

# **STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST**

**Obor č. 2: Fyzika**

## **S částicovou kamerou nejen v letadle**

**Daniel Staník, Jan Poštulka**  
**Olomoucký kraj**

**Uničov 2018**

# STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 2: Fyzika

**S částicovou kamerou nejen v letadle**

**With particle camera not only on an  
airplane**

**Autoři:** Daniel Staník, Jan Poštulka

**Škola:** Gymnázium Uničov, Gymnazijní 257, 783 91  
Uničov

**Kraj:** Olomoucký kraj

**Konzultant:** Mgr. Jiří Kvita Ph.D.

## Prohlášení

Prohlašujeme, že jsme svou práci SOČ vypracovali samostatně a použili jsme pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašujeme, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemáme závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Uničově dne 30. 04. 2018 .....

Podpis autora

V Uničově dne 30. 04. 2018 .....

Podpis autora

## **Poděkování**

Za nezměrnou pomoc při vytváření této práce a za zapůjčení potřebné techniky bychom chtěli poděkovat Společné laboratoři optiky Univerzity Palackého v Olomouci, konkrétně našemu supervizoru a odbornému poradci Mgr. Jiřímu Kvitovi Ph.D., který nám byl v mnoha případech oporou a který nás provedl problematikou částicové fyziky. Dále bychom chtěli poděkovat učiteli fyziky Mgr. Miroslavu Komsovi za to, že si nás pro fyziku jako takovou dokázal získat, učiteli robotiky Mgr. Radimu Děrdovi, který nás naučil programovat, a nakonec učiteli matematiky Mgr. Lubomíru Balcárkovi za to, že s námi ve škole podrobně probral problematiku analytické geometrie. Bez dobré znalosti programování a analytické geometrie by nebylo možné většinu našich programů vytvořit.

Tuto práci bychom chtěli věnovat našemu zatím stále nezvěstnému učiteli fyziky Mgr. Karlu Tesařovi.

## **ANOTACE**

Tuto práci jsme zasvětili částicové fyzice, konkrétně výzkumu různých typů částic za pomoci částicové kamery Timepix MX-10, jež umožňuje zachycování i následné zkoumání částic dopadnuvších na její křemíkový čip. V naší práci SOČ se zabýváme různými typy ionizujícího záření, měřením spekter některých zdrojů záření, zářením a radiační dávkou ve vyšších nadmořských výškách, silně ionizujícími částicemi a programováním vlastního softwaru pro širší analýzu získaných dat v jazyce Java.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

částicová kamera Timepix MX-10; kosmické záření; textový ASCII soubor; částice; miony; radiační příkon; GPS log; silně ionizující částice

## **ANNOTATION**

We devoted this work to particle physics, especially to investigating different types of particles with the particle camera Timepix MX-10. This camera allows capturing impacting particles on its silicon chip and studying them. In our work we deal with different types of ionizing radiation, measuring the spectrum of some radiation sources, radiation and radiation dose in higher altitude, strongly ionizing particles and programming our own software in Java for further analysis of acquired data.

## **KEYWORDS**

particle camera Timepix MX-10; cosmic rays; text ASCII file; particles; muons; radiation dose; GPS log; strongly ionizing particles

# OBSAH

1	Úvod.....	8
2	Částicová kamera Timepix.....	9
2.1	Pixelový detektor MX-10.....	9
2.2	Software dodávaný ke kameře.....	11
3	Základní typy záření.....	13
3.1	Alfa záření.....	13
3.2	Beta záření.....	14
3.2.1	Beta plus.....	14
3.2.2	Beta minus.....	15
3.3	Gama záření.....	16
3.4	Stabilita jádra.....	17
4	Radiační aktivita, Dávka.....	19
4.1	Aktivita.....	19
4.2	Radiační dávka.....	19
5	Kosmické záření.....	21
5.1	Složení.....	21
5.1.1	Primární kosmické záření.....	21
5.1.2	Sekundární kosmické záření = sprška.....	22
5.2	Detekce kosmického záření.....	23
5.3	Miony.....	23
6	Měření laboratorních zdrojů.....	25
6.1	Metodika.....	25
6.2	Americium-241.....	26
6.3	Dolet alfa částic.....	27
6.4	Průchod gama záření.....	28
6.5	Sklenice z uranového skla.....	30
7	Měření radiace v letadle.....	31
7.1	MX-10 s GPS v letadle.....	31
7.2	Počty částic jednotlivých typů v dané nadmořské výšce.....	33

7.3	Dávka a energie v daném úseku nadmořské výšky.....	33
8	Analýza silně ionizujících částic .....	38
8.1	Výběr samotných částic.....	38
8.2	Dopad částic na čip.....	40
8.3	Analýza postupné ztráty energie .....	41
8.4	Pokus o určení typu částice dle charakteristických $\Delta E/\Delta x$ .....	50
8.5	Jedna jaderná interakce .....	52
9	Tvorba vlastního softwaru k analýze dat získaných z kamery MX-10 .....	53
9.1	Textové soubory snímků a jejich analýza .....	53
9.2	Program na identifikaci a analýzu spektra a četnosti částic snímku .....	54
9.3	Program na párování snímků s GPS daty nadmořské výšky.....	57
9.4	Program na oddělování částic do samostatných souborů .....	58
9.5	Program na analýzu odevzdané energie částice v závislosti na její dráze .....	58
10	Závěr .....	63
11	Použitá literatura.....	65
12	Seznam obrázků a tabulek .....	68
13	Příloha .....	70

# 1 ÚVOD

Celý náš vesmír je složen z částic, o kterých však v každodenním životě nemáme ani ponětí, přestože by se bez nich jen stěží obešel. My věříme, že s rozluštěním tajemství těch nejmenších stavebních kamenů lze snadno řešit otázky čehokoliv bez ohledu na velikost všeho, čeho jsou tyto kameny základem.

A z toho důvodu jsme se jali prohloubit naše znalosti částicové fyziky. Náš výzkum byl proveden pomocí zařízení MX-10 firmy JABLOTRON ALARMS, vybaveného Medipix/Timepix čipem a softwarem Pixelman od katedry ČVUT UTEF. Tato kamera umožňuje zachycování a za pomoci softwaru i následné zkoumání částic dopadnuvších na její křemíkový čip. Byla nám zapůjčena od Společné laboratoře optiky Univerzity Palackého v Olomouci, kde také probíhal náš výzkum pod vedením Mgr. Jiřího Kvity Ph.D.

Mezi naše cíle patří změřit záření ve vyšších nadmořských výškách a zjistit jeho složení. Následně také podrobněji analyzovat ionizující částice, jež se zde vyskytují. Chtěli jsme také rozšířit software dodávaný ke kameře o programy, které pomohou se zkoumáním jednotlivých částic, spojí data ze snímků kamery s GPS daty, aj.

V naší práci SOČ se nejdříve zabýváme teorií a různými typy ionizujícího záření, poté vlastním měřením spekter a četností jednotlivých částic u laboratorního zdroje, radiací ve vyšších nadmořských výškách, radiační dávkou a příkonem v letadle, zkoumáním samostatných částic zachycených ve vyšších nadmořských výškách a jejich energetickým chováním. Částice a snímky zachycené kamerou jsme studovali pomocí vlastních algoritmů a programů, které jsme naprogramovali v jazyce Java a které nám umožnily je prozkoumat více do hloubky.

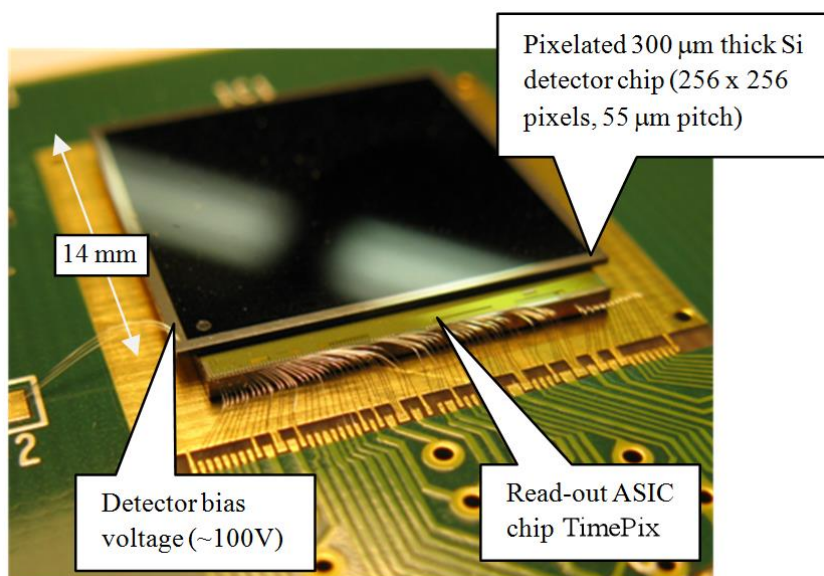


## 2 ČÁSTICOVÁ KAMERA TIMEPIX

### 2.1 Pixelový detektor MX-10

Patří mezi detektory typu Medipix, které byly vyvinuty kolaborací výzkumných týmů pod Evropským centrem pro jaderný výzkum CERN. Velký význam v tomto seskupení má Institut technické a experimentální fyziky (součást ČVUT) v Praze a tento konkrétní typ detektoru (MX-10) byl pro edukační účely sestaven českou společností Jablotron. Medipix detektory mají čip v pevné fázi (v tomto případě jde o křemík) a dokáží vizualizovat ionizující záření, počítat dopadající částice (režim čítač) a měřit energii absorbovanou v detektoru (režim spektrometr).

Na povrchu senzoru je tenká hliníková vrstva tvořící společnou katodu. Pod ní je polovodičový senzor typu P (spodní vrstva) a N (horní vrstva). Jeho spodní část je rozdělena na 65 536 ( $256 \times 256$ ) samostatných pixelů sloužících jako anody. Každý pixel je pomocí kontaktní bondovací kuličky napojen na vyčítací čip. V něm je pro každý pixel zesilovač, komparátor a čítač počtu částic. Katoda je připojena na vyšší elektrický potenciál než anoda, a proto je detektor zapojen v závěrném směru. Napětí (= bias) v tomto obvodu si může měnit uživatel (od 5 V do 100 V). Rozměry senzoru jsou 14 mm  $\times$  14 mm s tloušťkou 300  $\mu\text{m}$  [23].



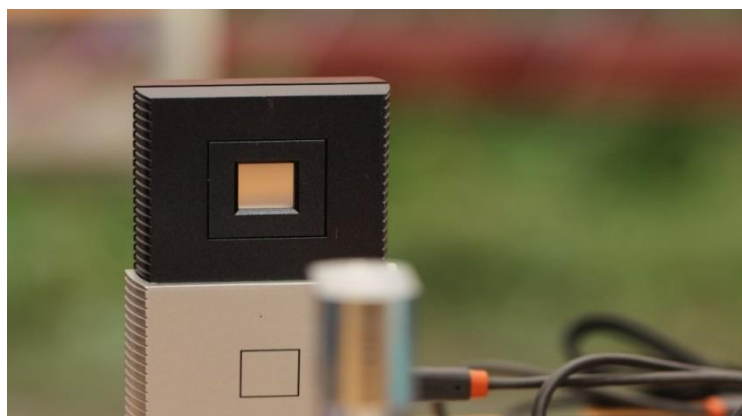
Obr. 1: Čip kamery Timepix. In: Medipix [online]. [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <http://aladdin.utef.cvut.cz/ofat/others/Medipix2/index.html>

Díky dopadu ionizujícího záření na pixel se v p-n přechodu vytvoří páry elektron-díra. Náboje jsou přitaženy ke katodě, a tím vzniká detekovatelný proudový impulz. Ten se přemění na napěťový impulz a je zesílen pomocí zesilovače. Pak se přivádí do komparátoru, kde se rozhoduje, jestli bude započten nebo ignorován. Děje se tak na druhém vstupu komparátoru pomocí thresholdu (= práh detekce), jehož velikost lze nastavit (minimální hodnota je rovna energii  $3,5 \text{ keV}^1$ ). Pokud je příchozí impulz menší než nastavený threshold (= šum) pak se na výstup nepřenesení a bude ignorován. Pokud je ovšem impulz vyšší než threshold, je přenesen na výstup komparátoru.

Čítač tedy tento impulz započítá (režim čítač), případně změří absorbovanou energii (režim spektrometr). Toto přiřazení energie impulzu funguje na principu ToT (Time over Threshold), což znamená, že se vyšle signál s danou taktovací frekvencí (u MX-10 je to 10 MHz) a čítač spočítá, kolik taktů proběhlo během doby, kdy měl impulz hodnotu větší než nastavený threshold. Počet taktů pak lze převést na absorbovanou energii [23].

Připojením detektoru k počítači USB kabelem se z něj stává kamera. Ta se pak používá v mnoha odvětvích, ať už jde o lékařství, materiálovou analýzu, optiku, vesmírný program nebo výuku na univerzitách.

Při většině měření nebyla však kamera přesně nakalibrovaná, což mohlo někdy způsobit zaregistrování šumu většinou jako nízkoenergetických gama částic či zneřádnit energie některých částic přibližně o 10 %.



Obr. 2: Částicová kamera Timepix. Vlastní obrázek.

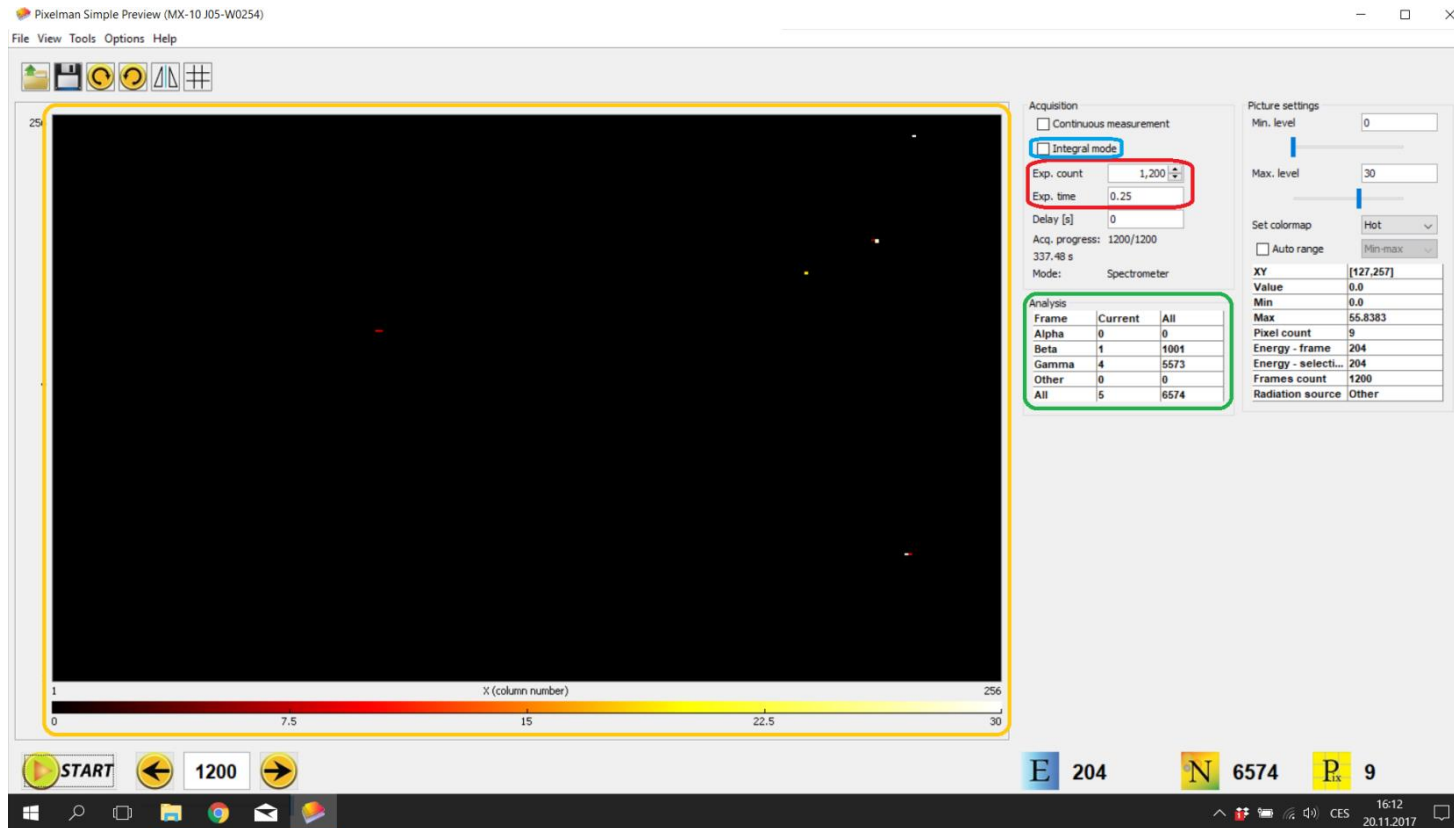
<sup>1</sup> Elektronvolt je jednotka energie. Odpovídá kinetické energii elektronu urychleného ve vakuu napětím 1 V. Je roven asi  $1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$ .

## 2.2 Software dodávaný ke kameře

Pro řízení detektoru typu Medipix a vizualizaci, ukládání a vyhodnocování dat z něj získaných byl vyvinut program Pixelman. Tento program je ale velmi komplexní a na úplné zvládnutí náročný, a proto byla vydána také jeho odlehčenější verze – Simple preview.

I v té si ale můžeme zobrazit histogramy energií, počtu nebo i velikosti částic. Ty si poté můžeme uložit jako sešity Excelu a dále s nimi pracovat. Také si můžeme uložit všechny snímky jako PNG nebo jako textový soubor. Z těchto snímků je možné vypočítat, jak přesně zachycené stopy částic vypadaly, a možnost exportu snímků ve formě textového souboru poté využíváme v našem vlastním softwaru. Spolu s textovými soubory se ukládá i soubor typu dsc, ve kterých se nachází údaje o každém snímku jako například čas jeho pořízení či doba expozice.

V prostoru zobrazení částicové kamery jsou jednotlivé pixely zbarveny dle barevné škály. Ovšem tato barevná škála už nerozlišuje u jednotlivých pixelů energie větší než 30 keV, a neurčuje tedy ztráty energií vysokoenergetických částic při jejich průchodu kamerou. Proto jsme se na tuto škálu nemohli spoléhat a pro měření vysokoenergetických částic jsme si vytvořili vlastní algoritmus na vykreslování.



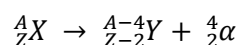
Obr. 3: Simple preview. Vlevo vidíme prostor zobrazení (= obraz čipu; žlutý rámeček), vpravo pak nastavení integrálního módu (modrý rámeček), nastavení doby expozice a počtu snímků (červený rámeček) a informační pole o naměřených částicích (zelený rámeček). Vlastní obrázek.

## 3 ZÁKLADNÍ TYPY ZÁŘENÍ

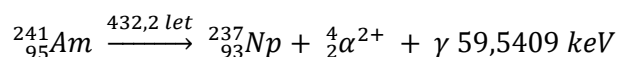
### 3.1 Alfa záření

Jedná se vlastně o jádro hélia (2 protony a 2 neutrony) vyvrhnuté z jádra nestabilního atomu. Nestabilní atom se tedy mění na atom prvku umístěného v periodické soustavě prvků o 2 místa zpátky.

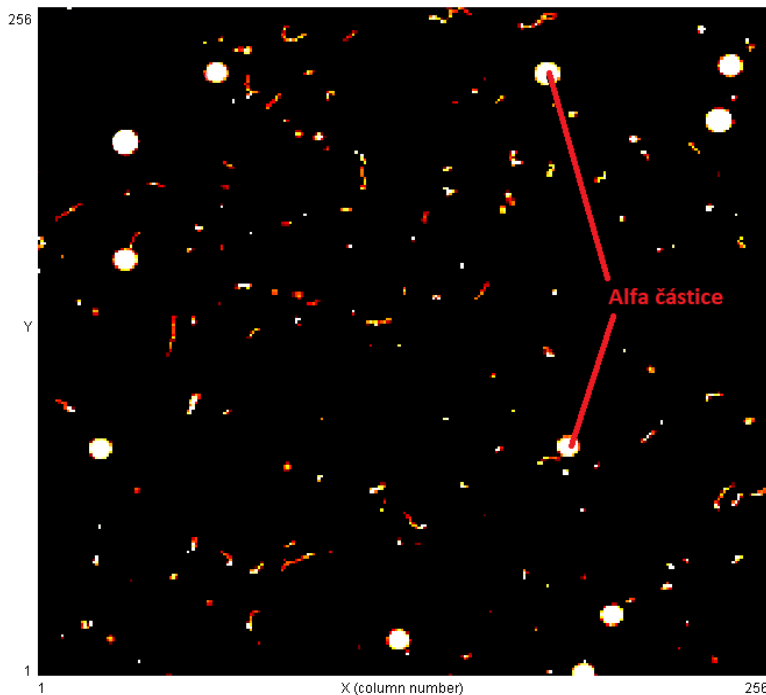
Obecně se dá rozpad zapsat jako:



Konkrétní příklad alfa rozpadu nestabilního izotopu americia, při kterém dochází ke vzniku excitovaného stavu atomu neptunia, který je blíže popsán v kapitole 6.2 Americium-241:



Alfa částice nemají dlouhý dolet. Jedním z důvodů je jejich relativně velká hmotnost a malá rychlost v porovnání s rychlostí světla, která způsobuje časté srážky s okolními molekulami, a tím rychlou ztrátu energie. Dolet závisí na vlastnostech prostředí, ve kterém se částice pohybuje. Za druhý důvod lze považovat jejich kladný náboj díky dvěma protonům (u anti-alfa částice by byl záporný), který může způsobit ionizaci či interakci s prostředím. Ve vzduchu za atmosférického tlaku je průměrný dolet alfa částic v řádech centimetrů, s růstem tlaku klesá, ve vodě je pak ještě menší. Alfa částice tedy lze odstínit pouhým listem papíru. Přesto však díky svým ionizačním účinkům může být alfa záření nebezpečné. Částice alfa jsou kupříkladu schopné poškozovat molekuly DNA a tím způsobovat mutace. Na záznamu kamery MX-10 se jejich stopa projevuje jako tzv. „blob“, její energie se rozdělí do několika pixelů (viz obr. 4). Vyvržení částice alfa je většinou doprovázeno následným gama zářením. Nově vzniklý prvek má většinou své jádro v excitovaném stavu, a aby se této energie zbavil, dojde k vyzáření energie ve formě částic gama. Alfa rozpad probíhá u prvků s vyšším protonovým číslem (uran, thorium), které se tímto snaží dosáhnout stabilnější modifikace, tedy správného poměru mezi neutrony a protony.



Obr. 4: Alfa částice, jak ji vidí MX-10, tzv. „Blob“. Vlastní obrázek.

## 3.2 Beta záření

Jedná se o proud letících elektronů nebo pozitronů<sup>2</sup>, které mají větší pronikavost materiálu než alfa záření. Při průchodu čipem Timepix se energie beta částic rozdělí tak, že na záznamu vytvoří křivku nebo přímku o několika pixelech (viz obr. 5). Rozlišujeme 2 typy: beta plus ( $\beta^+$ ) a minus ( $\beta^-$ ). Díky svému náboji má beta záření také ionizační účinky.

### 3.2.1 Beta plus

Dochází k rozpadu protonu na neutron a pozitron, který po zastavení a při srážce s elektronem vyzáří 2 fotony, které můžeme detekovat → využití  $\beta^+$  při pozitronové emisní tomografii (PET), a vznikne také elektronové neutrino<sup>3</sup>. Nestabilní atom se tedy mění na atom prvku umístěného v periodické soustavě prvků o 1 místo zpátky.

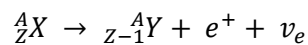
<sup>2</sup> Pozitron – antičástice k elektronu. Při srážce antičástice s částicí dojde k anihilaci a vytvoření 2 fotonů.

<sup>3</sup> Elektronové neutrino ( $\nu_e$ ) – velice malá částice, jež velice špatně interaguje s hmotou, a proto je těžké ji zachytit.

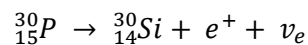
U beta minus přeměny vzniká jeho antičástice antineutrino ( $\bar{\nu}_e$ ) .

Počet částic v jádře však zůstává stejný, a to díky vzniku neutronu. Jádra s přebytkem protonů se tímto snaží přeměnit se na stabilnější jádra.

Obecně se dá rozpad zapsat jako:



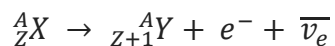
Konkrétní příklad rozpadu fosforu na křemík:



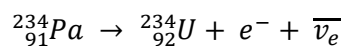
### 3.2.2 Beta minus

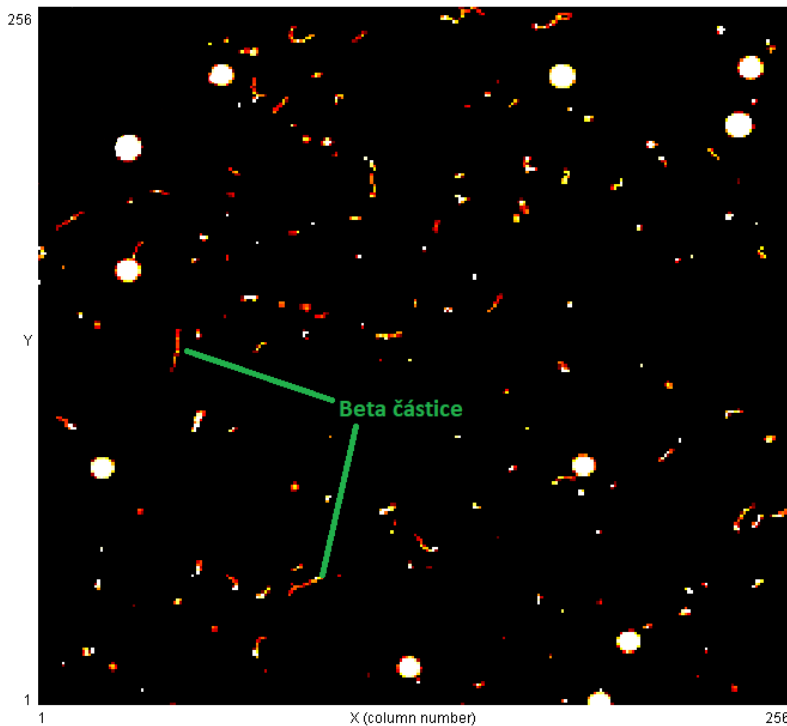
V přírodě rozšířenější než  $\beta^+$ . Dochází k rozpadu neutronu na proton a elektron + antineutrino. Nestabilní atom se tedy mění na atom prvku umístěného v periodické soustavě prvků o 1 místo dopředu. Jádra s přebytkem neutronů se tímto snaží přeměnit se na stabilnější jádra.

Obecně:



Konkrétní příklad rozpadu paladia na uran:



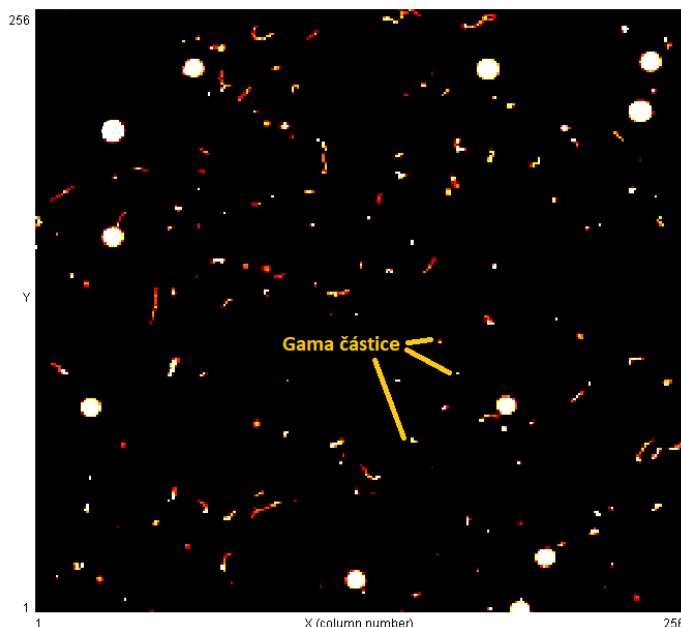


Obr. 5: Beta částice, jak ji vidí MX-10, podlouhlá křivka. Vlastní obrázek.

### 3.3 Gama záření

Lze jej charakterizovat jako pronikavé elektromagnetické záření tvořené proudem fotonů. Většinou doprovází předešlé 2 typy záření po vzniku excitovaného stavu jádra. Tyto fotony jsou tedy vyzářeny, aby jádro přišlo o část své energie a protony s neutrony se přeuspořádaly charakteristicky pro nově vzniklé jádro. Tento přechod se nazývá kvantový skok. Přesný opak mohou fotony způsobit, pokud zasáhnou jádro nějakého jiného atomu. Budou pohlceny a jejich energie se projeví jako přírůstek energie elektronů, které můžou v některých případech až opustit obal atomu (fotoelektrický jev). Díky těmto účinkům může být gama záření pro zdraví škodlivé, ale přesto nalézá vysoké uplatnění v medicíně při boji s rakovinou. Díky faktu, že částice gama nenesou žádný náboj, jsou schopny vysokého doletu a průchodu prostředím. Na čipu Timepix se projevují jako 1-2 osamělé pixely.



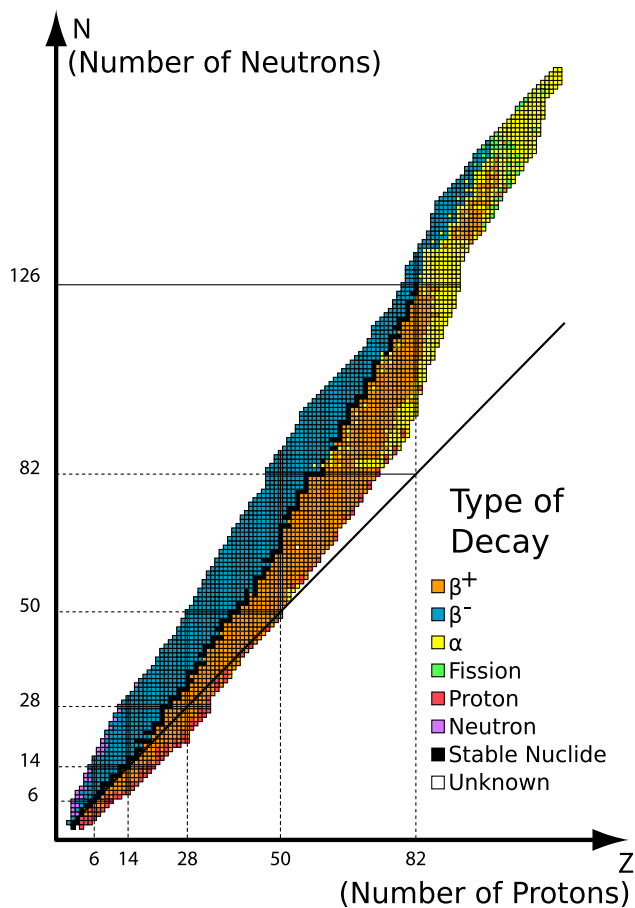


Obr. 6: Gama částice, obrazec zabírající 1-2 pixely. Vlastní obrázek.

### 3.4 Stabilita jádra

Stabilita daného jádra závisí na počtu protonů a neutronů a na poměru mezi nimi. Jeden prvek má vždy několik izotopů, které se liší počtem neutronů, a proto mají také rozdílnou stabilitu. Nestabilní jádra mají v sobě ukryto mnohem více energie než stabilní. Nestabilní jádra se tedy přirozeně snaží snížit svojí energii. Toho dosahují změnou poměru mezi protony a neutrony, například vyvržením částice alfa, nebo přeměnou neutronu na proton (beta minus) či protonu na neutron (beta plus), dále také existuje možnost vyvržení samostatného protonu nebo neutronu aj.

Pokud sloučíme 2 jádra na jádro, které má energii menší, než měla předchozí 2 jádra dohromady (jaderné slučování), nebo rozštěpíme jedno těžší jádro na 2, která mají dohromady menší energii než jádro předchozí (jaderné štěpení), energii získáme. Zmíněného jevu štěpení jádra se využívá například v jaderných elektrárnách při štěpení uranu. Jaderné slučování probíhá v nitru hvězd, kde se za velmi vysoké teploty jádra vodíku slučují na hélium za vzniku energie. Slučování je také základním principem vodíkové bomby. Pokud však chceme sloučit 2 lehčí jádra s menší energií na jedno těžší či budeme potřebovat rozštěpit jádro s menší energií na dvě s energií větší, je třeba energii dodat.



Obr. 7: Znázornění rozpadů pro daná protonová a nukleonová čísla. Anglicky Fission – štěpení. Stable nuclide – stabilní nuklid. Unknown – neznámý. Gallery Slideshow File: Table isotopes en.svg [online]. [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Table\\_isotopes\\_en.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Table_isotopes_en.svg)

Výše uvedený obrázek ukazuje, pro která jádra jsou jednotlivé rozpady charakteristické. Na x-ové ose je znázorněn počet protonů, na y-ové pak neutronů. Černě jsou znázorněny stabilní poměry mezi protony a neutrony, tedy stabilní jádra, ke kterým se ostatní jádra snaží „propracovat“. Lze spatřit, že pro jádra s velkým počtem nukleonů jsou charakteristické alfa rozpady, někdy také rozštěpení. Velice čteně je zastoupen beta rozpad. Nad černou linií stabilních jader převládá beta minus rozpad z důvodu nadbytku neutronů, pod linií zase beta plus kvůli většímu počtu protonů.

## 4 RADIAČNÍ AKTIVITA, DÁVKA

### 4.1 Aktivita

Veličina udávající počet radioaktivních přeměn za jednotku času. Jednotkou je becquerel [Bq].

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t}$$

### 4.2 Radiační dávka

Absorbovaná dávka (D) udává energii, kterou z radioaktivního záření obdrží 1 kg látky. Její jednotkou je gray [Gy], což je dle definice joule na kilogram [J/kg]. Častěji se však setkáme s mnohem menšími dávkami [mGy]. Jméno nese podle zakladatele radiobiologie, britského fyzika Louise Harolda Graye.

$$D = \frac{E}{m}$$

Kde

E – energie záření absorbovaná tělesem hmoty m

m – hmotnost těles, které energii absorbovalo

D – absorbovaná dávka

Jednotka gray v sobě však nezahrnuje účinky na živé organismy. Pokud bychom chtěli kupříkladu zjistit, zda je daná dávka zdraví škodlivá, je třeba ji přepočítat na jednotku sievert [Sv], která je jednotkou dávkového ekvivalentu ( $D_{ekv}$ ). To, jak působí záření na lidský organismus, totiž závisí na jeho typu a energii. A tyto vlastnosti dávkový ekvivalent zohledňuje. Pokud bychom chtěli například zjistit, jak velký vliv má dávka tvořená zářením alfa, je třeba ji vynásobit tzv. koeficientem relativní biologické účinnosti (k), který závisí na typu záření a biologických faktorech. U částic alfa je k rovno 20 [21].

$$D_{ekv} = k \cdot D$$

Kde

$D$  – dávka

$k$  – koeficientu relativní biologické účinnosti

$D_{ekv}$  – dávkový ekvivalent

V radiobiologii se dále využívají veličiny jako ekvivalentní dávka a efektivní dávka, které v naší práci neuvažujeme.

K absorbované dávce i k dávkovému ekvivalentu existují dále veličiny jako dávkový příkon a ekvivalentní příkon, které dávky zohledňují v závislosti na čase: [Gy/s] a [Sv/s]. Radiační pozadí občana ČR činí 2,5 až 3 mSv/rok, v čemž je dohromady započítáno kosmické záření, dávka, kterou dostaneme z potravy, pozemská radiace a rentgenové vyšetření. Limit pro pracovníka se zářením činí 50 mSv/rok [9].

Limity dávek jsou ustanoveny ve vyhláškách a zákonech. Jsou stanovovány příslušnými úřady pro jadernou bezpečnost. Na mezinárodní úrovni hraje významnou roli komise ICRP.

## 5 KOSMICKÉ ZÁŘENÍ

Na Zemi dopadá z vesmíru veliké množství vysokoenergetických částic. Tyto částice se dají označit jako kosmické záření.

Kosmické záření je dvojího typu. Primárním kosmickým zářením se rozumí částice, které dopadnou do atmosféry, kde díky srážkám s jádry tvořícími atmosféru vytváří spršku nových částic, která již dopadne na zemský povrch (= sekundární kosmického záření).

Množství částic dopadajících na Zemi se mění spolu se vzdáleností od zemského povrchu a s geomagnetickou polohou.

### 5.1 Složení

#### 5.1.1 Primární kosmické záření

Primární složka kosmického záření má hustotu asi 20 až 40 tisíc částic na  $m^2$  (pouze částice, které proniknou až do atmosféry) [12]. Je tvořeno především galaktickým kosmickým zářením, slunečním kosmickým zářením a zářením Van Allenových (radiačních) pásů Země.

Galaktické kosmické záření (GKZ) vzniká někde ve vesmíru, mimo naši sluneční soustavu a je urychlováno v důsledku explozí hvězd (supernov). GKZ je složeno z jader vodíku (protony;  $\sim 86$  %), jader helia ( $\alpha$  částice;  $\sim 11$  %), elektronů ( $\sim 2$  %) a jader těžších prvků ( $\sim 1$  %). Jeho pole je izotropní (má stejnou intenzitu bez ohledu na směr měření). Energetické spektrum GKZ téměř nezávisí na typu částic a nejvyšší naměřená energie v tomto typu záření byla asi  $10^{11}$  GeV. GKZ je částečně omezováno slunečním větrem [20].

Sluneční kosmické záření (SKZ) pochází hlavně ze dvou dějů probíhajících na Slunci: výrony koronální hmoty a erupce. Toto záření je tvořeno převážně protony (99 %) a z pouhých 0,1 % těžšími nabitými částicemi. Energetické hodnoty jsou různé, ale většinou nepřesahují 100 MeV. Při opravdu silných erupcích se objevuje maximální energie kolem 1 GeV.

Protože však z většiny mají tak „malé“ energie, jsou zachyceny magnetickým polem Země a do atmosféry tedy pronikají jen zřídka [20].

Země má na ochranu proti kosmickému záření kromě atmosféry i magnetické pole. To, spolu se slunečním větrem (složeným z nízkoenergetických protonů a elektronů), slouží jako stínění a brání částicím s energiemi nižšími než 100 MeV (SKZ) proniknout do blízkosti Země. Tyto částice jsou jím zachyceny a vytváří radiační pásy obklopující naši planetu. Tyto radiační pásy jsou pojmenovány podle jejich objevitele, a to jako Van Allenovy radiační pásy. Energie zachycených částic se s časem mění a u protonů dosahuje několika stovek MeV, zatímco u elektronů jen několika stovek keV. Vzdálenost radiačních pásů od povrchu Země je 400–50 000 km. Nejnížší výšku mají v oblasti pólů. Zde také částice s vyšší energií odevzdají část své energie atomům v atmosféře, tím je přenesou do excitovaného stavu. Při návratu těchto atomů do původní energetické hladiny jsou pak uvolněny fotony viditelného světla a tím vzniká polární záře [20].

### **5.1.2 Sekundární kosmické záření = sprška**

Tento jev vzniká, když vysokoenergetické částice primárního kosmického záření vletí do atmosféry, kde se sráží s jádry vzduchu a dusíku. K této srážce dochází většinou mezi 10–30 km nad zemským povrchem (závisí to na typu částice a její energii). Těmito interakcemi vznikají nové částice, které do sebe také naráží a tím tvoří další a další částice. Tento proces probíhá, dokud částice nebudou mít energii nižší, než je tzv. kritická hodnota ( $E_{\text{crit}}$ ). Pro vzduch je to asi 84 MeV. Po překročení této hodnoty se již nevytváří nové částice a sprška je absorbována atmosférou [20].

Nově vzniklé částice jde rozdělit do dvou hlavních skupin: lehké a těžké. Do lehkých patří např. fotony, elektrony, pozitrony a nízkoenergetické miony.

Těžké částice jsou hlavně vysokoenergetické miony, ale i protony a nabitě piony<sup>4</sup>. Při průchodu spršky atmosférou vznikají také neutrální piony, ale ty se rychle rozpadají a tím vrací část energie zpět spršce [11]. Pro naši práci jsou z těchto částic nejdůležitější miony.

---

<sup>4</sup> Piony patří do skupiny mezonů (= částice tvořené párem kvark – antikvark).

Nejvyšší intenzitu má sekundární kosmické záření v tzv. Pfozterově maximu (kolem 20 km nad povrchem). Poté intenzita klesá a od 50 km je téměř stálá [20]. My jsme se dostali jen do výšky 11 km.

## 5.2 Detekce kosmického záření

Za objevitele kosmického záření je považován rakouský fyzik Victor Franz Hess. Díky experimentům s horkovzdušným balónem vyvrátil tehdejší teorii, že záření vychází ze Země, a potvrdil teorii, že pochází z kosmu. Za svůj objev dostal později Nobelovu cenu.

V roce 1935 předpověděl japonský vědec a nositel Nobelovy ceny za fyziku Hideki Yukawa, díky svému teoretickému výzkumu, nové částice – mezony. O 12 let později byla jeho teorie potvrzena nálezem pionu ( $\pi$  mezon). V roce 1936 byly Carlem Andersonem a Sethem Neddermeyerem objevena další nové částice – mion. Ten byl původně považován za mezon, ale další výzkumy ukázaly, že má odlišné vlastnosti od mezonů a byl tedy přeřazen do leptonů<sup>5</sup>[20].

Jedním z nejvýznamnějších a největších objektů na zkoumání kosmického záření je observatoř Pierre Auger v Argentině. Toto výzkumné zařízení má pozemní detektory a fluorescenční teleskopy. Oba tyto detektory zachycují a měří signály vyvolané sekundárními částicemi kosmického záření.

## 5.3 Miony

Mion  $\mu$  je, stejně jako elektron a tauon, elementární částice patřící do skupiny leptonů. Existuje i jeho kladná verze, a to antimion a také jeho neutrino a antineutrino.

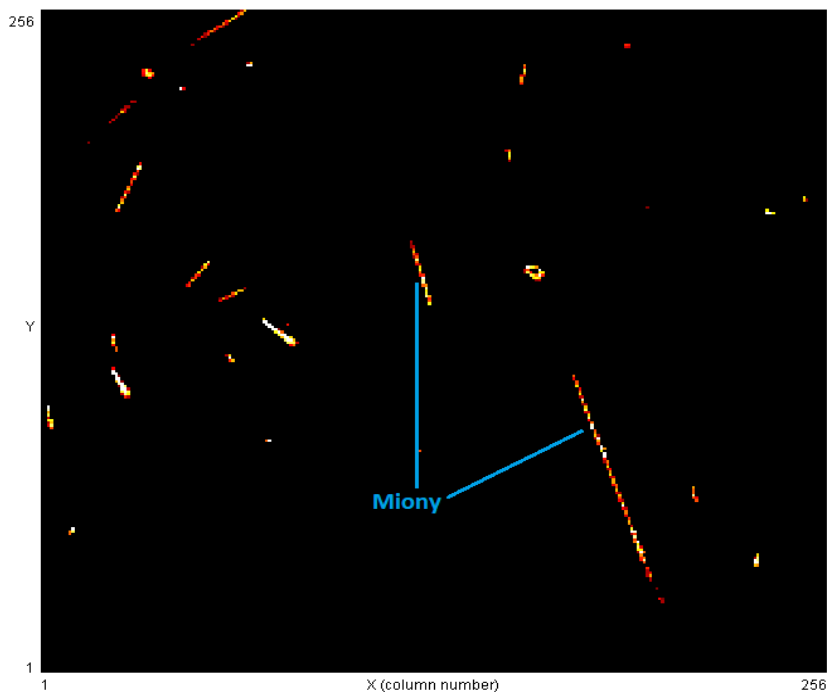
Hmotnost mionu je rovna  $207 \times$  hmotnost elektronu, což odpovídá klidové energii přibližně 105,7 MeV. Jeho doba života je asi 2,2 mikrosekund. Miony mají spin  $\frac{1}{2}$  a náboj -1 [15,19].

---

<sup>5</sup> Leptony – skupina elementárních (základních) částic. Patří sem elektron, mion a tauon a jejich neutrino.

Srážením velmi rychle letících protonů (primární složka kosmického záření) s jádry dusíku a kyslíku v nejvyšších vrstvách atmosféry vznikají piony. Ty se hned poté samovolně rozpadají na mion a jeho neutrino (případně jejich antičástice). Mion je ovšem také nestabilní částice, a proto se po uplynutí doby svého života rozpadá na elektron a elektronové a mionové neutrino. Průměrná energie mionu vzniklého v atmosféře interakcí kosmického záření je 6 GeV, avšak při průletu atmosférou ztrácí asi 2 GeV, takže na zemském povrchu lze naměřit energie okolo 4 GeV [18].

Miony byly objeveny v roce 1936 Carlem Andersonem a Sethem Neddermeyerem (potvrzeny roku 1937 J. C. Streetem a E. C. Stevensonem) díky pozorování stop částic v mlžné komoře, způsobeným dopadáním tohoto kosmického záření na povrch Země. To, že mion i přes svoji velmi krátkou dobu života dopadá až na zemský povrch, je důkazem platnosti dilatace času. Hustota jejich toku je přibližně 1 mion na  $\text{cm}^2$  za minutu [15]



Obr. 8: Mion, jak ho vidí MX-10 detektor. Vlastní obrázek.

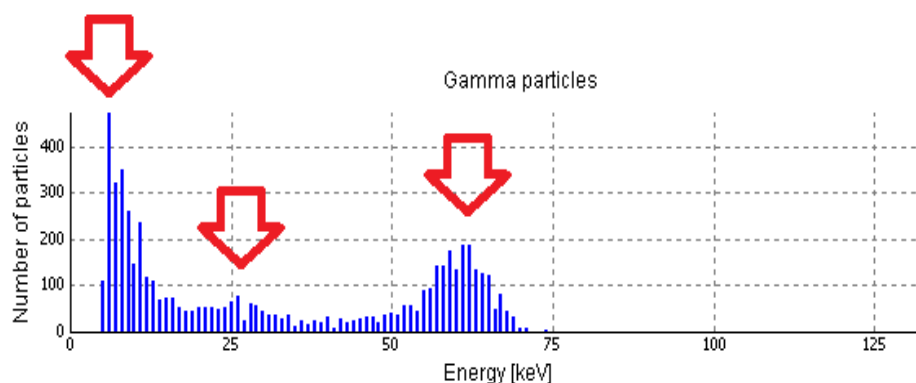


## 6 MĚŘENÍ LABORATORNÍCH ZDROJŮ

### 6.1 Metodika

Naši práci jsme započali seznámením se s částicovou kamerou. K tomu nám Společná laboratoř optiky laskavě zapůjčila MX-10 kameru, stojan a zdroj alfa a gama záření – izotop americium-241 (viz Americium-241). S nimi jsme provedli spoustu měření, naučili se rozeznávat různé částice a celkově si rozšířili znalosti o této problematice.

Naměřené energie ve vyexportovaných histogramech mají viditelné 2–3 tzv. peaky, tj. místa v grafu udávající energii, kterou mělo nejvíce částic při daném měření. Jeden peak je očekáván, ale ostatní jsou energie, které kamera zaznamená třeba při fotoefektu a Comptonově rozptylu<sup>6</sup> původního gama fotonu. Tyto jevy se objevují při vyzařování gama částic (viz Gama záření), kdy je očekáván spíše 3. peak. U alfa záření je však 2. peak většinou způsoben dopadem dvou částic na stejné místo a překrytím jejich stopy.



Obr. 9: První, druhý a třetí peak při měření gama částic. Očekáván je třetí peak (kolem 60 keV). Vlastní obrázek.

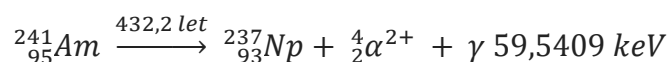
<sup>6</sup> Comptonův jev (rozptyl) – Záření předává část své energie atomům tvořícím prostředí, kterým dané záření prochází. Důsledkem toho se mění vlnová délka záření a sražené částice se vychýlí ze svých drah.

## 6.2 Americium-241

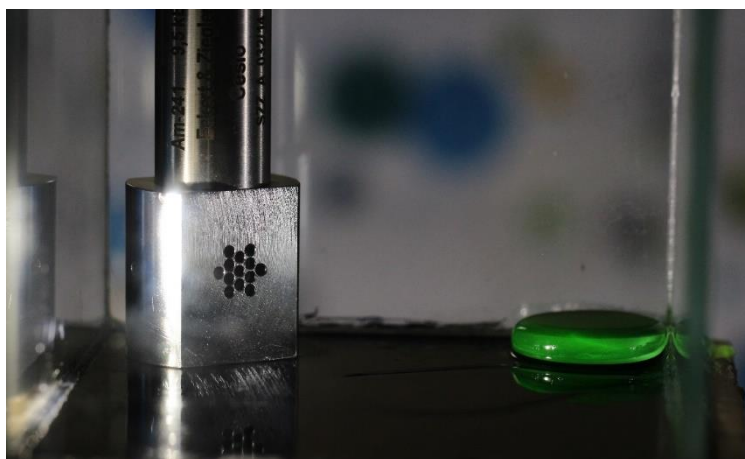
Americium-241 je nejrozšířenějším a prvním vytvořeným izotopem americia (vytvořen roku 1944). Stejně jako ostatní izotopy tohoto prvku je radioaktivní. Jeho jádro obsahuje 146 neutronů a 95 protonů. Rozkládá se na Np s poločasem rozpadu asi 432 let [3,6].

Tento izotop americia nám sloužil jako laboratorní zdroj alfa a gama záření při našich prvotních pokusech.

Americium-241 se rozpadá hlavně alfa rozpadem se slabým vedlejším produktem gama záření. Rozpad  $\alpha$  je znázorněn následovně:



Při  $\alpha$  rozpadu se uvolňuje energie kolem 5,5 MeV. Při následném  $\gamma$  rozpadu vzniká nejčastěji foton o energii kolem 60 keV [3].

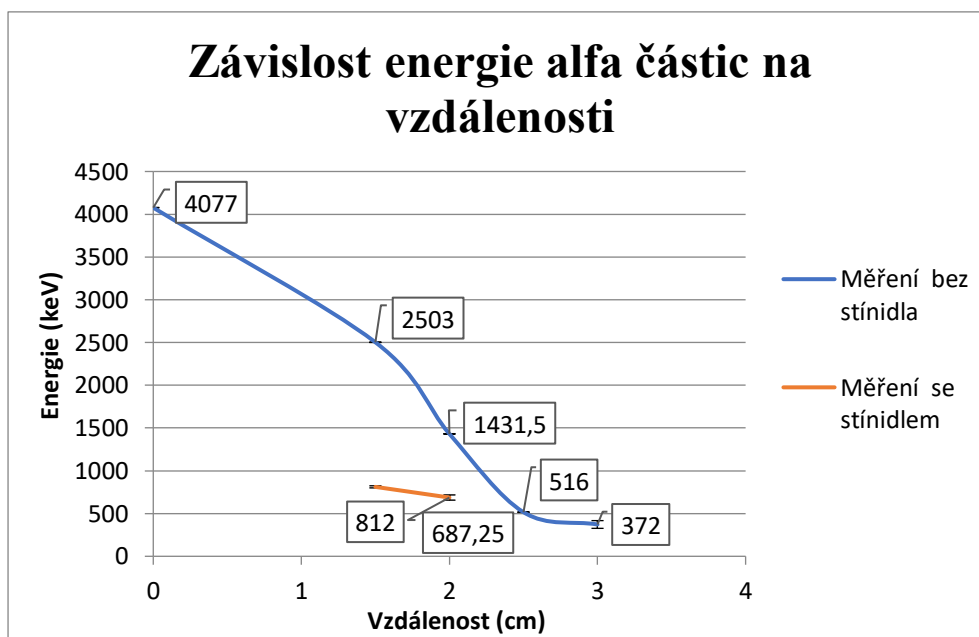


Obr. 10: Laboratorní zdroj záření – americium-241 (vlevo) a sklíčko z uranového skla (vpravo). Vlastní obrázek.

## 6.3 Dolet alfa částic

Jako první jsme měřili, nakolik vzdálenost ovlivňuje počet a energii alfa částic dopadnuvších na čip kamery.

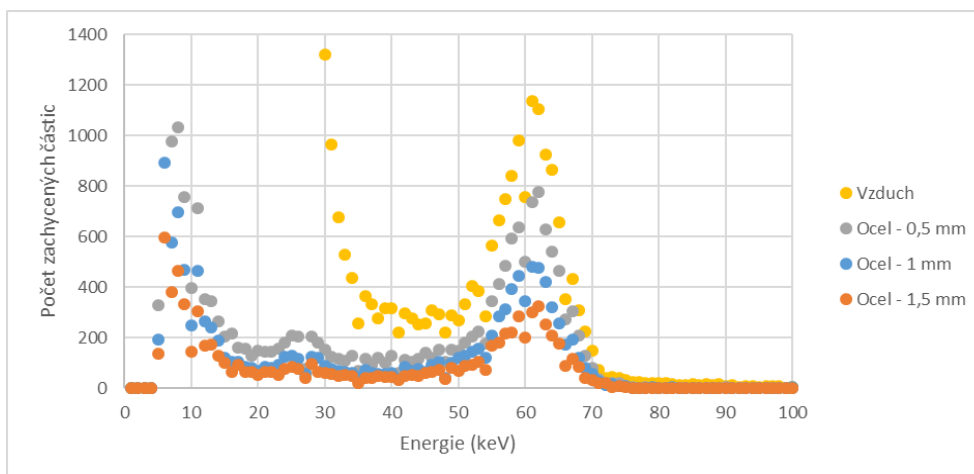
Alfa částice mají velkou energii, a proto hodně reagují s okolím a tím se ale také velmi zpomalují. Tento jev jsme se jali vyzkoušet při testování detektoru Timepix, kdy jsme laboratorní zdroj americia odstínili tenkým listem papíru a naměřili energie z různých vzdáleností. Z měření jsme posléze vytvořili graf, v němž lze spatřit pokles energií částic alfa se zvyšující se vzdáleností a poté posun celé energetické řady směrem dolů při užití tenkého papíru jako stínidla. Naše měření jsme započali přímo u čipu Timepix a posléze jsme posouvali zdroj až do vzdálenosti 3 cm. Ve vzdálenosti větší než 3 cm bylo již alfa částic velmi málo.



Obr. 11: Energie alfa částic v závislosti na vzdálenosti od zdroje. Vlastní graf.

## 6.4 Průchod gama záření

Také jsme měřili průchod gama záření skrze vzduch a 3 různě široké vrstvy oceli (0,5; 1 a 1,5 mm). S každým půlmilimetrovým plíškem oceli jsme provedli 3 měření s dobou expozice 0,25 s a počtem snímků 1200. Se vzduchem jsme taktéž provedli 3 měření, ale poprvé s dobou expozice 1 s a počtem snímků 300, podruhé s dobou expozice 0,5 s a počtem snímků 600 a nakonec i s počtem snímků 1200 a dobou expozice 0,25 s. Každou vrstvu jsme tedy měřili 15 minut.



Obr. 12: Očekávaný peak gama záření při průchodu ocelí. Graf je oříznut z důvodu velkého počtu částic zachycených při měření bez stínidla. Vlastní graf.

Jak bylo již výše zmíněno, očekávan byl hlavně třetí peak. Tomuto odpovídá i to, že na rozdíl od prvních dvou vycházel pro všechna měření stejně (kolem 60 keV). Jak jde v obrázku i v následující tabulce vidět, ocel gama částice stínila. Zachycených částic totiž při stejné délce měření rapidně ubývalo. To se dá vysvětlit například tím, že některé gama částice při průchodu odevzdávaly část své energie atomům tvořícím ocel a při dopadu na čip tedy již neměly tolik energie. Toto potvrzuje i existence druhého peaku, který se objevuje až při měření s ocelí. Některé částice dokonce odevzdaly tolik ze své energie, že je kamera ani nezachytila. Ocel také odstiňuje část záření z pozadí. Počet částic, které detektoru odevzdaly očekávanou energii (kolem 60 keV) klesá s rostoucí šířkou oceli (zvyšuje se totiž pravděpodobnost, že odevzdají svoji energii).

První a druhý peak jsou možná také trochu zvětšeny díky vyšší citlivosti kamery na fotony o nižší energii.

Tloušťka oceli (mm)	0	0,5	1	1,5
1. peak				
Maximální hranice peaku stanovena (keV):	42	20	21	24
Medián:	6	8	9	9
Průměr:	5,7	9,5	9,6	10,4
Střední chyba průměru:	0,023	0,041	0,053	0,077
Rozptyl průměru:	12,1	3,5	3,6	4,5
Poloha peaku (keV):	18	6	6	6
Počet gama částic s energií peaku	18910	1408	892	595
3.peak				
Minimální hranice peaku stanovena (keV):	40	40	40	40
Maximální hranice peaku stanovena (keV):	80	80	80	80
Medián:	59	60	59	59
Průměr:	58,1	58,7	58,6	58,2
Střední chyba průměru:	0,065	0,075	0,095	0,12
Rozptyl průměru:	6,7	6,2	6,3	6,4
Poloha peaku (keV):	61	62	61	61
Počet gama částic s energií peaku	873	606	382	253

Tab. 1: Průchod gama záření ocelí. Vlastní tabulka.

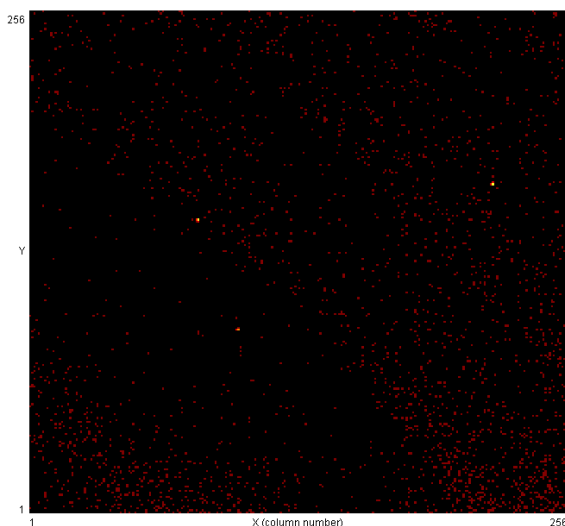
## **6.5 Sklenice z uranového skla**

Měření uranové sklenice jsme provedli, abychom se mohli podívat na alfa, beta i gama částice zároveň a vyzkoušeli náš program na rozpoznávání částic (viz Program na analýzu spektra a četnosti částic snímku).

## 7 MĚŘENÍ RADIACE V LETADLE

### 7.1 MX-10 s GPS v letadle

Stěžejní částí našeho výzkumu jest analýza dat ze dvou letů letadlem nad Evropou ve výšce až 12 000 m n. m. Dle teorie by se intenzita záření s rostoucí nadmořskou výškou měla kvůli kosmickému záření zvyšovat. Jeden let se konal z Prahy do Ženevy, druhý poté ze Ženevy do Prahy s mezipřistáním v Bruselu. K měření nadmořské výšky byla užita GPS ze zrcadlovky Canon EOS 6D (@CanonGPS/ver1.0/wgs-84/Canon EOS 6D/103025001545/003c), ze které lze následně vyexportovat GPS log. Měření by se samozřejmě neobešlo bez kamery MX-10. Spárování dat z GPS logu a snímků jsme provedli vlastním programem, jehož funkčnost je rozebrána v kapitole Vlastní software.

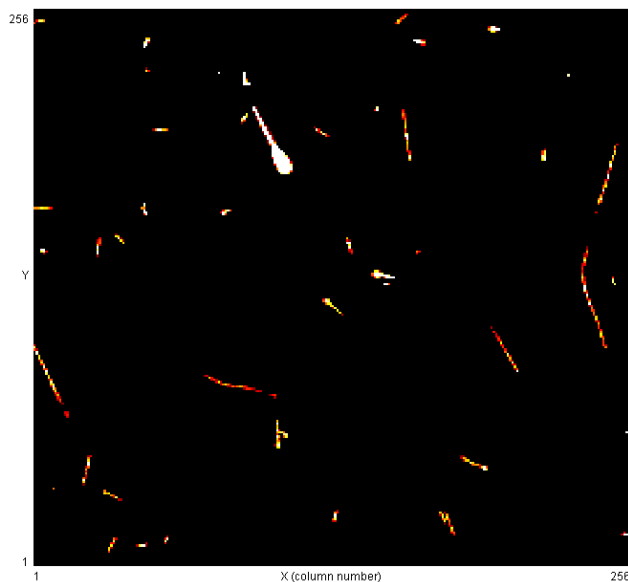


Obr. 13: Snímek zasažený elektrostatikou. Vlastní obrázek.

Z programu jsme získali informace o snímcích (energie, počty jednotlivých druhů částic podle našeho algoritmu) společně s nadmořskou výškou příslušející danému snímku. Při zpracování dat musely však být některé snímky vyřazeny, a to z důvodu nesmyslných hodnot, např. příliš velká hodnota energie (60 000 keV) nebo velké počty částic gama, které může způsobit zasažení čipu elektrostatikou.



Obr. 14: Snímek z malé nadmořské výšky. Vlastní obrázek.



Obr. 15: Snímek z vyšší nadmořské výšky. Vlastní obrázek.



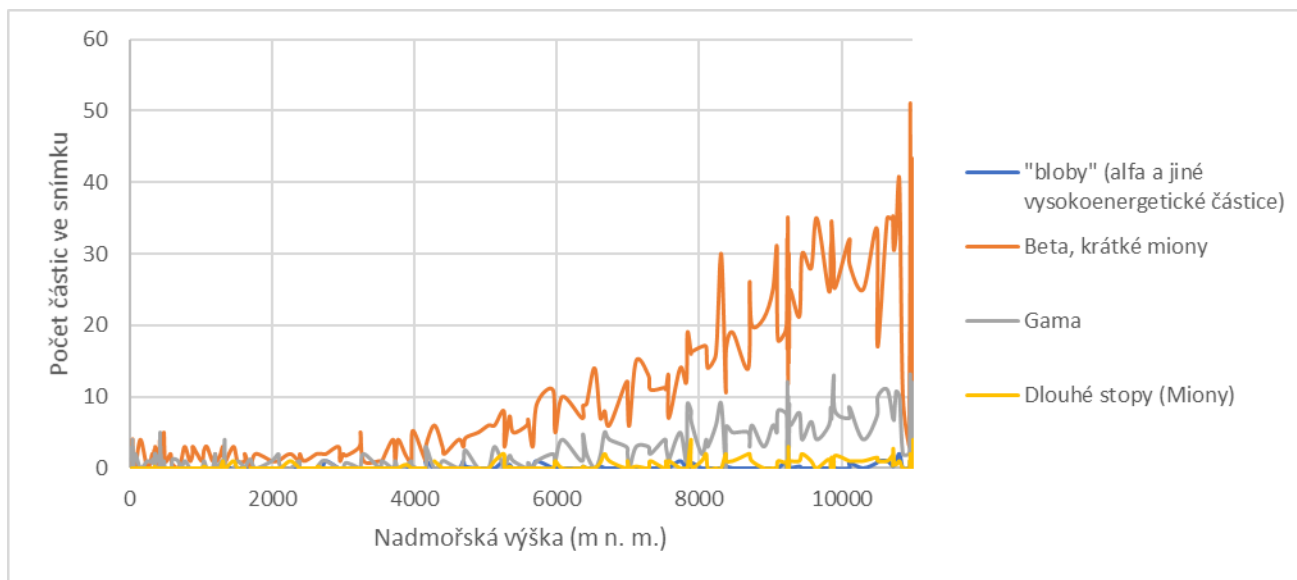
## 7.2 Počty částic jednotlivých typů v dané nadmořské výšce

Z analýzy dat jednotlivých snímků, které byly brány 30 s nebo byly na tento čas normalizovány, jsme vytvořili závislost počtu jednotlivých typů částic na nadmořské výšce, jak lze vidět v následujícím obrázku (viz obr. 16). Od klasických částic jsme pomocí našeho algoritmu oddělili i delší stopy, které nejpravděpodobněji náleží mionům. Někdy není možné stoprocentně určit, zda se jedná o betu či mion, obě totiž někdy zanechávají stopy rovných přímek. My jako dlouhé stopy mionů považujeme přímé stopy, které nemají více než 3 obklopené pixely a jsou delší než 25 pixelů.

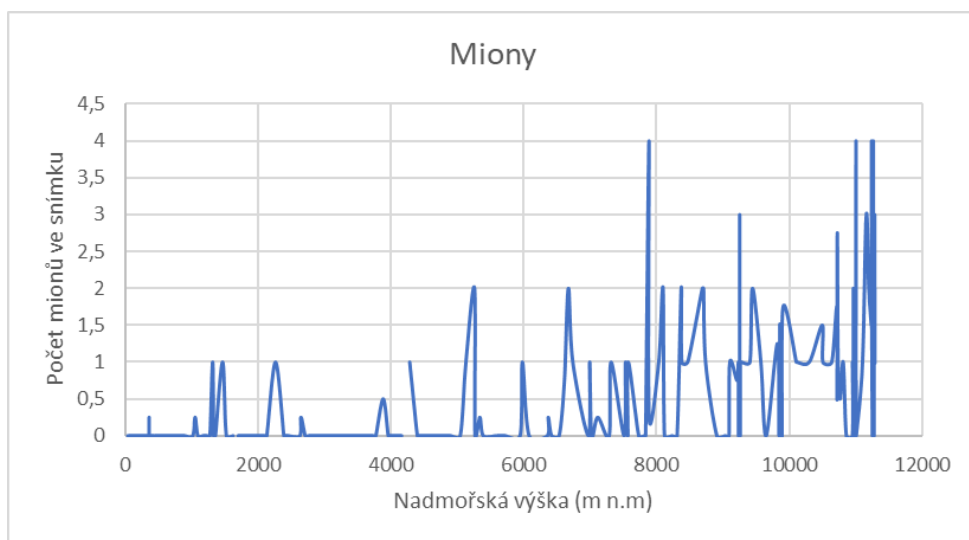
Jak lze vyčíst z obrázku 16, tak počet zachycených částic roste s vyšší nadmořskou výškou a jde především o elektrony beta minus a krátké stopy mionů, jež se od nich nedají nejlepším způsobem odlišit. Dále pozorujeme vzrůst počtu částic gama, v menším měřítku potom i zvýšení počtu částic vysokoenergetických a samozřejmě dlouhých stop mionů. Růst počtu dlouhých stop mionů je znázorněn v obrázku 17.

## 7.3 Dávka a energie v daném úseku nadmořské výšky

Dále jsme naše data rozdělili do výškových úseků, vždy po jednom kilometru. V těchto úsecích jsme spočítali průměrnou energii na jeden snímek, a dále radiační dávkový příkon, který dostal křemíkový čip ( $m = 1,37 \times 10^{-4}$  kg) za určitý čas taktéž v daném výškovém úseku. Data jednoho snímku byla brána po dobu 30 s. V následující tabulce jsou zobrazeny informace o našem měření pro jednotlivé výškové úseky (hodnota v tabulce je poslední bod úseku). Z tohoto důvodu jsou zde vypočítané dávkové příkony. Do grafu na obrázku 18 je vynesena dávková příkon v mGy/rok v závislosti na nadmořské výšce úseku, kterému náleží. Přesnost je bohužel závislá na tom, kolik máme počtu snímků z daného úseku, protože se letadlo v každém úseku nepohybovalo stejnou dobu.



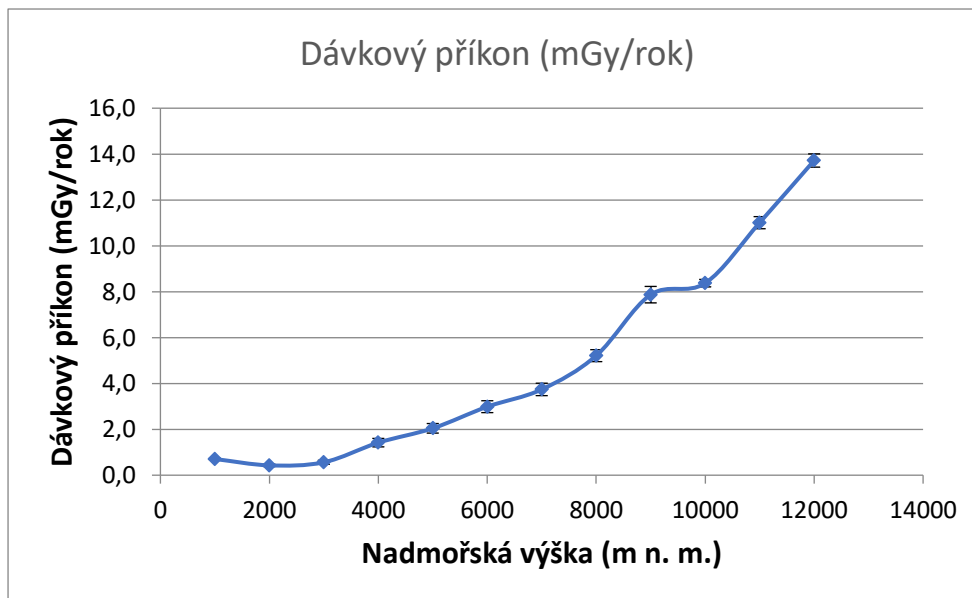
Obr. 16: Závislost počtu jednotlivých typů částic ve snímcích na nadmořské výšce. Vlastní graf.



Obr. 17: Závislost počtu dlouhých mionů ve snímcích na nadmořské výšce. Vlastní graf.

úsek nadmořské výšky (m n. m.)	celková energie (keV)	počet snímků	průměrná E snímků (keV)	počet částic	počet částic na snímek	průměrná E částic (keV)	Dávkový příkon mGy/rok	Chyba (mGy/rok)
0-1000	99720	174	573	482	2,8	207	0,705	0,032
1000-2000	8009	23	348	69	3	116	0,428	0,052
1000-3000	10057	22	457	41	1,9	245	0,562	0,088
3000-4000	16141	14	1153	59	4,2	274	1,418	0,185
4000-5000	29910	18	1662	97	5,4	308	2,044	0,208
5000-6000	41265	17	2427	133	7,8	310	2,986	0,259
6000-7000	48635	16	3040	190	11,9	256	3,739	0,271
7000-8000	97437	23	4236	400	17,4	244	5,211	0,261
8000-9000	121562	19	6398	480	25,3	253	7,87	0,359
9000-10000	544454	80	6806	2621	32,8	208	8,372	0,164
10000-11000	447434	50	8949	1739	34,8	257	11	0,264
11000-12000	557595	50	11152	2278	45,6	245	13,72	0,287

Tab. 2: Výsledky z měření kosmického záření v letadle. Vlastní tabulka.



Obr. 18: Závislost dávkového příkonu na nadmořské výšce. Vlastní graf.

Z obrázku lze vyčíst očekávaný růst dávkového příkonu s rostoucí nadmořskou výškou. Mezi 1000 m a 2000 m si lze povšimnout krátkého poklesu, který může být zapříčiněn vzdálením se od pozemského radiačního pozadí. Dočasné snížení růstu od výšky cca 9000 m n. m. může být způsobeno nedostatkem dat z daného intervalu a větší chybou. Graf pro průměrnou energii na snímek by vypadal stejně, je z něj totiž vypočten dávkový příkon.

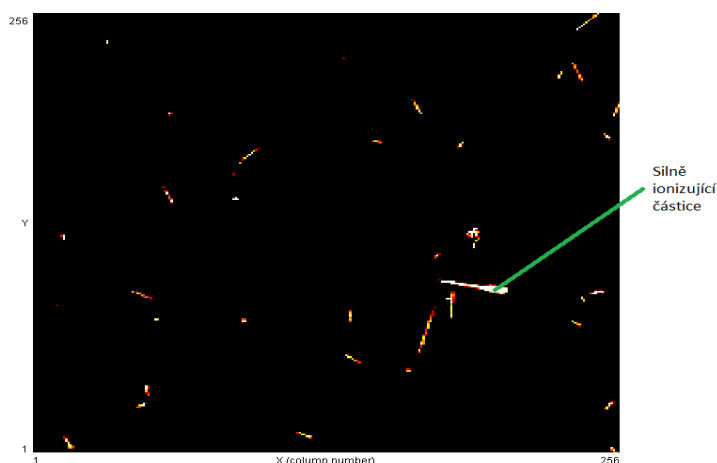
Za porovnání s hodnotami v tabulce jistě stojí dávkové příkony ve vyšších úsecích, které dosahují vyšších hodnot. Normy a průměrné roční dávky, se kterými bychom mohli porovnávat, mají sice své jednotky v mSv/rok, čili jsou oproti mGy/rok vynásobeny koeficientem relativní biologické účinnosti, který závisí na typu záření a biologických faktorech. Oboje jsou však energie na hmotnost. A pokud náš vypočtený dávkový příkon překoná onen již vynásobený příkon v mSv/rok, můžeme říct, že náš nenásobený příkon je větší. Mohli bychom také z důvodu výsledků našeho měření četností, kdy značnou část tvoří elektrony, miony a gama částice, které mají koeficient relativní biologické účinnosti roven jedné, považovat hodnotu v mGy/rok za rovnou mSv/rok. Když jej tedy porovnáme s radiačním pozadím občana ČR, které je 2,5 až 3 mSv/rok, ve kterém je již započítána část z kosmického záření, tak jej ve vyšších nadmořských výškách (11mSv/rok, 13,7 mSv/rok) převyšuje téměř pětkrát.

Co se týče limitu pro pracovníka se zářením, který činí 50 mSv/rok (obě hodnoty udává [9]), tak se tento příkon do tohoto limitu ještě vejde. Dle zákona by měly letecké společnosti dávku přijatou ve výšce větší než 8 km měřit a dle výsledků upravovat letové rozpisy posádek [20].

## 8 ANALÝZA SILNĚ IONIZUJÍCÍCH ČÁSTIC

### 8.1 Výběr samotných částic

Naším dalším cílem bylo také zjistit vlastnosti některých silně ionizujících částic, které dopadaly na čip ve vyšších nadmořských výškách. Jednalo se především o částice, u nichž se na místě dopadu a začátku jejich cesty křemíkem vyskytoval tzv. „blob“, od kterého se však ve směru cesty počet zasažených pixelů v jednotlivých úsecích dráhy snižuje až k nule. Částice pocházely ze snímků z letu nad Evropou. Další jsme poté hledali ve snímcích z letu nad Atlantikem, od nichž jsme bohužel neměli GPS data, ale předpokládaná výška je 10 km.



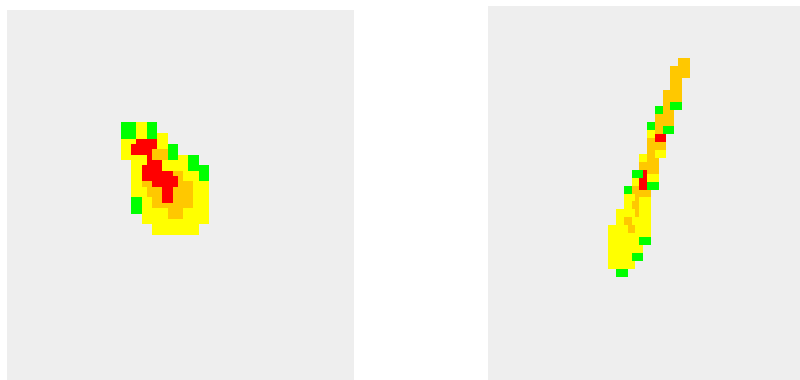
Obr. 19: Ionizující částice na snímku ze Simple preview. Vlastní obrázek.

Abychom mohli tyto částice blíže studovat, vyvinuli jsme program, který dokáže projít jednotlivé snímky a na základě námi zadaných parametrů tyto částice vyhledat a umístit je do separátních txt souborů, kde je můžeme samostatně analyzovat (viz kapitola Vlastní software). Částice jsme vybrali na základě délky, zvýšeného počtu pixelů obklopených ze všech stran a minimální celkové energie.

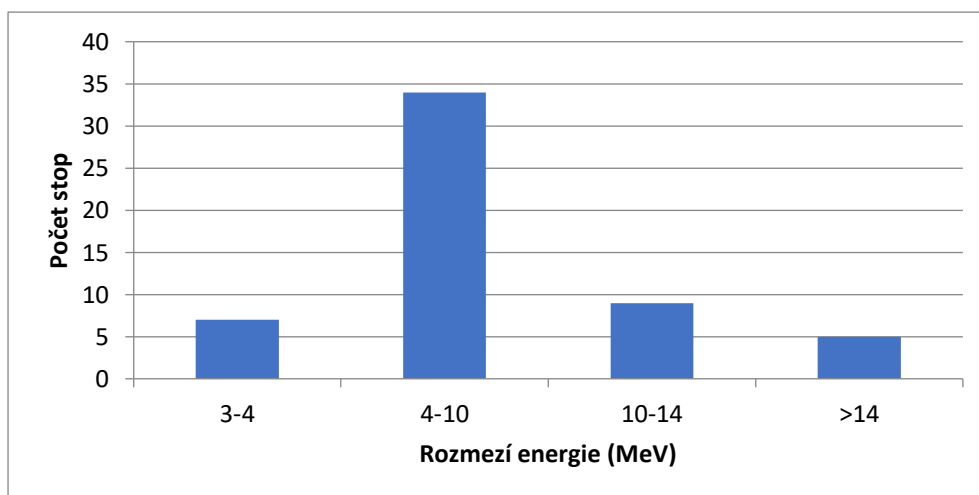
Z takto vyhledaných částic jsme vybrali ty, u kterých jsme si byli jistí, že nevznikly spojením dvou stop různých částic, a že jejich stopy byly úplné, tedy nevznikly dopadem na samotný okraj čipu. Naším programem jsme si stopy částic nechali také zobrazit. Z důvodu, že Simple preview celou stopu kvůli vysokým energiím vybarvilo bíle, jsme v našem programu zvolili jiné barevné rozvržení, které je vidět v následující tabulce, a ve kterém jsou vidět vysokoenergetické pixely.

Barva	Interval energie v jednom pixelu (bez koncové hodnoty v keV)
Zelená	0-10
Žlutá	10-50
Oranžová	50-150
Červená	150+

Tab. 3: Barevné škály energií. Vlastní tabulka.



Obr. 20: Stopy silně ionizujících částic vyobrazené naším programem. Vlastní obrázek

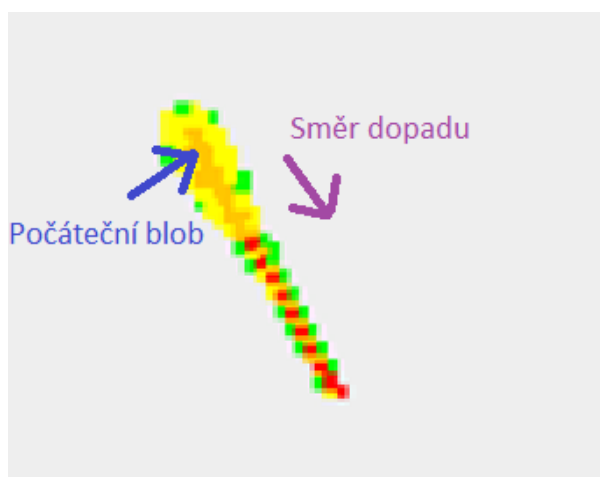


Obr. 21: Energetické rozdělení všech stop, jež jsme analyzovali. Vlastní graf.

## 8.2 Dopad částic na čip

Pro většinu námi vybraných částic je charakteristické, že při dopadu na čip se jejich počáteční energie rozdělí po menších sumách do několika pixelů, které utvoří „blob“, přičemž energie pixelů zasažených prvotním dopadem se od místa dopadu snižuje. Dále částice na své cestě křemíkem pokračuje jedním přímým směrem. Nelze bohužel určit přesnou velikost dráhy částice, neboť neznáme úhel pod kterým dopadla na čip.

Na následujícím obrázku je rozebrána jedna ze zachycených stop. Na konci „blobu“ ve směru částice si lze povšimnout zvýšení energie pixelů, které může být způsobeno sečtením energie z prvotního dopadu a odevzdané energie během počáteční cesty.



Obr. 22: Popis stopy zachycené částice. Vlastní obrázek.

Ke konci cesty částice vidíme spoustu červeně zbarvených pixelů, které značí velké energetické ztráty, a které by mohly být charakteristické pro jev tzv. Braggova peaku, jímž se zabýváme v následující kapitole.



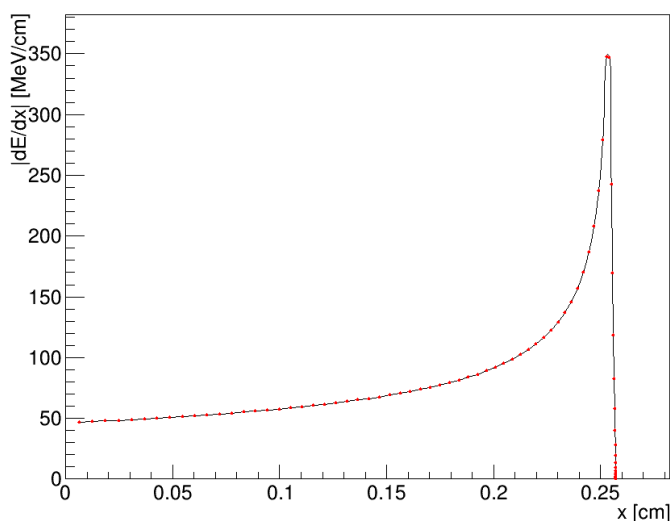
### 8.3 Analýza postupné ztráty energie

Abychom byli schopni určit další vlastnosti těchto silně ionizujících částic, například jak postupně během své cesty křemíkovým čipem Timepix ztrácí energii, bylo nutné vytvořit program, který z textového souboru obsahujícího jednu částici určí směr její cesty, rozdělí ji pomocí postupného posunování přímkou kolmé na její směr na intervaly dráhy a pak pro každý interval sečte energie všech pixelů. Vytvoří tak tedy její  $\Delta E/\Delta x$  závislost pro jednotlivé intervaly dráhy čili vyjádří, kolik energie částice ztratila v daném intervalu dráhy.

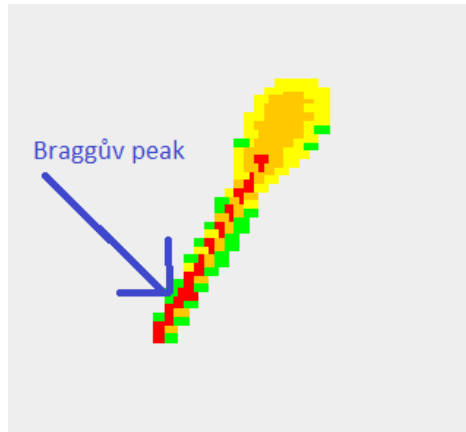
Tento typ analýzy má však u tohoto typu částic jednu nevýhodu. I počáteční „blob“ může být takto nežádoucně rozdělen na jednotlivé intervaly, přičemž pro úplnou korektnost by celková energie „blobu“ měla být přiřazena prvnímu intervalu dráhy. Problém je však v tom, že nelze zcela efektivně rozlišit „blob“ od následné cesty. Tento jev může tedy zneprávesnit data, naštěstí však jen počátečních intervalů. Tento program hojně využívající metody analytické geometrie je podrobně popsán v kapitole Vlastní software.

$\Delta E/\Delta x$  závisí jak na vlastnostech látky (ionizační potenciál, atomové číslo aj.), kterou částice prochází, tak na vlastnostech částice. Některé z částic ztrácí většinu své energie až ke konci své cesty, což způsobí velké výchylky odevzdané energie a následné zastavení částice. A proto lze na konci dráhy jednotlivých částic spatřit vysoký peak odevzdané energie, jež se nazývá Braggův. Některé částice jej vykazovaly, jiné vykazovaly několik peaků, a některé zase neměli zřetelné peaky, ale bylo vidět znatelné zvýšení  $\Delta E/\Delta x$  ke konci dráhy. U velkého počtu byla zjištěna rovnoměrná ztráta energie. Zkusili jsme analyzovat i jiné částice, u kterých jsme nakonec zjistili rozdílné chování.

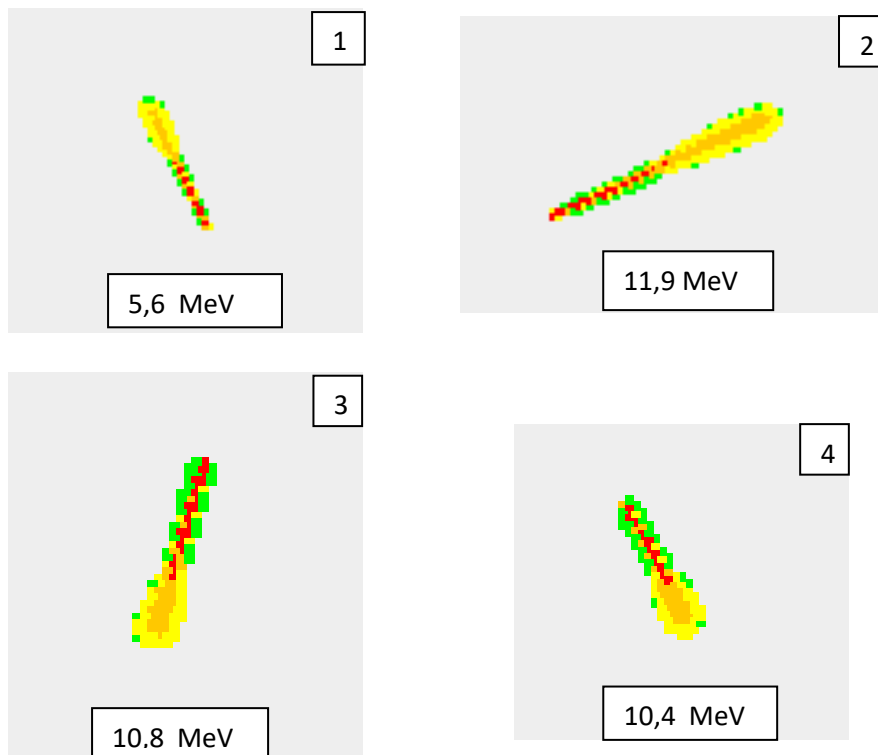
Nechali jsme tedy analyzovat textové soubory vybraných částic naším programem, jednotlivé hodnoty pro každou stopu jsme kvůli porovnávání s teoretickými výsledky převedli u  $\Delta E/\Delta x$  na MeV/cm a intervaly dráhy na cm a vynesli do následujících obrázků (obr 26, 27, 29, 31, 33, 34, 36). Grafy na těchto obrázcích tedy říkají, jakou energii zachycená částice v daném intervalu dráhy odevzdala. Zde je vidět pro srovnání teoretický průběh odevzdávání energie u protonu v křemíku (obr. 23) a poté následují naše obrázky, ke kterým jsou vždy přiřazeny částice, jež jsou v daném obrázku vykresleny. Z obrázků částic nelze přesně vyčíst jejich velikost či délku, některé obrázky bylo třeba trochu roztáhnout, aby bylo barevné rozložení energií vidět.



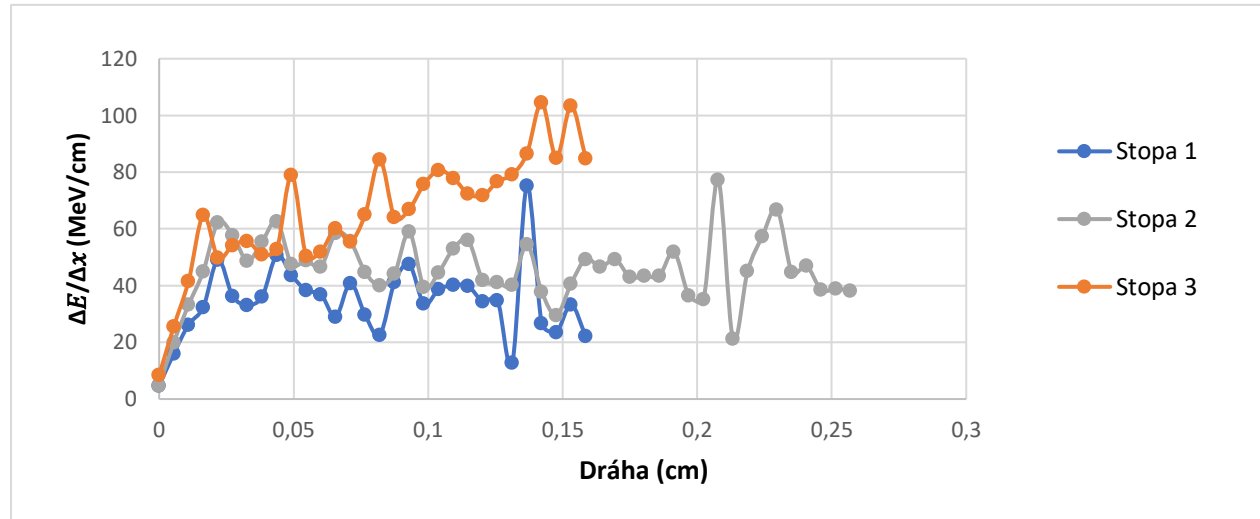
Obr. 23: Teoretický graf energetických ztrát při cestě protonu křemíkem, ke konci lze spatřit Braggův peak. KVITA, Jiří. Detektory ionizujícího záření a ve fyzice částic (SLO/DIZFC) [online]. [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: [http://jointlab.upol.cz/kvita/Poznamky\\_DIZFC.pdf](http://jointlab.upol.cz/kvita/Poznamky_DIZFC.pdf)



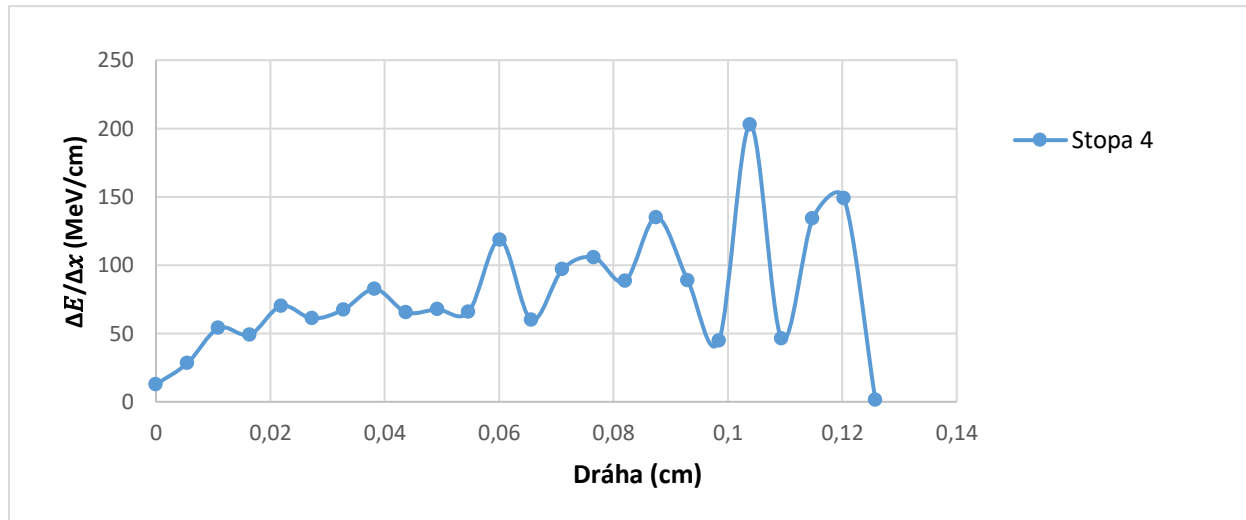
Obr. 24: Možné zvýšení  $\Delta E/\Delta x$  či Braggův peak ve stopě částice.  
Vlastní obrázek.



Obr. 25: Čtyři stopy z obr. 26 a 27 s jejich celkovými zachycenými energiemi.  
Vlastní obrázek

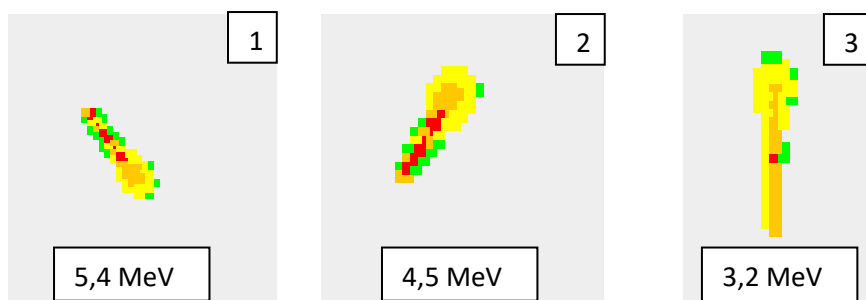


Obr. 26: Odevzdaná energie v jednotlivých úsecích pro 3 ze 4 stop vykazujících mírné zvýšení  $\Delta E/\Delta x$  na konci dráhy. Na konci možno spatřit peak podobný Braggovu, u něhož je však sporné, zda nejde o statistickou fluktuaci. Vlastní graf.

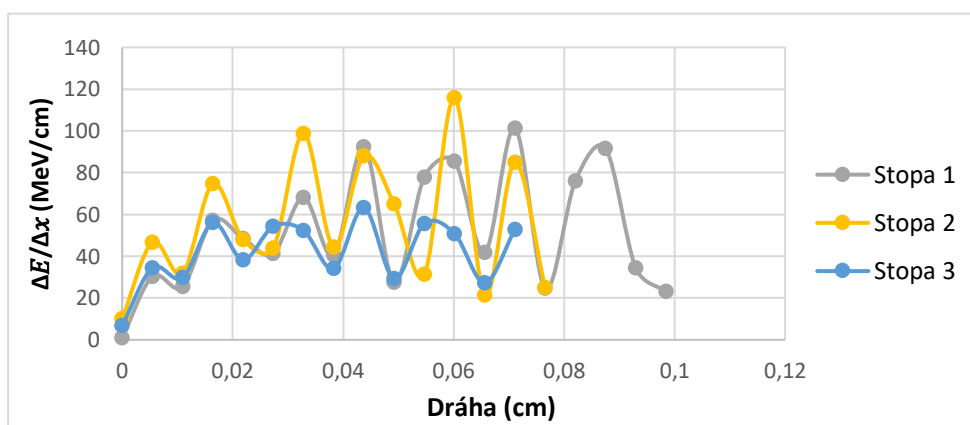


Obr. 27: Odevzdaná energie v jednotlivých úsecích pro 1 ze 4 stop vykazujících mírné zvýšení  $\Delta E/\Delta x$  na konci dráhy. Vlastní graf.

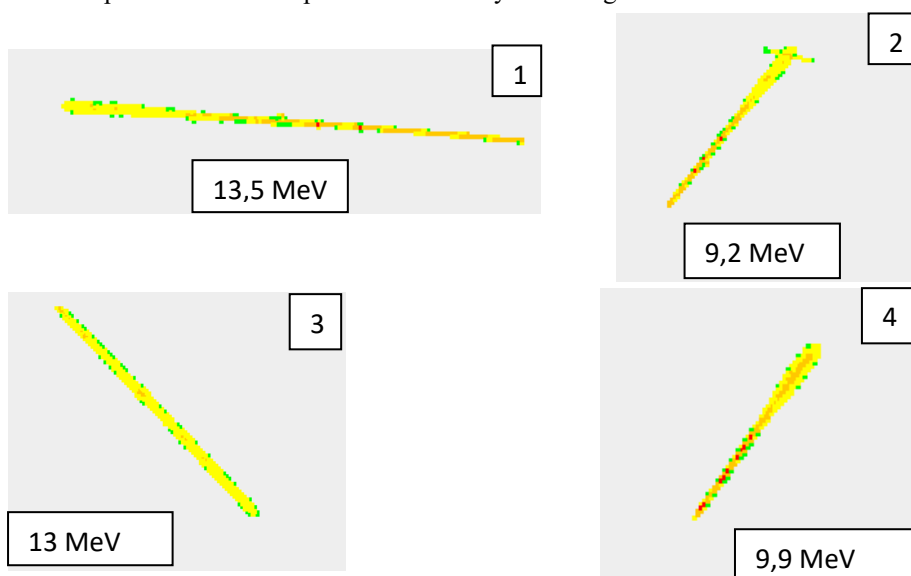
Dále jsme určili energetické chování několika dalších stop, které nevykazovaly tak viditelné peaky (popřípadě stejně velké peaky) a průběh jejich  $\Delta E/\Delta x$  byl celkem rovnoměrný, jak je vidět v následujících obrázcích (obr. 29 a 31). Stopy jsme v tomto případě rozdělili do 2 grafů podle délky.



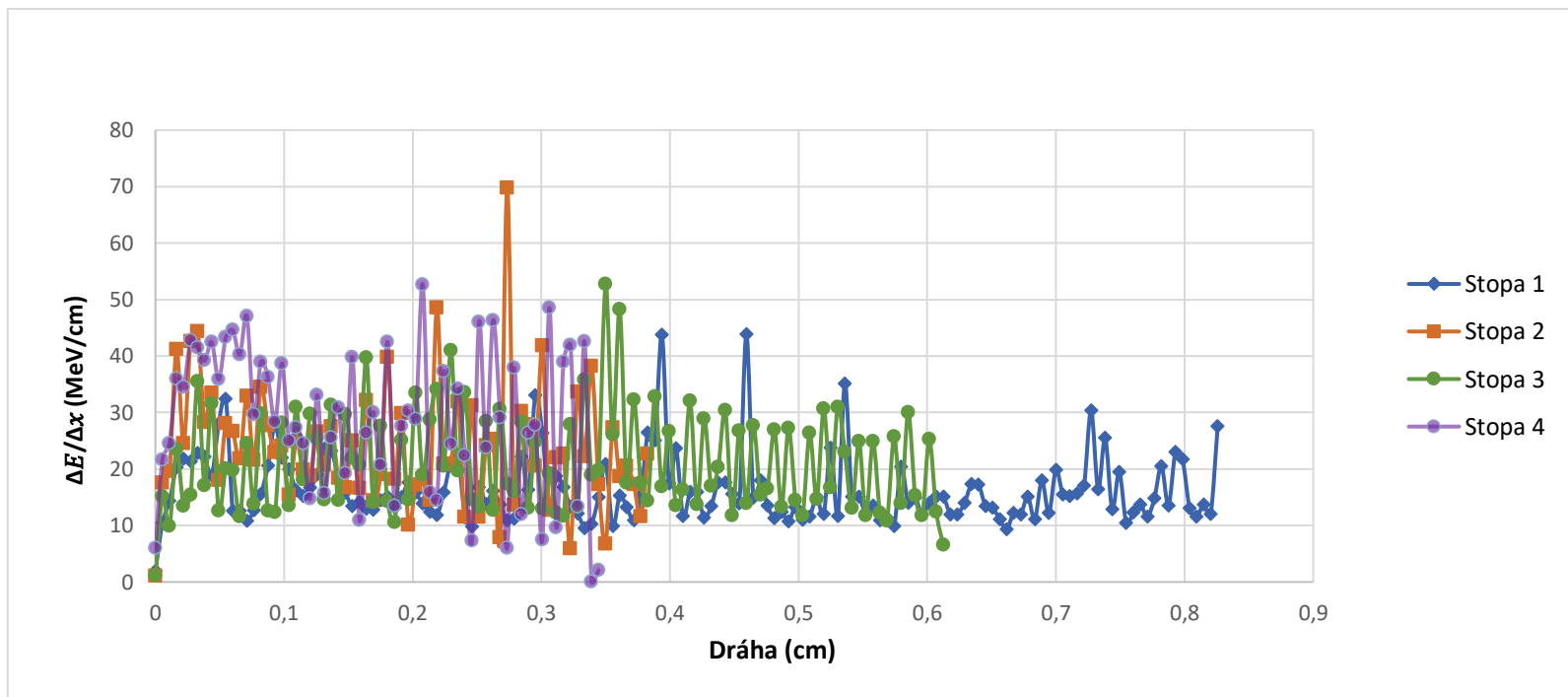
Obr. 28: Tři vybrané stopy z obrázku 29 se zachycenými energiemi. Vlastní obrázek.



Obr. 29: Odevzdaná energie v jednotlivých úsecích pro 3 vybrané kratší stopy, u nichž lze pozorovat několik peaků během cesty. Vlastní graf.

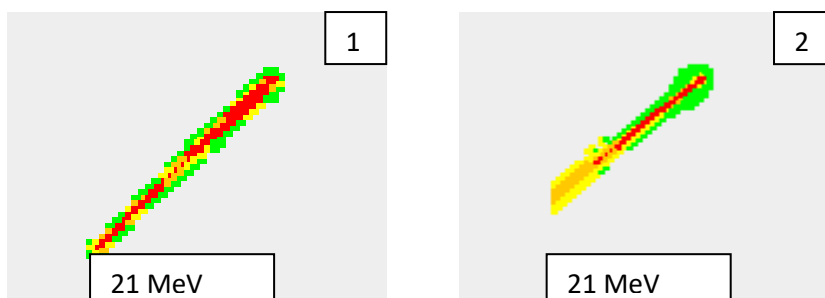


Obr. 30: Čtyři stopy s rovnoměrným průběhem z obr. 31. Vlastní obrázek.

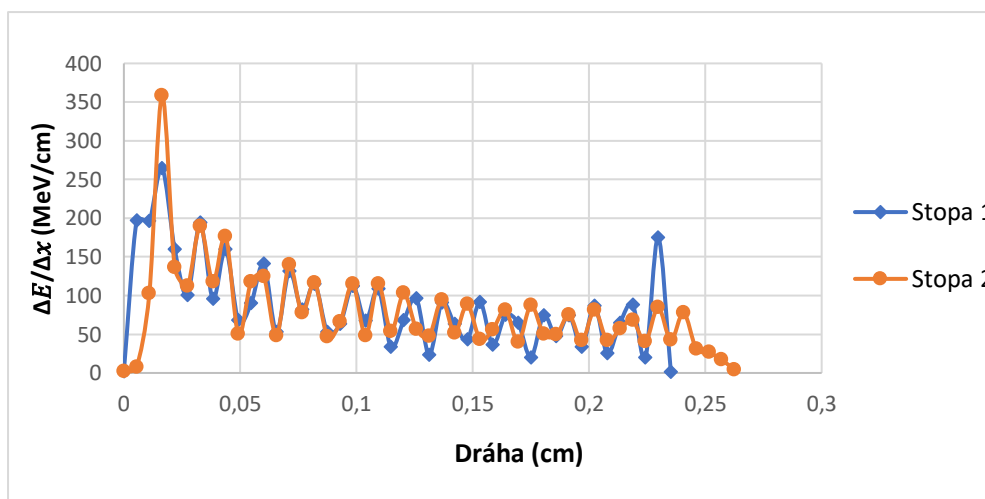


Obr. 31: Průběh rovnoměrného odevzdávání energie u vybraných stop. Peak uprostřed může být způsoben sečtením energie blobu s odevzdanou energií následující cesty nebo fluktuací energetických ztrát. Vlastní graf.

Dále jsme našli i vysokoenergetické částice, které vykazovaly klesající průběh kromě peaku na počátku či na konci, neboť u těchto stop není možné přesně určit směr dopadu (v grafu na obr. 33 je směr brán z pravého horního rohu do levého dolního).

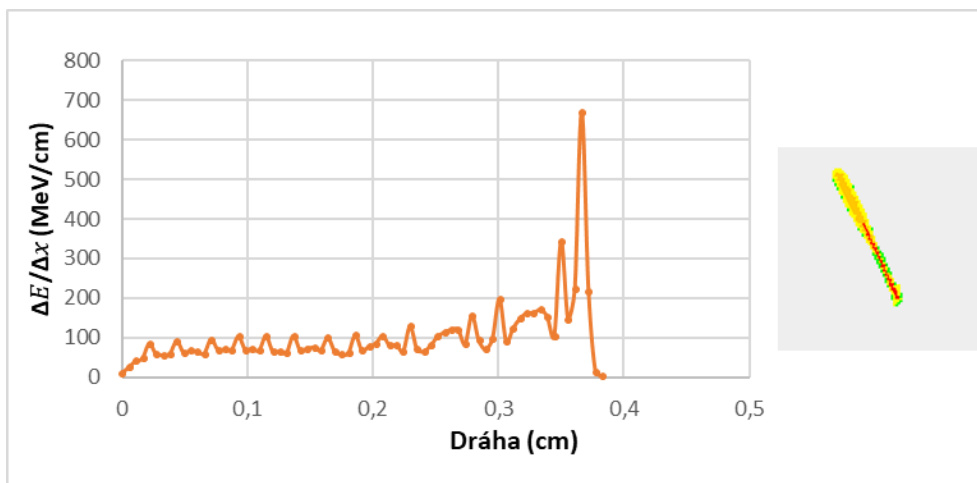


Obr. 32: Dvě vysokoenergetické stopy z obr. 33. Vlastní obrázek.



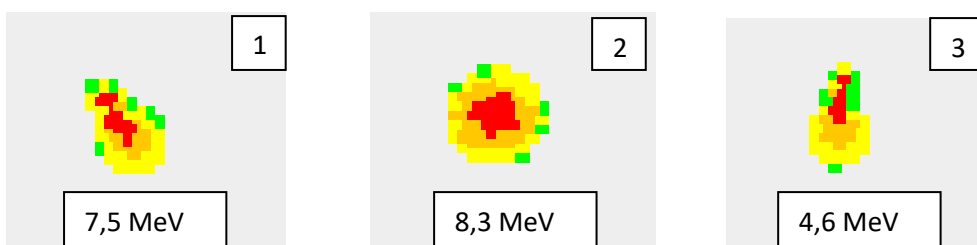
Obr. 33: Dvě vysokoenergetické stopy s klesajícím průběhem a peakem. Vlastní graf.

Narazili jsme i na částici, jejíž zachycená energie dosahovala téměř 40 MeV a u níž byl velice zřetelný Braggův peak (viz obr. 34). Energie této částice byla asi desetkrát větší, než mívají alfa zářiče v přírodě či než námi, u čipu kamery naměřené, alfa částice (při použití americia-241 jako zdroje).

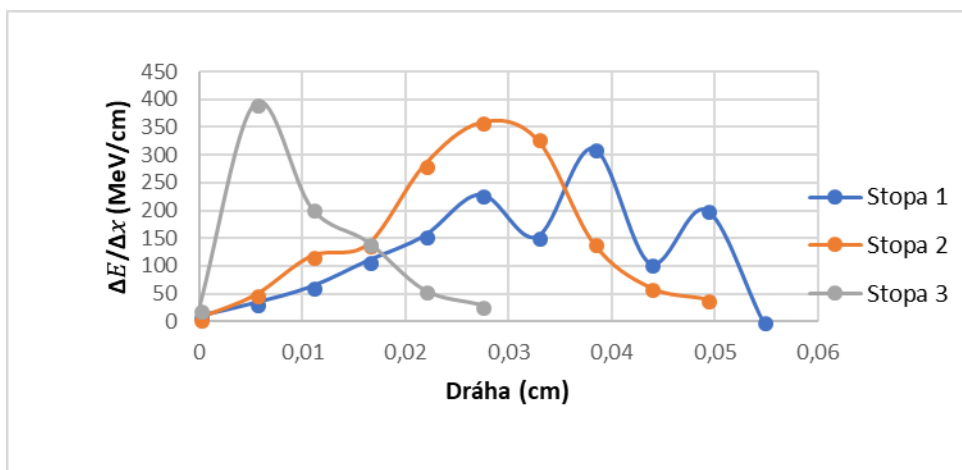


Obr. 34: Stopa s energií 40 MeV vykazující Braggův peak. Vlastní graf.

Dále jsme pro zajímavost nechali vykreslit i několik dalších částic, které se chovaly zvláště, měly většinou trochu jiný tvar a vykazovaly své vlastní peaky, jak je vidět v obr. 36.



Obr. 35: Tři stopy částic, které se chovaly jinak než předchozí. Vlastní obrázek.



Obr. 36: Průběh 3 částic jiného typu. Vlastní graf.



U stopy 2 se s největší pravděpodobností jedná o alfu či o částici, která prošla kolmo čipem, takže je velice dobře vidět peak uprostřed jejího blobu. U stopy číslo 3 se může díky špatně odlišitelnému počátečnímu blobu jednat o chybu algoritmu, který aproximoval její směr opačně. Kdyby tomu tak bylo, mohli bychom u třetí stopy zrcadlově otočit její  $\Delta E/\Delta x$  průběh a potenciálně nalézt Braggův peak.

Částic, jež jsme vybrali pro tuto analýzu, jsme měli celou řadu, avšak nebylo možné a bylo by nepřehledné je zde všechny do grafů vynášet. Vybrané částice měly i různé škály energií, jak nebylo na snímcích ze Simple preview vůbec patrné. Většina částic se svými celkovými energiemi vešla pod 10 MeV, narazili jsme ale i pár částic s energiemi mnohem vyššími.

Z našich dat vyplývá, že některé z námi vybraných částic odevzdávají většinu své energie až na konci dráhy. Dále je tu spousta částic, co takto činí téměř rovnoměrně či s pravidelnými výchyly. Rovnoměrný průběh je charakteristický pro delší stopy, u nichž bylo vidět i celkové žluté zbarvení s malým zastoupením červených a oranžových pixelů, jež značilo rovnoměrné rozložení energie do jednotlivých pixelů.

Některé kratší částice vykazovali rovnoměrný průběh přesto, že se na konci jejich drah vyskytovaly vysokoenergetické červené pixely, což tedy značí koncentraci odevzdávané energie do menšího počtu pixelů než na počátku dráhy.

## 8.4 Pokus o určení typu částice dle charakteristických $\Delta E/\Delta x$

Pomocí našich  $\Delta E/\Delta x$  dat jsme se chtěli dostat k určení typu několika málo částic, které vykazovaly Braggův peak. K tomu jsme se pokusili užít Bethe-Blochovy formule, jež udává hodnotu  $\Delta E/\Delta x$  v závislosti na bezrozměrné rychlosti <sup>7</sup>  $\beta$  a Lorenzově faktoru<sup>8</sup>  $\gamma$  a dalších parametrech. Jedno z jejich znění je [13]:

$$-\frac{\Delta E}{\Delta x} = \frac{Kz^2Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} - \beta^2 \right) \rho$$

Kde

$\frac{\Delta E}{\Delta x}$  – odevzdaná energie v daném intervalu

$K$  – konstanta ( $0,307 \text{ MeV} \times \text{cm}^2$ )

$A$  – atomová hmotnost látky, jež částici absorbovala

$z$  – násobek náboje elektronu částice (pro proton – 1, u alfa – 2)

$Z$  – atomové číslo látky, jež částici absorbovala (křemík – 14)

$I$  – ionizační potenciál (pro nás křemík –  $1,54 \times 10^4 \text{ MeV}^{-1}$ )

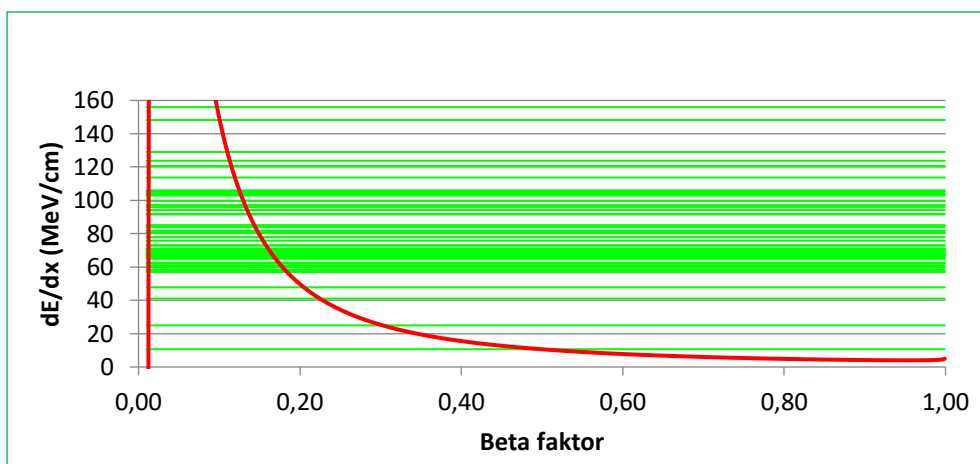
$\rho$  – hustota (křemík -  $2,329 \text{ g} \times \text{cm}^{-2}$ )

Tuto rovnici jsme se pokusili narýsovat jako funkci  $\beta$  od 0,01 do 0,99, pro proton ( $z = 1$ ). Pak jsme vybrali pár stop, které měly viditelný Braggův peak a jejich  $\Delta E/\Delta x$  jsme vynesli jako kolmice na osu  $y$  do samostatných grafů. Červeně je znázorněna Bethe–Blochova formule, zeleně pak vynesené  $\Delta E/\Delta x$ . Průsečíky s B-B formulí by mohly být bezrozměrné rychlosti pro dané  $\Delta E/\Delta x$ .

---

<sup>7</sup> Bezrozměrná rychlost značí poměr rychlosti ku rychlosti světla. Tedy  $\beta = \frac{v}{c}$ .

<sup>8</sup> Lorenzův faktor lze vyjádřit jako  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$



Obr. 37:  $\Delta E/\Delta x$  jedné částice a funkce B-B formule pro částici s 40 MeV. Vlastní graf.

Tímto způsobem jsme zkusili několik bezrozměrných rychlostí aproximovat. Poté jsme data porovnali s očekávanými počátečními bezrozměrnými rychlostmi pro dané částice s vizí, že tato shoda by nás vedla k typu částice, které jsme spočítali z následujícího vzorce za předpokladu, že se částice v čipu zastavila, a že čip zachytil všechnu její energii, která byla před dopadem kinetickou:

$$\gamma = \frac{E_k}{mc^2} + 1$$

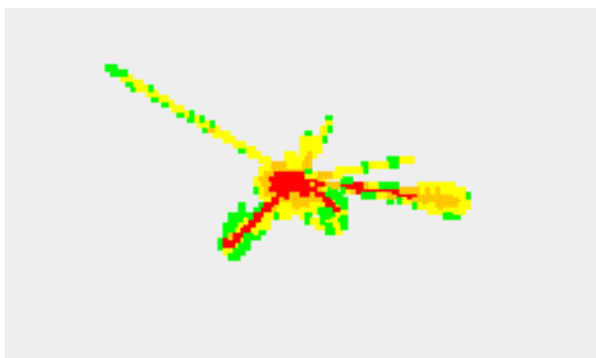
Za  $m$  jsme dosadili hmotnost protonu a za  $E_k$  zachycenou energii stopy. Bezrozměrná rychlost  $\beta$  je pak:

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}}$$

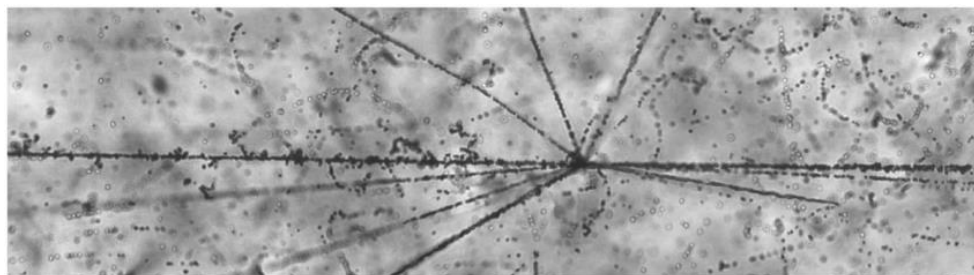
Problém byl však v tom, že nám pro protony vycházely  $\beta$  faktory u většiny částic jinde, než kde bychom je dle grafu našli (podle rovnice pro částici o 40 MeV – 0,28; v grafu bychom největší hustotu průsečíků viděli spíše u 0,18; zkoušeli jsme i částice s nižšími energiemi, avšak bez valného úspěchu). Je to způsobeno tím, že B-B formule udává průměrné ztráty, kdežto ke správnému porovnání by bylo nutné nalézt správnou formuli, jež by udávala ztráty nejpravděpodobnější. Zkusili jsme toto provést i pro deutron a alfu, avšak výsledky nebyly o nic moc uspokojivější.

## 8.5 Jedna jaderná interakce

Během výběru částic se nám podařilo zachytit i jednu jadernou interakci tvaru hvězdy v čipu samotné kamery. Je pravděpodobně tvořena stopami částic, které tento jev způsobily a stopami částic, které tímto nově vznikly. Zde je vidět jaderná interakce zobrazená našim algoritmem a poté pro srovnání jaderná interakce měřená ve fotografické emulzi. Celková energie jevu na obrázku 38 přesáhla hodnotu 77 MeV.

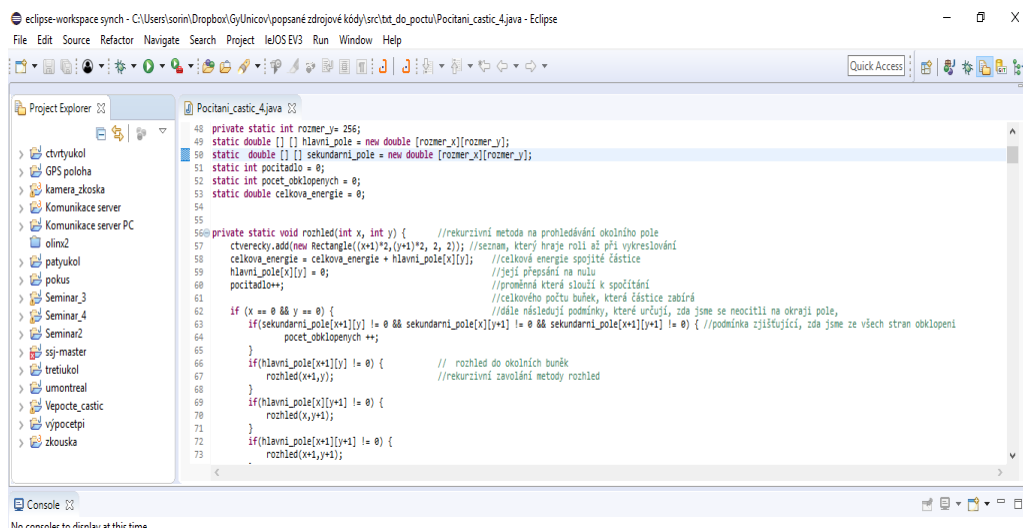


Obr. 38: Jaderná interakce vyobrazená našim algoritmem. Vlastní obrázek.



Obr. 39: Jaderná interakce ve fotografické emulzi. LA TESSA, Chiara a Cary ZEITLIN. The Role of Nuclear Fragmentation in Particle Therapy and Space Radiation Protection [online]. Březen 2016 [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/A-nuclear-interaction-star-seen-in-photographic-emulsion-The-28-Si-beam-ion-is\\_fig1\\_299495390](https://www.researchgate.net/figure/A-nuclear-interaction-star-seen-in-photographic-emulsion-The-28-Si-beam-ion-is_fig1_299495390)

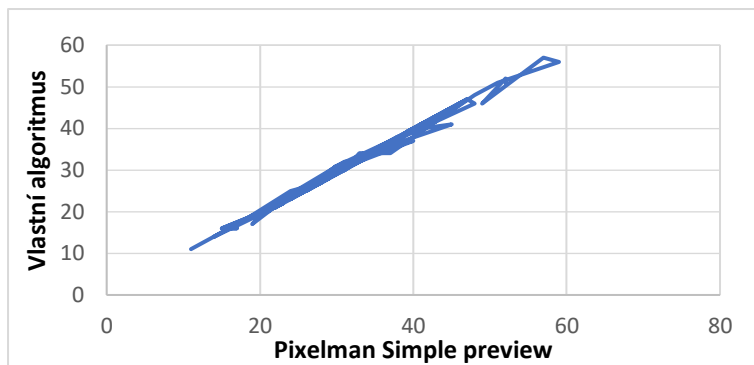




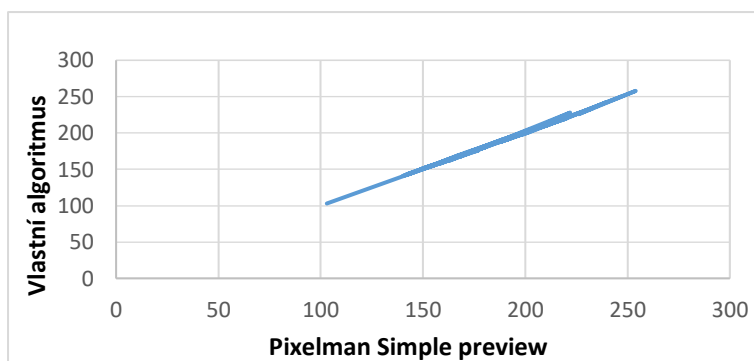
Obr. 41: Vývojové prostředí Eclipse Oxygen 2.0. Vlastní obrázek.

## 9.2 Program na identifikaci a analýzu spektra a četnosti částic snímku

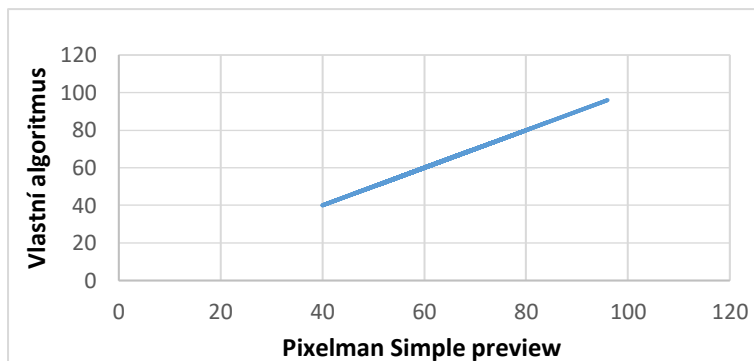
Tento program dokáže v načteném txt souboru nalézt jednotlivé částice a určit, zda se jedná o alfa, beta, gama či jinou částici, spočítat energii každé částice. Tuto analýzu však provádí již prostředí Simple Preview při přijímání dat z kamery. Za výhodu lze však považovat, že si můžeme sami určovat kritéria, podle kterých budeme částice rozlišovat. Kvůli potřebě analyzovat data tak, aby přibližně odpovídala výpisům spekter částic ze Simple Preview, jsme se pokusili určit kritéria pro rozpoznání jednotlivých částic a výpisy obou algoritmů posléze porovnat. Rozdíly lze pozorovat na následujících obrázcích s grafy typu „scatter plot“, kde jsou naneseny počty jednotlivých typů částic v jednotlivých snímcích, které jsme pro srovnání vybrali, na y-ové z našeho algoritmu a na x-ové algoritmu Simple preview.



Obr. 42: Scatter plot pro alfa částice. Vlastní graf.



Obr. 43: Scatter plot pro beta částice. Vlastní graf.

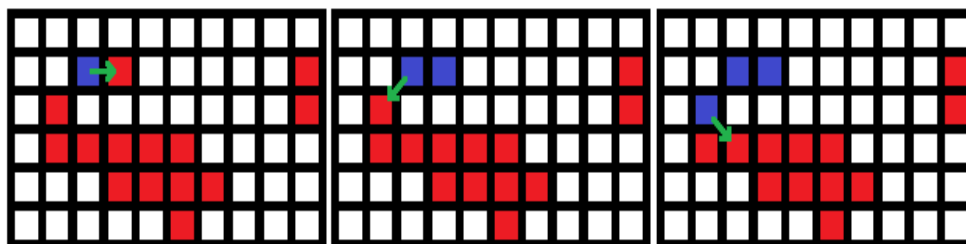


Obr. 44: Scatter plot pro gama částice. Vlastní graf.

Celkové počty částic u obou algoritmů jsou shodné. To samé platí i pro částice gama. Počty částic alfa a beta se zanedbatelně liší. Užití samotného programu je tedy k analýze txt souborů, u kterých nemáme výpis spektra jednotlivých typů částic. Program posloužil našim kolegům, když bylo třeba zachránit jimi naměřená data z jeskyní, ze kterých nebylo možné normálním způsobem vyčíst spektra a četnosti částic. Tento program ale dále používáme jako součást dalších programů.

Program prohledává pole s energiemi buňku po buňce, dokud nenarazí na buňku s nenulovou energií. Poté zavolá metodu rozhled (int x, int y), přičemž jako argumenty uvede souřadnice buňky, na kterou narazil. Tato metoda nejprve zapíše energii do proměnné, která je k tomu předem určena, poté hodnotu buňky přepíše na 0. Následně začne nahlížet do okolních buněk. Pokud nalezne buňku s nenulovou hodnotou, metoda rekurzivně<sup>9</sup> zavolá samu sebe a jako argumenty uvede souřadnice této buňky.

Jakmile metoda nahlédne do všech okolních buněk (i do těch, které jsou od zvolené buňky uloženy diagonálně), dojde k jejímu ukončení a program se vrátí na místo, odkud byla volána, což je tedy buďto z její předchozí instance, v tom případě metoda pokračuje v rozhlížení, nebo z hlavního prohledávacího cyklu, kde program podle parametrů z proměnných, do kterých metoda zapisovala, určí, o jakou částici se jednalo, jakou měla energii a poté pokračuje v prohledávání pole. Nakonec vypíše celková spektra. Daný txt potom i vykreslí za pomoci javovských knihoven jako snímek. Jednotlivé intervaly energií barevně odliší. Každý typ částice má vlastnosti, podle kterých jej lze snadno rozlišit. Kupříkladu částice alfa lze snadno poznat podle většího počtu pixelů, které jsou ze všech stran obklopeny jinými zasaženými pixely. Částice gama jsou většinou 1 nebo 2 osamělé pixely.



Obr. 45: Ilustrace principu fungování algoritmu. V prvním kroku se program rozhodne zavolat rekurzivní metodu rozhled na sousední buňku. V druhém kroku se instance metody rozhled z kroku 1 ukončí, protože kolem sebe má již jen prázdné buňky a navrátí se tedy do předchozí buňky, která s další zaplněnou buňkou sousedí. Zavolá rekurzivní metodu na buňku sousedící diagonálně. V kroku 3 program pokračuje v analýze, sousední buňky prohledává ve směru hodinových ručiček. Vlastní obrázek.

<sup>9</sup> Rekurze – Zavolání metody z těla stejné metody.



### 9.3 Program na párování snímků s GPS daty nadmořské výšky

Tento program jsme vytvořili, když jsme potřebovali spojit data o nadmořské výšce z GPS logu a snímky, které byly v dané výšce pořízeny. Program umí z GPS logu vyčíst nadmořskou výšku společně s časem, ve kterém byla získána. Ke každému txt souboru snímku vždy existuje jeden soubor se stejným jménem, ale s příponou dsc, který obsahuje informace o tom, jaké bylo při daném sbírání snímků nastavení kamery, a co pro tento program bylo hlavní, jaký byl při pořízení čas. Tento čas poté nalezneme v GPS logu a ke snímku přiřadí nadmořskou výšku, ve které byl pořízen. Takto jsme schopni získat kupříkladu závislost energie ve snímcích zaznamenaných kamerou na nadmořské výšce.

Program po spuštění načte uživatelem vybraný GPS log, který obsahuje data v jednotlivých řádcích, které mají na začátku napsaný svůj formát. Program načítá řádky formátu GGA (v logu zapsané jako GPGGA), což je v našem GPS logu každý druhý řádek. Tyto řádky obsahují jak data o čase, tak i o nadmořské výšce. Řádky v GPS logu vypadají takto:

```
$GPGGA,173228.000,4613.7575,N,00606.2388,E,1,05,2.2,427.0,M,,0000*07
$GPRMC,173228.000,A,4613.7575,N,00606.2388,E,,051217,,A*62
$GPGGA,173230.000,4613.7575,N,00606.2388,E,1,05,2.2,427.0,M,,0000*0E
$GPRMC,173230.000,A,4613.7575,N,00606.2388,E,,051217,,A*6B
$GPGGA,173231.000,4613.7575,N,00606.2388,E,1,05,2.2,427.0,M,,0000*0F
$GPRMC,173231.000,A,4613.7575,N,00606.2388,E,,051217,,A*6A
```

Plně podtržená data značí čas ve formátu HH MM SS, zatímco přerušovaně podtržená nadmořskou výšku v metrech nad mořem (vše uvádí [4]). Další data o souřadnicích a data ve formátu GPRMC, který GPS log taktéž obsahuje, nebere náš program v potaz. Samotný řádek je nejdříve načten jako textový řetězec a všechna potřebná data jsou z něj postupně vytažena. Čas je pro lepší ukládání do proměnných převeden na sekundy.

Program vytvoří mapu<sup>10</sup> čas – výška. Uživatel poté taktéž vybere txt soubory snímků, ke kterým chce navázat nadmořskou výšku. Ty jsou analyzovány stejně jako u předchozího programu na analýzu spekter, pomocí něhož je snímku přidělena energie a četnosti jednotlivých částic. Je nezbytné, aby ke každému txt souboru ve stejné složce existoval také dsc soubor, ze kterého program načte čas, převede jej na sekundy a vytvoří mapu čas – snímek. Poté se pokusí o nalezení časů, které si přibližně odpovídají a vytvoří mapu snímek – výška, z níž jsou poté informace vypsány do textového souboru.

## **9.4 Program na oddělování částic do samostatných souborů**

Program je schopen na základě parametrů, které zadá uživatel, z vybraných txt souborů snímků oddělit jednotlivé částice splňující zadané parametry a pro každou vytvořit samostatný txt soubor ve stejném formátu jako txt soubor snímku. Buňky náležející této částici jsou se zachováním tvaru částice přesunuty co nejbližší ke středu. Tyto soubory mohou být nadále využity pro analýzu jednotlivých částic. Program k nalezení částic využívá stejných metod jako předchozí programy.

## **9.5 Program na analýzu odevzdané energie částice v závislosti na její dráze**

Tento program poté, co převede txt soubor, který obsahuje jen 1 částici (nejlépe vygenerovaný předchozím programem), do dvourozměrného pole, změří dráhu této částice a pak přiřadí jednotlivé buňky obsahující energie do intervalu dráhy. Vše nakonec vypíše do souboru. S těmito daty jsme poté pracovali, když jsme potřebovali zjistit  $\Delta E/\Delta x$  charakteristiku vybraných částic.

---

<sup>10</sup> Speciální třída jazyka Java, patřící mezi tzv. kolekce. V programu užíváme její implementaci TreeMap. Jednoduše by ji šlo popsat jako 2 lineární pole, přičemž jedno obsahuje klíče a druhé proměnné navázané k těmto klíčům. Pomocí klíče lze pak získat odkaz na navázanou proměnnou.

K tomu, aby bylo vůbec možné zjistit, jakou dráhu částice během pohybu na čipu urazila, je nejprve třeba určit, jakým směrem se pohybovala čili směrový vektor pohybu částice.

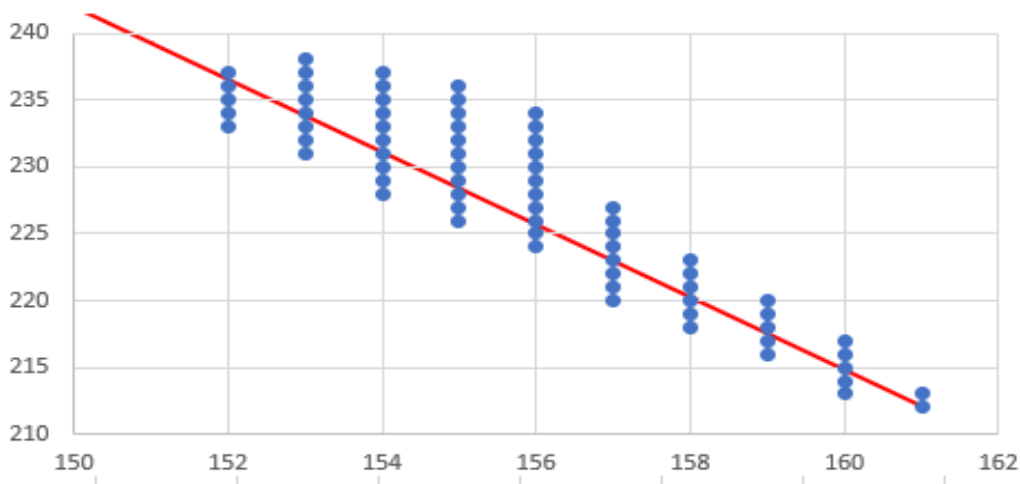
K jeho získání jsme se snažili ze souřadnic buněk náležejících této částici aproximovat přímkou za pomoci matematické metody nejmenších čtverců. Tato metoda bohužel překračuje naše znalosti analytické geometrie, a proto jsme se rozhodli k tomu užít vhodné knihovny jazyka Java (knihovna SSJ získaná z [14]). Konkrétně metodu třídy LeastSquares – `calcCoefficients(double [ ] x, double [ ] y)`, která bere jako argumenty dvě lineární pole, jedno x-ových a druhé y-ových souřadnic bodů a vrací hodnoty parametrů  $a$ ,  $b$  z následující rovnice přímky:

$$p: y = a + bx$$

Jakmile program získá parametry popisující přímkou, dokáže z nich vyčíst informace, které jsou pro pokračování této analýzy nezbytné. Pokud rovnici převedeme do obecného tvaru:

$$p: y - bx - a = 0$$

dokážeme z ní vyčíst normálový vektor této přímky (dále již přímka  $p$ ), což je  $\vec{n}(-b, 1)$ , nebo jeho převrácená varianta  $\vec{n}(b, -1)$ , a k němu kolmý, tedy směrový této přímky  $\vec{s}(1, b)$  nebo  $\vec{s}(-1, -b)$ . Oba tyto vektory jsou velice důležité, protože s nimi nebo s jejich násobky tento program dále pracuje.

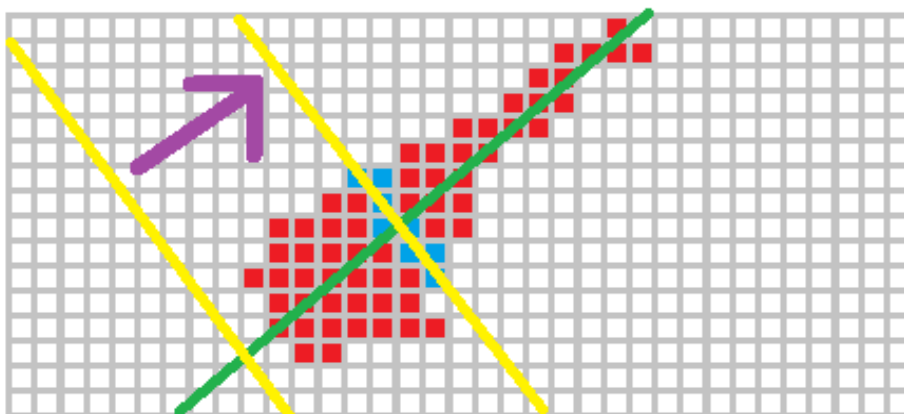


Obr. 46: Ukázka aproximace přímky pomocí metody nejmenších čtverců. Modře jsou znázorněny souřadnice všech buněk, které analyzovaná částice obsahovala, červeně aproximovaná přímka. Vlastní graf.

Princip analýzy tkví v tom, že si program vytvoří přímku kolmou (dále již jen přímka  $k$ ) na přímku  $p$ , kterou jsme získali aproximací, a postupně bude tuto přímku  $k$  posouvat pomocí malého násobku vektoru  $\vec{s}$  po dvourozměrném poli částice.

Pokud vzdálenost<sup>11</sup> buňky od přímky  $k$  bude menší než velikost vektoru, kterým posunujeme, bude energie této buňky zapsána do mapy délka – energie. Délka je velikost úseku na přímce  $p$  od vůbec první takto zachycené buňky do buňky, která byla právě zachycena. Pokud mají 2 buňky v jednom posunutí menší vzdálenost než velikost posunovacího vektoru, je do mapy umístěn součet jejich energií. Program vždy dle hodnot koeficientu  $b$  a parametru  $a$  volí vhodný počáteční a koncový bod analýzy, což je v některých případech například průsečík přímky  $p$  a osy  $x$  nebo  $y$ . Program se na konci také pokusí rozeznat směr, kterým ve směru přímky  $p$  částice dopadala.

Rozdělí částici na 2 poloviny pomocí osy kolmé na přímku  $p$  podle její celkové délky, spočítá body v obou částech, a poté za předpokladu, že analyzovaná částice ze začátku dráhy zasahuje více pixelů, rozhodne, jestli byl předchozí směr podle analýzy přímky  $k$  veden správným směrem. Pokud ne, hodnoty délek v mapě délka – energie budou převráceny.



Obr. 47: Ilustrace analýzy kolmou přímkou. Zeleně je znázorněna přímka aproximovaná, žlutě pak přímka na ni kolmá, u níž dochází k postupnému posouvání podle fialového vektoru. Buňky, které v daném posunutí mají od přímky vzdálenost menší než velikost vektoru, jímž posunujeme, nebo na ni leží, jsou vybarveny modře. Fialový vektor je pouze ilustrační. Vlastní obrázek.

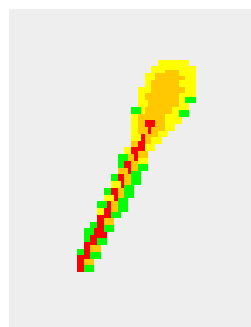
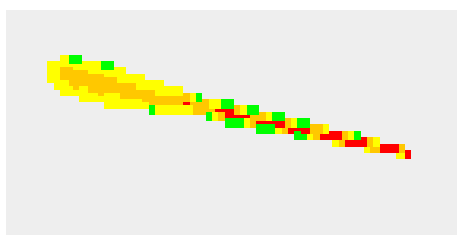
<sup>11</sup> Vzdálenost od přímky je počítána dosazením souřadnic buňky s nenulovou energií do klasické rovnice pro výpočet vzdálenosti bodu od přímky  $v = \frac{|ax+by+c|}{\sqrt{a^2+b^2}}$ .

Z programu posléze můžeme vyexportovat txt soubor, ve kterém budou zápisy z mapy délka – energie. Tedy ke každé hodnotě dráhy je přiřazena energie, kterou částice v daném úseku dráhy ztratila. Data z tohoto txt je možné zkopírovat do excelu a dále s nimi pracovat.

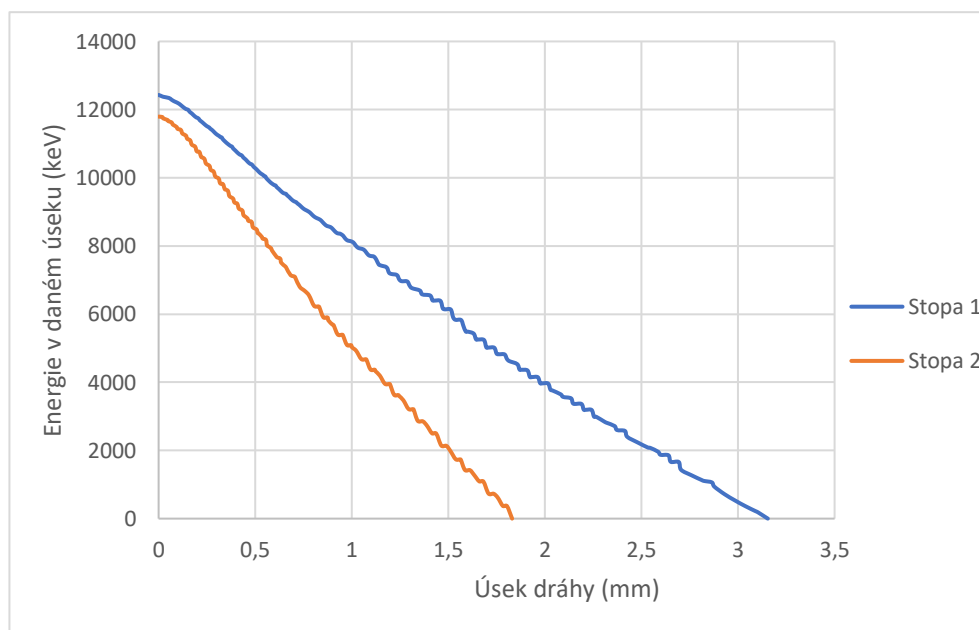
Zde následuje ukázka dat získaných tímto programem při analýze 2 vybraných stop částic. U každé částice jsme určili následující parametry v tabulce. Dále jsme vytvořili graf (na obr. 49), který zobrazuje klesající energii v závislosti na uražené dráze (1 pixel = 0,054687 mm).

stopa	E (keV)	délka (pix)	Zabrané pixely	délka(mm)
1	12441	57,6	193	3,15
2	11815	33,4	135	1,83

Tab. 4: Stopa 1 a 2. Vlastní tabulka.

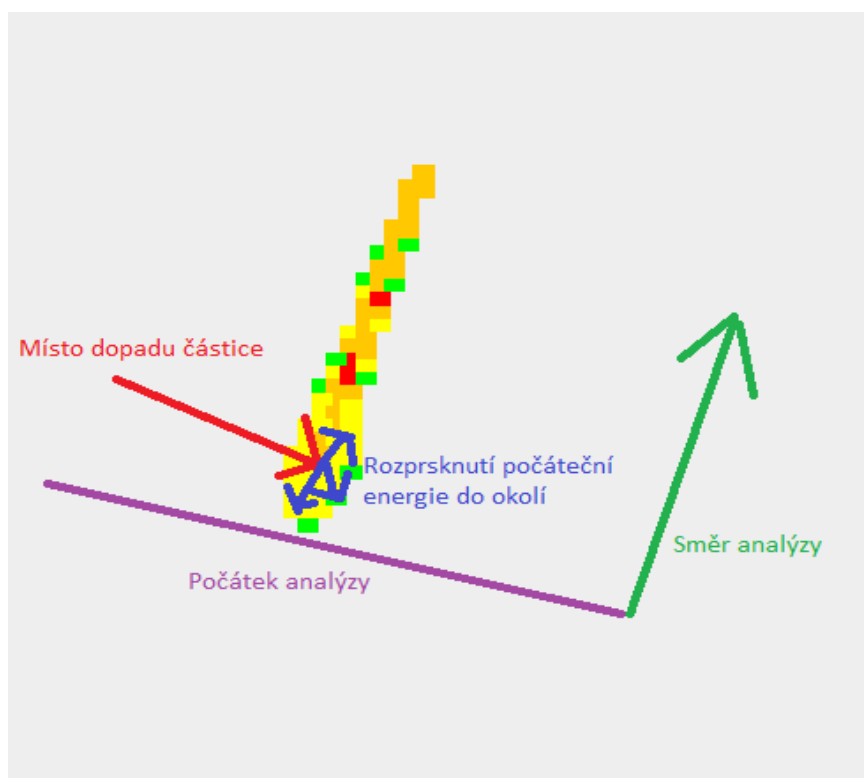


Obr. 48: Stopa 1 a 2. Vlastní obrázek.



Obr. 49: Postupná ztráta energie během putování křemíkovým čipem. Vlastní graf.

U tohoto programu je však nejedna nepřesnost, která se může projevit u částic obsahujících na začátku velký „blob“. Nelze jej totiž zcela odlišit od zbytku cesty a částečně se s ní překrývá. Data z prvních intervalů mohou být tedy „rozmazaná“.



Obr. 50: Nevýhoda počáteční analýzy algoritmu. Vlastní obrázek.

Dalším problémem by pak mohla být stopa, u které by aproximovaná přímka měla být rovnoběžná s osou  $y$ , která nelze pomocí 2 parametrů předaných metodou nejmenších čtverců vyjádřit. Naštěstí jsme na žádnou takovou stopu nenarazili.

Práce s dvourozměrným polem jako s rovinou může přinášet spoustu nepřesností. Energie jsou zapsané v buňkách, jež mají souřadnice jen v celých číslech. Problematické je i samo určování přesných poloh pixelů pomocí posunování přímky směrovým vektorem, které s sebou jistě přináší spoustu nevýhod. Celkové délky stop tím mohou být také nepatrně zkreslené.

## 10 ZÁVĚR

Kdybychom měli na závěr shrnout přínos práce, určitě bychom jako první vyzdvihli vytvoření pomocného analytického softwaru k částicové kameře. S jeho pomocí lze například párovat GPS data nadmořské výšky s daty ze snímků, což může posloužit zjednodušení dalšího měření ve vyšších nadmořských výškách. Pomocí něj lze z txt souborů zpětně dostávat spektra a četnosti částic. Dále jsou jeho součástí programy na analýzu jednotlivých částic, což prostředí Pixelman–Simple preview neumožňuje. Vybrané částice lze nyní ze souborů „vyřezávat“ a poté je různě analyzovat, či vykreslovat, či počítat jejich energie. Program by šel jistě užít i při zachycení jiných exotických částic. Co s osamělými částicemi úzce spolupracuje, je náš  $\Delta E/\Delta x$  program, který dokáže analyzovat energetický průběh jejich stop. Mohl by být taktéž užit na různé další částice. Všechny náš software necháváme pro zájemce volně ke stažení, a to na stránkách SLO ([http://jointlab.upol.cz/kvita/SOC\\_GyUnicov\\_2018](http://jointlab.upol.cz/kvita/SOC_GyUnicov_2018)). Nachází se zde spustitelné JAR verze programů. Dále jsme také rozebrali možný způsob, jímž se dá určit směr dopadu některých částic na čip, čehož by v budoucnu mohli využívat další programy, například program, který by zjišťoval polohu zdroje částic od čipu kamery.

Nelze také opomenout, že se nám podařilo změřit jednotlivé četnosti částic v závislosti na nadmořské výšce a dávkový příkon pro jednotlivé výškové úseky nad Evropou. Našich výsledků by někdo mohl využít při opakování měření a zjištění případné změny jevů ovlivňující radiaci ve vyšších nadmořských výškách. Pro porovnání by mohlo být také dobré změření radiace nad jiným místem.

Dále se nám povedlo nalézt a analyzovat jednotlivé vysokoenergetické částice, určit u nich hodnoty energií a průběh jejich odevzdávání a překreslit je přehlednějším způsobem. Některé částice odevzdávali většinu energie až na konci dráhy a u některých jsme dokonce našli i jev zvaný Braggův peak, který má mimo jiné hojné užití v medicíně při hadronové terapii, kde zaručuje minimální poškození kůže pacienta. Většina ostatních vykazovala rovnoměrný průběh odevzdávání energie.

Bohužel se nám nepovedlo přesně určit typ námi analyzovaných silně ionizujících částic, a proto doufáme, že někdo využije našich výsledků k dořešení tohoto problému. Dle našich předpokladů by se mohlo jednat o protony, deuterony, alfa částice, nebo jádra lithia.



## 11 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Americium – Periodic Table of Videos. In: *Youtube* [online]. 30. 8. 2012 [cit. 2018-01-12]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=CC-L-CITg3k>
- [2] Americium-241. In: *Washington State Department of Health* [online]. Washington State Department of Health, 2002, s. 1-3 [cit. 2018-02-03]. Dostupné z: [https://www.doh.wa.gov/portals/1/Documents/Pubs/320-075\\_am241\\_fs.pdf](https://www.doh.wa.gov/portals/1/Documents/Pubs/320-075_am241_fs.pdf)
- [3] Americium-241. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Americium-241>
- [4] DEPRIEST, Dale. NMEA data: Decode of selected position sentences [online]. [cit. 2018-02-03]. Dostupné z: <http://www.gpsinformation.org/dale/nmea.htm>
- [5] DOLEJŠÍ, Jiří a Olga KOTRBOVÁ. *Standardní model* [online]. Praha: Univerzita Karlova v Praze [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/el/1441/jaro2013/FY2RC\\_AF/um/Standard\\_model\\_CZ.pdf](https://is.muni.cz/el/1441/jaro2013/FY2RC_AF/um/Standard_model_CZ.pdf)
- [6] GAGNON, Steve. The Element Americium. *Jefferson Lab* [online]. Newport News: U.S. Department of Energy, 1997 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://education.jlab.org/itselemental/ele095.html>
- [7] HOLÝ T., J. JAKŮBEK, S. POSPÍŠIL, J. UHER, D. VAVŘÍK, Z. VYKYDAL: „Data Acquisition and Processing Software Package for Medipix2“. *Nucl. Instr. And Meth. A563* (2006) 254 – 258
- [8] *International Masterclass* [online]. Olomouc: PřF UP Olomouc, 2018 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <http://exfyz.upol.cz/didaktika/masterclass/>
- [9] KOSTKA, Tomáš. *Radiační dávky* [online]. 21.11.2012 [cit. 2018-04-01]. Dostupné z: <https://chernobylzone.cz/radiacni-davky/>
- [10] KREJČÍ, Václav. *Svět očima moderní fyziky*. Praha: Horizont, 1981. Malá moderní encyklopedie (Horizont). ISBN 421400127362.
- [11] KREJČÍKOVÁ, Martina. *Současný stav poznání o kosmickém záření nejvyšších energií* [online]. Praha, 2012 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: [https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/40593/BPTX\\_2011\\_1\\_\\_0\\_283130\\_0\\_116595.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/40593/BPTX_2011_1__0_283130_0_116595.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta, Ústav částicové a jaderné fyziky.

- [12] KVITA, Jiří. *Jak si posvítit na Higgsův boson* [online]. Olomouc: PřF UP Olomouc, 2018 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: [http://exfyz.upol.cz/didaktika/masterclass/masterclass\\_prezentace\\_20180316.pdf](http://exfyz.upol.cz/didaktika/masterclass/masterclass_prezentace_20180316.pdf)
- [13] KVITA, Jiří. *Detektory ionizujícího záření a ve fyzice částic (SLO/DIZFC)* [online]. [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: [http://jointlab.upol.cz/kvita/Poznamky\\_DIZFC.pdf](http://jointlab.upol.cz/kvita/Poznamky_DIZFC.pdf)
- [14] L'ECUYER, Pierre, MUNGER, David, Chweyan a Mamadou THIONGANE, ed. *Stochastic Simulation in Java* [online]. Simulation and Optimization Laboratory, located at the Department of Computer Science and Operations [cit. 2018-02-16]. Dostupné z: <https://github.com/umontreal-simul/ssj>
- [15] Leptony. *Aldebaran* [online]. Praha: Aldebaran Group for Astrophysics, 2000 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <http://www.aldebaran.cz/astrofyzika/interakce/leptons.php>
- [16] MACKINTOSH, Raymond. *Jádro: cesta do srdce hmoty*. Praha: Academia, 2003. ISBN 80-200-1025-4.
- [17] *MX-10 - Digitální částicová kamera* [online]. [cit. 2018-02-02]. Dostupné z: <http://www.particlecamera.com/index.php/cs/>
- [18] NAVE, R. Atmospheric Muons. *HyperPhysics Concepts* [online]. Atlanta: Georgia State University, 2016 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Particles/muonatm.html#c1>
- [19] NAVE, R. Leptons. *HyperPhysics Concepts* [online]. Atlanta: Georgia State University, 2016 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Particles/lepton.html#c3>
- [20] PLOC, Petr. *Kosmické záření a jeho vliv na posádky letadel* [online]. Praha, 2017 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/74000/F6-DP-2017-Ploc-Petr-PP\\_DP\\_ULD.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/74000/F6-DP-2017-Ploc-Petr-PP_DP_ULD.pdf?sequence=-1&isAllowed=y). Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, Ústav letecké dopravy.
- [21] *Sievert, becquerel, rentgen.....Jak měříme radioaktivitu* [online]. 8.5.2012 [cit. 2018-02-03]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2012/05/sievert-becquerel-rentgen-jak-merime-radioaktivitu/>
- [22] ŠIDLÍKOVÁ, Markéta. *Alfa, beta, gama záření – principy a vztahy, způsoby měření, užití v praxi, Interakce záření s prostředím* [online]. [cit. 2018-02-03]. Dostupné z: <http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Svadlenkova/Alfa,beta,gama%20zareni.pdf>

- [23] VÍCHA, Vladimír. *Experimenty s pixelovým detektorem pro výuku jaderné a částicové fyziky*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016. ISBN 978-80-01-05888-6.
- [24] VYKYDAL Z., J. JAKŮBEK, S. POSPÍŠIL: „USB Interface for Medipix2 Pixel Device Enabling Energy and Position Detection of Heavy Charged Particles“. Nucl. Instr. And Meth. A 563 (2006) 112 – 115

## 12 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 1: Čip kamery Timepix .....	9
Obr. 2: Částicová kamera Timepix.....	10
Obr. 3: Simple preview .....	12
Obr. 4: Alfa částice, jak ji vidí MX-10, tzv. „Blob“ .....	14
Obr. 5: Beta částice, jak ji vidí MX-10, podlouhlá křivka.....	16
Obr. 6: Gama částice, obrazec zabírající 1-2 pixely .....	17
Obr. 7: Znázornění rozpadů pro daná protonová a nukleonová čísla.....	18
Obr. 8: Mion, jak ho vidí MX-10 detektor.....	24
Obr. 9: První, druhý a třetí peak při měření gama částic.....	25
Obr. 10: Laboratorní zdroj záření a sklíčko z uranového skla .....	26
Obr. 11: Energie alfa částic v závislosti na vzdálenosti od zdroje .....	27
Obr. 12: Očekávaný peak gama záření při průchodu ocelí .....	28
Obr. 13: Snímek zasažený elektrostatikou .....	31
Obr. 14: Snímek z malé nadmořské výšky .....	32
Obr. 15: Snímek z vyšší nadmořské výšky. ....	32
Obr. 16: Závislost počtu jednotlivých typů částic na nadmořské výšce. ....	34
Obr. 17: Závislost počtu dlouhých mionů ve snímcích na nadmořské výšce .....	34
Obr. 18: Závislost dávkového příkonu na nadmořské výšce.....	36
Obr. 19: Ionizující částice na snímku ze Simple preview .....	38
Obr. 20: Stopy silně ionizujících částic vyobrazené naším programem .....	39
Obr. 21: Energetické rozdělení všech stop, jež jsme analyzovali.....	39
Obr. 22: Popis stopy zachycené částice.....	40
Obr. 23: Graf energetických ztrát při cestě protonu křemíkem .....	42
Obr. 24: Možné zvýšení $\Delta E/\Delta x$ či Braggův peak ve stopě částice .....	43
Obr. 25: Čtyři stopy z obr. 26 a 27 s jejich celkovými zachycenými energiemi .....	43
Obr. 26: Odevzdaná energie stop z obr. 25 v jednotlivých úsecích .....	44
Obr. 27: Odevzdaná energie stopy z obr. 25 v jednotlivých úsecích .....	44
Obr. 28: Tři vybrané stopy z obrázku 29 se zachycenými energiemi.....	45
Obr. 29: Odevzdaná energie v jednotlivých úsecích pro 3 vybrané kratší stopy ...	45
Obr. 30: Čtyři stopy s rovnoměrným průběhem z obr. 31.....	45
Obr. 31: Průběh rovnoměrného odevzdávání energie u vybraných stop .....	46
Obr. 32: Dvě vysokoenergetické stopy z obr. 33 .....	47
Obr. 33: Dvě vysokoenergetické stopy s klesajícím průběhem a peakem .....	47
Obr. 34: Stopa s energií 40 MeV vykazující Braggův peak .....	48
Obr. 35: Tři stopy částic, které se chovaly jinak než předchozí .....	48
Obr. 36: Průběh 3 částic jiného typu .....	48
Obr. 37: $\Delta E/\Delta x$ jedné částice a funkce B-B formule pro částici s 40 MeV .....	51
Obr. 38: Jaderná interakce vyobrazená naším algoritmem .....	52

Obr. 39: Jaderná interakce ve fotografické emulzi .....	52
Obr. 40: Textový soubor snímku s částicí .....	53
Obr. 41: Vývojové prostředí Eclipse Oxygen 2.0.....	54
Obr. 42: Scatter plot pro alfa částice .....	55
Obr. 43: Scatter plot pro beta částice .....	55
Obr. 44: Scatter plot pro gama částice .....	55
Obr. 45: Ilustrace principu fungování algoritmu .....	56
Obr. 46: Ukázka aproximace přímky pomocí metody nejmenších čtverců .....	59
Obr. 47: Ilustrace analýzy kolmou přímkou.....	60
Obr. 48: Stopy 1 a 2.....	61
Obr. 49: Postupná ztráta energie během putování křemíkovým čipem.....	61
Obr. 50: Nevýhoda počáteční analýzy algoritmu .....	62

Tab. 1: Průchod gama záření ocelí .....	29
Tab. 2: Výsledky z měření kosmického záření v letadle.....	35
Tab. 3: Barevné škály energií.....	39
Tab. 4: Stopy 1 a 2 .....	61

## 13 PŘÍLOHA: ZDROJOVÉ KÓDY PROGRAMŮ

V příloze se nacházejí zdrojové kódy v jazyce Java všech námi vytvořených programů a příklad textových souborů se snímky a se stopami částic, které ze snímků byly vyexportovány.

Ve složce *Zdrojové kódy* naleznete:

### **Třídy, které využívá více programů –**

*Castice.java* – třída, která charakterizuje částici jako objekt, její energii atd.

*typ\_castice.java* – výčtový typ, které zahrnuje typy částic

*nakresli\_ctverecek.java*, *nakresli\_barevny\_ctverecek.java* – třídy, které slouží k vykreslování

*Snimek.java* – třída, která charakterizuje informace z txt souboru snímku

*Bode.java* – pomocná třída pro bod a vektor v rovině

### **Program na analýzu spektra a četnosti částic snímku –**

*Pocitani\_castic\_4.java*

### **Program na párování snímků s GPS daty nadmořské výšky –**

*MTSnimek.java* (dědí ze třídy *Snimek.java*),

*Pocitani\_castic\_9.java* (spektra bez mionů, hlavní kontrolní třída),

*Pocitani\_castic\_10.java* (spektra s miony, hlavní kontrolní třída),

*GPSAltDec.java* (dekódování nadmořské výšky)

### **Program na oddělování částic do samostatných souborů –**

*OrezSnimek.java* (dědí ze třídy *MTSnimek.java*),

*Vyriznout\_Castici.java* (hlavní kontrolní třída tohoto programu)

### **Program na analýzu odevzdané energie částice v závislosti na její dráze –**

*SnimekICastice.java* (dědí ze třídy *OrezSnimek.java*),

*Nacist\_vyriznutou\_castici.java* (hlavní kontrolní třída tohoto programu)