď sa vyskytovala vo všetkých skupinách naprieč oboma ročníkmi. Pri analyzovaní tejto otázky sme na záver zistili, že sme v dotazníku ako pomôcku žiakom práve tieto dve slová ponechali a preto usudzujeme, že takáto odpoveď podmienila získané dáta. Okrem dobrého nápadu žiaci označovali aj *estetiku* (pokiaľ išlo o projekt, v ktorom žiaci využívali grafickú knižnicu), *brainstorming* a *oprava bugov.*

Na otázku *Kto bol šéf* žiaci odpovedali slovami *neviem posúdiť, nikto, obaja* alebo označili konkrétneho spolužiaka. V oboch skupinách žiakov prvého ročníka sme si všimli, že ak žiaci v otázke *vzťahy v tíme* určili, že išlo o priateľské vzťahy (a všetci traja sa zhodli) tak sa žiaci zhodli aj v určení konkrétnej osoby šéfa. Ak žiaci uviedli, že išlo o iné než priateľské vzťahy, nedokázali sa v tíme zhodnúť na konkrétnom mene.

3.5 Sebahodnotenie

Analýza otázok z časti sebahodnotenia vo všeobecnosti ukázala, že žiaci nepoznajú svoje silné a slabé stránky alebo nie sú schopní ich konkrétnejšie vyjadriť. Odpovede boli buď jednoslovné alebo veľmi strohé.

Na otázku *Čo mi pri práci na projekte išlo dobre a čo som spravil pre tím to najlepšie* označovali niektorí žiaci *programovanie*.

V otázke *Čo mi pri práci na projekte nešlo a mohol by som na sebe zmeniť/popracovať* približne polovica všetkých žiakov napísala *zlepšiť sa v programovaní.*

S poslednou otázkou v dotazníku *Čo som spolužiakov naučil v tíme* malo väčšina žiakov problém – nevedeli sa vyjadriť. Na túto otázku odpovedalo takmer 75% žiakov slovom *neviem/nič.*

3.6 Porovnanie tímového hodnotenia a sebahodnotenia

Po analýze tímového hodnotenia a sebahodnotenia sme sa zamerali na zhodu medzi niektorými otázkami z oboch oblastí a to v rámci tímu.

V prvom kroku sme sledovali zhodu medzi otázkami *Čo chcem vedieť tak ako môj spolužiak* a *Čo mi pri práci na projekte išlo dobre a čo som spravil pre tím to najlepšie.* Cieľom bolo zistiť, či sa v tíme nachádza zhoda medzi tým, ako žiaka hodnotili spolužiaci a ako sa hodnotil sám. Ukázalo sa, že ak žiaci v tíme na otázky neodpovedali slovami *nič/neviem*, tak sa zhoda v týchto otázkach nachádzala. Ako príklad uvádzame odpovedia žiakov jedného tímu:

- Žiak 1: *„Chcem vedieť nad niektorými vecami rozmýšľať tak ako on. Okrem toho spravil peknú grafiku – chcel by som mať také estetické cítenie.“*
- Žiak 2: *„Myslím si, že som pekne vyriešil náš problém s vyhodnotením stavu. Najprv nám to nešlo, potom som na to prišiel. Oproti ostatným si myslím, že sme mali najlepšiu grafickú stránku projektu.“*

V tomto príklade sledujeme dve zhody. Žiak 1 označil, že jeho spolužiak má dobré myslenie v kritických situáciách a tiež má cit pre estetiku. Jeho spolužiak to v odpovedi na sebahodnotenie potvrdil. Takýchto zhôd sme v jednotlivých skupinách veľa nenašli, pretože žiaci v otázkach sebahodnotenia neboli vyjadrenia schopní.

V druhom kroku sme sledovali zhodu medzi otázkami *Čo by mal spolužiak na svojej tímovej práci zmeniť* a *Čo mi pri práci na projekte nešlo a mal by som sa zlepšiť.* V tomto prípade bolo zhôd ešte menej ako v prvom porovnávaní. Pre príklad uvádzame jednu zhodu z troch, ktoré sme zanalyzovali:

- Žiak 1: *„Mal by zmeniť aktivitu. Nerobiť veci o 21:00.“*
- Žiak 2: *„Nešlo mi zrealizovať veci podľa plánov“*.

3.7 Zaujímavé zistenia

Počas analýzy dát sme zistili, že niektoré tímy sa vo všeobecnosti odlišovali od ostatných. Ako príklad uvádzame jeden tím tretieho ročníka skupiny 3A1. Obaja žiaci ako jediný tím v celej skupine označili, že vzťahy v tíme boli pracovné. V tímovom hodnotení označili, že šéfom skupiny boli oni sami (žiak 1 označil, že šéf tímu bol žiak 1; žiak 2 označil, že šéf skupiny bol žiak 2) v čom sa nezhodli. V otázke *Čo mi pri práci na projekte išlo najlepšie* obaja žiaci uviedli, že majú manažérske schopnosti:

- Žiak 1: *„Koordinovanie a leaderovanie“*.
- Žiak 2: *„Rýchlo zmanažovať a rozdeliť robotu“*.

V niektorých tímoch došlo k hádkam, ktoré vyústili v situáciu, pri ktorej už nedokázali ďalej spolupracovať. Napríklad sa žiaci nedokázali dohodnúť na spoločnom čase kedy by projekt mohli programovať, preto jeden člen tímu naprogramoval celý projekt sám:

- *„Tímové hodnotenie nebudem vypĺňať nakoľko som celý projekt spravil sám“*.

Po podrobnejšej analýze (osobný rozhovor s oboma členmi skupiny) sme zistili, že žiak, ktorý nespolupracoval mal veľmi vážne rodinné problémy, o ktorých nechcel pred spolužiakom hovoriť.

Ako posledný príklad „zaujímavého“ tímu uvádzame troch žiakov prvého ročníka. V tejto skupine nás zaujali odpovede jednej žiačky. Na otázku *Čo by mal spolužiak na projekte zmeniť* odpovedala:

- *„*upravujem to na mňa* mohla by som viac hovoriť, som dosť ticho a to sa týka všetkého“*

Odpovede v dotazníku boli väčšinou negatívne orientované na jej osobu. Zaujala nás aj odpoveď na nepovinnú otázku *Chcel by si niečo dodať k sebahodnoteniu?*

- *„vždy keď mi niečo nefunguje tak miesto toho aby som sa niekoho opýtala čo mám zle alebo v čom mám chybu tak sa to snažím opraviť sama čím to občas zhoršujem ale občas sa mi to nejakým zázrakom podarí.“*

Nakoľko sme mali podozrenie, že má žiačka problém zaradiť sa do skupiny a mala prevažne negatívne odpovede, rozhodli sme sa prípad posunúť školskej psychologičke, ktorá zhodnotila, že môže mať aj iné problémy.

4 Záver

Vzájomné hodnotenie a sebahodnotenie v tímovom vyučovaní na hodinách informatiky sa javí ako efektívny nástroj na dosahovanie viacerých cieľov výchovy a vzdelávania (kognitívna a afektívna oblasť).

Počas realizácie prvej fázy výskumu nás potešilo prijatie takejto formy výučby zo strany žiakov. Ich nadšenie odôvodňovali tým, že takéto aktivity na škole (či už základnej alebo strednej) neabsolvovali a páčila sa im myšlienka tímového hodnotenia, ktoré bolo vzhľadom k ostatným členom tímu anonymné.

Analýzou dát z dotazníka sme zistili, že sa žiaci (v prípade, ak odpovedali slovami inými ako neviem/nič) v rámci tímu dokázali zhodnúť v silných a slabých stránkach. Vo všeobecnosti zatiaľ platí, že väčšina žiakov nedokáže podať komplexnejšie hodnotenie svojich spolužiakov. Tento jav pripisujeme práve absencii tímových aktivít v predošlých rokoch štúdia.

Vďaka takejto forme výučby sme nezískali len dáta o tom, či sú žiaci schopní hodnotiť, ale získali sme aj pohľad na klímu triedy. Dokázali sme identifikovať žiakov s algoritmickým myslením, ktorí sa zrejme informatike a programovaniu venujú aj vo voľnom čase. Zásluhou tímového projektového vyučovania sme odhalili konflikty medzi žiakmi a dokázali diagnostikovať členov tímu, ktorí by mohli mať aj iné (rodinné alebo psychologické) problémy.

Najväčšou nevýhodou celej realizácie tímového projektového vyučovania bola veľká časová náročnosť v oblasti spravovania projektov a recenzií. Riešením takejto nevýhody by mohol byť voľne šíriteľný softvér na realizáciu podobných aktivít. Napriek tomu sme toho názoru, že výhody takejto formy výučby prevyšujú nad nevýhodami.

Poďakovanie

Chcel by som sa poďakovať mojej školiteľke, Zuzane Kubincovej, ktorá mi pomáha a vedie ma pri realizácii výskumu, ktorého výsledkom bude moja diplomová práca.

Literatúra

[1] CESTONE, C.M., LEVINE, R.E and LANE, D.R. (2008), Peer assessment and evaluation in team-based learning. New Directions for Teaching and Learning, 2008: 69-78.

[2] SAHIN, S. (2008), An Application of Peer Assessment in Higher Education. Turkish Online Journal of Educational Technology - TOJET, v7 n2 p5-10.

[3] FATE, M., HAIGHT, R., CLAPP, P., MCCOLLUM, M. (2017), Peer Evaluation

Instrument Development, Administration, and Assessment in a Team-based Learning Curriculum. American Journal of Pharmaceutical Education May 2017, 81.

[4] DINGEL, M., WEI, W. and HUQ, A. "Cooperative learning and peer evaluation: the effect of free riders on team performance and the relationship between course performance and peer evaluation." Journal of the Scholarship of Teaching and Learning 13 (2013): 45-56.

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 322–327
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Dominika Valášková, Mária Slavíčková

Rozvoj funkcionálneho myslenia - lineárna funkcia

Dominika Valášková[1*] Mária Slavíčková[1†‡]

[1]Katedra didaktiky matematiky, fyziky a informatiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstrakt: Predložená práca sa zaoberá spôsobom, akým by si mohli žiaci pojem lineárnej funkcie budovať využitím tzv. meniacich sa vzorov. Dôvodom pre tento prístup bolo, že častokrát sa táto téma učí to len spôsobom „toto je vzorec a počítajte podľa neho“. To u žiakov môže spôsobiť nepochopenie učiva a odpor k matematike (keďže je to súbor vzorcov, ktoré treba poznať). V práci stručne predstavíme Teóriu generického modelu, ktorá je považovaná za protipól práve opísaného spôsobu vyučovania. Po vysvetlení základných pojmov predstavíme dve aktivity na rozvoj funkčného myslenia a tvorbou predpisu lineárnej postupnosti (v podstate ide o všeobecný predpis aritmetickej postupnosti). K jednej aktivite je vytvorená séria rozširujúcich, resp. podmienky upravujúcich podúloh s cieľom uvedomiť si vplyv zmeny parametrov na tvar výsledného vyjadrenia funkčnej závislosti v podobe všeobecného predpisu postupnosti s definičným oborom prirodzených čísel, od ktorého je už len malý krok k funkcii s definičným oborom reálnych čísel.

Kľúčové slová: lineárna funkcia, generický model, gradovaný vzor

Úvod

Kvalita vzdelávania je veľmi dôležitým faktorom v dnešnej dobe, s ktorým je veľmi úzko spojený proces poznania. Na tento proces sa často zabúda a žiaci sa len mechanicky učia rôzne poučky, bez toho aby sa čo i len snažili objaviť fakty prečo je to tak. Potom v neskoršom veku žiaci častokrát nerozumejú matematike, pretože základy boli len mechanicky naučení a neporozumeli im. Preto je dôležité sa zamerať na proces poznania už počas základnej školy. V tejto práci uvedieme Teóriu generických modelov (TGM), ktorá je práve zameraná na proces poznania a odhaľovania "tajomstiev"za niektorými poučkami. V prvej časti práce uvedieme samotnú TGM spolu s ilustračným príkladom. V druhej časti uvedieme gradované úlohy, ktoré sú vytvorené tak aby žiakom pomohli s postupným poznávaním.

*valaskova33@uniba.sk
†maria.slavickova@fmph.uniba.sk
‡Školiteľ

1 Teória generických modelov

Teória generického modelu patrí medzi tzv. konštruktivistické prístupy k vyučovaniu. Konštruktivizmus má viacero prúdov. Najznámejším je tzv. kognitívny konštruktivizmus, ktorého predstaviteľom je aj švajčiarsky psychológ J. Piaget. Pri konštruktivistickom prístupe si žiak má počas vyučovania osvojiť nové učivo, o ktorom má už v hlave vytvorenú určitú predstavu. Intuitívne porozumenie pojmom sa nazýva prekoncept. Čo nastane ak sa žiak stretne s novými informáciami? Podľa [Piaget, 1970] môžu nastať nasledovné situácie:

1. Asimilácia: Žiak nové učivo zaradí do sústavy svojich poznatkov, pretože sa dokáže prispôsobiť niektorej starej už existujúcej schéme.

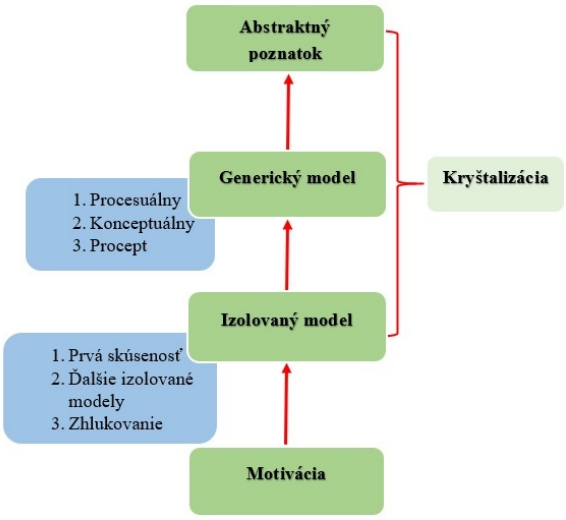
2. Akomodácia: Nové učivo nie je v súlade s tým čo žiak už pozná a dochádza k nerovnováhe a potrebe rekonštruovať už existujúce schémy v mozgu.

3. Nové učivo žiaka nezaujíma, nemá k nemu vytvorený žiaden prekoncept. Nedochádza k učeniu sa žiaka.

[Turek, 2010] upozorňuje na problém, ktorý môže nastať vtedy ak má žiak zle vybudovaný prekoncept a teda učiteľ musí byť pripravený, aby daný fakt vhodnými argumentami vyvrátil. K vytvoreniu nesprávneho prekonceptu môže dôjsť aj priamo na hodine. Zabrániť tomuto javu sa dá prostredníctvom spätnej väzby, teda učiteľ zistí, či žiaci učivo správne pochopili.

Nás bude zaujímať tzv. generický konštruktivizmus, ktorého autormi sú Vít a Milan Hejný. [Kuřina, 2009] uvádza, že cieľom tohto prístupu je znížiť počet hodín matematiky, na ktorých bude učivo povedané žiakom bez akéhokoľvek ďalšieho hlbšieho zmyslu. Ak je veľa hodín matematiky bez procesu poznania, tak verejnosť potom právom považuje matematické vzdelanie za zbytočné.

[Hejný, 2014] uvádza, že kľúčovú úlohu v celom modeli (vid obr. 1) zohráva motivácia. Žiak, ktorý sa nebude chcieť učiť, ktorý nie je motivovaný sa učiť



Obr. 1: Schéma TGM

sa nebude si budovať ani žiadnu štruktúru z poznatkov vďaka, ktorým by mohol napredovať a objavovať nové veci. Motivácia je preto veľmi potrebná pre dobrý začiatok procesu učenia sa. Môže mať rôzne formy: od slov povzbudenia, zaujímavého príbehu, budúceho využitia vedomostí alebo aj keď len predstavy získať dobrú známku. Je potrebné aby motivácia bola prítomná po celý čas procesu učenia sa. Na začiatku je vhodné povedať, prečo ideme riešiť vôbec danú úlohu. Keďže motivačné pole dieťaťa je veľmi široké môžeme sa oprieť o situácie, s ktorými sa môže stretnúť aj v bežnom živote napr. príprava stolov na narodeninovú oslavu. Pokračovať priebežným povzbudením, že to má naozaj zmysel a pochváliť za každý malý úspech, pretože úspech žiaka je dôležitým motivačným faktorom.

Po motivácii prichádzame k izolovaným modelom. Podľa [Kuřina, 2009] model chápeme ako určitý metodologický prostriedok k ďalšiemu poznaniu a skúmaniu situácie. Základom rozširovania ľudského poznania je súbor viacerých izolovaných modelov, ktoré sa prepájajú a vytvárajú zložitejší model. Pri budovaní fázy izolovaných modelov môžeme sledovať tri štádiá:

1. Prvá konkrétna skúsenosť s modelom.

2. Zoznámenie sa s ďalšími modelmi.

3. Poznanie vzájomných súvislostí medzi modelmi a vytváranie skupín viacerých izolovaných modelov, lepšie poznanie ich podstaty.

Dôležité je vzájomné prepojenie izolovaných modelov, pretože bez toho by sme sa nevedeli dostať k vyššiemu univerzálnemu modelu. Vedomosti, ktoré nie sú vybudované na základe izolovaných modelov sú väčšinou silno formálne a žiaci pri nich nemajú žiadnu konkrétnu predstavu. Existuje možnosť ako odstrániť tento nedostatok a to doplnením izolovaných aj univerzálnych modelov k týmto vedomostiam.

Ak máme dostatočnú skúsenosť, resp. zásobu izolovaných modelov, abstrakčným zdvihom sa dostávame ku generickému modelu. Generický model má všeobecnejší charakter ako akýkoľvek izolovaný model. Bližšie si ho môžeme predstaviť ako opis situácie vo vhodnom jazyku, ktorý nám uľahčí predpoveď. Skúsenosti z tvorby viacerých izolovaných modelov vedú ku konštrukcii generického modelu. Okamih vzniku generického modelu sprevádza radosť, ktorá je spojená aj s abstrakčným zdvihom a objavením niečoho nového. Pričom je vždy dôležité overiť správnosť objaveného generického modelu na viacerých príkladoch.

Najvyššou úrovňou sú tzv. abstraktné modely. Tieto sú väčšinou obsahom matematických učebníc. Objavujú sa tu rôzne na prvý pohľad nezrozumiteľné definície a axiómy. Naučiť sa matematiku na základe takýchto nezrozumiteľných pojmov je priam nemožné, preto sú veľmi dôležité predchádzajúce modely aby u žiaka vznikla nejaká predstava a vybudovali sa súvislosti medzi pojmami.

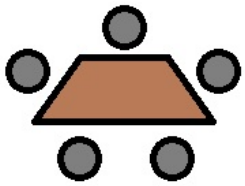
Pri opísanom modeli sa začína nová vedomosť prepájať s existujúcimi poznatkami, kryštalizuje sa. Na prvý pohľad sa môže zdať, že kryštalizácia prebieha až na konci celého procesu poznávania. Opak je pravdou a každý krok podieľajúci sa na formovaní abstraktnej vedomosti sa okamžite stáva súčasťou celej poznatkovej štruktúry a vstupuje do kryštalizácie. Taktiež pri väčšine poznatkov, ktoré si žiak formuje pri poznávacom procese nemajú finálny tvar a až v priebehu kryštalizácie budú dotvorené.

Učenie je proces konštruovania poznatkových štruktúr a práve teória generického modelu je zameraná na vytváranie týchto štruktúr. Človek obvykle najskôr pochopí niekoľkým konkrétnym príkladom, všíma si, čo majú spoločné, a postupne dochádza k všeobecným poznatkom. Jednotlivé fázy TGM si ukážeme na príklade rastúceho vzoru, keďže práve na tých je ťažisko predloženej práce.

1. **Motivácia:**

   Žiakom možno povedať, že našou úlohou bude odhaliť tajomstvo ako rýchlo vypočítame počet ľudí sediacich okolo 30 stolov, bez toho aby sme si ich všetky museli kresliť. Žiakom zadáme nasledovnú aktivitu (prebrané z [Blanton, 2008]):

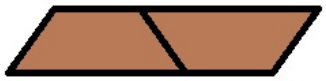
   Na obrázku nižšie môžeš vidieť hnedý lichobežníkový stôl a sivé kruhy predstavujúce stoličky, na ktoré usádzaš maximálny počet ľudí. Okolo jedného lichobežníkového stola vieš usadiť maximálne 5 ľudí.



Obr. 2: Lichobežníkový stôl so stoličkami

2. **Izolované modely:** Zadanie úlohy a) vedie k vytváraniu izolovaných modelov: skúšame, hľadáme, skúmame postupnosť pre konkrétnu hodnotu dvoch spojených stolov a počítame ďalší krok. Ide o prvú skúsenosť s novou situáciou. V úlohe b) sa zoznamujeme s ďalšími izolovanými modelmi a poznávame prvé vzťahy medzi modelmi, čo postupne vyúsťuje do úlohy c).

   a) Ak spojíš dva lichobežníkové stoly koľko najviac ľudí vieš usadiť okolo stola? Zakresli do obrázku.



Obr. 3: Dva lichobežníkové stoly bez stoličiek

   b) O koľko sa zmení počet ľudí ak spojíme tri stoly? Zdôvodni.

3. **Generický model:**

   Úloha c) vedie k vytváraniu generického (univerzálneho) modelu, kedy si začíname všímať súvislosti v tabuľke. Ide o procesuálny model, keďže sledujeme rozdiely medzi krokmi a spôsob akým pridávame ďalšie stoličky.

   c) Doplň údaje do tabuľky.

Počet stolov	1	2	3	4	5	10	20
Počet ľudí							

4. **Abstraktný poznatok**

   Úloha d) nás tlačí k abstrakcii, ktorá nám už trochu vyplýva z predchádzajúcich modelov. Posledná úloha slúži len na overenie, či žiak rozumie uvedenému vzťahu, tomu, ako vznikol a čo znamenajú jednotlivé premenné a ako má čísla dosadiť.

   d) Napíš predpis na základe, ktorého budeš poznať závislosť medzi počtom ľudí l a počtom stolov s.

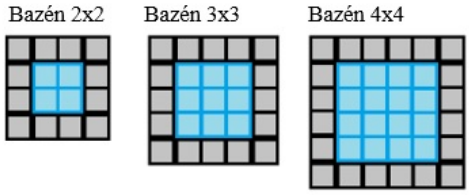
   e) Využi vzťah z úlohy d) na výpočet koľko ľudí usadíš za 30 stolov.

2 Gradované úlohy

2.1 Rastúce vzory

V tejto časti ponúkneme aktivitu a jej modifikácie zamerané na rastúce vzory. Každá z nich obsahuje obrázkovú postupnosť, ktorá je názorne nakreslená v troch po sebe idúcich krokoch (uvádzame tri po sebe idúce členy postupnosti, zvyčajne prvé tri členy). Obrázok využijeme pre jednoduchšiu vizualizáciu a na ľahšie definovanie určitého predpisu (pravidla), na základe ktorého postupnosť rastie. K uvedenej aktivite je vytvorená aj jej modifikácia, ktorá umožňuje pochopiť danú postupnosť v rôznych súvislostiach a zároveň ponúka možnosť pre širší okruh otázok. Pri niektorých úlohách ponúkame aj očakávané riešenia, ktoré sú však len návrhom, nepredstavujú teda jedinú správnu odpoveď.

Aktivita: Kachličky okolo bazéna podľa [K.A. Markworth, 2009]:



Obr. 4: Ukladanie kachličiek okolo bazéna

Na obrázku je znázornený spôsob ukladania kachličiek okolo bazéna. Aby sa dalo do bazéna pohodlne vchádzať a následne sa v ňom kúpať, budeme

uvažovať o najmenšom možnom bazéne v rozmere 2x2metre. Bazén budeme postupne zväčšovať avšak zachováme štvorcový tvar bazéna. Obrázok slúži pre ľahšiu vizuálnu predstavu a tiež pre ľahšie základné výpočty. Prezri si dôkladne postupnosť obrázkov a vyrieš zadané úlohy.

Úlohy:

a) Koľko kachličiek budeme potrebovať okolo bazéna veľkosti 5x5?

b) Ako závisí počet kachličiek od veľkosti bazéna?

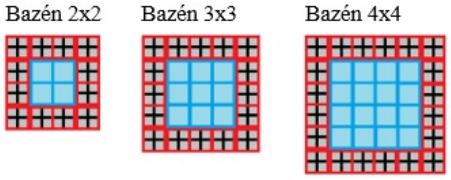
c) Napíšte predpis, kde k označuje počet kachličiek a bb veľkosť bazéna.

d) Aký rozmer musí mať bazén aby sme použili presne 53 kachličiek?

e) Aký najväčší rozmer môže mať bazén ak k dispozícii máme 74 kachličiek?

Modifikácia aktivity: Kachličky okolo bazéna I.

Na obrázku je znázornená postupnosť akou vieme zväčšovať bazén a akým spôsobom budeme ukladať kachličky okolo bazéna. Rovnako ako v pôvodnej aktivite platí, že najmenší bazén, o ktorom budeme uvažovať má rozmer 2x2 metre.



Obr. 5: Modifikácia ukladania kachličiek okolo bazéna I.

Kachličky sa však štandardne vyrábajú v rozmere 50x50cm (0,5x0,5m), preto na vytvorenie jedného štvorca zodpovedajúceho „štvorcu bazéna“ budeme potrebovať 4 kachličky, ktoré budú uložené nasledovne:



Obr. 6: Detail ukladania kachličiek

Žiaci majú možnosť si uvedomiť, že je to minimálna modifikácia oproti pôvodnej aktivite a preto možno využiť predchádzajúce výsledky, ktoré stačí len trochu upraviť.

Úlohy:

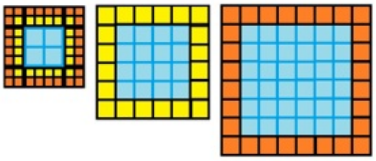
a) Koľko kachličiek budeme potrebovať okolo bazéna veľkosti 6x6?

Môžeme postupovať rôznymi spôsobmi:

1. Vyriešime si úlohu pre bazén veľkosti 5x5 a až potom pre veľkosť 6x6, čiže pôjdeme na to postupne.

2. Uvedomíme si tvar bazéna, štvorec a budeme využívať jeho vlastnosti, ktoré vieme odčítať z obrázka bazén 3x3: na každej strane je 12 kachličiek, pretože rozmer strany je 3 a na každý meter potrebujeme 4 kachličky, t.j. $3.4 = 12$. Počet strán je 4, z toho nám vznikne jednoduchý výpočet $12.4 = 48$. Na záver vyplníme rohy, čo predstavuje ďalších $4.4 = 16$ kachličiek, čiže ešte $+16$. Celkovo to je $48 + 16 = 64$ kachličiek okolo bazéna 3x3. Rovnakú úvahu použijeme pre bazén 5x5, t.j. do prvého výpočtu miesto čísla 3 dáme číslo 5. $(5.4 = 20)$

3. Pri bazéne 2x2 možno pristupovať k riešeniu situácie nasledovne: je to počet kachličiek okolo 4x4 (z predchadzajúcej aktivity) plus počet kachličiek okolo bazéna 6x6 (z predchádzajúcej aktivity) – pozri obrázok. Podobne postupujeme aj pre bazén veľkosti 6x6.



Obr. 7: Spôsob riešenia modifikácie aktivity

b) Ako závisí počet kachličiek od veľkosti bazéna? Stačí si uvedomiť, že na každú stranu bazéna potrebujeme presne toľko kachličiek aký je jej rozmer a za každým treba vyplniť aj rohy kachličkami, takže na záver pripočítame 16, bez ohľadu na veľkosť bazéna.

c) Akými spôsobmi môžeme riešiť úlohu aby sme dostali počet kachličiek pre rôzne veľkosti bazéna?

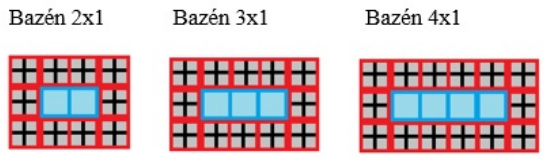
Vytvoriť tabuľku s hodnotami, geometricky (nakresliť si ďalšie bazény) a z toho odčítavať počet kachličiek, vytvoriť všeobecný predpis.

d) Napíšte predpis, kde k označuje počet kachličiek a bxb veľkosť bazéna.

Najdôležitejšie je si uvedomiť koľko kachličiek a podľa čoho sa pridávajú v každom kroku a tiež, že rohy bazéna je potrebné vyplniť samostatne. Využijeme všetky úvahy uvedené v predchádzajúcich úlohách a vytvoríme všeobecný predpis, keďže bazén je štvorec v predpise využijeme len jedno b:

$$k = 4.b + 16$$

Modifikácia aktivity: Kachličky okolo bazéna II.



Obr. 8: Modifikácia ukladania kachličiek okolo bazéna II.

Na obrázku je znázornené akým spôsobom budeme ukladať kachličky okolo bazéna. Najmenší bazén o akom má zmysel uvažovať má rozmer 2x1m. Kachličky sa bežne vyrábajú v rozmere 50x50cm, preto ich budeme ukladať tak aby sme okolo bazéna vytvorili chodník široký jeden meter (viď. Obr. 8).

Úlohy:

a) Doplň tabuľku.

Veľkosť bazéna	2x1	3x1	4x1	5x1	10x1	20x1	50x1
Počet kachličiek							

b) Koľko kachličiek potrebujeme na obloženie bazéna s rozmerom 10x1?

c) Ako závisí počet kachličiek od tvaru bazéna?

d) Ovplyvní tvar (štvorec, obdĺžnik) bazéna počet potrebných kachličiek?

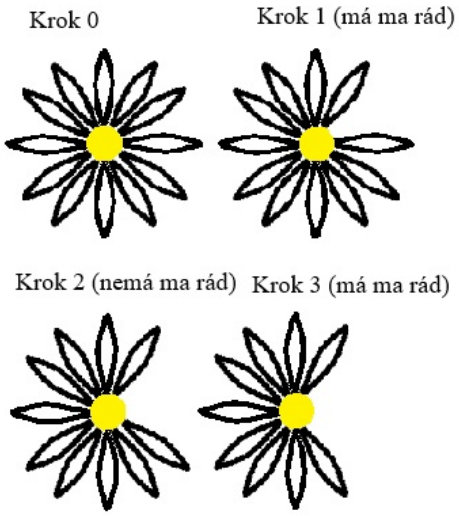
2.2 Klesajuce vzory

V tejto časti uvedieme iný spôsob využitia obrázkových postupností. Keďže všetko čo poskladáme musíme vedieť aj rozložiť tak je rovnako dôležité poznať tiež vlastnosti klesajúcich vzorov. Zadanie aktivity je vytvorené tak aby obrázok uľahčil vizualizáciu postupnosti a úlohy sú napísané v poradí aby postupne odkryli všetky podstatné vlastnosti.

Aktivita: Margarétka

Kontext nasledujúcej aktivity je určený skôr pre dievčatá, pretože je založená na detskej hre, s ktorou sa mnohé dievčatá v detstve stretli. Jej cieľom je vzbudiť záujem dievčat o matematiku. Zároveň pri riešení aktivity využijeme ďalšie znalosti žiakov ako je deliteľnosť dvoma (resp. celočíselné delenie zo zvyškom).

Dve kamarátky, Janka a Danka, našli na lúke margarétky a rozhodli sa, že z nich budú trhať lupienky a pri každom odtrhnutom lupienku budú hovoriť „má ma rád, nemá ma rád, ...“. Pozri si nasledujúci obrázok a vyrieš úlohy, koľko lupienkov majú dievčatá odtrhnúť.



Obr. 9: Trhanie lupienkov z margarétky

Úlohy:

a) Koľko lupienkov musí Janka odtrhnúť aby jej vyšlo, že ju chlapec má rád? Zdôvodni.

Janka musí odtrhnúť jeden alebo tri alebo päť lupienkov, aby jej vyšlo že ju chlapec má rád. Počet odtrhnutých lupienkov musí byť nepárny, pretože v nepárnom kroku ju chlapec má rád.

b) Koľko lupienkov musí Danka odtrhnúť aby jej, vyšlo že ju chlapec nemá rád? Zdôvodni.

Danka musí odtrhnúť dva alebo štyri alebo šesť lupienkov, aby jej vyšlo že ju chlapec nemá rád. Počet odtrhnutých lupienkov musí byť párny, pretože v párnom kroku ju chlapec nemá rád.

c) Koľko lupienkov trhajú dievčatá v každom kroku?

Dievčatá v každom kroku trhajú po jednom lupienku.

d) Koľko lupienkov odtrhnú dievčatá v kroku 10? Zdôvodni.

V kroku 10 odtrhnú dievčatá 10 lupienkov, pretože v každom kroku odtrhnú práve jeden lupienok.

e) Koľko lupienkov musia dievčatá odtrhnúť aby im zostalo 5 lupienkov? Zdôvodni.

Najskôr potrebujeme vedieť koľko lupienkov má margarétka spolu. Na začiatku má margarétka 12 lupienkov, na to aby dievčatám zostalo 5 lupienkov musia odtrhnúť 7 lupienkov, pretože $12-7=5$.

f) Aký je vzťah medzi číslom kroku k a celkovým počtom lupienkov l?

Využijeme poznatky z predchádzajúcich úloh a vytvoríme vzťah:

$$l = 12 - 1.k$$

Z celkového počtu (12 lupienkov) v každom kroku odtrhneme jeden lupienok.

2.3 Zhrnutie typov úloh

Všetky uvedené úlohy majú viacero spoločných znakov. V každej z úloh sa zväčšuje alebo zmenšuje počet predmetov v postupnosti a teda vieme určiť lineárne vlastnosti.

Pri každej gradovanej úlohe vieme určiť predpis lineárnej funkcie/závislosti na základe toho ako sa daná postupnosť obrázkov mení. V predpise nám vystupuje číslo kroku a premenná, ktorá určuje počet predmetov (stolov, lupienkov,...). Pre ľahšie pochopenie vždy môžeme označiť neznámu premennú začiatočným písmenom predmetu, ktorého počet chceme daným predpisom určiť, t.j. veľkosť bazéna – b, stoly – s, lupene - l. Hlavným spoločným znakom je ***konštantná diferencia*** a teda hodnota, o ktorú sa rovnomerne (konštante) daná postupnosť zväčšuje/zmenšuje (pri rekurzívnom predpise). Diferencia vo všeobecnom predpise nám reprezentuje koeficient pri lineárnom člene. Číslo, ktorým násobíme premennú vo všeobecnom predpise.

Záver

V tomto príspevku sme sa venovali procesu poznania a opísali sme teóriu generického modelu, ktorá podporuje tento proces. Navrhli sme viaceré úlohy, také aby boli pre žiakov čo najjednoduchšie predstaviteľné (situácie, s ktorými sa stretnú aj v bežnom živote). Aktivity obsahujú úlohy, ktoré môžu pomôcť zlepšiť poznanie.

V prvej časti sme sa venovali TGM, ktorú sme následne predstavili na konkrétnom príklade.

V druhej časti sme uviedli viaceré aktivity zamerané na gradované vzory, ktoré nás naviedli na predpis lineárnej funkcie.

V ďalšom rozšírení práce by sme chceli zahrnúť viac typov úloh. Chceli by sme aby obsahovala aj zložitejšie postupnosti prípadne spojité úlohy. Zaujímavým pozorovaním by bolo aj testovanie navrhnutých úloh v praxi v rôznych triedach druhého stupňa základných škôl. Na základe testovania, by sa nám určite naskytli ďalšie otázky, na ktoré by sme tiež chceli nájsť odpovede.

Poďakovanie

Ďakujem školiteľke PaedDr. Márii Slavíčkovej, PhD. za pomoc, za jej cenné poznatky a vecné pripomienky, ktoré mi pomohli pri písaní tejto práce.

Literatúra

[Blanton, 2008] Blanton, M. (2008). *Algebra and the Elementary Classroom: Transforming thinking, transforming practice*. Heinemann.

[Hejný, 2014] Hejný, M. (2014). *Vyučování matematice orientované na budování schémat*. Univerzita Karlova v Praze, Pedagogická fakulta, Praha.

[K.A. Markworth, 2009] K.A. Markworth, . S. F. (2009). *Framework for analyzing geometric pattern tasks*.

[Kuřina, 2009] Kuřina, M. H. . F. (2009). *Dítě, škola a matematika: konstruktivistické přístupy k vyučování. Vyd. 2.* Portál, Praha.

[Piaget, 1970] Piaget, J. (1970). *Psychologie inteligence*. SPN, Praha.

[Turek, 2010] Turek, I. (2010). *Didaktika*. Wolters Kluwer (Iura Edition), Bratislava.

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, pp. 328–336
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Barbora Ollerínyová, Mária Slavíčková

Podpora argumentácie v téme analytická geometria

Barbora Ollerínyová[1]* Mária Slavíčková[1†]
[1]FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstrakt

Téma analytickej geometrie vie skĺznuť do vyučovania postupov, vzorcov a algoritmov, čím sa vytratí jej potenciál a význam. V príspevku preto predstavíme aktivitu, ktorá by na vyučovaní mohla rozprúdiť diskusiu a argumentáciu stratégie riešenia. Aktivita je navrhnutá formou riadeného objavovania. Ako motiváciu používame pomerne známy hlavolam, ktorý na prvý pohľad pôsobí ako kúzelnícky trik, no možno ho objasniť pomocou nástrojov analytickej geometrie. Záujem o pochopenie rébusu dovedie študentov od skúmania lineárne nezávislých vektorov až k parametrickému vyjadreniu priamky v rovine.

Kľúčové slová: bádateľsky orientované vyučovanie, lineárna nezávislosť vektorov, parametrické vyjadrenie priamky

1 Úvod

V ostatných rokoch môžeme na našich školách pozorovať snahu o implementáciu postupov, ktoré stavajú žiakov do role vedca – objaviteľa. Úlohou týchto postupov je docieliť kladný prístup žiakov k vedeckému spoznávaniu sveta a na základe svojich pozorovaní si osvojovať nové vedomosti, cibriť kritické myslenie.

Téma analytickej geometrie sa môže žiakom častokrát javiť ako zmes vzorcov, ktoré sú komplikované na zapamätanie aj pochopenie. V predloženom príspevku sa preto zameriavame na zatraktívnenie tohto učiva. Cieľom tejto práce je ukázať žiakom, že aj preberanie tejto témy môže byť zábava. Na porozumenie a osvojenie si pojmov nepotrebujú mať vzorce naučené naspamäť, postačia im základné znalosti z vektorovej algebry, zvedavosť a chuť objavovať.

Navrhnutá aktivita v sebe zahŕňa úlohy, pri ktorých žiaci pomocou riadeného bádania objavujú pojem lineárnej závislosti respektíve nezávislosti vektorov, nájdu parametrické vyjadrenie priamky a naučia sa s touto rovnicou priamky pracovať. Žiaci riešia úlohy v skupinách. Počas samotného objavovania zákonitostí analytickej geometrie si teda žiaci cibria aj svoju argumentačné schopnosti a zručnosti.

2 Teoretické východiská

2.1 Bádateľsky orientované vyučovanie

Pojem bádania, na základe ktorého je postavená predložená aktivita, má niekoľko definícií. Jednou z nich je:
„Bádanie je cieľavedomý proces spojený s rozpoznaním problému, návrhom vhodných experimentov a posúdením alternatívnych možností, plánovaním postupu skúmania, tvorbou a overovaním hypotéz, vyhľadávaním informácií, vytváraním modelov študovaných dejov, diskusiou s ostatnými a formulovaním logických argumentov.“ [Linn et al., 2004]

Žiak pri rozvíjaní svojich zručností v procese bádania však potrebuje učiteľa, prípadne si pomáha materiálmi určenými na výučbu. Podľa miery zapojenia učiteľa do procesu bádania rozlišujeme rôzne úrovne bádania. Podľa riešiteľov projektu VEMIV (Výskum efektívnosti metód inovácie výučby matematiky, fyziky a informatiky) rozlišujeme nasledovné úrovne bádania:

- Interaktívna diskusia
- Potvrdzujúce bádanie
- Riadené bádanie
- Nasmerované bádanie
- Otvorené bádanie

V predloženom príspevku používame na dosiahnutie stanoveného cieľa riadené bádanie: Žiaci riešia problém sformulovaný učiteľom na základe pripraveného postupu, pričom výsledok nepoznajú. [Balogová, Ješková, 2015]

2.2 Metóda E-U-R

Forma plánovania výučby jednotlivých vyučovacích hodín je v našom prípade model E-U-R.

Názov modelu predstavuje skratku začiatočných písmen zo slov: evokácia, uvedomenie a reflexia. Evokácia má za úlohu žiakov zaktivizovať, motivovať, priblížiť im učivo, ktoré budú preberať. Uvedomenie slúži na získanie a spracovanie nových vedomostí. Žiaci si v tejto fáze uvedomujú význam toho, čo sa naučili a prepájajú si nové vedomosti s tými, ktoré si vybavili vo fáze evokácie. Reflexia

* halajova17@uniba.sk
† maria.slavickova@fmph.uniba.sk

slúži na to, aby si žiak vytvoril vlastný názor na danú tému a utvrdil sa v tom, čo sa naučil.

3 Aktivita

V tejto kapitole predstavíme sekvenciu troch vyučovacích hodín, ktoré prevedú žiakov od objavenia lineárnej nezávislosti vektorov až k práci s parametrickým vyjadrením priamky.

3.1 Návrh prvej vyučovacej hodiny

EVOKÁCIA

Žiaci by mali rozumieť nasledovným pojmom: *súradnicová sústava, priradenie súradníc k bodu, vektor, operácie s vektormi, sčítanie vektorov, násobok vektora*. Skôr ako s aktivitou začneme, odporúčame však zaradiť na úvod preopakovanie týchto vyššie spomenutých pojmov, s ktorými sa pracovalo na predošlých hodinách. Opakovanie by mohlo prebiehať nižšie opísanou formou:
Učiteľ žiakov rozdelí do dvojíc. Príklad na preopakovanie znie:
Dané sú body A[-1,2], B[7,4]. Úlohou žiakov je:

- vyznačiť vektor $\overrightarrow{AB}$
- vyznačiť vektor $\overrightarrow{AC} = \frac{1}{2}\overrightarrow{AB}$
- vyznačiť vektor $\overrightarrow{AD}$, ktorý má y-ovú súradnicu o 1 väčšiu ako vektor $\overrightarrow{AC}$
- zistiť súradnice vektorov $\overrightarrow{AB}, \overrightarrow{AC}, \overrightarrow{AD}$

Úloha je súťažná – kto je hotový, vstane. Prvé tri dvojice, ktoré majú správne vyriešený príklad, dostanú napríklad plusový bod (alebo akúkoľvek „odmenu“ ktorú učiteľ má zaužívanú). Tí, čo úlohu dokončili prví, pôjdu úlohu preriešiť na tabuľu.

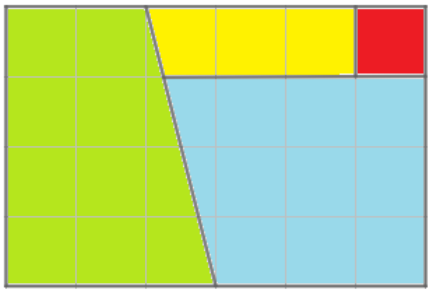
Po úvodnom zopakovaní prejdeme k zadaniu problému na riešenie. Žiakov možno uviesť do deja napr. tým, že sme natrafili na video o nekonečnej čokoláde a že či je niečo také vôbec možné. Video je dostupné na **Obr. 1**.



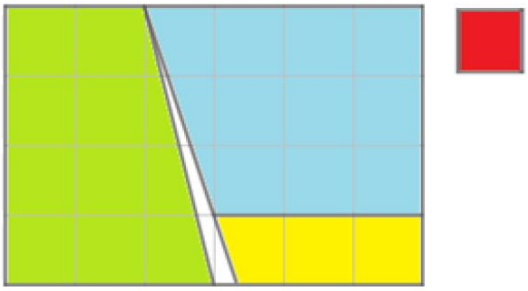
Obr. 4 Nekonečná čokoláda

Obr. 1: QR kód k odkazu
https://www.youtube.com/watch?v=bL0h18mYyrU

Na videu vidíme, ako šikovným rozrezaním čokolády a následným preusporiadaním dielikov nám vznikne čokoláda o pôvodných rozmeroch a dielik navyše. Takýmto rezaním by sme predsa dokázali dookola získavať tabličky čokolády navyše! Alebo žeby nie?
Pre odvážnejších kolegov-učiteľov: tento experiment možno spraviť aj naživo pred žiakmi: Rozrežeme tabličku čokolády 6×4 ako na Obr. 2, odlomíme jeden štvorček (červený) a naspäť poskladáme tabličku ako na Obr. 3. Ostane nám zdanlivo neporušená čokoláda a kúsok čokolády (červený štvorček) navyše.



Obr. 2: Spôsob rezania čokolády



Obr. 3: Preusporiadanie dielikov čokolády

Po videu/experimente navrhujeme krátku moderovanú diskusiu. Najprv u žiakov vyzistíme, či videli už takéto video, prípadne či poznajú aj iné podobné hlavolamy či očné klamy. Ďalšie otázky na zamyslenie: Čo keby sme tú čokoládu rezali nejako inak, tiež by sme ju vedeli následne poskladať tak, aby nám ostali nejaké kúsky navyše? Dokážeme čokoládu nafukovať do ďalších veľkostí len vhodným orezaním a preusporiadaním? V ideálnom prípade by sa žiaci mali spoločne zhodnúť, že to musí byť nejaký klam. Pýtajme sa žiakov - kde je teda problém?

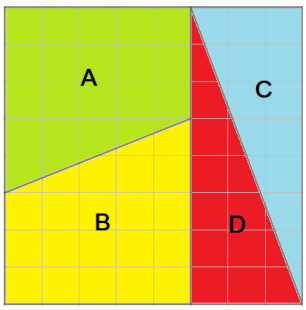
Učiteľ sa rozpráva s celou triedou, kladie otázky, vždy po položení otázky necháva aspoň 10 sekúnd ticho na premyslenie. Ďalej vyvoláva žiakov, ktorí sa hlásia na odpoveď otázky. Niektoré žiacke komentáre môžu byť aj námetom pre iných žiakov, aby sa zapojili do diskusie. Pokiaľ učiteľ vidí, že žiaci vyčerpali postrehy k aktuálnej otázke, položí im ďalšiu.

Možno žiaci odhalia, kde je klam, vtedy im predostrieme ďalšiu úlohu „Kde sa vzal štvorček?“ [Belan, 2017] - či by si rovnako vedeli poradiť aj s iným, podobným príkladom.

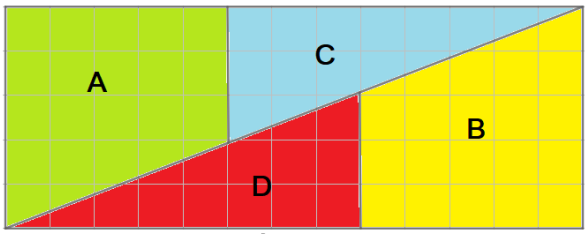
V prípade, že by si s príkladom o čokoláde poradiť nevedeli, sa rovnako presunieme k úlohe „Kde sa vzal štvorček?“ (s komentárom, že možno ďalšia úloha nám pomôže objasniť, čo sa stalo vo videu a že sa porozprávame, ako spolu tie úlohy súvisia).

KDE SA VZAL ŠTVORČEK?

Farebný štvorec zložený zo štyroch útvarov A, B, C, D *sa skladá z* 8×8 *malých štvorčekov. Keď tieto útvary preusporiadame inak, dostaneme obdĺžnik. Obdĺžnik má však rozmery* 13×5*, čo je v súčine o jeden štvorček viac ako má štvorec. Ako je to možné?*



Obr. 5: Štvorec z hlavolamu



Obr. 6: Obdĺžnik z hlavolamu

Opäť necháme žiakov o probléme diskutovať. Učiteľ, ako moderátor debaty, kladie triede otázky a čaká na reakcie, postupne vyvoláva hlásiacich sa žiakov: Ako spolu súvisí video a tento hlavolam? Vieme zistiť, prečo v oboch úlohách vznikajú navyše štvorčeky?

Žiaci by počas diskusie sami mohli prísť s nápadmi, ako zistiť, kde je problém. Pravdepodobne sa najprv presvedčia, že jednotlivé útvary A, B, C, D sa naozaj skladajú na oboch obrázkoch z rovnakého počtu štvorčekov. To je dobrý základ k zisteniu, že ak štyri farebné útvary sú „v poriadku“, potom sa ten chýbajúci štvorček zrejme nachádza „zamaskovaný“ v obrázku Obr. 6. Možno budú chcieť aj skúsiť nakresliť a rozstrihať podobný štvorec, no to je aktivita na dlhšie (možnosť zadať aktivitu ako nepovinnú domácu úlohu). Ak žiaci trvajú na tom, že si chcú skúsiť obdĺžnik poskladať tiež, v takom prípade je dobré mať nachystaných niekoľko štvorcov $8x8$, aby si ich žiaci mohli sami rozstrihať.

Následne sa hodina odoberá jedným z nasledovných dvoch scenárov:

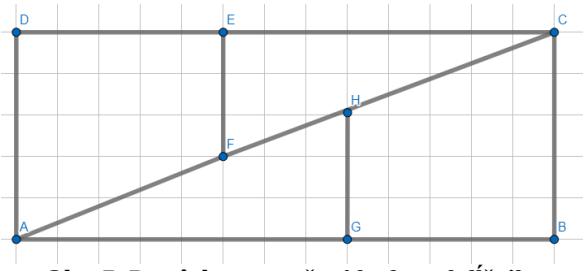
1. možnosť - žiakom sa podarí odhaliť hlavolam: Ak žiaci odhalili pri predošlom videu trik s čokoládou, pravdepodobne si všimnú spojitosť tejto úlohy s videom a budú vedieť, kde je problém - že niekde v obdĺžniku je zrejme „diera“. Učiteľ však môže vyzvať žiakov, aby sa túto úlohu snažili rozriešiť pomocou nástrojov matematiky, pretože len tak presvedčia aj najväčších skeptikov, že to nie je žiadna mágia. Pomôže aj návrh, aby sme si označili vrcholy v obdĺžniku ako na Obr. 7Obr. 6. Učiteľ môže rozbehnúť diskusiu o problematických miestach obdĺžnika, v rámci ktorej žiaci zrejme určia ako „podozrivé“ časti okolo uhlopriečky AC . Skúmanie by mohlo viezť napríklad k pozorovaniu, že body A, F, H, C možno neležia na jednej priamke, hoci to tak na prvý pohľad vyzerá.

2.možnosť – žiaci neodhalia trik: Pokiaľ zatiaľ považujú oba príklady za kúzla a mágiu, minimálne by si mali všimnúť spojitosť (a ak si to nik nevšimne, učiteľ objasní): V oboch prípadoch máme útvar, ktorý vieme rozrezať na niekoľko častí. Tieto časti vieme preusporiadať tak, aby mi vznikol útvar, ktorý má o jeden štvorček navyše. Učiteľ ďalej spolu s žiakmi rozrieši, v ktorom útvare je chyba a spolu preskúmajú, kde presne sú problémové časti. Ak treba, môže napovedať, aby sa zamerali na miesta, kde sa spájajú jednotlivé útvary, ktoré vznikli rozstrihaním štvorca. Pozornosť môže napríklad presmerovať aj konkrétne na body A, F, H, C. Ak ich kolineárnosť nespochybnia sami žiaci, môže to nenápadne spraviť učiteľ.

UVEDOMENIE

Učiteľ predostrie triede nasledovné zadanie, ku ktorému sme sa dopracovali v diskusií:

Ležia body A, F, H, C na jednej priamke?



Obr. 7: Pomôcka – označené body v obdĺžniku

Opäť bude priestor na diskusiu. Žiaci môžu argumentovať, prečo si myslia, že body ležia respektíve neležia na jednej priamke. Možné scenáre pri diskusií a následnom riešení úlohy sú:
Scenár A – rozdelenie žiakov do skupiniek (dvojice, maximálne štvorice). Učiteľ chodí pomedzi skupiny žiakov a kontroluje, ako postupujú. Ak sa niektorá zo skupín zasekne, poradí a usmerní ich. Usiluje sa, aby každá skupina vo vyhradenom čase na riešenie prišla. Ak po uplynutí na to určeného času budú ešte skupiny, ktoré nemajú svoje riešenie hotové, učiteľ vyberie jednu zo skupín, ktorá skončila medzi prvými, aby riešenie odprezentovali v krátkosti pred tabuľou.
Scenár B – Diskutuje celá trieda. Učiteľ vyvoláva hlásiacich sa žiakov. Žiaci postupne pridávajú svoje postrehy.
Ak sa trieda zasekne, učiteľ nasmeruje triedu pomocou nižšie vypísaných krokov.
Na tejto vyučovacej hodine odporúčame použiť scenár A. Scenár B má opodstatnenie, pokiaľ na bádanie už nezostáva veľa času. Ak pracuje celá trieda spolu, objavovanie je o niečo dynamickejšie ako vo dvojiciach, ale hrozí, že pomalší žiaci nebudú stíhať sledovať tempo.
Bádanie, či už v scenári A alebo scenári B (pokiaľ sa žiaci zaseknú) môže pracovať s nasledovnými krokmi riešenia:

1. Žiaci priradia súradnice k bodom A, F, H, C a vyčíslia vektory $\overrightarrow{FA}, \overrightarrow{HA}, \overrightarrow{CA}$.
2. Žiaci skúmajú, či vektory majú medzi sebou nejaký vzťah. Ak si nevedia dať rady s touto otázkou, učiteľ im môže napomôcť podúlohou: načrtne vektor $\overrightarrow{ZX}$, potom ho predĺži na $\overrightarrow{ZY}$ a spýta sa na vzťah medzi vektormi; vyzve žiakov aplikovať rovnaký princíp na naše zadanie.
3. Žiaci si všimnú, resp. uvedomia niekoľko dôležitých informácii pre vyriešenie úlohy:
    a. body X, Y, Z ležia na jednej priamke a platí, že $\overrightarrow{ZX} = k.\overrightarrow{ZY}, k\epsilon\, \mathbb{R}$
    b. pre vektory $\overrightarrow{FA}, \overrightarrow{HA}, \overrightarrow{CA}$ podobný vzťah neplatí.
4. Žiaci si potrebujú zdôvodniť, že to znamená - body A, F, H, C na jednej priamke tým pádom neležia. V prípade potreby môže učiteľ nakresliť na tabuľu ďalšie príklady bodov, ktoré ležia/neležia na jednej priamke a žiaci preskúmajú vzťahy medzi vektormi určenými danými bodmi.

REXLEXIA

Žiaci na tejto hodine vďaka práci s vektormi už odhalili, že obrázok Obr. 6 využíva nedokonalosť nášho videnia a „klame". Po tejto hodine by mali žiaci vedieť posúdiť, či dané body ležia alebo neležia na jednej priamke – a to na základe vektorov určených danými bodmi. Učiteľ pre žiakov zhrnie nasledové:

Máme dané body A, B, C a k nim prislúchajúce vektory $\overrightarrow{BA} = \vec{b} = (b_1, b_2)$ a $\overrightarrow{CA} = \vec{c} = (c_1, c_2)$.

1. Ak platí, že existuje reálne číslo k také, že $\vec{b} = k.\vec{c},\ k\epsilon\, R$ (po zložkách $b_1 = k.c_1, b_2 = k.c_2$), potom body A, B, C ležia na jednej priamke. Hovoríme, že vektory $\vec{b}$ *a* $\vec{c}$ sú *lineárne závislé*.
2. V opačnom prípade body A, B, C neležia na jednej priamke a hovoríme, že vektory $\vec{b}$ *a* $\vec{c}$ sú *lineárne nezávislé*.

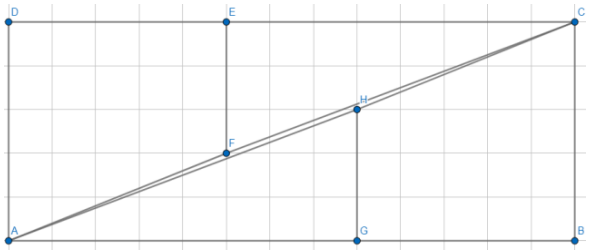
Zhrnutie, aby si to uvedomili naozaj všetci žiaci, by mohol sprostredkovať učiteľ aj prostredníctvom týchto otázok položeným žiakom:

1. Prečo body A, F, H, C neležia na jednej priamke?
2. Uveďte príklady súradníc bodov, ktoré ležia na priamke AC.

Učiteľ vyvoláva hlásiacich sa žiakov.

Potom sa však vrátime k pôvodnému zadaniu: dáva nám naše nové zistenie aj odpoveď na otázku „Kde sa vzal štvorček navyše" (v hlavolame i vo videu)? Učiteľ sa pýta tieto otázky celej triedy. Ako to, že body neležia na jednej priamke, súvisí s riešením našej úlohy?

Ak žiaci na začiatku hodiny neodhalili trik, po vyriešení a zodpovedaní otázok už zrejme tušia, že i v čokoláde, i vo farebnom obdĺžniku sa vytvorila medzera. Učiteľ v tomto bode môže ukázať správny obrázok Obr. 8 s „dierou" v strede:



Obr. 8: Správne nakreslený obdĺžnik s medzerou

ZADANIE DOMÁCEJ ÚLOHY

Žiaci, ktorým sa nepáčilo vektorové vysvetlenie úlohy (prípadne ktorí chcú na vlastné oči vidieť, čo sa stalo), si môžu doma nastrihať štvorec z hlavolamu a skúsiť ho poskladať na obdĺžnik.

3.2 Návrh druhej vyučovacej hodiny

EVOKÁCIA

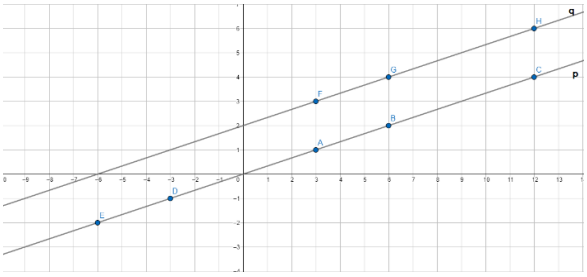
Učiteľ pripomenie hlavolam respektíve video. Dobrovoľník spomedzi žiakov príde k tabuli nakresliť, na čo sa prišlo na predošlej hodine - že sme mali štvorec, ktorý sme poskladali na obdĺžnik a vznikol štvorček navyše. Overovali sme, či konkrétne body ležiace vnútri obdĺžnika ležia na jednej priamke. Následne ho vystrieda iný žiak, ktorý prerieši na tabuľu nasledovný príklad:

Vedeli by sme podobným spôsobom overiť, či ležia na jednej priamke aj body $A\,[8{,}2], B[5{,}1], C[12{,}3]$.? Žiak pri tabuli ho prerieši pred triedou, ostatní žiaci spolu s ním si príklad riešia do zošita. Môžu si pomáhať i svojím nakresleným obrázkom – ale s upozornením, že zdanie klame a výpočet je presnejší.

Žiaci - dobrovoľníci za svoj výstup pred tabuľou môžu dostať napríklad plusový bod.

UVEDOMENIE - PARAMETRICKÉ VYJADRENIE PRIAMKY

Teraz môže trieda pokračovať v aktivitách vedúcich k objaveniu parametrického vyjadrenia priamky. Žiaci dostanú obrázok Obr. 9 s načrtnutými dvoma priamkami. Ich úlohou bude priradiť si jednotlivé súradnice k bodom, vyjadriť vektory pomocou bodov na priamke a skúsiť vyjadriť nejaký bod na priamke pomocou iného bodu a vektora. Mala by však tomu predchádzať motivácia, prečo také niečo chceme robiť. Učiteľ môže od žiakov vyzistiť, či doterajší spôsob zisťovania, či body ležia na jednej priamke, považujú za praktický a či by sme si to nevedeli zjednodušiť. Pomôcť dokáže otázka, či by nepomohlo, keby poznáme viac bodov priamky a na základe toho vieme posúdiť, či skúmaný bod medzi ne patrí alebo nepatrí. Žiaci si vďaka obrázku Obr. 9 všimnú, že tých bodov vlastne vieme poznať veľa - nekonečne veľa a že ich vieme ľahko vyjadriť (praktické je použiť pre tieto účely najprv priamku prechádzajúcu bodom $[0{,}0]$ ako napríklad priamka p.)



Obr. 9: Priamky p a q

PARAMETRICKÉ VYJADRENIE PRIAMKY - ÚLOHA

Žiakom predostrieme podobnú aktivitu, ako v úvode hodiny, avšak tentoraz vieme, že vyznačené body ležia na priamkach p resp. q. Úlohou žiakov pracujúcich vo dvojiciach je skúsiť nájsť pravidlo, pomocou ktorého vieme popísať body priamky p a následne body priamky q.

Pokiaľ sa žiaci nebudú vedieť, ako začať, prípadne sa zaseknú, navrhujeme tieto stratégie riešenia pre žiakov:

a) Priraďte súradnice bodom ležiacim na priamkach. Vyčíslite hodnoty vektorov, ktoré sú dané bodmi na priamkach p resp. q (vyberte si pre každú priamku aspoň tri vektory).

b) Aký vzťah majú medzi sebou vektory priamok p a q? Skúste sformulovať zovšeobecnenie, čo platí pre vektory rovnobežných priamok.

c) Skúste nájsť univerzálne pravidlo, pomocou ktorého viete opísať všetky vyznačené body na priamke p.

d) Zamyslite sa, pomocou čoho ste vlastne vyjadrili každý bod na priamke.

e) Viete toto pravidlo aplikovať aj na body priamky q? Zamyslite sa a diskutujte, ako by ste mohli vyjadriť body priamky q.

f) Pokiaľ sa žiakom podarilo prísť na to, že jednotlivé body priamky q vieme vyjadriť tak, že ku $k.(3,1), k \in \mathbb{R}$ pripočítame $(0,2)$, vieme nadviazať na úvodnú otázku zo začiatku hodiny - čo teda určuje priamku?

g) Vieme vyjadriť bod priamky q pomocou iného bodu ako $(0,2)$ a iného vektora ako $(3,1)$? Vyjadrite takto aspoň dva body priamky q.

h) Ak sa nám podarilo vyjadriť všetky body priamky p pomocou bodu a násobku vektora, prečo sme si pri vyjadrení bodov priamky p vystačili len s reálnym násobkom vektora $(3,1)$?

Žiaci by počas aktivity mali prísť na nasledovné veci:

1. Všimnúť si, že každý bod priamky p sa dá vyjadriť ako $k.(3,1), k \in \mathbb{R}$
2. Ďalej sa dopracovať k objavu, že s priamkou q to už nefunguje tak jednoducho ako pri priamke p. Všimnúť si, že jednotlivé body priamky q vieme vyjadriť tak, že ku $k.(3,1), k \in \mathbb{R}$ pripočítame $(0,2)$, čo je zhodou okolností tiež bod patriaci priamke q. Uvedomiť si, že na vyjadrenie priamky q potrebujeme bod priamky q a vektor daný dvoma bodmi priamky q.
3. Vedieť sformulovať zovšeobecnenie objavu: Každý bod na priamke vieme vyjadriť pomocou zvoleného bodu priamky a reálneho násobku vektora daného ľubovoľnými dvoma bodmi tejto priamky.

Teraz učiteľ môže povedať, že ten násobok sa nazýva *parameter* a žiaci objavili *parametrický zápis priamky:* $X = A + t.u$, $t \in \mathbb{R}$, kde A je bod priamky a u je *smerový vektor priamky*. Pre stredoškolákov je vhodnejší zápis po súradniciach:

$$x = a_1 + t.u_1$$
$$y = a_2 + t.u_2, t \in \mathbb{R}$$

REFLEXIA

Objavili sme, ako vyzerá parametrické vyjadrenie priamky $X = A + u.t$, $t \in \mathbb{R}$, kde A je bod priamky a u je *smerový vektor priamky*. Na overenie novonadobudnutej vedomosti odporúčame preriešiť ešte tieto tri úlohy:

Sú zadané tri priamky:

p: $X = [1,1] + t.(1,1), t \in \mathbb{R}$,

q: $X = [-4,1] + s.(0,2), s \in \mathbb{R}$,

m: $X = [-2,0] + r.(5,3), r \in \mathbb{R}$

a úlohou žiakov je nakresliť priamky na tabuľu / do zošita.

ZADANIE DOMÁCEJ ÚLOHY

Máme dané body $A[-1,1], B[9,0], C[-4,2]$. Nájdite parametrické vyjadrenie pre priamky AB, BC, a AC.

3.3 Návrh tretej vyučovacej hodiny

Na predošlej hodine žiaci objavili parametrické vyjadrenie priamky, jeho formálny zápis. Naučili sa pomocou dvoch bodov nájsť parametrickú rovnicu priamky. Na tejto vyučovacej hodine si žiaci preopakujú poznatky z minulej hodiny a naučia sa s rovnicou priamky lepšie pracovať. Naučia sa na základe rovnice určiť, či daný bod na priamke leží alebo neleží. Budú si precvičovať prácu s parametrom rovnice. Žiaci pracujú prevažne v skupinách.

EVOKÁCIA

V rámci opakovania a pripomenutia učiva na predošlej hodine dostanú žiaci sled úloh:

Máme danú priamku $s: X = [0,1] + t.(1,2),\ t \in \mathbb{R}$.

a) Narysujte priamku *s*. Napíšte tri body, ktoré ležia na priamke *s* a tri body, ktoré *neležia* na priamke s.

b) Aké súradnice má bod A z priamky s pre $t = 0$, bod B pre $t = 1$, bod C pre $t = -9$?

c) Znázornite úsečku pre $t \in [0,1]$. (Stále pracujeme s priamkou s).

d) Nájdite také vyjadrenie priamky, nazvime ju z, aby reprezentovalo tú istú priamku ako s a zároveň aby vyjarenie priamky z bolo rôzne od vyjadrenia priamky s.

Žiaci pracujú samostatne a následne si v skupinkách (dvojice, maximálne štvorice) porovnajú riešenia. Učiteľ sa prechádza medzi skupinkami, aby sa uistil, že v každej skupine sa dopracovali k správne vyriešeným úlohám.

UVEDOMENIE - NASPÄŤ K HLAVOLAMU

Žiaci po prvej hodine síce vedia, kde chýba zmiznutý štvorček, no po týchto úlohách uvidia, ako nám

rovnica priamky vie ľahko odpovedať na pôvodné zadanie. Pomáhať si však budú stále obrázkom Obr. 7.
Finálna úloha pre žiakov teda znie:

Pomocou rovnice priamky overte, že na Obr. 7 body F a H neležia na priamke AC.

Šikovnejší žiaci sa teraz môžu sami pustiť do práce, vyjadriť si rovnicu priamky a súradnice bodov a zistiť, ako by vedeli posúdiť, či body ležia alebo neležia na danej priamke. Žiakom, ktorí sa v určitom bode zaseknú, prípadne ktorí nevedia ako začať, môže učiteľ predostrieť nasledovný sled úloh.

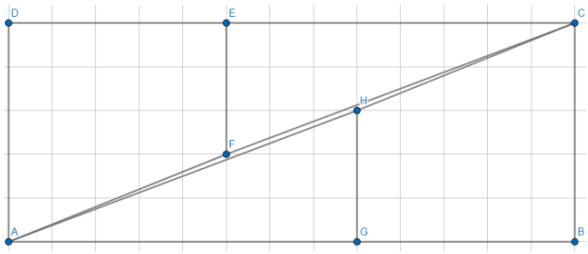
a) Vyjadrite parametrický zápis priamky AC.
Teraz už žiaci dokážu napísať parametrické vyjadrenie priamky AC, ktorým je: $[0,0] + t.(13,5), t \in \mathbb{R}$. *Bolo by však pre žiakov užitočné vedieť priamku použiť aj v tvare* $x = t.13, y = t.5, t \in \mathbb{R}$

b) Vyjadrite x-ovú súradnicu bodu C. Vyjadrite y-ové súradnice bodov priamky AC.

c) Pomocou novozískaných vedomostí zistite, či body F a H ležia na priamke AC. *Opäť je priestor na skupinovú diskusiu. Ak je úloha pre žiakov stále náročná, vedia si vypomôcť postupným riešením nasledovných krokov:*

1. Zistiť súradnice bodu F a H.
2. Vyznačiť si body priamky pre $t = 0$ a $t = 1$ *(čo sú to za body?)*
3. Uvedomenie si, že keď viem pre nejaké t nájsť bod, tak to viem spraviť aj naopak a nájsť pre nejaký bod na priamke parameter t. Napríklad pre aký parameter t na priamke AC nájdeme bod $\left[{}^{13}/_{2}, {}^{5}/_{2}\right]$?
4. Zamyslenie - čo platí pre bod B [0,13], o ktorom vieme, že neleží na priamke? Vieme nájsť k nemu prislúchajúce t?
5. Zostavenie sústavy rovníc pre bod F (vďaka zápisu priamky po súradniciach) a zistenie, že nevieme nájsť t, čo by spĺňalo obe rovnice. Z toho nám vyplynie, že bod F na priamke AC neleží. Postup zopakujeme aj pre bod H.

Obr. 10 slúži na pripomenutie, ako vyzerá správne nakreslený obdĺžnik bez hrubých čiar, ktoré v sebe „schovali“ bod F a H a vzbudzovali dojem, ako by tieto body ležali na jednej priamke AC.



Obr. 10: Správne nakreslený obdĺžnik s medzerou

Reflexia

Na záver zhrnieme výsledky, na ktoré sme prišli počas uplynulých hodín: Žiaci sa dozvedeli, ako zostaviť parametrickú rovnicu priamky. Zistili, ako rozoznať, či daný bod leží alebo neleží na danej priamke. Dozvedeli sa, čo sú lineárne závislé resp. lineárne nezávislé vektory, čo je parameter a čo je smerový vektor.
Hovorí sa, že vtedy žiak dobre rozumie učivu, keď ho dokáže zrozumiteľne vysvetliť mladšiemu súrodencovi. Ako ozvláštnenie hodiny a zábavnejšie preopakovanie navrhujeme podobnú aktivitu. Učiteľ predstiera, že je nahluchlý dedko/babka a vypytuje sa na detaily príkladu. Trieda má za úlohu odpovedať mu na jeho naivné zvedavé otázky a tým ukázať, že učivu skutočne rozumie.
Podobne by sa pokračovalo, kým by učiteľ nevyčerpal aj úplne triviálne otázky ohľadom priamky, ktoré sa už možno žiaci hanbia opýtať.

Odporúčané príklady na precvičenie

Nasledujúce príklady slúžia na lepšie pochopenie a zžitie sa s prácou s rovnicami priamky.

1. Aké je parametrické vyjadrenie súradnicových osí?
2. Na priamke sú dané body A, B. Vyjadrite podmienky pre parameter t v závislosti od toho, či sa jedná o priamku AB, polpriamku AB, úsečku AB, bod A, bod B, stred úsečky AB.
3. Máme trojuholník ABC, so súradnicami vrcholov: $A[0,1], B[4,5], C[-1,3]$. Nájdite parametrické vyjadrenie ťažnice na stranu AB.
4. Premyslite si, ako by vyzeralo parametrické vyjadrenie priamky v priestore.

4 Realizácia pilotného testovania

4.1 Metodika výskumu

Voľbu respondentov do otestovania predloženej vyučovacej sekvencie hodín značne ovplyvnila pandémia Covid-19. Hoci cieľová skupina sú stredoškoláci – študenti tretieho ročníka, pre obmedzenie výučby na školách nebolo možné vystúpiť s navrhovanými hodinami pred triedou, prípadne aspoň skupinou žiakov. Riešenie v podobe online vyučovania nespĺňa predpoklad, že žiaci spolupracujú v skupinkách. Okrem toho výučbu s reálnymi stredoškolákmi mierne komplikuje aj fakt, že testovanie bolo potrebné stihnúť v určitom časovom okne: kedy žiaci už mali vedomosti o vektoroch, ale zároveň ešte nepreberali učivo analytickej geometrie.

Preto sme ako vhodných kandidátov na prevedenie pilotného testovania uvažovali mladých ľudí cca do 30 rokov s ukončeným stredoškolským vzdelaním, ktorí neštudovali matematicko-fyzikálny alebo technický odbor. Ďalším kritériom na vhodnú dvojicu bolo spoločné bývanie respondentov. Dôsledkom pandémie boli obmedzenia ako napríklad zákaz návštev, kvôli čomu bolo vylúčené, aby sa fyzicky stretli respondenti z dvoch rôznych domácností. Ak pri testovaní boli respondenti spolu v jednej miestnosti, bola vhodnejšie nasimulovaná spolupráca žiakov v jednej triede.

Na spracovanie pozorovaní budeme používať kvalitatívnu metódu analýzy dát. Táto analýza bude prevedená po ukončení výskumných aktivít. Zozbieraný materiál bude spracovaný pomocou otvoreného kódovania. V tomto príspevku uvedieme predbežné spracovanie dát ešte bez kódovania.

4.2 Výskumný súbor

Z predbežnej vzorky vyššie spomenuté kritériá plne spĺňa iba jedna dvojica respondentov, ktorú v rámci anonymizácie budeme označovať ako Dvojicu A.

Dvojica A sa skladá z páru 29-ročných osôb s humanitne zameraným vysokoškolským vzdelaním, ktorí žijú v jednej domácnosti.

Cenné reakcie poskytli aj ďalšie dvojice:
Dvojica B - pár s vysokoškolským vzdelaním prírodovedného zamerania, vek respondentky je 28 rokov a respondent má 40 rokov. Stretnutie sa neodohrávalo v jednej domácnosti.
Dvojica C – pár s vysokoškolským vzdelaním z matematicko – fyzikálnej fakulty, respondentka má 28 rokov a respondent 30 rokov, dvojica bola počas testovania v jednej miestonosti.

4.3 Zber dát a predbežné výsledky

Zber dát prebieha od konca marca online formou prostredníctvom videokonferencie. Jednotlivé hodiny boli so súhlasom respondentov nahrávané. Dvojice sa zúčastnili hodín separátne. Doteraz prebehla prvá vyučovacia hodina so všetkými troma dvojicami a druhá hodina s dvoma dvojicami.
Za ideálny výsledok hodiny považujeme, že respondenti vyriešia jednotlivé úlohy s minimálnym zásahom učiteľa a v časovom limite vyučovacej hodiny 45 minút.

Dvojica A bola počas oboch vyučovacích hodín motivovaná, pár živo diskutoval a spolupracoval. Obaja respondenti mali základné znalosti o vektoroch, ktoré si na začiatku hodiny preopakovali. Video o čokoláde i hlavolam dávnejšie videli, ale nepoznali riešenie.
V priebehu prvej hodiny mali niekoľko nápadov, z ktorých tie relevantnejšie si overili. Potrebovali mierne nasmerovanie, vyžadovali si spätnú väzbu. To, že dokázali prísť na správne riešenie ich veľmi potešilo, hodina sa však výrazne natiahla.
Druhá vyučovacia hodina sa konala s časovým odstupom jeden týždeň, podarila dokončiť takmer v časovom limite, trvala iba mierne dlhšie ako štandardná 45 minútová hodina. Respondenti si správne pamätali učivo predošlej hodiny: jednotlivé hlavolamy ako aj pojem lineárnej nezávislosti vektorov. Spolupracujúc dokázali nájsť pravidlá pre vyjadrenie ktorýchkoľvek bodov konkrétnych priamok. Bolo však potrebné im pomôcť všimnúť si, že priamku vyjadrili pomocou smerového vektora priamky. Ďalej potrebovali poradiť, že bod, ktorý taktiež použili na vyjadrenie priamky, môže byť ktorýkoľvek bod patriaci priamke – nie len prienik priamky s osou x alebo osou y. Za miernej pomoci z našej strany sa im podarilo tento objav aj zovšeobecniť, čím prišli na parametrickú rovnicu priamky.

Dvojica B absolvovala doteraz len jednu hodinu. Opakovanie na začiatku prvej hodiny im problém nerobilo, základné znalosti o vektoroch mali. Video o čokoláde i hlavolam už videli, ale riešenie nepoznali. Hneď odhalili, že sa nejedná o kúzlo, tvrdiac, že pri čokoláde došlo k úbytku hmotnosti, nová poskladaná čokoláda je ľahšia o jeden dielik. Videli i súvis s hlavolamom, že zrejme ide o podobný princíp. Našli aj problematické časti oboch útvarov, uhlopriečky i čokolády. Jeden z nápadov, ako vyriešiť úlohu, bolo spočítanie obsahov jednotlivých častí obdĺžnika a porovnanie s celkovým obsahom. Napokon im bolo podsunuté, že by sa oplatilo skúmať, či body A, F, H, C ležia na jednej priamke a zamerať sa na vektory vzniknuté na základe týchto bodov. Nevýhodou dvojice bolo, že neboli fyzicky vedľa seba a tým pádom ich spolupráca bola obmedzená. Promptnejší postup v riešení komplikoval aj fakt, že jeden respondent mal nečakane popri hodine aj iné povinnosti a záver hodiny dokončila respondentka sama. Úlohu

vyriešila až po riešení našich pomocných otázok a hodina skončila s časovým sklzom.

Dvojica C absolvovala obe hodiny hneď za sebou. Video ani hlavolam nepoznali, avšak hneď im napadlo nastrihať si štvorec a poskladať na obdĺžnik. Napokon si však iniciatívne obdĺžnik z hlavolamu prekreslili na papier a skúmali ho. Po krátkej chvíli jeden z respondentov predložil svoje riešenie: trojuholníky AHG a ACB nie sú podobné, to znamená, že body A, H, C neležia na jednej priamke a teda nám vzniká v obdĺžniku medzera. Respondetka mala iný nápad – pomocou Pytagorovej vety spočítať dĺžku uhlopriečky AC a porovnať ju s dĺžkami prepôn trojuholníkov, z ktorých je poskladaný obdĺžnik, čo je tiež fungujúce riešenie úlohy. Je podnetné vidieť aj iné riešenia úlohy, avšak pre účely ďalších hodín bola dvojici predostretá aj idea riešenia pomocou vektorov, ktorú respondenti považovali za vhodnú na objavovanie lineárnej závislosti resp. nezávislosti vektorov.
Ďalšia hodina sa konala hneď po prvej, respondenti preriešili úvodný príklad. Zadanie, kedy mali hľadať jednoduchšie pravidlo na určenie toho, či sú body kolineárne, si zjednodušili na hľadanie rovnice priamky. Respondentka sa podujala rovnicu odvodiť spôsobom, že hľadala, pomocou akého pravidla dokáže popísať akýkoľvek bod na zadanej priamke. V krátkom čase odvodila parametrický zápis priamky.

4.4 Zhrnutie

Všetky tri dvojice zaujalo video o čokoláde i hlavolam a snažili sa ho vyriešiť. Všetci videli, že tabličky čokolády sú pri spojoch zdeformované a že pravdepodobne podobný princíp platí aj pri hlavolame, hoci im na prvý pohľad riešenie nebolo zrejmé. Každému napadlo skúsiť hlavolam nastrihať a poskladať, ale táto aktivita sa v dôsledku toho, že stretnutia prebiehali online, nekonala.

Na to, že v obdĺžniku je „diera" prišli všetci, ale každý svojím tempom. Spolupracujúce dvojice na to prišli s pomerne malými zásahmi od nás, naproti tomu dvojica, ktorá mala hodinu separátne, potrebovala podstatne viac pomoci z našej strany. O rýchlosti a priebehu hodiny rozhodovalo, prirodzene, aj dosiahnuté vzdelanie – dvojica z matematickým vzdelaním rozriešila úlohu mimoriadne rýchlo a kreatívne. Vplyv mal pravdepodobne aj chuť objavovať, prostredie, v ktorom sa dvojica nachádzala. Plynulejšie prebiehala napríklad aj hodina konajúca sa v sobotu doobeda, ako cez pracovný deň na obed.
To, či sa žiaci dostanú do požadovaného cieľa, závisí zrejme od ich vedomostí, od schopnosti kooperovať s ostatnými, od úrovne prípravy učiteľa aj od chuti bádať a objavovať.

5 Záver

V predloženom príspevku je opísaná sekvencia troch vyučovacích hodín, ktorá má za úlohu priviesť žiakov od lineárne nezávislých vektorov až k práci s parametrickým vyjadrením priamky. Ako hlavný motivačný prvok v tejto téme slúži hlavolam, ktorý tému zatraktívni a prebudí v žiakoch túžbu odhaliť fungovanie triku.

Aktivity na hodine sú postavené na teórií bádateľsky orientovaného vyučovania, kedy učiteľ pôsobí ako moderátor diskusie a žiaci vlastnou činnosťou, objavovaním a argumentáciou objavujú jednotlivé zákonitosti danej témy.

Každá z troch vyučovacích hodín je navrhnutá podľa trojfázového modelu učenia E-U-R.

Pilotné testovanie bolo predbežne vykonané na troch dvojiciach: všetky tri sa zúčastnili prvej vyučovacej hodiny a dve sa zúčastnili druhej vyučovacej hodiny. Tretiu hodinu zatiaľ neabsolvovala žiadna dvojica.

Tempo hodín a mieru pochopenia danej látky určovalo najmä vzdelanie respondentov, vzájomná spolupráca v rámci dvojice a schopnosť učiteľa vhodne reagovať na podnety žiakov.

Vhodným pokračovaním tohto príspevku je oslovenie ďalších respondentov do výskumu, za účelom získania ďalších dát a skvalitnenia vyučovacej sekvencie. Našim cieľom je ukončiť výskumné aktivity v priebehu prvej polovice apríla, preto predpokladáme, že samotná prezentácia tohto príspevku bude obsahovať viac informácií o výsledkoch výskumu.

Poďakovanie

Veľká vďaka patrí mojej školiteľke, PaedDr. Márií Slavíčkovej, PhD., za cenné rady a ochotu poradiť so všetkými otázkami a problémami, ktoré počas práce vyvstali.

Som vďačná aj všetkým mojim respondentom, ktorí si našli čas na otestovanie navrhnutej aktivity.

Literatúra

[Belan, 2017] Belan, Anino. Analytická geometria pre tých, ktorí jej potrebujú rozumieť. Equilibria. 2017. 108s. ISBN: 9788081432149

[Linn et al., 2004] Linn, M. C. - Davis, E. A. - Bell, P. 2004. Internet environments for science education. Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey, USA : Inc., Publishers, Mahwah, 2004. 412 s.

[Balogová, Ješková, 2015] Brigita Balogová, Zuzana Ješková. 2015. Analýza bádateľských aktivít. Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach, 2015. Dostupné z: https://ufv.science.upjs.sk/_projekty/smolenice/pdf_15/03_balogova_jeskova.pdf

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 337
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Petra Javorková, Monika Dillingerová

Rozvoj priestorovej predstavivosti žiakov druhého stupňa ZŠ

Petra Javorková[1]*
Monika Dillingerová[2‡§]

[1] Katedra didaktiky prírodných vied, PriF UK, Mlynská Dolina, 842 48 Bratislava
[2] Katedra didaktiky matematiky, fyziky a informatiky, FMFI UK, Mlynská Dolina, 842 48 Bratislava

Priestorová predstavivosť je veľmi zaujímavá a nie do poslednej bodky prebádaná schopnosť. Vďaka nej sme schopní si predstaviť geometrické objekty, ich vzájomnú polohu a vlastnosti, tiež manipulácie s nimi a pod. Priestorová predstavivosť v matematike je nazývaná ako geometrická predstavivosť. Touto schopnosťou sa zaoberá mnoho autorov. Jedným z nich je Jirotková (1990), ktorá pod pojmom geometrická predstavivosť rozumie schopnosť:

- poznávať geometrické útvary a ich vlastnosti,
- z reálnej skutočnosti - z konkrétnych objektov, vyvodiť geometrické vlastnosti a byť schopný vidieť v nich geometrické útvary v „čistej podobe“,
- na základe rovinných obrazov si predstaviť geometrické útvary v rôznych vzájomných vzťahoch, a to aj v takých, v ktorých nemôžu byť prevedené pomocou hmotných modelov geometrických útvarov,
- mať zásobu predstáv geometrických objektov a byť schopný vybaviť si ich rôzne podoby,
- predstaviť si geometrické objekty a vzťahy medzi nimi prostredníctvom ich slovného opisu.

Práve tieto schopnosti sme sa snažili v našej práci rozvíjať u žiakov základnej školy. Navrhli sme pracovné listy, ktoré by sa dali využiť v edukačnom procese na rozvoj priestorovej predstavivosti.

Skladanie kocky a jej „prechádzky“ – 6. ročník/príma. K tomuto pracovnému listu žiaci potrebujú papierový model kocky, ktorý si vyrobia a chodník. Papierová kocka má na štyroch stenách nakreslené obrázky. Úlohou žiakov je kotúľanie kocky po chodníku podľa zadaní jednotlivých úloh. Cieľom úloh je bližšie oboznámenie sa s vlastnosťami a prvkami telesa kocka. Žiaci by si mali uvedomiť, že po chodníku kocku pretáčajú len po štyroch stenách a dve steny bez obrázka sú vždy na boku. V pracovnom liste sú aj úlohy, v ktorých je na obrázku nakreslené teleso zložené z viacerých kociek. Žiaci však majú k dispozícii len jednu, nimi vyrobenú kocku. Preto, aby vedeli odpovedať na otázky úloh, musia si v predstavách toto teleso vyskladať, čím rozvíjajú svoju priestorovú predstavivosť.

Skladanie kocky a jej „prechádzky“ – 8. ročník/tercia. Je to náročnejšia verzia predchádzajúceho pracovného listu. Žiaci si tiež vyrobia pomôcky, ale namiesto chodníka pracujú s tzv. šachovnicou. Kocka v tomto prípade nemá na stenách nakreslené obrázky, ale čísla. Vyzerá ako hracia kocka. Žiaci pretáčajú kocku v rôznych smeroch po šachovnici. Aby žiaci vedeli, ktorým smerom majú kocku pretáčať, v úlohách používame symboly ↑ ↓ → ←. Najnáročnejšia úloha je zameraná na to, aby žiaci pred uskutočnením prechádzky určili, aké číslo podľa nich bude na hornej stene. Žiaci si teda najskôr museli v predstavách kocku popretáčať, aby vedeli toto číslo určiť, a potom reálne uskutočniť prechádzku.

Nárys, pôdorys a bokorys stavieb z kociek – 7. ročník/sekunda. Učiteľ tento pracovný list môže použiť priamo pri sprístupňovaní učiva alebo ako opakovanie. Úlohy sú zamerané na stavanie stavieb z kociek, kreslenie ich nárysu, bokorysu a pôdorysu a naopak. Žiaci k vypracovaniu tohto pracovného listu potrebujú viacej kociek ako jednu. Preto si žiaci kocky nevyrábajú, ale pohľadajú doma, napr. zo starých stavebníc, z Lega a pod.

Najdôležitejšou časťou našej práce bolo pripravené testovanie. Museli sme ho uskutočniť dištančne, takže sme ochudobnení o postrehy z priameho pozorovania práce s pracovnými listami. Žiaci všetkých spomínaných ročníkov dostali pracovné listy mailom ako dobrovoľnú domácu úlohu. Celkovo sa do našej pilotáže zapojilo 30 žiakov. Žiaci pracovné listy vypracovali podľa pokynov, ktoré sme im do pracovného listu napísali a zdokumentovali výrobu pomôcok. V závere pracovných listov sme uviedli krátky dotazník s otázkami zameranými na to, či žiakov aktivita zaujala, či by podobné privítali na matematike a pod. Na základe dištančného testovania sme získali vypracované pracovné listy žiakmi a tiež ich spätnú väzbu, ako naše pracovné listy vnímali. V PL pre 6. ročník sme cieľ splnili a žiaci si tento cieľ podľa svojich vyjadrení aj všimli. Išlo teda o vedomé rozvíjanie priestorovej predstavivosti. Podobne aj v PL pre 8. ročník/terciu žiaci vyjadrili, že ich pracovný list zaujal a tiež splnil svoju úlohu v rozvíjaní priestorovej predstavivosti. Žiakov 7. ročníka/sekundy zaujala práca s pomôckami, ktoré si žiaci doma našli. Tiež vnímali, že rozvíjali priestorovú predstavivosť.

Literatúra

[Jirotková, 1990] Jirotková, D. Rozvoj prostorové představivosti žáků In *Komenský*, 1990, roč. CXIV, 5, s. 280.

* javorkova.pe@gmail.com
‡ monika.dillingerova@fmph.uniba.sk
§ školiteľ

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 338
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Barbora Stenová, Karolína Miková

ANALÝZA OVLÁDANIA DETSKÝCH EDUKAČNÝCH ROBOTICKÝCH HRAČIEK

Barbora Stenová[1]* Karolína Miková[2‡§]
[1] Katedra didaktiky matematiky, fyziky a informatiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

V tomto príspevku predstavíme výsledky výskum zameraného na ovládanie detských edukačných robotických hračiek. Potenciál týchto moderných edukačných pomôcok prináša do vyučovania oživenie a hravú formu učenia. Robotické hračky rozvíjajú veľa zručností u žiakov ako napríklad jemnú motoriku, kreativitu, plánovanie, spoluprácu, kritické a algoritmické myslenie [1]. Podnecujú deti vyjadrovať svoje vlastné myšlienky a nápady, ktoré vkladajú, či už do konštrukcie robota, alebo tvorby programu. Na rozdiel od detských edukačných softvérov sú roboty viditeľné, hmotné a žiaci dostanú okamžitú spätnú väzbu v podobe správania robota.

Robotické hračky sme vyberali podľa týchto kritérií: vek dieťaťa, aby bola zastúpená širšia veková škála, od predškolského veku až po nižšie ročníky 2. stupňa základnej školy. Ďalej sme prihliadali na rôzne typy konštrukcie. Dôraz sme kládli aj na ich ovládanie a vybrali sme programovateľné hračky pomocou ovládača, alebo softvérového prostredia. Zohľadnili sme aj na jednoduché pripojenie robotov so softvérovým prostredím, nie veľmi náročnú konštrukciu robota, či samotnú dostupnosť prostredí. Našu analyzovanú vzorku tvoria tieto edukačné roboty: Ozobot Bit a Evo [2], LEGO WeDo 2.0 [3], Micro:bit [4], Botley [5], LEGO Education SPIKE Prime [3], Thymio[6].

Výsledky nášho skúmania sme budovali v iteráciách. Každá iterácia zahŕňala pridanie novej robotickej hračky a s ňou aj nového programovacieho prostredia na ovládanie daného robota. V našej analýze sme sa zamerali na tri oblasti: programové konštrukcie, charakteristiky softvérových prostredí a interaktivita. Tieto tri kategórie nám poskytnú informácie k lepšiemu poznaniu robotických hračiek. Programové konštrukcie sú dôležitým ukazovateľom potenciálu robotov. Do úvahy sme brali príkazy, ktoré boli v danom prostredí k dispozícii v základnej sade, pretože rozšírenia obsahovali náročnejšie príkazy. Do tejto kategórie sme zaradili aj príkazy na ovládanie pohybu robota, čo je špecifická vlastnosť pre robotiku. V analýze softvérových prostredí sme skúmali rôzne charakteristiky, ktoré sú dôležité na posúdenie primeranosti prostredia pre detských programátorov. Interaktivita je jednou z hlavných vlastností, ktorá odlišuje robotiku od klasického programovania. Ide hlavne o senzory, reproduktory, či svetlá, ktoré zabezpečujú komunikáciu s okolím. Takúto interaktivitu vieme prirovnať k správaniu človeka a komunikácii medzi ľuďmi.

Uvedomujeme si, že výsledky tohto výskumu majú aj isté nedostatky. Robotické hračky sa veľmi rýchlo vyvíjajú, vznikajú novšie verzie robotov a tak isto aj ich softvérové prostredia podliehajú rôznym aktualizáciám, čo môže spôsobiť problémy pri ovládaní. Z tohto dôvodu informácie, ktoré sme uviedli v našej kategorizácií, nemusia byť pravdivé o niekoľko rokov.

Veríme, že podľa našej kategorizácie by sa neskôr dali zaraďovať aj ďalšie edukačné robotické hračky. Výsledky analýzy by mohli skvalitniť vyučovanie edukačnej robotiky na školách, pretože môžu pomôcť učiteľom pri výbere robotickej hračky pre edukačné účely. A mohli by byť tiež využiteľné pri tvorbe nových metodických materiálov. Podrobné výsledky analýzy sú spracované v prílohe - bakalárskej práci.

Literatúra

[1] GUJBEROVÁ, M., MAYEROVÁ, K., VESELOVSKÁ, M.: Edukačná robotika na 2. stupni ZŠ a zručnosti pre 21. storočie. In Zborník konferencie DidInfo 2014. Banská Bystrica: Univerzita Mateja Bela, Fakulta prírodných vied v Banskej Bystrici, ročník 20, 2014, 45-52. ISBN 978-80-557-0698-6.
[2] OZOBOT & EVOLLVE. Ozobot. Dostupné na: https://ozobot.com/
[3] THE LEGO GROUP. Dostupné na: https://education.lego.com/en-us/
[4] MICRO:BIT EDUCATIONAL FOUNDATION. BBC Micro:bit. Dostupné na: https://microbit.org/
[5] LEARNING RESOURCES. Botley. Dostupné na: https://www.learningresources.com/media/botley/
[6] MOBSYA ASSOCIATION. Thymio. Dostupné na: https://www.thymio.org/

* stenova7@uniba.sk
‡ Karolina.Mikova@fmph.uniba.sk
§ Školiteľ

Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2021, p. 339
ISBN 978-80-8147-107-0, © 2021 Katarína Hrušková, Mária Slavíčková

Rozvoj myslenia žiakov využitím zážitkovej pedagogiky

Katarína Hrušková[1]* Mária Slavíčková[2†§]
[1] Katedra didaktiky matematiky, fyziky a informatiky, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

V príspevku predstavíme jednu z možností, ako žiakov vytrhnúť z rutiny frontálnej výučby a ukázať im o niečo iný pohľad na matematiku. Aktivita „Rybárska osada“ prepája rozvoj divergentného myslenia s konvergentným a vďaka úzkej spolupráci kognitívnych a afektívnych cieľov rozvíja nielen vedomosti, ale aj osobnosť žiaka.

Aktivitu predstavujeme od možného uvedenia do deja, kedy učiteľ žiakom opíše situáciu, cez vysvetlenie pravidiel, možné stratégie a prístupy žiakov až po návrhy na reflexiu po samotnej aktivite.

Ide o skupinovú hru, v ktorej figurujú 3 až 5 členné skupiny, nazývané v kontexte hry klany. Jej mechanizmus je prebraný z Metodickej príručky Komu patrí Zem. Úlohou klanov je počas 10 herných dní (deň trvá cca 2 min) vyloviť každý deň toľko rýb, aby ich klan bol sýty a aby ryby v rybníku, ktorý je ich spoločným zdrojom obživy, nevymreli. K tomu majú k dispozícii tabuľku s aktuálnym počtom rýb v rybníku, možným počtom rýb na vylovenie a informáciu, akým koeficientom sa aktuálny počet rýb cez noc vynásobí, teda koľko rýb bude k dispozícii na ďalší deň.

Účastníkom je ako cieľ hry prezentovaná veta: „Vašou úlohou je mať na konci čo najviac rýb.“ [Kolektív autorov Centra environmentálnej a etickej výchovy Živica, 2019]. Na prvý pohľad ide o jednoduché zadanie, avšak opak je pravdou. Každý klan a každý člen klanu si totižto zadanie môže interpretovať po svojom. Pre predstavu uvedieme niekoľko z možných interpretácií:

1. Ide o súťaž a vyloviť čo najväčší počet rýb pre svoj klan znamená mať na konci vyloveného viac ako ostatné klany.
2. Ide o tímovú aktivitu, kedy chceme mať na konci vylovených čo najviac rýb všetci spolu ako dedina.
3. Na konci hry chceme mať čo najviac rýb v rybníku.

Aktivita je vďaka tomu dostatočne otvorená, preto môže byť vnímaná ako súťaž alebo ako kooperatívna aktivita. Bude takou, akou si ju spravia žiaci. Účastníkov zapája do živej diskusie o možných interpretáciách zadania, o stratégiách.

V práci sa podrobne zameriavame najmä na analýzu možných porozumení zadaniu a prístupov ku tvorbe stratégie vo forme otázok, na ktorých možno demonštrovať fungovanie lineárnych rovníc, zloženého úrokovania, percent, logaritmických rovníc, exponenciálnych funkcií, rekurentného určenia geometrickej postupnosti, zaokrúhľovania a zdravej dávky sedliackeho rozumu.

Nakoľko skupina žiakov, ktorá do hry vstupuje, má medzi sebou rôzne vzťahy, rôzne stupne dôvery a každý hráč do nej vstupuje s inou históriou a nažitými vzorcami správania, vytvorili sme pre túto aktivitu 4 fázovú kostru reflexie spolu s paletami otázok, ktoré možno v reflexii použiť podľa toho, na ktorý z možných ponúkaných cieľov sa učiteľ rozhodne zamerať najviac.

Podstata tejto aktivity spočíva v pozvaní žiakov ku zamysleniu sa nad dopadmi svojho konania nie len na ich samotných, ale rovnako na komunitu, v ktorej žijú. Preberie žiak zodpovednosť za svoje rozhodnutia alebo sa ukryje za pohodlnú anonymitu väčšiny? Dodrží sľúbenú dohodu alebo v záujme vlastnej skupiny ostatné podrazí? Spojí sa so svojimi súpermi pre dobro rybníku a budúcnosti alebo bude chcieť hru vyhrať aj za cenu jeho vymretia? Hra je pretkaná otázkami, prepojenými na realitu a v bezpečnom prostredí simulácie odhaľuje žiakom etické a sociálne dilemy, s ktorými sa budú v budúcnosti stretávať ako aktívni členovia spoločnosti.

V blízkej dobe plánujeme aktivitu otestovať kolektívom inštruktorov zážitkovej pedagogiky mládežníckej organizácie Plusko. V závislosti od ich pripomienok upravíme časové dotácie jednotlivých častí, doplníme reflexiu o konkrétne skúsenosti z praxe a ponúkneme ako nástroj na učenie učiteľom vnímajúcim hry nie len ako prostriedok na vyplnenie “hluchých” hodín pred prázdninami, ale ako silného partnera vo výchovno vzdelávacom procese svojich žiakov.

Literatúra

[KOLEKTÍV autorov Centra environmentálnej a etickej výchovy Živica, 2019] Komu patrí Zem?, [online] Dostupné na internete: https://zivica.sk/wp-content/uploads/2020/04/prirucka-komu-patri-zem-35w.pdf

* hruskova57@uniba.sk
† maria.slavickova@fmph.uniba.sk
§ Školiteľ