

# **STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST**

**Obor č. 2: Fyzika**

## **Měření rozpadových produktů radonu částicovou kamerou MX-10**

**Štěpán Filip  
Královehradecký kraj**

**Náchod 2020**

# STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 2: Fyzika

**Měření rozpadových produktů radonu částicovou  
kamerou MX-10**

**Measurement of radon decay products using particle  
camera MX-10**

**Autor:** Štěpán Filip

**Škola** Jiráskovo gymnázium, Náchod, Řezníčkova 451, 54701,  
Náchod

**Kraj:** Královehradecký kraj

**Konzultant:** Mgr. Zdeněk Polák

Náchod 2020

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval samostatně a použil jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

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

Nemám 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 Náchodě dne 25.3.2020 .....

Štěpán Filip

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat mému třídnímu učiteli a zároveň učiteli fyziky, Zdeňkovi Polákovi. Za seznámení s částicovou kamerou, za poskytnutí všech pomůcek potřebných k měření a za celkovou výpomoc při zpracování moji SOČ.

## **Anotace**

Téma moji SOČ byla částicová fyzika, a to nepřímé měření radonu částicovou kamerou MX-10. Se kterou jsem chtěl naměřit a potvrdit přítomnost radonu ve sklepe školy, aniž bych položil kameru do sklepa. Seznámil jsem se s používáním MX-10, obohatil jsem si své znalosti v oblasti částicové fyziky a během svého seznamování s přírodní radioaktivitou jsem obohatil mezinárodní databázi. Radon jsem nepřímou metodou potvrdil.

## **Klíčová slova**

Částicová kamera MX-10; Radon; Alfa záření; Ionizující radiace; Rozpadové produkty

## **Annotation**

Theme of my SOČ was particle physics and to be exact it was indirect measurement of radon gas using particle camera MX-10. I wanted to confirm the presence of radon gas in the basement of our gymnasium without placing the camera in the basement. I learnt how to use the particle camera, I improved my knowledge in particle physics during which I enriched international database of background radiation. In the end I proved the presence of radon gas.

## **Keywords**

Particle camera MX-10; Radon; Alpha radiation; Ionizing radiation; Decay products

# OBSAH

|                                                               |               |
|---------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>1. ÚVOD .....</b>                                          | <b>- 7 -</b>  |
| <b>2. TEORETICKÁ ČÁST .....</b>                               | <b>- 8 -</b>  |
| 2.1. JEDNOTKY RADIOAKTIVITY .....                             | - 8 -         |
| 2.2. ČÁSTICOVÁ KAMERA MX-10 .....                             | - 9 -         |
| 2.2.1. Program Pixelman Simple Preview .....                  | - 11 -        |
| 2.3. RADIACE.....                                             | - 12 -        |
| 2.3.1. Záření terestriálního původu.....                      | - 14 -        |
| 2.3.2. Záření kosmického původu .....                         | - 16 -        |
| 2.3.3. Vzhled záření na MX-10 .....                           | - 17 -        |
| 2.4. RADON .....                                              | - 20 -        |
| 2.4.1. Detektory radonu .....                                 | - 21 -        |
| 2.4.2. Efekty radonu na lidský organismus .....               | - 22 -        |
| 2.5. SAFECAST BGEIGE NANO .....                               | - 23 -        |
| <b>3. PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>                                | <b>- 25 -</b> |
| 3.1. MĚŘENÍ RADONU S MX-10.....                               | - 25 -        |
| 3.1.1. Získávání rozpadových produktů .....                   | - 25 -        |
| 3.1.2. Měření s kamerou MX-10 .....                           | - 28 -        |
| 3.1.3. Výsledky měření.....                                   | - 29 -        |
| 3.2. MĚŘENÍ RADIOAKTIVNÍHO POZADÍ S SAFECAST BGEIGE NANO..... | - 33 -        |
| 3.2.1. Program QGIS .....                                     | - 33 -        |
| 3.2.2. Spolupráce se SÚRO .....                               | - 36 -        |
| <b>4. ZÁVĚR .....</b>                                         | <b>- 37 -</b> |
| <b>5. PŘÍLOHY .....</b>                                       | <b>- 40 -</b> |
| <b>6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>                     | <b>- 38 -</b> |

# 1. ÚVOD

V této práci se zaměřím na práci s částicovou kamerou MX-10. A to přesněji, zda lze pomocí této kamery nepřímo dokázat přítomnost radonu ve sklepech školy. Důkaz výskytu radonu jsem provedl pomocí měření dceřiných produktů rozpadu radonu s využitím částicové kamery MX-10. Pro pochopení přírodní radioaktivity jsem také používal detektor radioaktivity SAFECAST bGeige nano. Se kterým jsem následně provedl několik měření radiačního pozadí v mém okolí, těmito měřeními jsem následně přispěl do mezinárodní databáze společnosti SAFECAST.

Radioaktivita byla vždy velký strašák společnosti, již od prvního výbuchu atomové bomby za druhé světové války až po nedávné jaderné havárie-Černobyl, Fukušima.

Radioaktivita je všude kolem nás, v půdě, po které chodíme, v jídle, které jíme, ve vzduchu, který dýcháme, dokonce jsme bombardováni zářením z vesmíru. Nic není v takové míře, abychom se báli vycházet ven, ale za pomoci vhodných měřicích přístrojů ji dokážeme změřit.

Po gymnáziu hodlám studovat jadernou fyziku na ČVUT, tak chci pomocí této SOČ rozšířit svoje vědomosti v oblasti ionizujícího záření a naučit se, jak zpracovávat a vyhodnocovat mnou naměřená data.

## 2. TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1. Jednotky radioaktivity

**Aktivita** vyjadřuje počet radioaktivních přeměn během daného časového intervalu. Její jednotka je 1 Bq [Becquerel]. 1Bq se rovná 1 radioaktivní přeměně za 1 sekundu.

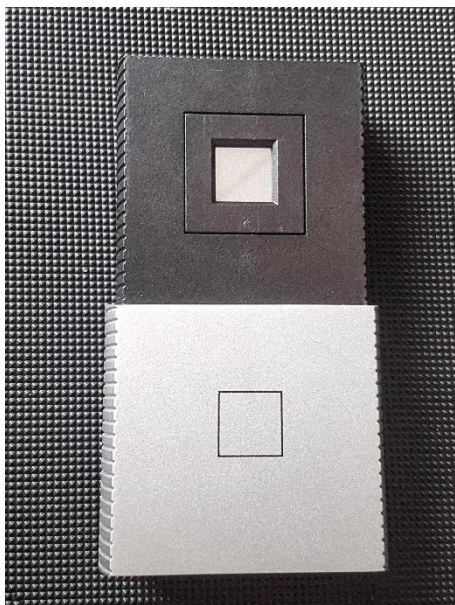
Aktivita se též vyjadřuje pomocí **CPM** (angl: Counts Per Minute) počet rozpadů za minutu. Aktivita vzorku klesá s časem, podle zákona poločasu rozpadu.

**Dávkový ekvivalent** jednotka vzniklá vynásobením dávkového příkonu koeficientem Q, který se liší v závislosti na látce vystavené záření. Jednotka je 1 Sv [Sievert] = J.kg<sup>-1</sup>

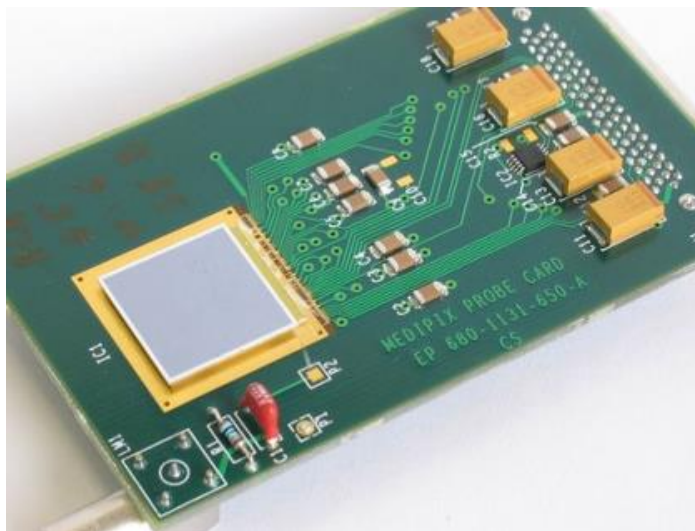
**Poločas přeměny** je doba, za kterou se přemění polovina všech jader ve vzorku. Její jednotka jsou sekundy a značí se  $T_{1/2}$ . Délka poločasu může být ns až miliardy let.

## 2.2. Částicová kamera MX-10

Částicová kamera MX-10 (viz obr. č. 2) byla vyvinuta ve spolupráci ČVUT a CERNu. K detekci částic ionizujícího záření dochází na čipu Medipix2 (viz obr. č. 1) o rozměrech 14 mm × 14 mm, který je vyrobený z křemíku o tloušťce 300 μm.



Obr. 2 Částicová kamera s odhaleným čipem. Vlastní obrázek.



Obr. 1 Čip Medipix2 zapojený na tištěném obvodu v kamerě MX-10. In: Medipix [online]. [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://www.marsbioimaging.com/mars/applications/medipix>

Čip funguje jako polovodičová dioda, která má volitelné napětí až 100V. Při dopadu ionizujícího záření na n-p přechod vznikají páry elektron - díra, náboj je následně přitážen k elektrodám, kde lze změřit jako malý proudový impulz. Rozlišení sensoru je 256×256 pixelů. Každý jednotlivý pixel dokáže přesně změřit energii částice, která prošla čipem. Nejsvrchnější část je hliníková vrstva sloužící jako elektroda. Na ni přímo leží dotovaný křemík jako polovodič N. Spodní část křemíku je dotována jako polovodič P. K vyčítacímu čipu je připojena pomocí bondovacích kuliček, které dělí čip již na jednotlivé pixely. Signál poté prochází v podobě proudového impulzu, jenž je převeden na napěťový impulz zesilovačem, kde se zesílí a následně pokračuje do komparátoru, který rozhoduje, jestli velikost impulzu překročila threshold (práh detekce) a není pouhým šumem. Minimální hodnota detekce pro jeden pixel je 3,5KeV<sup>1</sup>. Poslední součástí obvodu je čítač, který díky známému oscilačnímu taktu (pro MX-10 je hodnota 10MHz) počítá podle délky a počtu taktů, jenž překonaly detekční hranici a podle toho určí absorbovanou energii. Kameru jsem používal v horizontální poloze (viz obr. č. 3) položenou v krabici na měření dceřiných produktů radonového rozpadu. Na její zadní straně je vidět mnou nalepená papírová páska s nakresleným čtverečkem narýsovaným tak, aby

<sup>1</sup> 1eV velmi malá jednotka energie používaná v částicové fyzice, definovaná jako kinetická energie jednoho elektronu urychleného ve vakuu napětím 1 voltu. 1eV = 1,602.10<sup>-19</sup> J

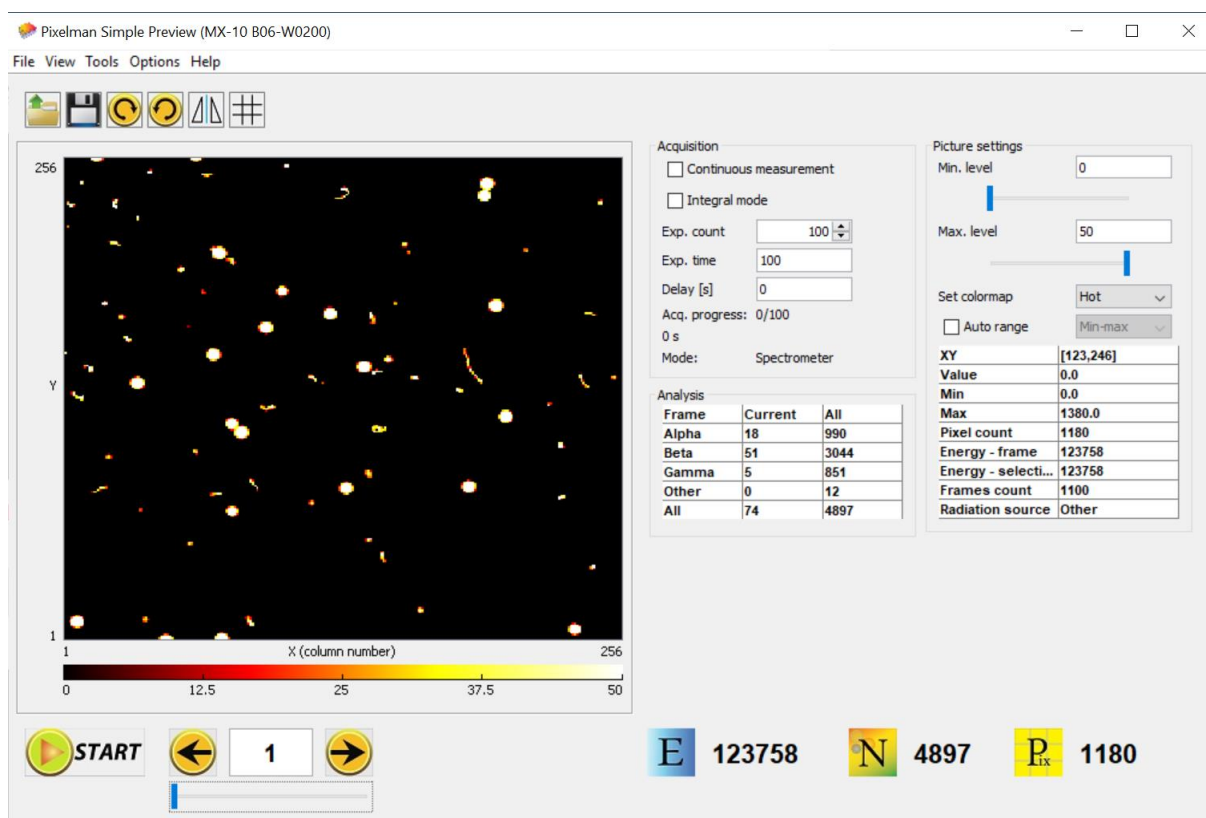
odpovídal poloze senzoru na druhé straně kamery. Čtvereček mi pomáhal při pokládání kamery na střed filtru.



Obr. 3 Částicová kamera položená v krabici připravená na měření. Vlastní obrázek.

### 2.2.1. Program Pixelman Simple Preview

Tento program byl vyvinut na ÚTEF<sup>2</sup> ČVUT a slouží k vyhodnocování signálů přicházejících z USB. Je to zjednodušený program pro školní účely. Jeho uživatelské prostředí je přehledné (viz obr. č. 4). Černý čtverec představuje snímací čip kamery a zobrazuje stopy částic v reálném čase. V textových oknech nastavujeme hodnoty měření: délku expozice, počet expozic, zpoždění jednotlivých expozic. Doba expozic ovlivní přesnost měření. Pokud je doba příliš dlouhá, dochází k překrývání absorpčních stop částic, v takových místech nedokážeme s přesností určit energie, jelikož byl vyčítač přehlcen. Program poté taky nedokáže určit přesný počet naměřených částic, jelikož se stopy překrývají a program podle jejich tvaru nedokáže přesně určit typ částice. Počet expozic udává samotný počet snímků a výslednou délku měření. Pomocí zpoždění prodloužíme měření na větší časový úsek bez toho, abychom museli nasnímat tisíce snímků. Výsledky měření dokáže exportovat v podobě excel tabulek. V tabulkách jsou uvedena data o četnosti částic, energii jednotlivých částic a jejich typu. Vizualizaci měření ukládá do textových souborů.



Obr. 4 Rozhraní aplikace Pixelman po měření rozpadů dceřiných produktů radonu. Vlastní obrázek

<sup>2</sup> ÚTEF – Ústav technické a experimentální fyziky

## 2.3. Radiace

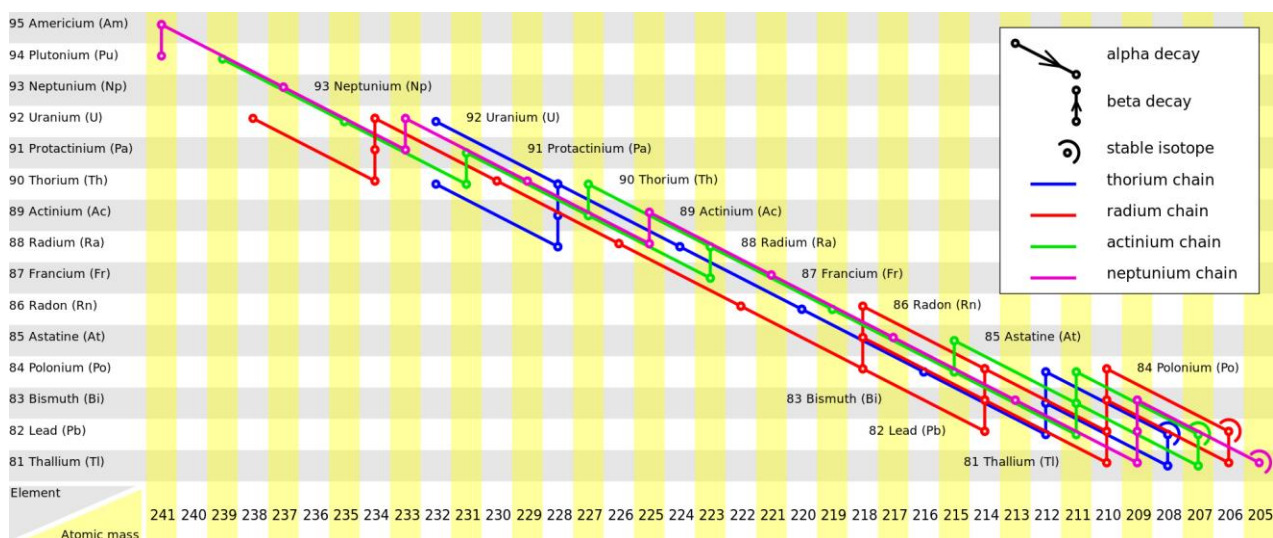
Přirozená radioaktivita je způsobená samovolnou přeměnou nestabilních jader, které se přirozeně vyskytují v přírodě. V 20. století se mezi přírodní zdroje přidaly i zdroje umělé-vzniklé při testování jaderných zbraní a provozu jaderných elektráren. Energii uvolňují pomocí emise částic nebo elektromagnetickým vlněním. Atom bude zpravidla stabilní pokud je jeho celkový počet částic v jádře v rozmezí 30 – 130. Stabilita se také řídí podle poměru mezi protony a neutrony. Rozmezí stabilních poměrů se nazývá řeka stability. Na grafu (viz graf 1) vidíme černý pás, to je řeka stability, kde poměr protonů a neutronů způsobuje stabilitu jádra. Graf obsahuje všechny námi známé izotopy, ať už stabilní nebo nestabilní. Radioaktivní prvky vznikají přeměnou v jedné ze 4 rozpadových řad (viz obr. č. 5). Na začátku je vždy těžký izotop, který se volně vyskytuje v přírodě a je nestabilní a na konci každé řady se nachází stabilní izotop. Řady jsou pojmenovány podle první a posledního izotopu.

Uran-radiová, začínající uranem  $^{238}\text{U}$  a končící olovem  $^{206}\text{Pb}$

Uran-aktiniová, začínající uranem  $^{235}\text{U}$  a končící olovem  $^{207}\text{Pb}$

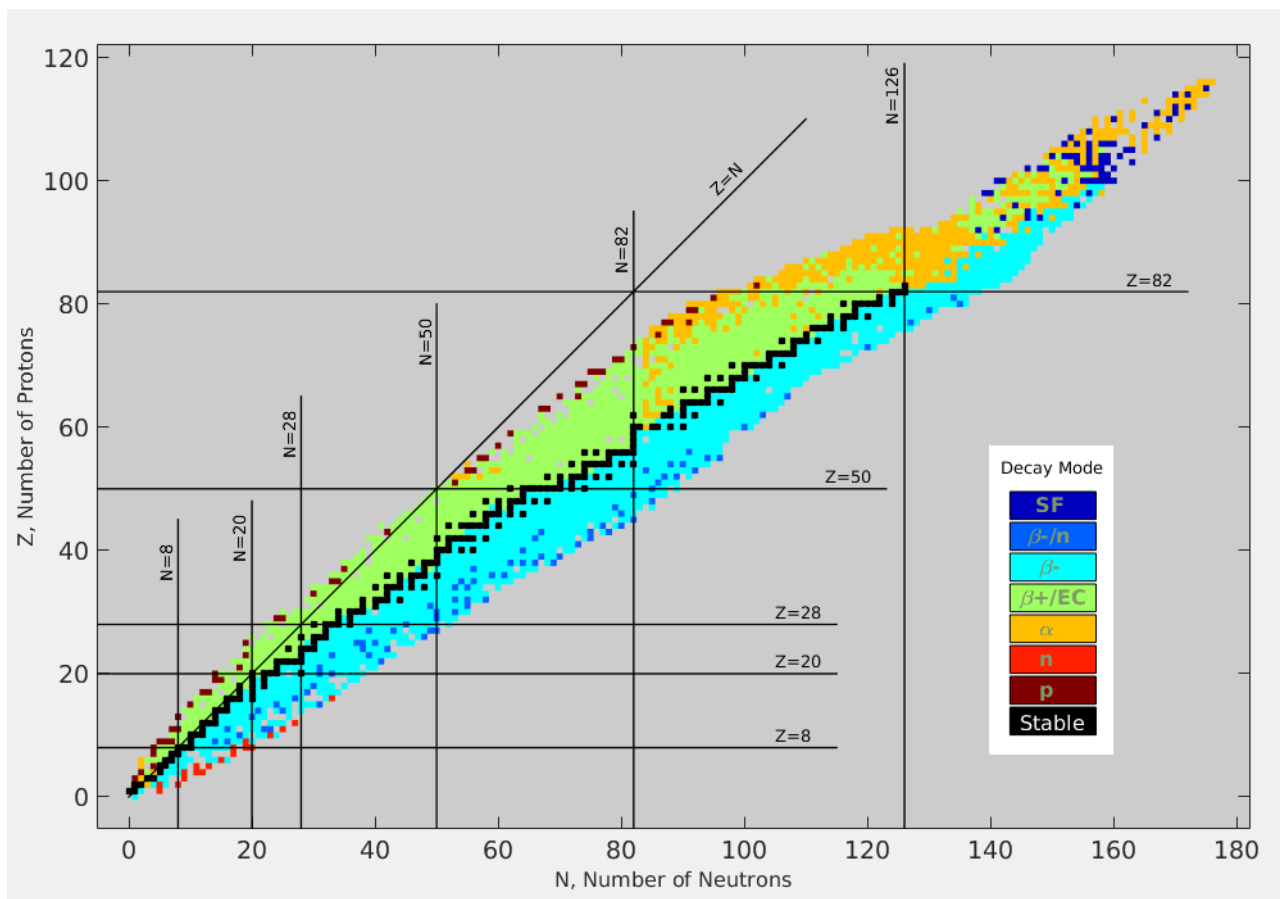
Thoriová, začínající thoriem  $^{232}\text{Th}$  a končící olovem  $^{208}\text{Pb}$

Neptuniová, začínající neptuniem  $^{237}\text{Np}$  a končící thalliem  $^{205}\text{Tl}$



Obr. 5 Rozpadové řady, kde osa x představuje atomovou hmotnost izotopu. Osa y představuje název prvku, od kterého pochází daný izotop. In: rozpadové řady [online]. [cit. 2020-03-12] Dostupné z: [https://www.wikiwand.com/cs/Rozpadov%C3%A1\\_%C5%99ada](https://www.wikiwand.com/cs/Rozpadov%C3%A1_%C5%99ada)

Pomocí posloupnosti těchto řad dokážeme zpětně určit předchozí izotop řady. Izotopy při každé přeměně vyzáří záření o dané energii, která se po změření dá přiřadit tabulkovým hodnotám zobrazených v rozpadové řadě (Příloha A) a podle toho určit předchozí izotop.



Graf. 1 Závislosti počtu protonů na počtu neutronů. Černé čtverečky označují stabilní atomy, ostatní barvy rozdělují jednotlivé izotopy podle druhu radioaktivního rozpadu. In: Stability chart [online]. [cit. 2020-03-12] Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Valley\\_of\\_stability#/media/File:DecayModeNuDat2.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Valley_of_stability#/media/File:DecayModeNuDat2.png)

### 2.3.1. Záření terestriálního původu

Záření se dělí na 3 hlavní typy. Pro moji práci je nejpodstatnější hned první typ.

**První typ** je alfa záření- $\alpha$ . Těžká jádra se pomocí alfa rozpadu zbavují nukleonů a posunují se k stabilnějšímu stavu. Těžké jádro s více jak 210 nukleony je tak velké, že jeho silné jaderné síly na okrajích nemají takovou sílu, aby udržely všechny nukleony pohromadě. Na okrajích jádra tak vznikají skupiny 2 protonů a 2 neutronů, tudíž jádra helia bez elektronové obalu, tato lokální skupina na sebe působí větší jadernou silou než její okolí. Před vyzářením musí překonat ještě potenciálovou bariéru vazbové energie jádra, která má výšku cca 25 MeV, zatímco uvolněné alfa záření dosahuje kinetických energií v rozmezí 4-9 MeV. [4] Podle klasické fyziky by se částice od bariéry odrazila, protože nemá dostatečnou energii na její překonání a nenastala by žádná emise. Tento jev vysvětlila kvantová fyzika, která považuje částici jako vlnovou funkci, jenž má nenulovou šanci touto bariérou proltnout. Jev se nazývá kvantové tunelování. Po překonání bariéry je vymrštěna do prostoru odpudivými elektrostatickými silami, které na ni působí, jelikož její náboj je  $\text{He}^{2+}$  a to rychlostí 0,05c. Toto záření má silné ionizační schopnosti, řádově dokáže zionizovat  $10^5$  atomů, než ztratí všechnu svoji energii. Díky svojí hmotnosti a kladnému náboji předá svoji energii při průletu vzduchem velmi rychle. Jeho dolet ve vzduchu je okolo 3–4 cm. Vnější působení na člověka je prakticky nulové, protože záření je odstíněno pouhým listem papíru. Látky s hustotou lidského těla záření alfa pohltí již po 0.1 mm. Pokud se zářič (uran, radium, radon) dostane do těla tak může přerušit iontové vazby v DNA a způsobit nemoc z ozáření [4]. Záření alfa, jenž se zbavilo svojí kinetické energie se zastaví v hornině, kde váže do svého elektronového obalu volné elektrony a stává se neutrálním. Ročně takto vznikne okolo 3000 tun helia, které zůstává zachycené v hornině nebo se uvolňuje do dutin a je posléze těženo společně se zemním plynem. Odhaduje se, že všechno helium na Zemi začínalo jako alfa záření.

**Druhý typ** je beta záření- $\beta$ . Malá klidová hmotnost částic způsobuje, že nemá tak silné ionizační schopnosti jako předešlé záření. Při průletu vzduchem se šíří rychleji a to 0,4c až 0,99c. Dolet beta záření ve vzduchu je několik desítek centimetrů, ale i tak lze odstínit tenkými kovy (hliníková folie) a materiály s nízkou hustotou. Dělí se na dva druhy dle náboje:

$\beta^-$  elektrony. Záření vylétá přímo z jádra společně s antineutrinem<sup>3</sup>, z důvodu rozpadu neutronů na protony a elektrony. Proton díky jaderným silám zůstane v jádru, zatímco elektron a antineutrino vylétá mimo jádro.

$\beta^+$  pozitrony jsou opačné neboli antičástice k elektronům. Positrony se vyskytují v antihmotě a při srážkou s hmotou dojde k jejich anihilaci a následnému vyzáření dvou fotonů,

---

<sup>3</sup> Anti částice neutrina, které je jedno z nejlehčích částic, a proto skoro neinteraguje s hmotou.

které se využívá v PET<sup>4</sup> scannerech. Vznikají v urychlovačích nebo při jaderných reakcích umělých nuklidů.

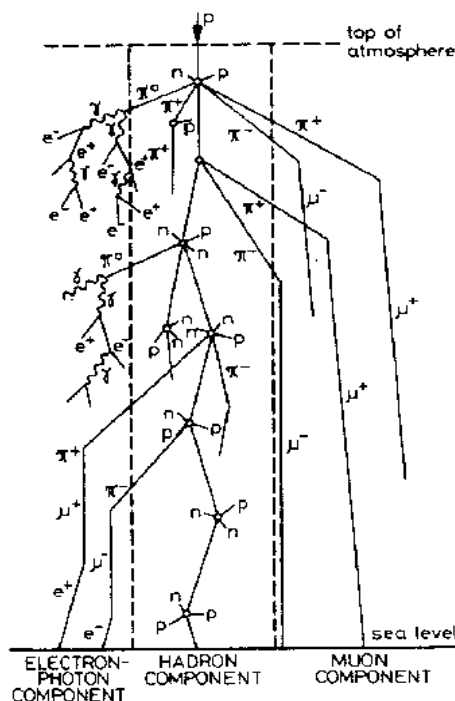
**Třetí typ** je gama záření- $\gamma$ . Je to elektromagnetické záření. Záření vzniká během jaderných reakcí, hlavně během jaderných rozpadů spolu s alfa a beta rozpadem, díky tomu je nejčastěji se vyskytující záření. Záření se nedá stoprocentně zastavit, pouze dokážeme snížit jeho intenzitu a k tomu slouží tlusté vrstvy obsahující materiály s vysokou hustotou (olovo, vrstvy betonu). energii v tomto případě nesou vysokoenergetické fotony. Má krátkou vlnovou délku a velmi velkou pronikavost, díky jejich nulovému náboji. Proto je nejnebezpečnějším typem záření a zdraví škodlivé.[4] Fotony svoji energii předají elektronovému obalu atomu, ze kterého při dostatečné energii dokážou elektrony uvolnit-fotoelektrický jev. Vysokoenergetické záření má hojně využití v medicíně, kdy se pomocí něho ničí rakovina.

---

<sup>4</sup> PET-angl: Pozitron Emission Tomography. Pozitronová emisní tomografie se využívá jako zobrazovací metoda nádorů v lidském těle. Člověk vypije radiofarmakum-nejčastěji <sup>18</sup>F v glukóze. Glukóza doputuje do národu, kde se následně vyzáří pozitron, jenž okamžitě anihiluje a vyzáří dva gama fotony po přímce. Fotony jsou změřeny a podle jejich trajektorie dokážeme určit přesné místo jejich vzniku, tudíž místo nádoru.

### 2.3.2. Záření kosmického původu

Jsou to vysokoenergetické částice, ať už vysokoenergetické fotony (gama záření), protony, tak i plně ionizovaná atomová jádra. Částice dopadající na zemský povrch se nazývají miony- $\mu$ . Mají nízkou klidovou hmotnost, díky které mají vysokou prostupnost materiálem. Lze je detekovat i několik metrů pod zemí. Pohybují se rychlostí  $0,99c$ . Ve vrchních částech atmosféry (11 km) dopadá kosmické záření a při nárazu do molekul vzduchu vznikají piony s velmi krátkou dobou života, které se díky tomu po pár metrech rozpadají na miony. Čas rozpadu mionu se pohybuje okolo  $2,2\mu s$ . Tudíž bychom neměli být schopni je na povrchu naměřit. Díky speciální teorii relativity dopadají až na zemský povrch, přesněji v důsledku dilatace času. Mion se pohybuje tak blízko rychlosti světla, že dochází k prodloužení času letu a života částice. Díky tomu dopadá až na povrch „sprška“ částic (viz obr. č. 6), která nastává v případě, kdy vysokoenergetická částice vstoupí do horních vrstev atmosféry. Ze srážky vzniká skupina částic, která se nadále sráží a vytváří mnoho dalších částic v průběhu. Taková



Obr. 6 Sprška částic po nárazu energetického protonu do atmosféry, vznik několika mionů v průběhu In: cosmic rays [online]. [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: [http://cosray.unibe.ch/intro/nm\\_tutorial.html](http://cosray.unibe.ch/intro/nm_tutorial.html)

sprška produkuje během svého průletu atmosférou fluorescenční záření, které se dá detekovat pomocí dalekohledů vybavených fotonásobiči<sup>5</sup>. Takové dalekohledy se využívají na observatoři Pierra Augera.[4]

<sup>5</sup> Fotonásobič je elektronické zařízení sloužící k detekci velmi malého počtu fotonů. K vzniku signálu stačí pár fotonů dopadající na fotokatodu, kde se fotoelektrickým jevem vyrazí elektron. Elektron postupuje kaskádou dynod, kde se počet mnohonásobně zvýší. Na konci detekujeme vzniklý proud na anodě.

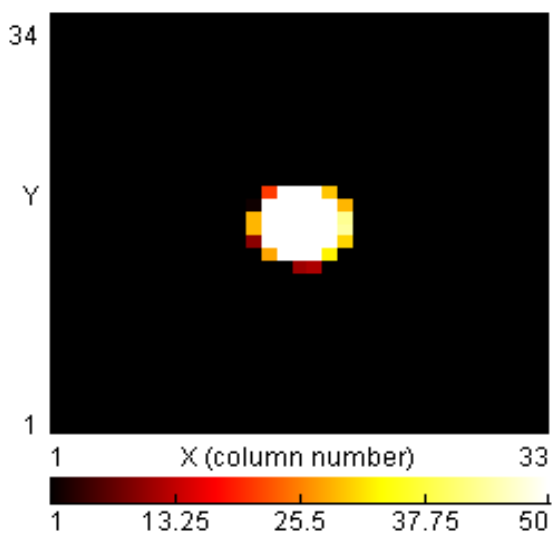
### 2.3.3. Vzhled záření na MX-10

Již během několika sekund expozice vidíme stopy dopadu **alfa záření** na polovodičový detektor. Vznikají kulaté stopy „bloby“ (viz obr. č. 7) díky vysokému ionizačnímu účinku mají rozsah přes několik pixelů.

Další častou stopou je **beta záření**, které při příletu do detektoru svoji energii předává postupně při srážkách s elektronovými obaly křemíkových atomů. Tvar a délka dráhy je náhodná a závisí na jeho energii. (viz obr. č. 8) Elektron svými nárazy do ostatních elektronových obalů předává svoji energii postupně.

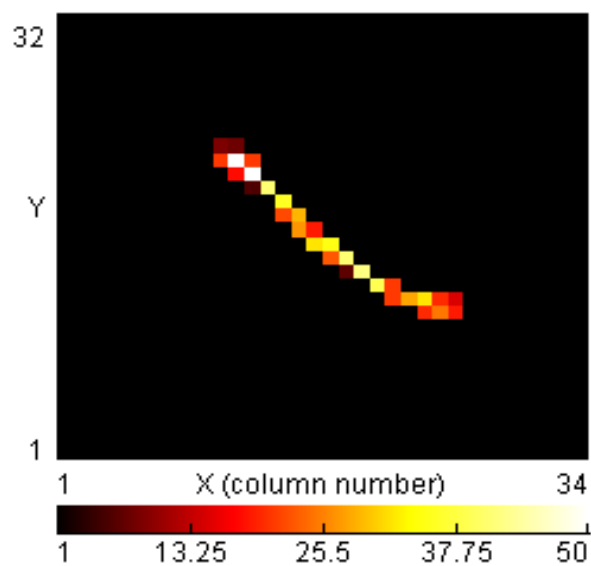
Vysokoenergetické fotony-**gama záření** ionizují elektrony v obalu křemíkových atomů, ale předaná energie není tak vysoká, aby vytvořila širokou stopu, a tak vznikají stopy (viz obr. č. 9) o řádové velikosti max. pár pixelů. Barevná škála ukazuje nízkou předanou energii při dopadu.

Největší stopy zanechává průlet **mionu** (viz obr. č. 10). Tyto vysokoenergetické částice mohou během svého průletu ionizovat atomy křemíku, uvolněné elektrony jsou detekovány. Uprostřed jeho dráhy nastala jaderná interakce. A to tak, že během průletu mion ionizoval elektron v obalu křemíku a následně vzniklé beta záření předalo energii čipu. Mion se nikdy nepohlí celý, jen předá část svojí energie a pokračuje dál v jeho dráze až hluboko pod zem. Během měření radiačního pozadí jsem zachytil další mion a jeho ojedinělou jadernou interakci. (viz obr. č. 11) Pak jsem zachytil další částici (viz obr. č. 12), kterou jsem zpočátku považoval za mion, ovšem dráha této částice nebyla přímkou, tudíž nemohla být mionem. Tato částice je

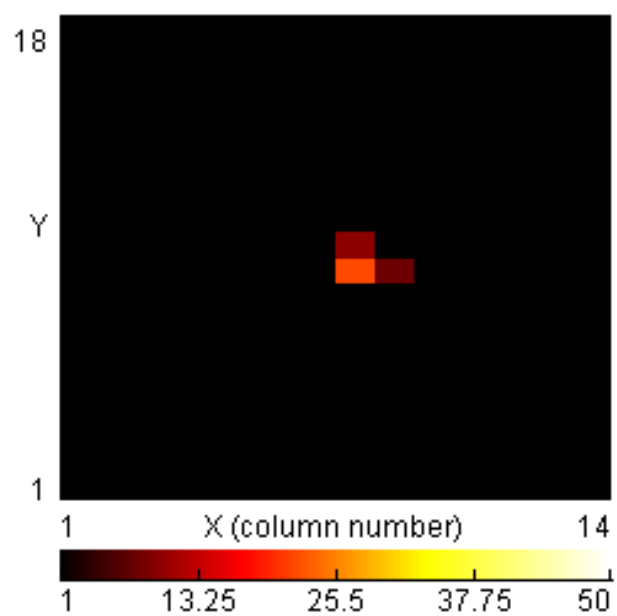


vysokoenergetický elektron, která při svém průletu vyrazila elektron. Tato jaderná reakce se Augerův jev a takto vyražené elektrony se nazývají Augerovy elektrony.

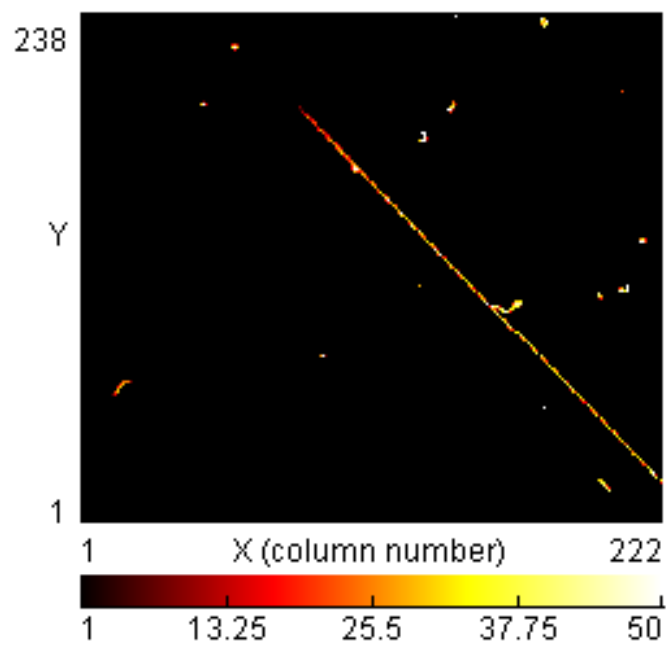
Obr. 7 Záření alfa, jak jej vidí částicová kamera. Vlastní obrázek.



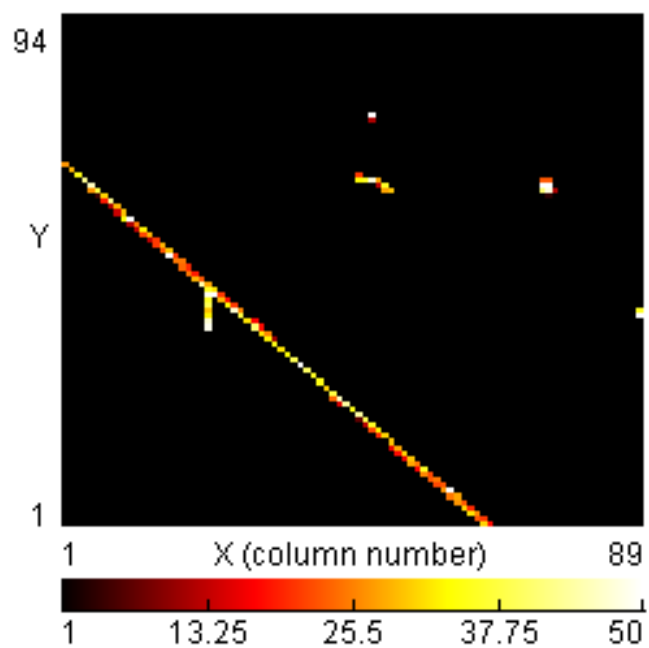
Obr. 8 Beta záření a jeho typická zakřivená a náhodná dráha. Vlastní obrázek.



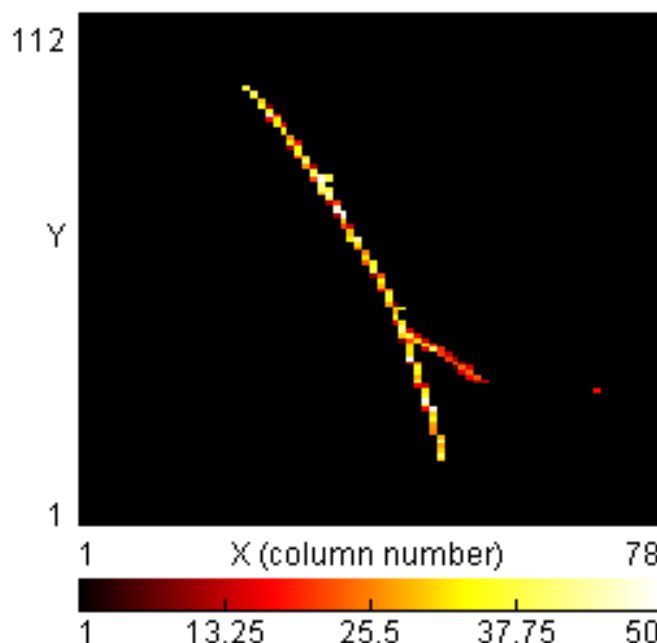
Obr. 9 Gama záření, rozměr je jen pár pixelů. Vlastní obrázek.



Obr. 10 Stopa prolétajícího mionu, který není během letu pohlcen. Vlastní obrázek.



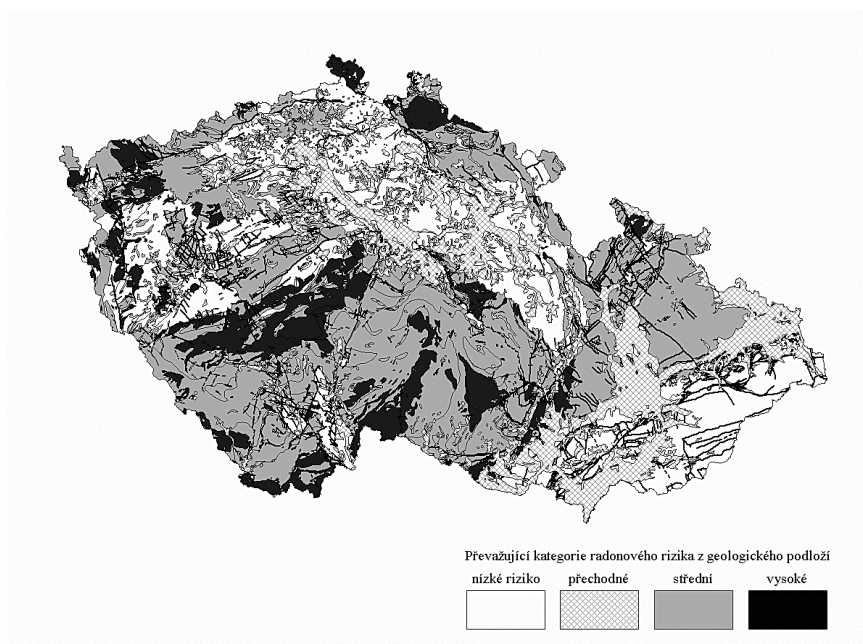
Obr. 11 Průlet mionu a jeho následná jaderná interakce. Vlastní obrázek.



Obr. 12 Průlet vysokoenergetického elektronu a následný Augerův jev.  
Vlastní obrázek.

## 2.4. Radon

Bezbarvý radioaktivní plyn se značkou **Rn** objevený E. Rutherfordem v roce 1899. V periodické tabulce patří mezi vzácné plyny s protonovým číslem 86. Existují 3 izotopy radonu. Izotopy  $^{219}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ . Izotopy 220 a 219 mají krátký poločas rozpadu, řádově několik sekund. Za tu dobu nestihnou prolhnout půdou na povrch. Jejich vyzářená radiační dávka nemá vliv na lidský organismus. Zatímco izotop radonu  $^{222}\text{Rn}$  má poločas rozpadu delší a to 3,8 dní, díky němu stíhá prolhnout na povrch, kde tvoří až 50 % dávky radiačního pozadí. Díky tomuto, patří radon celosvětově jako 2. nejčastější důvod rakoviny plic, hned po kouření.[1] Jeho poločas rozpadu by znamenal, že výskyt v přírodě bude velmi malý, ale díky matčiny izotopům (uran, thorium) které mají dlouhý poločas rozpadu radon neustále vzniká. A bude vznikat další miliony let. Jeho rozpadová řada pokračuje až k stabilnímu olovu. V reálném životě se s radonem můžeme setkat v nevětraných prostorech, sklepeních domů a starých dolech. Kde jako plyn vzlíná ze země. U nás v ČR se průměrná hodnota radonu v domácnostech pohybuje okolo  $118 \text{ Bq/m}^3$ , patříme mezi země s nejvyšším obsahem radonu v domácnostech.[1] Tato zvýšená hodnota je díky našemu podloží na území ČR (viz obr. č. 13) WHO (světová zdravotnická organizace) udává limit na  $100 \text{ Bq/m}^3$ . Díky jeho vyšší hustotě radon klesá k zemi a zdržuje se nejčastěji ve sklepeních domů. Některé prameny spodních vod obsahují v sobě rozpuštěný radon a jsou lehce radioaktivní. Tato radonová voda se využívá v radioterapii k léčení nemocí spojených s pohybovou soustavou. Největší lázeňské centrum s radonovou vodou se nachází v Jáchymově (viz. Obr. č.14) Využívají stále aktivního uranového dolu Svornost odkud vzlíná voda s rozpuštěným radonem.



Obr. 13 Mapa radonového rizika vypracovaná společností SÚRO, popisující riziko výskytu radonu v domácnostech. In: Mapa radonového rizika [online]. [cit. 2020-03-18] Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/prirodnioz/radonove-mapy/prognozniv.gif>



Obr. 14 Vodovod pro radonovou vodu v lázních Jáchymov. In: radonová voda [online]. [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <https://www.laznejachymov.cz/cim-lecime/>

### 2.4.1. Detektory radonu

K detekci radonu v domácnostech se využívají radonové detektory.

**První typ** detektorů je pasivní, také nazývaný stopový. Skládá se z dvou částí. První je polystyrénová nádoba sloužící k difuzi plynu. Druhá část je kousek speciálně ošetřeného fotografického filmu, jenž dokáže zachytit stopy ionizujícího záření. Detektory se rozmístí po domácnosti, vždycky se měří několik místností. Následně se film po roce měření vyvolá a v laboratoři se spočítá počet naměřených částic.

Těž pasivní typ, který ovšem využívá jinou technologii je elektretový detektor. Skládá se z kladně nabitého teflonového disku uzavřeného ve vodivé komoře. Dopadající částice zbaví disk části náboje. Při vyčítání hodnot se porovnává hodnota náboje na disku před a po měření. Pokles náboje odpovídá počtu zachycených částic.

**Druhý typ** detektorů je aktivní. Detektor do sebe větrákem nasává vzduch, obsahující dceřiné produkty rozpadu radonu nebo radon samotný. Dostávají se do měřicí komory, kde k vyčítání slouží scintilátor<sup>6</sup> napojený na fotonásobič.

Měření radonu před samotnou výstavbou domu je ze zákona povinné. U starých domů se provádí zpětné měření pomocí detektorů. Naměřené hodnoty jsou silně ovlivněny podmínkami v domě. Pokud jsou prostory větrány, tak koncentrace velmi rychle klesá. Také roční období a čas během dne hraje roli, jelikož přísun radonu je závislý na podtlaku uvnitř domu, který se vyvíjí podle rozdílu vnitřní a vnější teploty. Pokud průměrné naměřené hodnoty přesahují limit  $400\text{Bq/m}^3$ [1], tak se do základů domu umístí speciální kovová vrstva (folie pokovená hliníkem) která pak zamezuje vztlínání radonu z podloží.

## **2.4.2. Efekty radonu na lidský organismus**

Radon jako zdroj zabírá až 50 % celkové roční dávky radiace našeho okolí.[1] Ale můžeme ho vdechnout, je to inertní plyn, tudíž není přímo nebezpečný, skoro všechn opět vydechneme. Rizikem jsou jeho dceřiné produkty (Příloha A), které se vážou na prachové částice, aerosoly a následně se zachycují na sliznicích dýchacích cest nebo přímo v plicích samotných. Produkty se rozpadají v těsné blízkosti buněk. Vyzářená jádra hélia (alfa záření), která mají silné ionizační účinky poškozuji molekuly DNA, kde dokáží ničit iontové vazby. Poškozené DNA, jeho následná chybná oprava vedou k nekontrolovatelnému dělení buněk, tudíž k rakovině. A díky tomuto, patří radon celosvětově jako 2. nejčastější důvod rakoviny plic, hned po kouření.[2]. Pro hodnoty vyšší než  $150\text{Bq/m}^3$  je statisticky dokázáno riziko rakoviny plic.[1]

---

<sup>6</sup> Scintilátor je látka sloužící k detekci energetických částic. Prolétající částice interaguje s prostředím a při průchodu je vyzářen malý záblesk světla. Nejpoužívanější materiál scintilátoru je látka ZnS.

## 2.5. SAFECAST bGeige nano

Společnost SAFECAST vznikla po 11. březnu 2011, tudíž hned po jaderné havárii elektrárny Fukušima<sup>7</sup> na pobřeží Japonska. Základ projektu je dobrovolnická činnost. Detektor pořídíte jako kit, který se podle návodu sestaví a pak je připraven k měření.

Jádrem celého měřicího přístroje je Geiger-Muellerova trubice. Tato trubice se skládá ze dvou elektrod nabitých na vysoké napětí 475–675 V. Dutina je vyplněná mixem plynů Neon + halogen o tlaku 0,1 atmosféry. Halogen v trubici slouží k potlačování velkých lavin<sup>8</sup>, které by přehltily čítač a další částice by nebyly detekovány. Při průletu ionizujícího záření trubicí dochází k ionizaci molekul plynu, které díky silnému elektrickému poli ionizují okolní molekuly. Vzniklá elektronová lavina, je následně detekována jako malý napětový impuls. Tenké stěny trubice umožňují průlet všem druhům záření. Ale v našem případě měříme pouze gama radiaci, jelikož ostatní záření je krytem odstíněno. Všechna naměřená data převádí počítač Arduino, který hodnoty zobrazuje na displeji v jednotkách CPM (counts per minute) nebo  $\mu\text{Sv/hodinu}$ . Kit je vybaven GPS přijímačem, který každých 10 sekund zaznamená aktuální zeměpisnou polohu. Data jako je: poloha, přesný čas ve formátu UTC, naměřená dávka jsou společně zapsány na SD kartu. Detektor je napájen lithiovou nabíjecí baterií, která vydrží napájet detektor 40 hodin. Celý kit (viz obr. č. 15 a 16) je uložen v ochranném polykarbonátovém obalu, chránící jemnou elektroniku uvnitř. Díky němu můžeme brát detektor všude s sebou. Detektor je též vybaven malým reproduktorem, co specificky tikne při každém průletu částice. Měření můžeme provádět s detektorem na dně batohu, v kufru auta, na zemi v autobusu. Důležitá je orientace detekční mřížky, pokud by nesměrovala k zemi došlo by k odstínění, které by se při vyhodnocování muselo započítat. O českou distribuci detektorů se stará SÚRO (státní ústav radiační ochrany). Zpracovávají naměřená data od uživatelů. Následně jsou data ukládány na mezinárodní stránky do interaktivní mapy celého světa. <http://safecast.org/tilemap/>

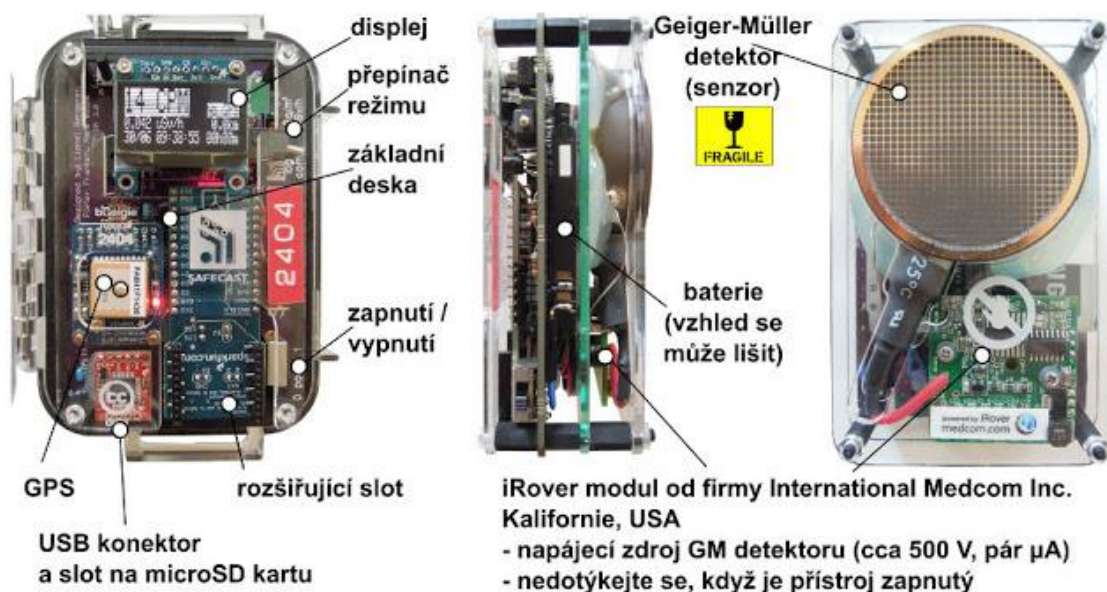
---

<sup>7</sup> Jaderná elektrárna poškozená vlnou tsunami, kterou následoval výbuch vodíku a do okolí elektrárny uniklo desítky tisíc TBq radioizotopů vzniklých při štěpení uranu.

<sup>8</sup> Pojmem lavina se rozumí jev, který způsobuje prolétající nabitá částice okolnímu plynu. Částice při průletu ionizuje své okolí a vznikají další volné ionty, které dokážou také ionizovat další částice a tak vytvářet pomyslnou lavinu



Obr. 16 Kit mimo pouzdro, pouzdro samotné má vyřízný otvor v gumové vystýlce k snížení stínění. [online]. [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/faq/detektor-safecast-bgeigie-nano-technicke-parametry>



Obr. 15 Pohled na elektroniku detektoru, první část obrázku-detektor již v provozu, vypisuje hodnoty a ukládá GPS polohu. Na třetí části vidíme G-M „pancake“ (palačinkovou) trubici, konkrétně vnější elektrodu. [online]. [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/faq/detektor-safecast-bgeigie-nano-technicke-parametry>

### 3. PRAKTICKÁ ČÁST

#### 3.1. Měření radonu s MX-10

Experiment jsem provedl na několik částí.

Cíl první části byl nachytání dceřiných produktů rozpadu radonu na filtr.

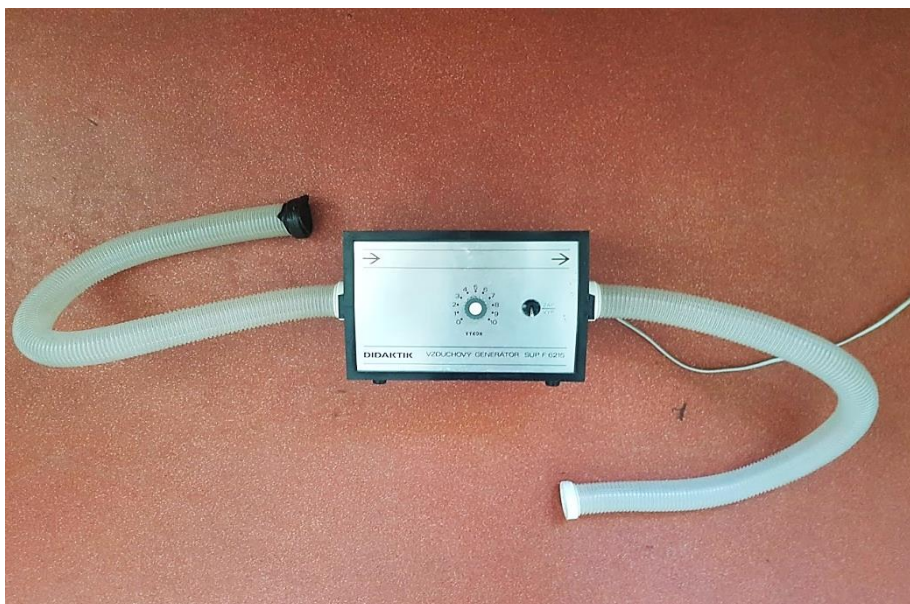
Cíl druhé části byla příprava měření a zahájení samotného měření.

Cíl třetí části bylo vyhodnocení naměřených dat a vzniklých histogramů.

##### 3.1.1. Získávání rozpadových produktů

###### Generátor vzduchu

Produkty rozpadu jsem zachytával pomocí generátoru vzduchu (viz obr. č. 17). Tato školní pomůcka má dva vstupy-hadice. První hadice s černou koncovkou nasává vzduch, zatímco druhá hadice jej vyfukuje. K vyhodnocování dat jsem potřeboval vědět kolik kubických metrů vzduchu dokáže generátor během měření profiltrovat. Měření průtoku jsem provedl funkčním modelem Pitotovy trubice připojené na Vernier tlakové čidlo (Gas Pressure Sensor). Na (Příloha B) je vidět hlavice Pitotovy trubice, kterou jsem následně vnořil do výstupní hadice generátoru. Tato trubice slouží k určování rychlosti letadla. Trubice vyčnívá z trupu křídla na letadle (Příloha B), kde je v přímém toku vzduchu. Vzduch vstupuje do trubice a na konci je měřen rozdíl mezi atmosférickým tlakem a tlakem vzniklým nápořem toku vzduchu na trubici. Data ze sensoru jsem ukládal pomocí programu Vernier Logger Lite. Hodnoty ze vzniklých dvou rovin v grafu (viz graf č. 2) jsem zprůměroval a použil ve výpočtu průtoku vzduchu.



Obr. 17 Školní generátor vzduchu

Hodnota atmosférického tlaku během měření byla **97,19 kPa** a tlak v hadici dosahoval **98,14 kPa**. Po dosazení do Bernoulliho rovnice pro rychlost toku:

$$v^2 = \frac{2(p_2 - p_1)}{\rho}$$

$\rho$  ... hustota vzduchu  $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

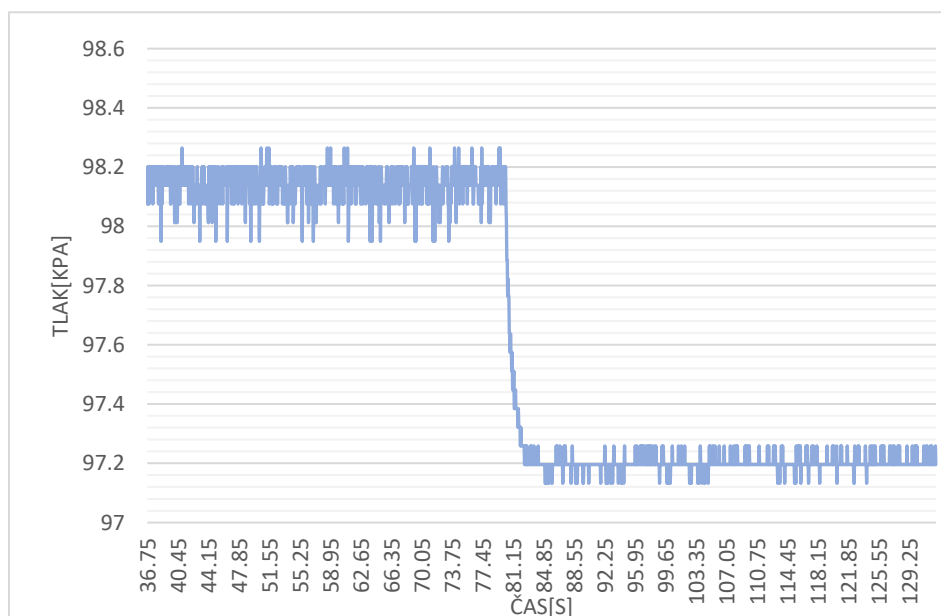
$p_1$  ... atmosférický tlak [Pa]

$p_2$  ... tlak v trubici [Pa]

$$v = 40 \text{ m/s}$$

Průměr výstupní hadice generátoru byl **37 mm**

$$Q_v = S * v$$



Graf. 2 Závislost tlaku na čase během měření pomocí Pitotovy trubice

$S$  ... průřez hadice v  $\text{m}^2$

$v$  ... rychlost vzduchu

$$Q_v = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$$

Průtok vzduchu za jednu sekundu následně stačí vynásobit počtem sekund, během kterého generátor vysával a celkový objem profiltrovaného vzduchu mi vyšel na:

$$V = Q_v * t$$

$$V = 26 \text{ m}^3$$

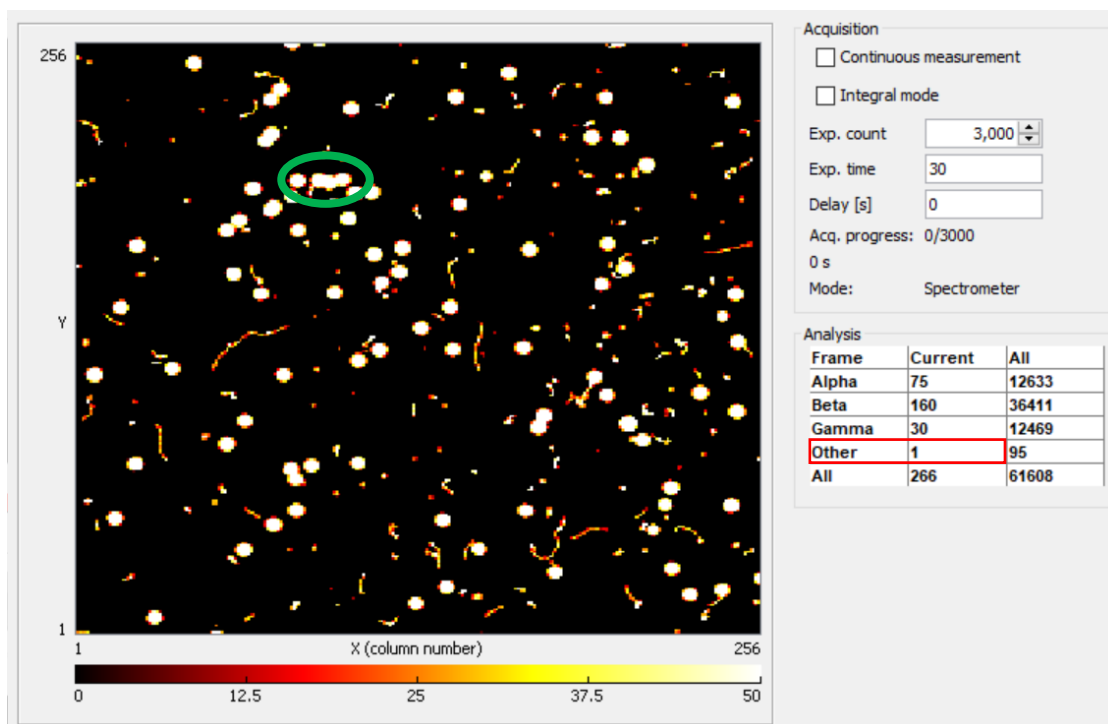
## Sklep školy

Měření proběhlo 23. 1. 2020. Počasí a okolní teplota má též vliv na koncentraci radonu. Venkovní teplota vzduchu byla okolo 2 °C. Vysoký rozdíl teplot znamená větší podtlak v budově školy, tudíž i vyšší koncentraci radonu. [1] Generátor jsem umístil do sklepu našeho gymnázia. Škola byla postavena roku 1897 bez jakékoliv radonové ochrany. Proti radonu bojuje pomocí přetlaku vzduchu v budově. Celý sklep je vybaven ventilátory, které táhnou vzduch z budovy skrz sklep a ven mimo budovu. Mnou měřená část sklepu nebyla aktivně využívána a sloužila pouze jako sklad. Neměla ani ventilátor, který by zajišťoval proudění vzduchu. A tak byla ideální místností pro měření, ve které se radon mohl volně hromadit. Generátor vzduchu jsem umístil na zem. Na vstupní hadici (s černou koncovkou) jsem umístil filtr. Filtr byl zhotoven z 2 vrstev papírového kapesníku připevněného gumičkou. Použil jsem papírový kapesník, protože je dostatečně prodyšný, tak aby neomezoval průtok vzduchu. Přesto dokáže zachytit velké množství částic. Lepší volbou by byl specializovaný filtr na filtrování pevných částic zvaný HEPA filtr. Druhou hadici generátoru jsem dal mimo místnost, abych předešel víření vzduchu a snížení celkové koncentrace. Spustil jsem sání vzduchu a po 10 minutách, jsem generátor vypnul. Dával jsem obzvlášť pozor na hadici s připevněným filtrem. Důležité bylo šetrné zacházení s filtrem, jelikož je jednoduché nachytané rozpadové produkty odfouknout nebo sklepat mimo filtr. Filtr jsem opatrně oddělil od hadice a rychle přenesl do měřicí krabice s kamerou. Rychlost byla také důležitá, protože aktivita částic na filtru klesá velmi rychle. Měření jsem spustil během 2 minut od ukončení nasávání vzduchu.

### 3.1.2. Měření s kamerou MX-10

Filtr jsem přemístil do kartónové krabice, která sloužila jako ochranná komora pro měření. Uzavřená krabice zajišťovala, že několika hodinová expozice proběhne bez vlivů okolí – náhodné zavadění o částicovou kameru nebo otevřené okno, které mohlo zachycené pevné částice z filtru odfouknout. Následně jsem umístil kameru na filtr. A to tak, že křemíkový senzor kamery byl ve vzdálenosti několika milimetrů od filtru, abych se maximálně vyhnul stínění vzduchem, který dolet alfa záření značně snižuje. A následně jsem spustil měření v programu Pixelman Simple Preview. Nastavení měření bylo následující:

**Čas jednotlivých expozic** byl 30 s. Poměrně dlouhé expozice snížily počet výsledných snímků v celém měření. Tyto dlouhé expozice způsobily, že vyčítací program v prvních pár minutách neměřil správný počet alfa částic. Protože alfa částice mají tvar blobu, tak se jednoduše překryjí a následný vzniklý tvar program nevyhodnotí jako alfa záření (viz obr. č. 18). Kde nastalo mnou zmiňované překrytí stop. Program následně započítal vzniklý tvar jako typ "Other" místo 3 alfa částic.



Obr. 18 Ukázka vzniklé chyby během měření. Vlastní obrázek

**Počet expozic** byl nastaven na 3000 snímků. Tato doba po přepočtu na hodiny:

$$\frac{3000 \times 30s}{3600s} = 25 \text{ hodin}$$

Během prvních 10 minut měření kamera zachytila v průměru 128 částic alfa

Během posledních 10 minut měření kamera zachytila v průměru 2 alfa částice.

Tudíž 25 hodin byla dostatečně dlouhá doba, během které aktivita filtru a jím zachycených částic klesla zhruba o 98 %. Zbývá 2 % nemá smysl nadále měřit. Mluvím zde o aktivitě v oboru alfa záření. Filtr na konci měření nadále vydával měřitelné dávky beta a gama záření, ale tyto dva typy v mojí práci neslouží k vyhodnocování rozpadu radonu, tak jsem je mohl při výpočtech vypustit.

**Zpoždění** jednotlivých snímků nebylo potřeba, a tak jsem nastavil 0 sekund.

### 3.1.3. Výsledky měření

Všechna data jsem zpracovával v programu excel. Program Pixelman Simple Preview naměřená data vyexportuje v tabulkách excel. Vznikají tak tabulky s tisícovkami řádků. Hlavním výstupem mého měření je několik grafů, pomocí kterých lze potvrdit přítomnost radonu.

**První** z nich se zaměřil na poločas přeměny nachytných produktů. Využil jsem naměřená data četnosti částic na jednotlivých snímcích. Na filtru se nachází několik izotopů vzniklých z rozpadu radonu. Tak nemůžeme s přesností určit poločas přeměny jednotlivých izotopů, pouze odhadnout celkový poločas přeměny, neboli za jak dlouhou dobu dojde k přeměně pooloviny částic na filtru. Poločas přeměny se řídí rovnicí:

$$N_t = N_0 * e^{-\lambda t}$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T}$$

$N_t$  ... počet nepřeměněných jader

$N_0$  ... celkový počet jader na začátku

$t$  ... celkový čas děje

$T$  ... poločas přeměny

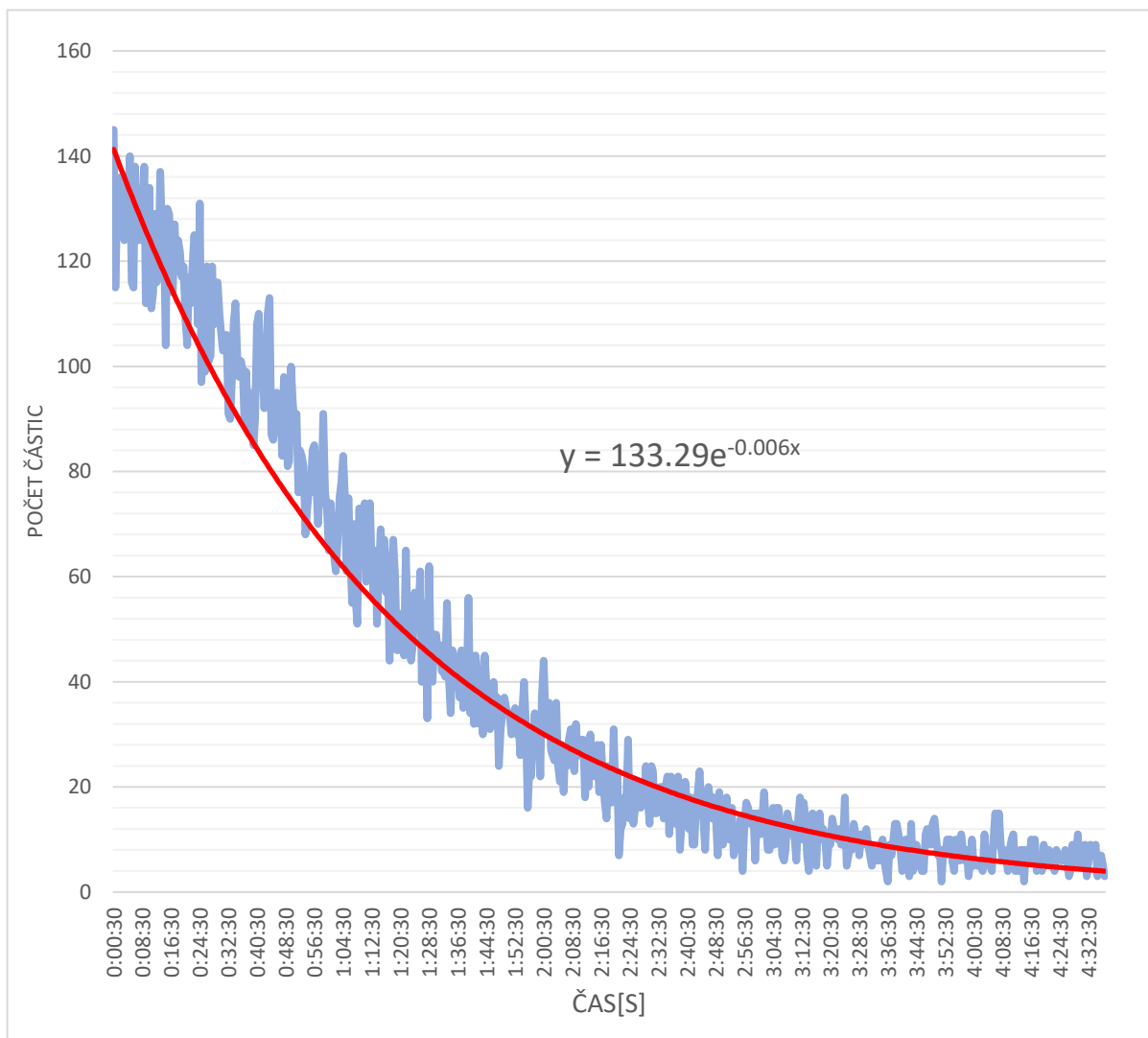
$\lambda$  ... přeměnová konstanta

Pro získání hodnoty přeměnové konstanty  $\lambda$  musím z dat vytvořit graf. Na osu Y jsem vynesl četnost alfa částic zachycených kamerou. Na osu X jsem vynesl čas měření. Vzniklé body připomínají křivku. Chování radioaktivní přeměny můžeme přirovnat k exponenciální funkci. Vzniklý graf (viz. Graf č.3) jsem nafitoval danou funkcí. Následně jsem nechal exceleem vypsát rovnici odpovídající exponenciále. Rovnice vypadá takto:  $y = 133.29e^{-0.006x}$ . Hodnota  $\lambda$  je tedy 0,006. Záporné znaménko a proměnou  $x$  jsem vypustil, jelikož proměnná  $x$  v rovnici zastupuje celkový čas děje  $t$ . Po upravení předešlého vztahu jsem dostal:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

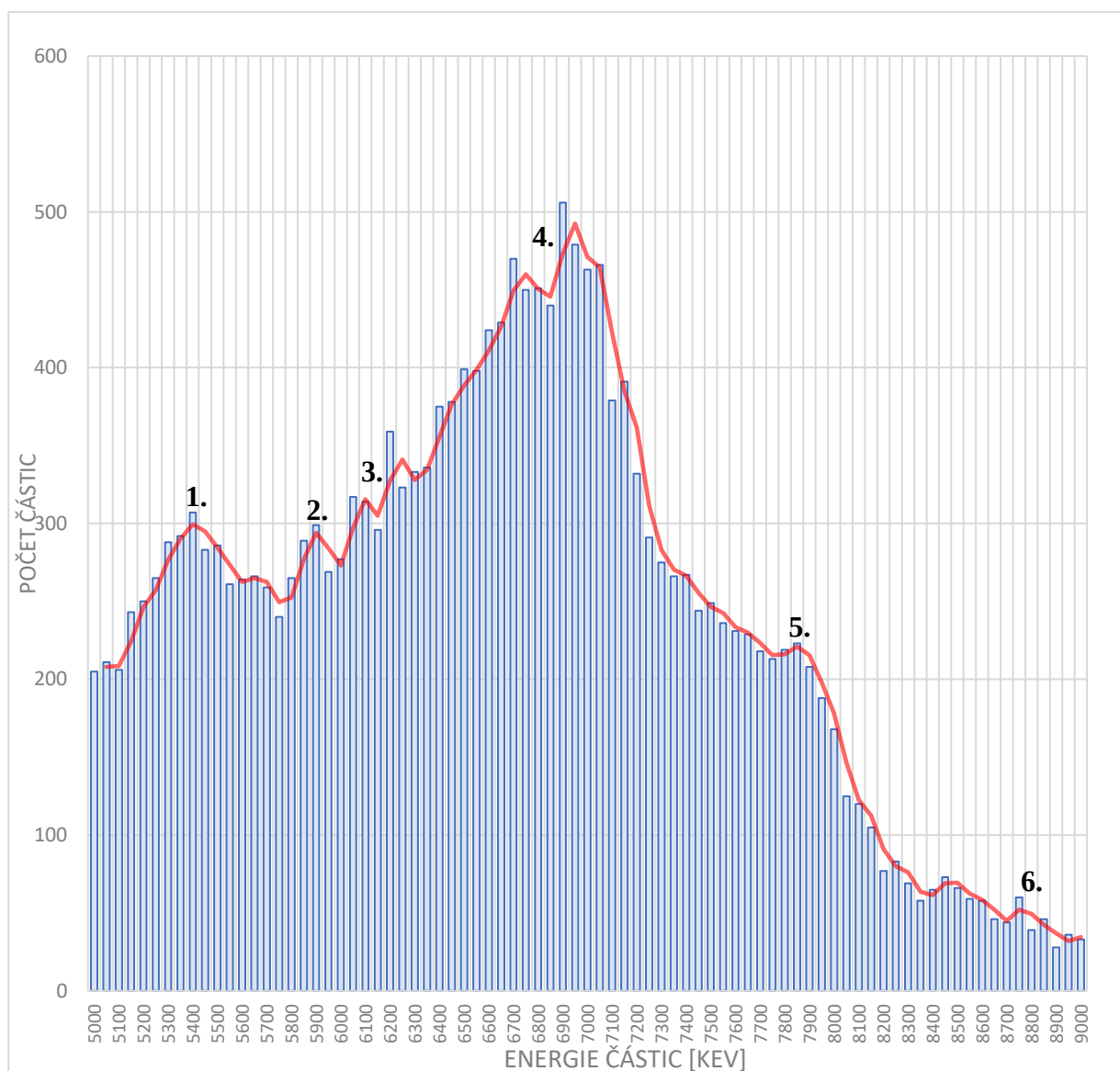
$$T = 116 \text{ s}$$

Po dosažení přeměnové konstatny do vzorce vychází poločas přeměny na 116 s. Tato krátká doba přeměny dokazuje, že moje nastavení délky expozice v druhé části 3.1.2 bylo více než dostačující. Tato krátká doba rozpadu je způsobená vysokým počtem izotopů Polonia. Přesněji izotopy 214, 216, 218, které mají velmi krátký poločas přeměny (viz. Příloha A)



Graf. 3 závislost počtu detekovaných částic na čase. Vlastní graf.

**Druhý** a ten hlavní je histogramem energií alfa částic zachycených kamerou. Vzniklý histogram ukazuje nerovnoměrné rozdělení energií částic. Graf (viz Graf č.4) je závislost počtu částic na absorbované energii. Jednotlivé sloupce histogramu mají rozměr 50 keV. To znamená, že hodnoty v rozmezí např. 5000-5050 keV jsou započteny do jednoho sloupce. Zvolil jsem tento rozměr sloupců, jelikož byl nejpřehlednější. Graf byl také proložen klouzavým průměrem pro 2 období. Při čtení histogramu musíme počítat s nepřesností naměřených hodnot. Kamera není nakalibrována natolik, abychom mohli odečítat přesné hodnoty v řádu jednotek. Největší nepřesnost je způsobená stíněním prostředí, pokud bychom měřili ve vakuu, výsledky by byly přesnější. Produkty se nenacházely na povrchu čipu kamery, tudíž jsou odstíněny i vzduchem mezi čipem a filtrem. Produkty rozpadu nemusí být na povrchu filtru, ale například uprostřed, kde jsou odstíněny filtrem samotným. Z toho důvodu jsou na ose X vyneseny hodnoty energií po 100 keV. Na grafu vidíme několik znatelných peaků<sup>9</sup>.



Graf. 4 Histogram energií částic alfa. Vlastní graf.

<sup>9</sup> Peak-označení lokálního maxima hodnot. Název peak je hojně využíván při popisu histogramů v částicové fyzice.

**Peak č.1** má přibližnou energii 5,3 MeV a je výsledkem rozpadu izotopu  $^{210}\text{Po}$ . Tento produkt má délku poločasu rozpadu 138,4 dne. Izotop patří do rozpadové řady Radonu 222.

Následující 2 peaky jsou díky nepřesné kalibraci pouhé odhady.

**Peak č.2** mohl vzniknout díky rozpadu izotopů  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{212}\text{Bi}$ . Energie toho peaku je přibližně 5,9 MeV. Nižší zaznamenaná energie mohla být výsledkem odstínění alfa záření filtrem-k rozpadu mohlo dojít uvnitř filtru a alfa záření pak částečně předalo svoji energii.

**Peak č.3** s přibližnou energií 6,1 MeV odpovídá rozpadu izotopů  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{212}\text{Bi}$ .

**Peak č.4** je nejvyšším peakem celého grafu. Má přibližnou energii 6,8 MeV odpovídá rozpadu izotopů  $^{216}\text{Po}$ ,  $^{211}\text{Bi}$ . Polonium 216 je dceřiným produktem rozpadu Radonu 220. Bismut 211 je dceřiným produktem rozpadu Radonu 219.

**Peak č.5** má přibližnou energii 7,7 MeV a odpovídá rozpadu izotopu  $^{214}\text{Po}$ . Tento izotop má poločas rozpadu 164  $\mu\text{s}$  a patří do rozpadové řady Radonu 222.

**Peak č.6** má přibližnou energii 8,7 MeV a odpovídá rozpadu izotopu  $^{212}\text{Po}$ . Tento izotop s poločasem rozpadu 0,3  $\mu\text{s}$  patří do rozpadové řady Radonu 220.

Tyto výsledky nepřímě dokazují výskyt radonu 222 ve sklepu školy. Jelikož rozpadové produkty patří do řad, ve kterých se vyskytuje i izotop radonu, tak se ve sklepě musel předtím také nacházet. Zbylé peaky naznačují přítomnost vzácnějších izotopů radonu. A to radonu 220 s poločasem rozpadu 55,6 s, radonu 219 s poločasem rozpadu 4 s.

Celková předaná energie všech částic během 25hodinového měření byla  $2,2 \cdot 10^{11}$  eV. Po převedení to je  $3,5 \cdot 10^{-7}$  J. Energie také odpovídá 1/30 energie urychleného protonu v LHC.[5]

Z naměřených dat jsem se pokusil o velmi hrubé odhadnutí Bq/  $\text{m}^3$  ve sklepě školy. Začal jsem spočítáním plochy filtru. Filtr měl průměr 37 mm.

$$V = \pi * r^2$$

$$V = 0,0011\text{m}^2$$

Následně jsem spočítal plochu křemíkového čipu na kameře. Hrana čipu měla velikost 14 mm.

$$V = a^2$$

$$V = 0,00020\text{m}^2$$

Kamera při měření leží v těsné blízkosti filtru a křemíkový čip tak zabírá 18 % plochy jedné strany filtru. Pro celkovou aktivitu jsem musel spočítat počet rozpadů na celém filtru. Během prvních 10 minut měření, kdy byl vzorek nejaktivnější, na čip kamery dopadlo za 1 minutu v průměru 911 částic. Během jedné sekundy na ploše čipu došlo k 15 rozpadům. Při přepočtu na jednu stranu filtru došlo k 84 rozpadům za sekundu. Po přičtení druhé strany filtru vychází aktivita filtru na 168 Bq/s. Toto číslo ještě musíme vydělit objemem profiltrovaného vzduchu, mnou vypočítaná hodnota vychází na 6,5 Bq/ $\text{m}^3$  což je 18x méně než průměrná hodnota aktivity způsobené radonem v domácnosti. Výsledek naznačuje, že tento způsob měření radonu nelze využít k měření hodnot radonu v jednom  $\text{m}^3$  vzduchu.

## 3.2. Měření radioaktivního pozadí s SAFECAST bGeige nano

Provedl jsem celkem 4 měření. Všechna měření jsem prováděl stejným způsobem. Pohyboval jsem se pěšky, s detektorem na dně mého batohu, s mřížkou směřující k zemi. Data jsem zpracoval v programu QGIS. A následně za spolupráce se SÚRO nahrál i na oficiální mapu společnosti SAFECAST.

### 3.2.1. Program QGIS

**První měření** (viz obr. č. 19) proběhlo 26.10.2019 v okolí nádrže Seč. Na 1. označeném místě je názorně vidět, schopnost vody odstínit radiaci. Díky této vlastnosti se využívá mimo jiné k odstínění radiace v jaderných elektrárnách a k odstínění při cestách do vesmíru, když kosmonauti prolétají Van der Allenovými pásy<sup>10</sup>. Na označeném místě jsme brodili přítok nádrže. Na 2. označeném místě jsme přecházeli vodní hráz, která měla cestu dlážděnou žulou, žula má jako vyvřelá hornina větší obsah radionuklidů, díky ní vidíme zvýšenou dávku záření. Průměrná hodnota naměřeného záření byla 50,6 CPM, v dávkových jednotkách odpovídá hodnotě 0,144 $\mu$ Sv/h.

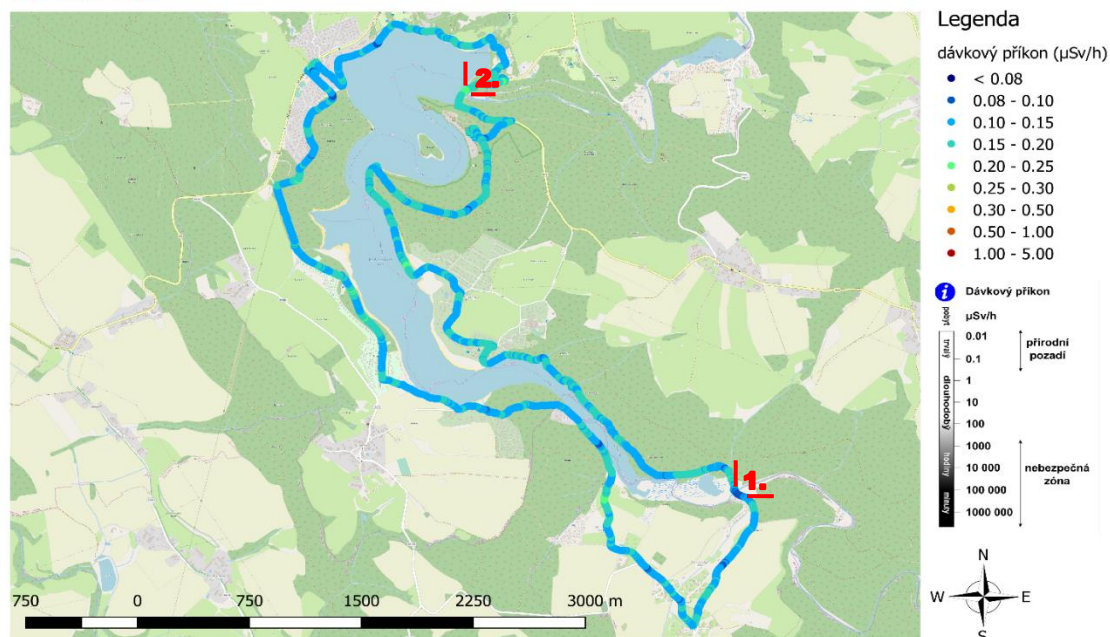
**Druhé měření** (viz obr. č. 20) proběhlo 27.10.2019 v okolí města Seč a Běstviny. Průměrná naměřeného záření byla 47,4CPM, v dávkových jednotkách odpovídá hodnotě 0,135 $\mu$ Sv/h.

**Třetí měření** (viz obr. č. 21) proběhlo 27.12.2019 v Krkonoších. Trasa vedla z Horních Míseček na Vrbatovu boudu. Celá cesta byla pokrytá půlmetrem sněhu, který odstínil část záření pocházejícího ze země. Naopak zvýšená nadmořská výška v průměru 1240 m. n. m. napomohla svojí radiační dávkou, která zvedla naměřené hodnoty na průměrnou hodnotu radiačního pozadí, které se vyskytuje v ČR. Průměrná hodnota naměřeného záření byla 44,7CPM, v dávkových jednotkách odpovídá hodnotě 0,127 $\mu$ Sv/h.

**Čtvrté měření** (viz obr. č. 22) proběhlo 30.12.2019 cestou ze Žďáru do Broumovských stěn a skončilo v Hronově. Průměrná hodnota naměřeného záření byla 40,9CPM, v dávkových jednotkách odpovídá hodnotě 0,117 $\mu$ Sv/h. Na pravé straně mapy vidíme oblast s nižší radioaktivitou. Tato oblast je skalní bludiště Broumovských stěn. Tamější hornina je pískovec, vzniklá sedimentací, díky které neobsahuje těžké radionuklidy. Pískovec pak sám o sobě slouží jako stínící materiál. Největší zásluhu na odstínění má ten pod našima nohama.

---

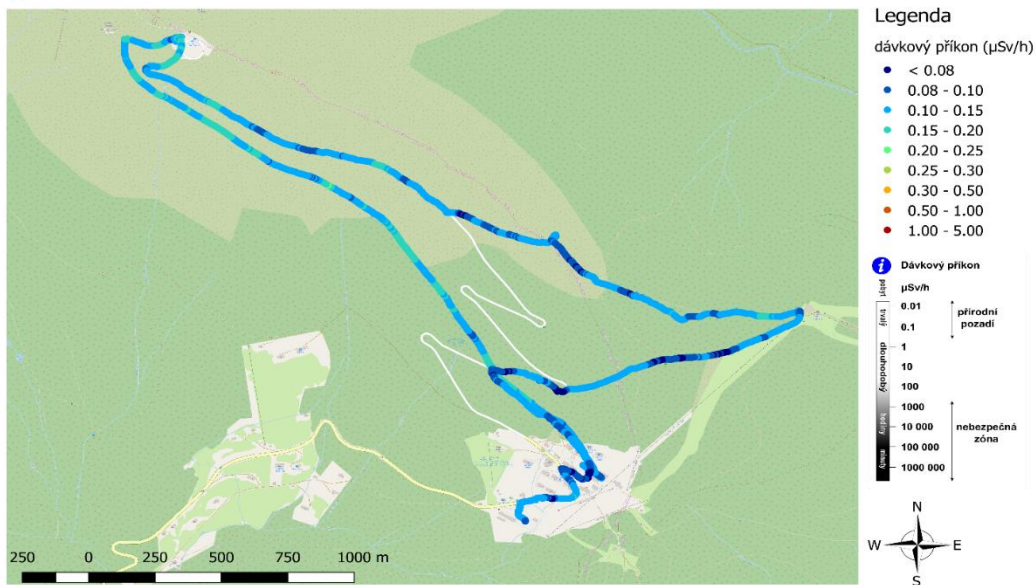
<sup>10</sup> Místa ve vesmíru s vysokou radiací. Zóny s vysokoenergetickými nabitými částicemi ze slunečního větru, které jsou zachycené magnetickým polem Země.



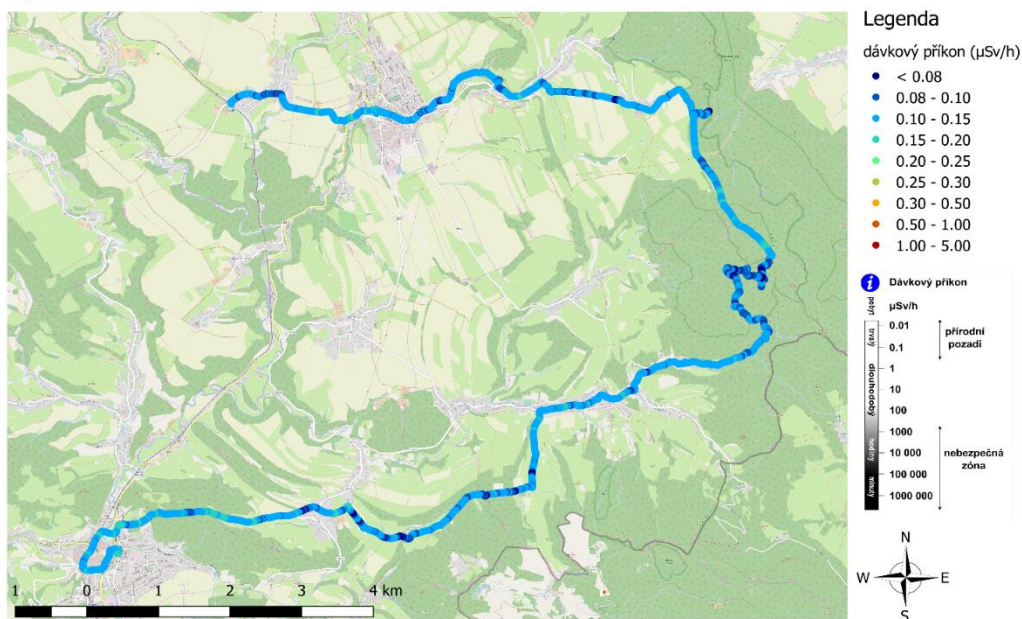
Obr. 19 Trasa okolo vodní nádrže Seč. Vlastní mapa.



Obr. 20 Trasa vedoucí přes města Seč a Běstvina. Vlastní mapa.



Obr. 20 trasa z Horních Míseček na Vrbatovu chatu v Krkonoších. Vlastní mapa.

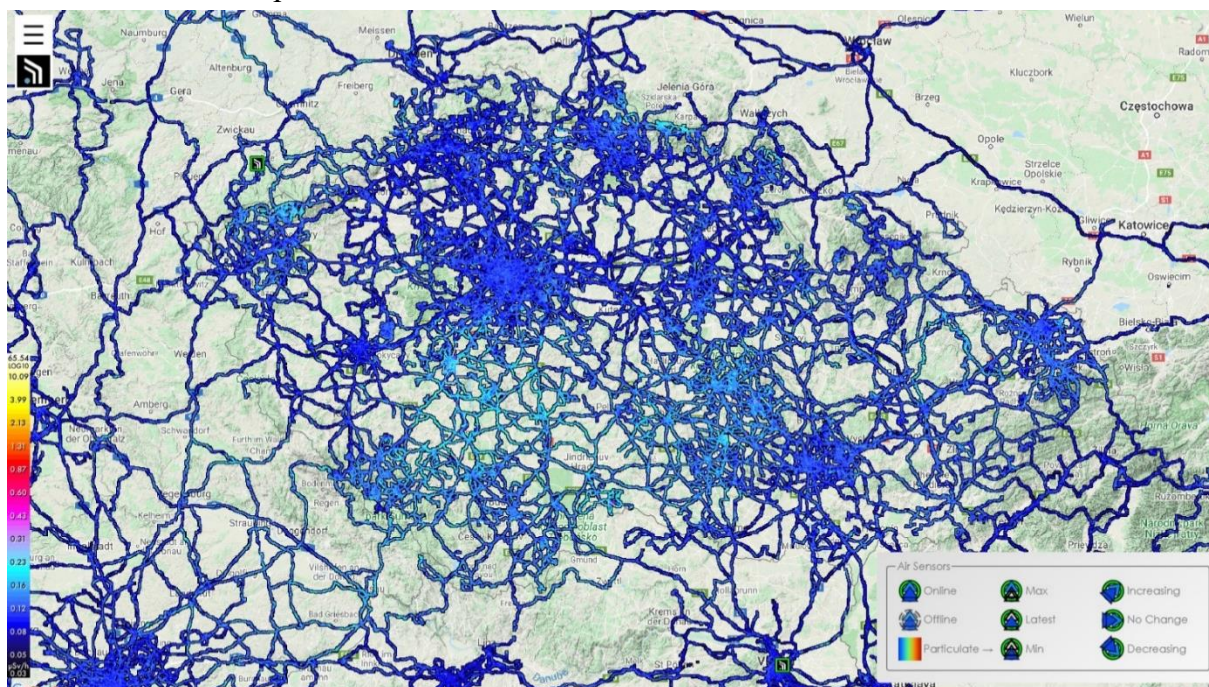


Obr. 19 rasa vedoucí ze Žďáru nad Metují přes Broumovské stěny do Hronova. Vlastní mapa.

### 3.2.2. Spolupráce se SÚRO

SÚRO-Státní Úřad pro Radiační Ochranu zaštiťuje detektory Safecast pro ČR. Komunikace probíhá přes mail, kde po vyplnění dotazníku ohledně umístění detektoru a jeho výšce nad zemí, jsou data během několika dní zpracována a následně nahraná na stránky mezinárodní organizace **Safecast**. Organizace vznikla v roce 2012 po jaderné havárii elektrárny Fukushima Daiichi na pobřeží Japonska. Pomocí malých přenosných detektorů, které byly lehce dostupné veřejnosti, zmapovali velmi přesně hodnoty radioaktivního spadu po havárii. Safecast data zpracovává přímo na stránkách, kde vyplníte dotazník, přiložíte data a během několika dní jsou zpracovány a nahrány na interaktivní mapu celého světa na stránkách <http://safecast.org/tilemap/>

Vytvořil jsem snímek mapy ze zmíněných stránek celé ČR. (viz obr. č. 23) Na levé straně se nachází legenda radiální dávky. Barevné cestičky jsou práce stovek lidí, kteří cestovali s detektorem. Na mapě se nachází i mnou naměřená data.



Obr. 21 mapa ČR na které vidíme jednotlivé cestičky uživatelů. Vlastní snímek obrazovky.

## 4. ZÁVĚR

Cílem mojí práce bylo zjistit, zda jsem pomocí kamery MX-10 schopen potvrdit přítomnost radonu ve sklepech školy, aniž bych kameru do sklepa položil. Z naměřených dat jsem vyhodnotil, že se ve sklepech nachází všechny 3 izotopy radonu. Radon 222, Radon 220, Radon 219. Porovnal jsem energii předané energie k energii urychleného protonu v LHC, která vyšla jako 1/30 energie protonu. Pak jsem vyzkoušel přepočítat naměřené hodnoty na Bq/m<sup>3</sup> a zjistil jsem, že moje metoda měření není schopna tímto přepočtem dávat správné hodnoty. Protože výsledky výpočtu jsou skoro dvacetinásobně menší než průměrná hodnota v ČR. Během mojí práce jsem také přispěl do mezinárodní databáze společnosti SAFecast. Databázi radiačního pozadí v ČR zajišťuje SÚRO.

Zůstává zde prostor na zpřesnění měření kamerou MX-10. Především odstraněním chyb z měření.

Chyby vznikaly odstíněním alfa záření díky prostředí, ve kterém se měřilo. Pokud by se kamera umístila nižšího atmosférického tlaku, dolet alfa částic by vzrostl, tudíž i naměřené energie.

Stínění způsobil i materiál filtru samotného, takže další cíl by byl nalezení možnosti, jak částice z filtru dostat a následně změřit. Díky tomuto způsobu by nenastávalo stínění filtrem.

Také možnost otestování různých typů filtrů, které by mohli zvednout četnost naměřených alfa částic.

Kalibrací kamery bychom předešli chyb způsobených kamerou. Kalibrace kamery by mohla být samostatnou prací SOČ.

Dalším možným cílem je nalézt způsob měření radonu, aby se naměřená data dala přesněji převádět na Bq/m<sup>3</sup>. Tudíž vytvořit z kamery MX-10 plnohodnotný radonový detektor.

## 5. SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

|                                                                                 |        |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Obr. 1 Čip Medipix2.....                                                        | - 9 -  |
| Obr. 2 Částicová kamera. ....                                                   | - 9 -  |
| Obr. 3 Částicová kamera položená v krabici. ....                                | - 10 - |
| Obr. 4 Rozhraní aplikace Pixelman.....                                          | - 11 - |
| Obr. 5 Rozpadové řady .....                                                     | - 12 - |
| Obr. 6 Sprška částic.....                                                       | - 16 - |
| Obr. 7 Záření alfa.....                                                         | - 17 - |
| Obr. 8 Beta záření.....                                                         | - 18 - |
| Obr. 9 Gama záření.....                                                         | - 18 - |
| Obr. 10 Stopa prolétajícího mionu .....                                         | - 19 - |
| Obr. 11 Průlet mionu .....                                                      | - 19 - |
| Obr. 12 Průlet vysokoenergetického elektronu .....                              | - 20 - |
| Obr. 13 Mapa radonového rizika.....                                             | - 21 - |
| Obr. 14 Vodovod pro radonovou vodu.....                                         | - 21 - |
| Obr. 15 Pohled na elektroniku detektoru.....                                    | - 24 - |
| Obr. 16 Kit mimo pouzdro .....                                                  | - 24 - |
| Obr. 17 Školní generátor vzduchu .....                                          | - 25 - |
| Obr. 18 Ukázka vzniklé chyby .....                                              | - 28 - |
| Obr. 19 Trasa vedoucí přes města Seč a Běstvína. ....                           | - 34 - |
| Obr. 20 Trasa okolo vodní nádrže Seč .....                                      | - 34 - |
| Obr. 21 Trasa z Horních Míseček na Vrbatovu chatu v Krkonoších. ....            | - 35 - |
| Obr. 22 Trasa vedoucí ze Žďáru nad Metují přes Broumovské stěny do Hronova..... | - 35 - |
| Obr. 23 Mapa ČR. ....                                                           | - 36 - |
|                                                                                 |        |
| Graf. 1 Závislosti počtu protonů na počtu neutronů. ....                        | - 13 - |
| Graf. 2 Závislost tlaku na čase.....                                            | - 26 - |
| Graf. 3 Závislost počtu detekovaných částic na čase. ....                       | - 30 - |
| Graf. 4 Histogram energií částic alfa.....                                      | - 31 - |

## 6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] SÚRO: <https://www.suro.cz/>

[2] LEVÝ Leoš. *Radionuklidy v životním prostředí*, [online]. České Budějovice, 2008. [cit. 2020-03-25] Dostupné z: [https://theses.cz/id/ib03h0/downloadPraceContent\\_adipIdno\\_11098](https://theses.cz/id/ib03h0/downloadPraceContent_adipIdno_11098). Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zdravotně sociální fakulta.

[3] Geologické a geovědní mapy. Dostupné na webu: <http://www.geologicke-mapy.cz/radon/okres-CZ0523/#katastry>

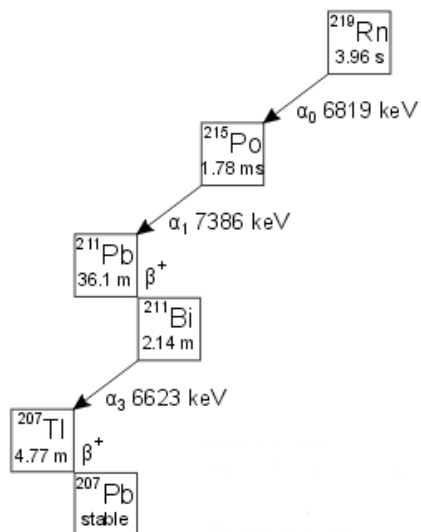
[4] ULLMAN Vojtěch. AstroNuklFyzika.[online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné y: <http://astronuklfyzika.cz/index.htm>

[5] CERN: <https://home.cern/resources/faqs/facts-and-figures-about-lhc>

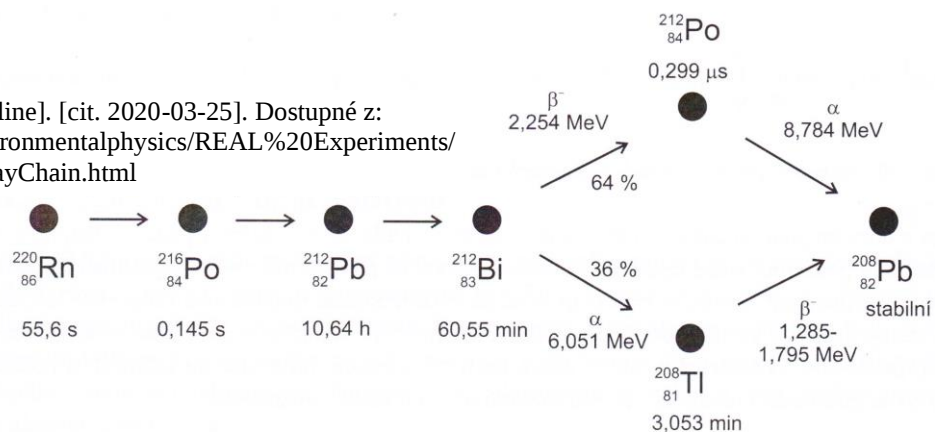
[6] VÍCHA, Vladimír. *Experimenty s pixelovým detektorem pro výuku jaderné a částicové fyziky*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016. ISBN 978-80-01-05888-6.

## 7. PŘÍLOHY

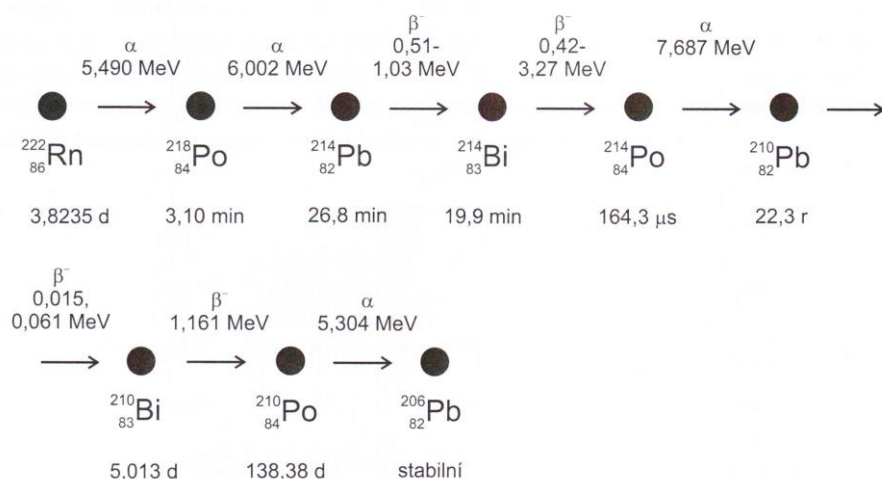
Příloha A - rozpadové řady obsahující důležité rozpadové produkty radonu



In: radon decay chain [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z:  
[http://www.nat.vu.nl/environmentalphysics/REAL%20Experiments/Radon/Radon\\_Rn219decayChain.html](http://www.nat.vu.nl/environmentalphysics/REAL%20Experiments/Radon/Radon_Rn219decayChain.html)



[6]



[6]

Příloha B - Pitotova trubice při měření průtoku generátoru vzduchu.



Vlastní obrázek



Vlastní obrázek



Ukázka reálného využití Pitotovy trubice v letectví. [online]. [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <https://www.planeandpilotmag.com/article/blocked-pitot-tubes/#.Xnu4GYhKhjR>