

# **STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST**

**Obor č. 2: Fyzika**

## **Difúzní mlžná komora**

**Alžběta Kozlová**  
**Jihočeský kraj**

**Prachatice 2023**

# STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 2: Fyzika

**Difúzní mlžná komora**

**Diffusion Cloud Chamber**

**Autoři:** Alžběta Kozlová

**Škola:** Česko-anglické gymnázium s.r.o., Třebízského 1010, 370 06  
České Budějovice

**Kraj:** Jihočeský kraj

**Konzultant:** RNDr. Květa Tůmová, Mgr. Josef Kaňkovský

Prachatice 2023

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval/a samostatně a použil/a 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 Prachaticích dne 6. 1. 2023 .....

Alžběta Kozlová

## Poděkování

V první řadě bych ráda poděkovala panu Kaňkovskému za odbornou pomoc a paní profesorce Tůmové za průběžné kontrolování práce. Dále bych chtěla poděkovat paní Marečkové z Informačního centra Jaderné elektrárny Temelín za povolení používání difúzní mlžné komory a zapůjčení jednoho z využitých uraninitů. Díky patří i Laboratoři radiační kontroly okolí ETE sídlící v Českých Budějovicích za zapůjčení některých vzorků. V neposlední řadě bych chtěla vyjádřit své veliké díky rodině za velkou podporu z psychického hlediska, která se, zvláště pak v některých chvílích, opravdu hodila.

## **Anotace**

Ve své práci SOČ jsem se zabývala difúzní mlžnou komorou. Chtěla jsem zjistit, jestli je díky ní možné pozorovat radioaktivitu některých minimálně radioaktivních vzorků. Chtěla jsem si také vyzkoušet práci se vzorky s vyšší radioaktivitou. Pracovala jsem s radiometrem a difúzní mlžnou komorou v Infocentru Jaderné elektrárny Temelín. Naměřené výsledky byly uspokojivé.

## **Klíčová slova**

Difúzní mlžná komora; radioaktivita; ionizující záření; radiometr

## **Annotation**

In my seminar work, I was dealing with a diffusion cloud chamber. I wanted to find out if radioactivity of slightly radioactive objects can be observed using this apparatus. I also wanted to work with some more radioactive samples. I was using radiometer and the diffusion cloud chamber in the information center of Temelín nuclear power station. Results obtained while measuring were satisfying.

## **Keywords**

Diffusion cloud chamber; radioactivity; ionizing radiation; radiometer

## Obsah

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| 1 ÚVOD .....                                                  | 7  |
| 2 MLŽNÁ KOMORA.....                                           | 8  |
| 2.1 Princip difúzní mlžné komory .....                        | 8  |
| 2.2 Možnosti použití.....                                     | 9  |
| 3 HISTORIE .....                                              | 9  |
| 3.1 Charles Wilson .....                                      | 9  |
| 3.2 Wilsonovi následovatelé .....                             | 10 |
| 3.3 Firma Nuledo.....                                         | 11 |
| 4 ČÁSTICE POZOROVATELNÉ V MLŽNÉ KOMOŘE .....                  | 11 |
| 4.1 Často pozorovatelné částice .....                         | 11 |
| 4.1.1 Elektrony a pozitrony .....                             | 11 |
| 4.1.2 Protony.....                                            | 12 |
| 4.1.3 Částice alfa .....                                      | 12 |
| 4.2 Vzácně pozorovatelné jevy a částice.....                  | 13 |
| 4.2.1 Miony.....                                              | 13 |
| 4.2.2 Kosmické záření .....                                   | 13 |
| 4.2.3 Záření delta .....                                      | 14 |
| 4.3 Částice z umělých zářičů.....                             | 15 |
| 4.3.1 Záření alfa.....                                        | 15 |
| 4.3.2 Záření beta minus .....                                 | 15 |
| 4.3.3 Thoriová rozpadová řada .....                           | 15 |
| 5 RADIOAKTIVNÍ PŘEDMĚTY.....                                  | 16 |
| 5.1 Minerály .....                                            | 16 |
| 5.1.1 Uranové rudy .....                                      | 16 |
| 5.1.2 Radiobaryt .....                                        | 17 |
| 5.2 Předměty.....                                             | 17 |
| 5.2.1 Uranové sklo.....                                       | 17 |
| 5.2.2 Historické letecké kompas a další podobné předměty..... | 17 |
| 5.2.3 Zdroje světla GTLS .....                                | 18 |
| 5.3 Potraviny .....                                           | 18 |
| 5.3.1 Banány .....                                            | 19 |

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| 5.3.2 Para ořechy .....                    | 19 |
| 5.2.3 Houby .....                          | 19 |
| 5.2.4 Pramenitá voda .....                 | 20 |
| 6 PRAKTICKÁ ČÁST .....                     | 21 |
| 6.1 Výzkumná otázka .....                  | 21 |
| 6.2 Použité přístroje.....                 | 21 |
| 6.2.1 Mlžná komora Phywe .....             | 21 |
| 6.2.2 Radiometr .....                      | 22 |
| 6.3 Měření radioaktivity .....             | 22 |
| 6.3.1 Aktivita .....                       | 22 |
| 6.3.2 Dávka.....                           | 22 |
| 6.3.3 Dávkový příkon .....                 | 23 |
| 6.3.4 Ekvivalentní dávka .....             | 23 |
| 6.4 Výzkumný vzorek .....                  | 23 |
| 6.4.1 Banány .....                         | 23 |
| 6.4.2 Para ořechy .....                    | 24 |
| 6.4.3 Uraninit .....                       | 24 |
| 6.4.4 Etalon $^{241}\text{Am}$ .....       | 24 |
| 6.4.5 Etalon $^{232}\text{Th}$ .....       | 25 |
| 6.5 Metody .....                           | 25 |
| 6.5.1 Měření dávkového příkonu.....        | 26 |
| 6.5.2 Pozorování pomocí mlžné komory ..... | 26 |
| 6.6 Výsledky.....                          | 26 |
| 6.6.1 Dávkový příkon .....                 | 26 |
| 6.6.2 Difúzní mlžná komora .....           | 26 |
| 6.7 Diskuze.....                           | 28 |
| 6.7.1 Dávkový příkon .....                 | 28 |
| 6.7.2 Difúzní mlžná komora .....           | 29 |
| 7 ZÁVĚR .....                              | 30 |
| POUŽITÁ LITERATURA .....                   | 31 |

# 1 ÚVOD

Většina lidí si pod pojmem radioaktivita představí jen hrůzné následky havárií jaderných elektráren v Černobylu nebo Fukušimě. Málokdo ale ví, že právě radioaktivita ovlivňuje řadu procesů v atmosféře, a dokonce nám pomáhá k vyspělejšímu světu. Neobejde se totiž bez ní téměř žádné odvětví lidské činnosti. Má své využití v medicíně, průmyslu, vesmírném výzkumu, ale i v zemědělství a mnoha dalších odvětvích.

A co to radioaktivita vlastně je? „Jedná se o jev, při kterém dochází k samovolné přeměně nestabilního atomového jádra na stabilní nebo radioaktivní jádro (SÚRAO, 2019).“ Existují dva druhy radioaktivity, přirozená a umělá. Mezi zdroje přirozené radioaktivity, která představuje zhruba dvě třetiny podílu ozáření obyvatelstva, řadíme přírodní radioaktivní pozadí, za kterým stojí radon (produkt uranové rozpadové řady). Radon může být nebezpečný v případě špatné ventilace nebo při nedostatečném větrání. Dále sem také patří záření ze Slunce a okolních hvězd, které je ale většinou zachyceno atmosférou nebo magnetosférou. Za vznikem umělé radioaktivity stojí jednoznačně člověk. Jako nejznámější příklady uvedeme radiofarmaka, rentgenová zařízení nebo jaderné elektrárny.

Radioaktivita se v posledních dvou staletích stala neoddělitelnou součástí našeho života i přes to, že ji necítíme, nemůžeme se jí dotknout a ani ji nevidíme. Existují ale zařízení, díky kterým můžeme stopy radioaktivních částic zahlédnout. Příkladem takového zařízení jsou bublinková komora nebo také mlžná komora. O mlžné komoře E. Rutherford prohlásil, že byla „nejoriginálnějším a nejúžasnejším nástrojem ve vědecké historii (The Nobel Prize, 2022).“

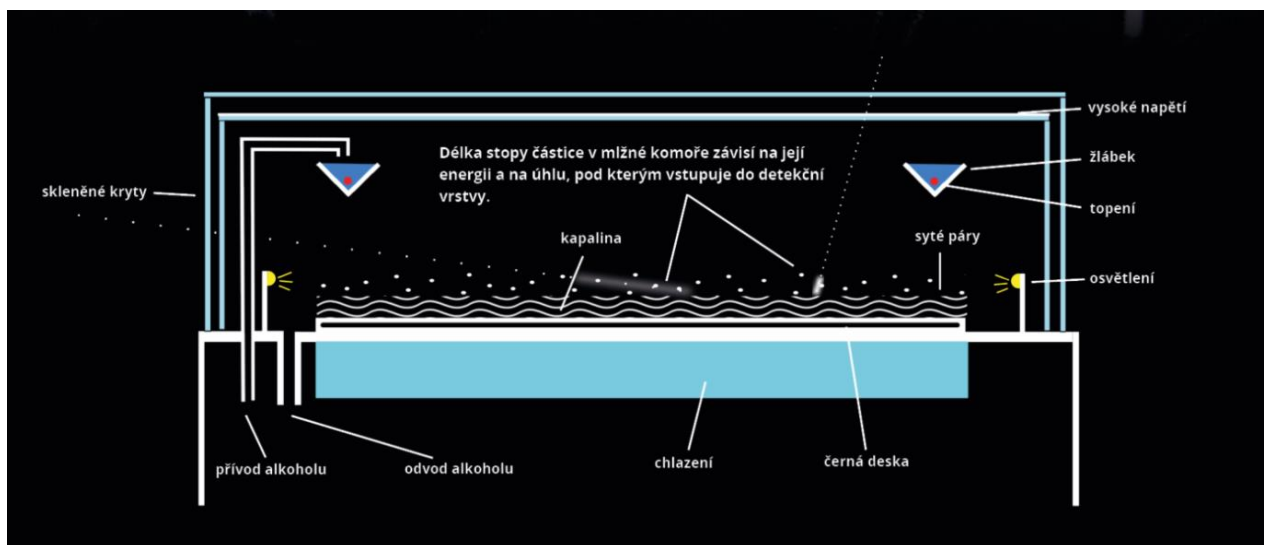
V této práci se budu zabývat difúzní mlžnou komorou. Mým cílem je zjistit, jestli pomocí tohoto přístroje můžeme odhalit i radioaktivitu předmětů, které běžně najdeme kolem nás. Také bych si chtěla vyzkoušet práci s více radioaktivními materiály. Nejprve vysvětlím princip tohoto typu mlžné komory, dále popíšu historii jejího vývoje. Také uvedu několik informací o jednotlivých pozorovatelných částicích ionizujícího záření a přidám údaje o jednotlivých předmětech experimentu. Nakonec provedu samotný experiment a celou práci zhodnotím a shrnu. Použiji difúzní mlžnou komoru umístěnou v Informačním centru Jaderné elektrárny Temelín.

## 2 MLŽNÁ KOMORA

Mlžná komora je jedním z nejstarších zařízení, které nám umožňuje pozorovat stopy ionizujícího záření<sup>1</sup>. Jedná se o takzvaný detektor, který zobrazuje přímo trajektorii částice. Dalšími takzvanými detektory jsou například plynový ionizační detektor, proporcionální, popřípadě drátová komora, Geigerův-Müllerův počítač nebo kalorimetry (Reichl a spol., 2006b). Mlžnou komoru můžeme vidět například v Informačním centru Jaderné elektrárny Temelín, Fyzikálním ústavu Akademie věd České republiky nebo na některých akcích Státního úložiště radioaktivních odpadů. Můžete si ji ale zkusit vyrobit i doma pomocí isopropylalkoholu, suchého ledu, intenzivního sdruženého světla a několika dalších běžně dostupných potřeb (Woithe, 2016). Vždy je ale třeba myslet na vlastní bezpečnost a dodržovat základní postupy při práci v chemické laboratoři.

### 2.1 Princip difúzní mlžné komory

Difúzní mlžná komora funguje na principu přesycených par<sup>2</sup>. Jedná se o komoru osvětlenou intenzivním světlem, jejíž podstavou je černá kovová deska. Vrchní část mlžné komory je vyhřívána a část spodní chlazená. K jejímu chlazení se většinou využívá suchý led. Vyhřívány jsou i průhledné části komory, aby na nich nedošlo ke kondenzaci alkoholových par. Tím by totiž mohlo být pozorování drah částic znemožněno (viz Obr. 1).



Obr. 1: Schéma difúzní mlžné komory. Dostupné z:

[https://www.fzu.cz/sites/default/files/images/mk\\_schema.png](https://www.fzu.cz/sites/default/files/images/mk_schema.png)

V difúzní mlžné komoře se jako médium používá ve většině případů isopropylalkohol. Ve vrchní (vyhřívané) části mlžné komory je zásobník, ze kterého alkohol kape do kanálku. Díky

<sup>1</sup> Záření s tak vysokou energií, že je schopna vyrážet elektrony z atomového obalu a tím látku ionizovat (Ullmann, 2022b).

<sup>2</sup> Pára, jejíž tlak je vyšší než u nasycené páry o téže teplotě (ČMeS, 2017a).

velkému rozdílu teplot v jednotlivých částech mlžné komory vzniká tzv. teplotní gradient<sup>3</sup>. Vzhledem k tomu, že se částice isopropylalkoholu snaží mít co nejmenší energii, probíhá difúze<sup>4</sup> par z teplejší do chladnější (spodní) oblasti. Ta je chlazená na -30 °C, a dojde v ní k přesycení vzduchu alkoholovými parami. „Pokud skrze přesycené páry v mlžné komoře prolétá částice, dojde k ionizaci prostředí a kondenzaci par na těchto iontech, čímž se zviditelní stopa částice (Motal a spol., 2008).“

## 2.2 Možnosti použití

Dříve sloužila mlžná komora k objevování subatomárních částic<sup>5</sup>. Dnes se ale používá především k demonstračním účelům pro širokou veřejnost. Je to totiž asi nejjednodušší způsob, jak „hmotně“ zobrazit stopy ionizujícího záření.

# 3 HISTORIE

## 3.1 Charles Wilson

Charles Thomson Rees Wilson byl skotský fyzik narozený roku 1869 v rodině farmářů. Když mu byly čtyři roky, jeho otec zemřel a matka tak zůstala na výchovu třech vlastních a čtyř nevlastních dětí sama. Spolu s nimi se tedy odstěhovala do Manchesteru ke svým rodičům. Tam chodil malý Charles do školy a po základním studiu nastoupil nejdříve na Owen's College. Po obdržení stipendia odešel v roce 1888 studovat Sidney Sussex College. Zde se již zaměřil na studium fyziky a chemie. Univerzitu dokončil a získal titul v roce 1892. Začal pracovat jako pomocný učitel, také čas od času jezdil vyučovat do chlapecké školy v Bradfordu.

Wilson nemohl ve svém stávajícím zaměstnání provádět svůj výzkum, tak se toto zaměstnání, i přes výrazně nižší plat, rozhodl změnit. Začal pracovat v Cambridge a zároveň se dostal do laboratorního týmu J. J. Thomsona.

Během výstupu na skotskou horu Ben Nevis si všiml slunečních korón<sup>6</sup> a glórií<sup>7</sup>. Tyto přírodní úkazy ho zaujaly natolik, že se rozhodl je napodobit v laboratoři. Nebyl prvním, kdo se o to pokusil. Před ním se o vytvoření mraků při laboratorních podmínkách snažil například Coulier nebo Aitken. Každý z nich vždy přidal již k dříve dosaženým poznatkům postřehy vlastní. Wilson navrhl novou aparaturu schopnou tvořit mraky. Jednalo se o soubor několika lahví

---

<sup>3</sup> Změna teploty s rozdílnou výškou (Ruda, 2014).

<sup>4</sup> Samovolné pronikání částic jedné látky mezi částice druhé látky (Králová, 2007a).

<sup>5</sup> Částice menší než atom (FZU AV ČR, 1998).

<sup>6</sup> Sluneční atmosféra, která má teplotu až několik milionů stupňů Celsia (Aldebaran, 2011).

<sup>7</sup> Jeden ze světelných jevů, který se projevuje jedním nebo více soustřednými barevnými kruhy kolem stínu vrženého na vodní kapičky oblačné vrstvy nebo mlhy (ČMeS, 2017b).

umožňujících snížit tlak vzduchu během chvíle o desítky procent (viz Obr. 2). Díky tomu klesla teplota sytých par pod rosný bod a začala se tvořit mlha (Sella, 2015).



Obr. 2: Wilsonova mlžná komora. Dostupné z: <https://www.mediastorehouse.co.uk/p/629/wilson-cloud-chamber-11790404.jpg>

Pokaždé, když vehnal do svého systému vlhký vzduch, objevila se stopa, což popsal již Aitken. Wilson ale zkoumal dál a zjistil, že mlha vzniká i při expanzi po vyčištění vzduchu (Sella, 2015). Kvůli tomu nabyl dojmu, že ke kondenzaci musí docházet na nějakých částicích, které zůstávají ve vzduchu i po jeho vyčištění. Svou hypotézu potvrdil v roce 1896 díky nově vynalezenému rentgenovému záření. Byl zaměstnán Meteorologickou radou a zkoumal atmosférickou elektřinu. To mu bohužel neumožnilo mlžnou komoru vylepšit, vybavil ji ale fotoaparátem. Svůj vynález publikoval v roce 1912 a roku 1927 získal Nobelovu cenu za fyziku.

### 3.2 Wilsonovi následovatelé

Po Wilsonovi se pozorováním částic v mlžné komoře zabývali další vědci. Tím objevili nebo potvrdili existenci několika částic.

Nobelovu cenu získal A. H. Compton za potvrzení Comptonova jevu<sup>8</sup>, dále také C. Anderson za objevení pozitronu. Díky mlžné komoře zviditelnili Blackett a Occhialini anihilaci částic<sup>9</sup>, konkrétně u elektron-pozitronového páru. Cockcroft a Walton ukázali transmutaci atomových jader<sup>10</sup> (The Nobel Prize, 2022).

---

<sup>8</sup> Interakce fotonu s volným nebo se slabě vázaným orbitálním elektronem (Hojcisková, 2009).

<sup>9</sup> Jev, ke kterému dochází při srážkách částic s antičásticemi a při něm ke vzniku elektromagnetického záření  $\gamma$  (Reichl a spol., 2006a).

<sup>10</sup> Z původního jádra vzniká jádro s málo odlišným protonovým číslem (Kusala, 2004).

### 3.3 Firma Nuledo

V současné době se mezi výrobce nejmodernějších mlžných komor řadí česká firma Nuledo. Jedná se o partu bývalých studentů Gymnázia Opatov. Ondřej Zbytek, Ondřej Svoboda, Barbora Vaňková a Valery Mezentsev prototyp komory představili v roce 2014 jako studenti oktávy. Zaujali tím někdejšího generálního ředitele CERNu Rolfa-Dietera Heuera. Ten je pak poprosil o zkonstruování mlžné komory pro výstavu Microcosm právě v ženevském CERNu. Jejich konstrukci můžeme spatřit například v informačním centru SÚRAO v Bystřici nad Pernštejnem, informačním centru Jaderné elektrárny Dukovany, ale i v zahraničí, jako třeba v Science muzeu CosmoCaixa ve Španělsku nebo ve Steno muzeu v Dánsku (Nuledo, 2022b).

Mezi revoluční změny patří kvalitnější obraz a robotický systém vsouvání radioaktivních zářičů, který umožňuje spatřit i umělou radioaktivitu (ČT24, 2016), přesněji záření alfa, beta minus a část Thoriové rozpadové řady (viz kap. 4.3).

## 4 ČÁSTICE POZOROVATELNÉ V MLŽNÉ KOMOŘE

V mlžné komoře můžeme pozorovat různé částice ionizujícího záření. Pro příklad uvádím několik běžnějších, ale i několik relativně vzácných částic a také těch, které můžeme spatřit po vypuštění umělého zářiče.

### 4.1 Často pozorovatelné částice

#### 4.1.1 Elektrony a pozitrony

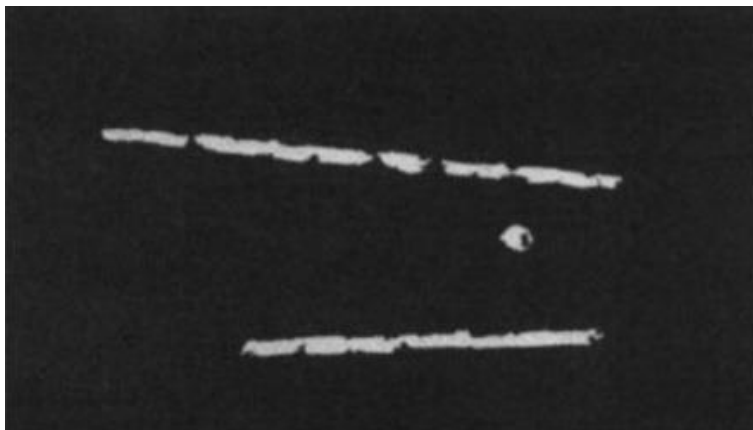
Elektron je subatomární částice, která tvoří obal atomu a má záporný elementární elektrický náboj. Jeho antičásticí je pozitron, který má elementární náboj kladný. V mlžné komoře je spatříme jako tenkou stopu různých tvarů a délek (FZU AV ČR, 1998) (viz Obr. 3). „Odlišit stopy těchto částic lze umístěním mlžné komory do magnetického pole, kdy se stopy elektronů a pozitronů začnou stáčet na opačné strany (Nuledo, 2022a).“



Obr. 3: Elektrony a pozitrony v mlžné komoře. Dostupné z: [https://www.fzu.cz/sites/default/files/images/mlzna-komora\\_pozorovani4.jpg](https://www.fzu.cz/sites/default/files/images/mlzna-komora_pozorovani4.jpg)

### 4.1.2 Protony

Protony se vyskytují společně s neutrony v atomovém jádře. Protony mají kladný náboj a jsou mnohem těžší než elektrony. Pokud proton proletí mlžnou komorou, uvidíme dlouhé rovné stopy (FZU AV ČR, 1998) (viz Obr. 4).



Obr. 4: Protony v mlžné komoře. Dostupné z: [https://www.fzu.cz/sites/default/files/images/mlzna-komora\\_pozorovani2.jpg](https://www.fzu.cz/sites/default/files/images/mlzna-komora_pozorovani2.jpg)

### 4.1.3 Částice alfa

Záření alfa<sup>11</sup> je tvořeno jádry helia a mohou ho vysílat jen prvky s nukleovým číslem vyšším, než 200 (Králová, 2007c). Zastaví ho pouhý list papíru (viz Obr. 3) a vyskytuje se například v přírodním radonu. Alfa částici pozorujeme jako krátkou širokou stopu (FZU AV ČR, 1998) (viz Obr. 5). To souvisí s vysokou hustotou ionizace podél jejich dráhy. Vysokou hustotou ionizace je dána i jejich značná radiobiologická účinnost. Zářiče alfa jsou nebezpečné zejména při průniku do organismu, kdy mohou bezprostředně ozařovat buňky a buněčné struktury.



Obr. 5: Částice alfa v mlžné komoře. Foto autorka

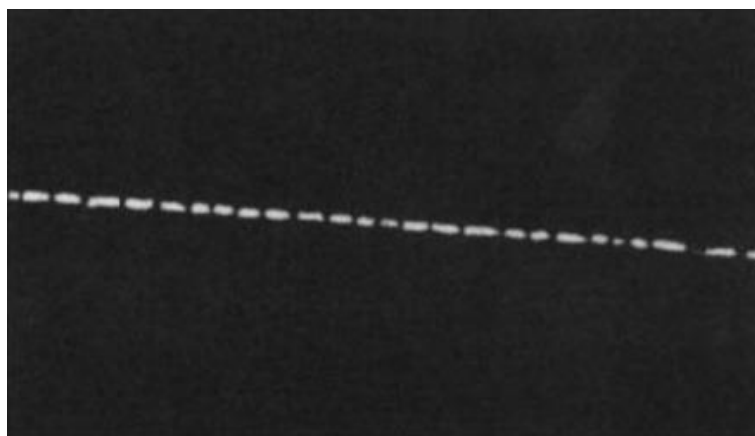
---

<sup>11</sup> Proud alfa částic vzniklý rozpadem jader (FZU AV ČR, 1998).

## 4.2 Vzácně pozorovatelné jevy a částice

### 4.2.1 Miony

Miony mají velice krátkou životnost a můžeme je sledovat díky relativistickým efektům - dilataci času<sup>12</sup> a malým energetickým ztrátám (FZU AV ČR, 1998). Mají záporný náboj a „vznikají interakcí kosmického záření s atmosférou (Nuledo, 2022a)“. Zanechávají za sebou velmi napřímenou stopu podobnou stopě elektronu (FZU AV ČR, 1998) (viz Obr. 6).



Obr. 6: Mion v mlžné komoře. Dostupné z: [https://www.fzu.cz/sites/default/files/images/mlzna-komora\\_pozorovani3.jpg](https://www.fzu.cz/sites/default/files/images/mlzna-komora_pozorovani3.jpg)

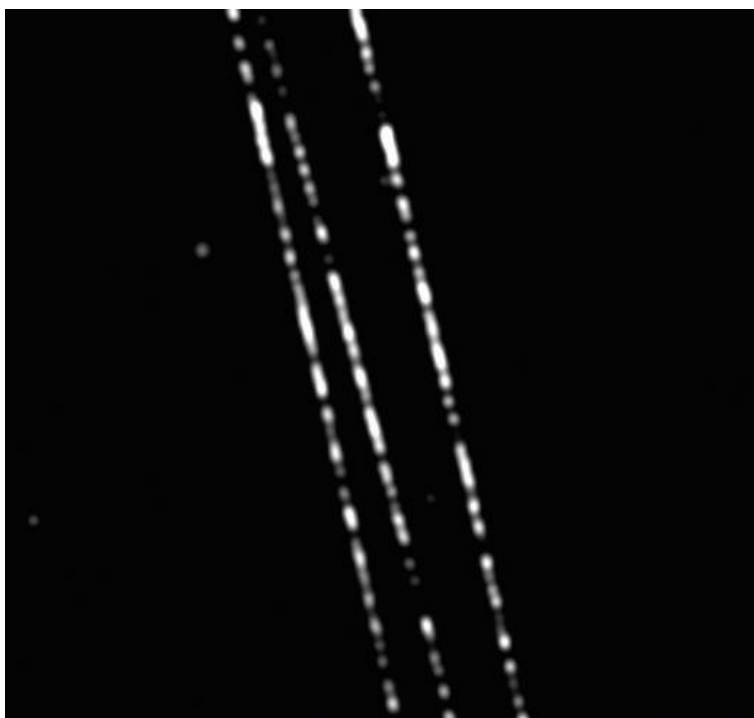
### 4.2.2 Kosmické záření

Kosmické záření jsou všechny částice přilétající vysokou rychlostí z kosmu do naší atmosféry. V mlžné komoře ho můžeme zahlédnout (viz Obr. 7) „díky sprškám<sup>13</sup> sekundárního kosmického záření, a to jako několik mlžných stop orientovaných stejným směrem ve stejný okamžik (FZU AV ČR, 1998).“

---

<sup>12</sup> Hodiny, které se vzhledem k pozorovateli pohybují, jdou pomaleji než hodiny, které jsou vzhledem k pozorovateli v klidu (Reichl a spol., 2006c).

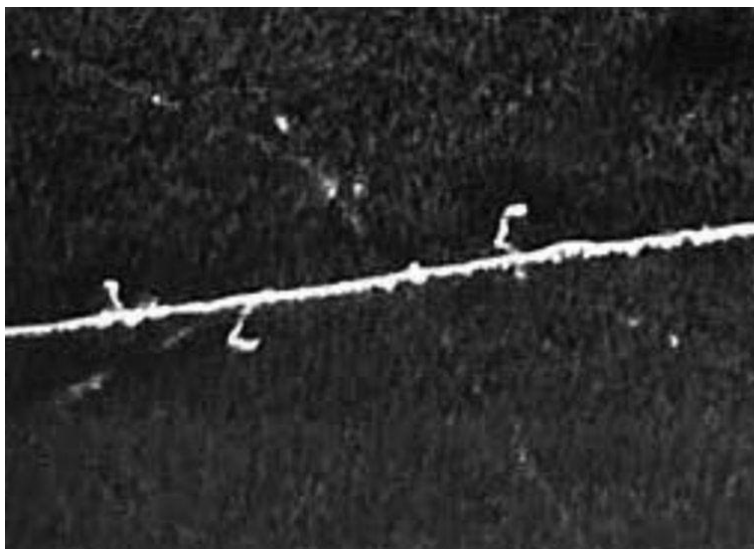
<sup>13</sup> Vysokoenergetická částice interaguje s materiálem a produkuje množství sekundárních částic, jež jsou samy schopny dále interagovat (Boháčová, 2000).



Obr. 7: Kosmické záření v mlžné komoře. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/sites/default/files/images/bc1a.gif>

### 4.2.3 Záření delta

Stopy delta záření lze pozorovat při průletu relativně těžké částice s vysokou energií. „Jedná se o elektrony vytrhávané z molekul isopropylalkoholu průletem právě takové těžké částice, jako je například proton. V mlžné komoře pak vidíme kolem přímé stopy protonu tenké stopy elektronů právě v důsledku ionizace molekul isopropylalkoholu (Nuledo, 2022a) (viz Obr. 8).“



Obr. 8: Záření delta v mlžné komoře. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/sites/default/files/images/delta.jpg>

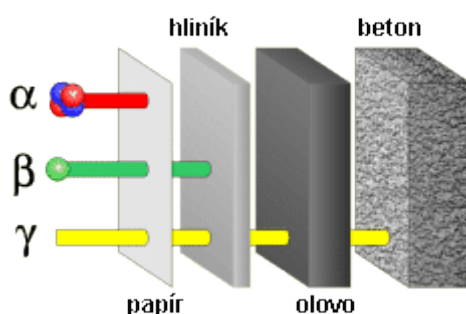
## 4.3 Částice z umělých zářičů

### 4.3.1 Záření alfa

V mlžné komoře ho můžeme pozorovat díky radioaktivnímu zdroji americium  $^{241}\text{Am}$  (FZU AV ČR, 1998).

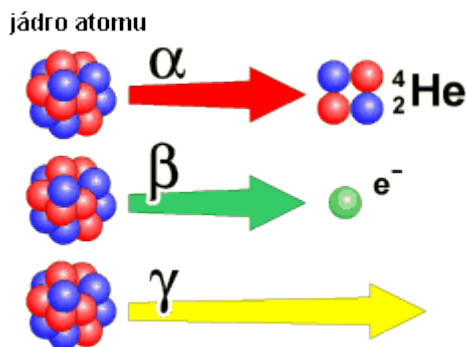
### 4.3.2 Záření beta minus

Záření beta minus ( $e^-$ ) je jedním z dvou typů beta rozpadu. Jedná se o proud elektronů, který sice pronikne papírem, ale jednoduše ho zastavíme vrstvou hliníku (viz Obr. 9). Uvolňuje se například z izotopů uranu. „Vzniká v jádře přeměnou neutronu v proton, přičemž je z jádra vyslán elektron (viz Obr. 10). V jádře tedy přibude proton a ubude neutron (Králová, 2007d).“



Obr. 9: Prostupnost záření různými materiály. Dostupné z:

[https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/images//03/35\\_03.gif](https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/images//03/35_03.gif)



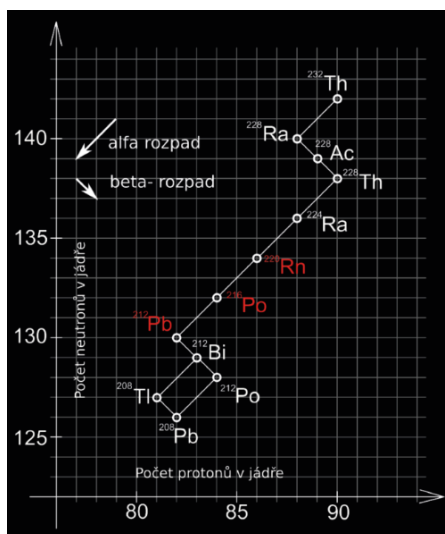
Obr. 10: Znárodnění rozpadu jádra při vyzáření různých druhů záření. Dostupné z:

[https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/images//03/35\\_01.gif](https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/images//03/35_01.gif)

### 4.3.3 Thoriová rozpadová řada

V mlžné komoře můžeme pozorovat i část thoriové rozpadové řady (červeně viz Obr. 11). Podobné řady jsou celkem čtyři. „Jedná se o posloupnost prvků, kde je přesně dáno, na jaký další prvek se předchozí nestabilní prvek rozpadne a jakou částicí při tom vyzáří (FZU AV ČR, 1998).“ V tomto případě vidíme, že se radon  $^{220}\text{Rn}$  rozpadá na 2 alfa částice. Nejdříve na

polonium a poté na olovo. V mlžné komoře se to projeví jako dvě stopy ve tvaru V (FZU AV ČR, 1998) (viz Obr. 12).



Obr. 11: Thoriová rozpadová řada. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/sites/default/files/images/thoriova-rada-m.png>



Obr. 12: Thoriová rozpadová řada v mlžné komoře. Foto autorka

## 5 RADIOAKTIVNÍ PŘEDMĚTY

### 5.1 Minerály

Zdrojem přirozené radioaktivity je ze 17 % půda a horniny (SÚRAO, 2019). V následujících dvou kapitolách bych ráda některé z nich představila.

#### 5.1.1 Uranové rudy

Termín uranová ruda označuje minerály, ze kterých můžeme získat uran (Ellis, 2022). Mezi horniny obsahující vysoký podíl uranu řadíme uraninit, monazit nebo coffinit. Nejvíce uranu z těchto rud se těží v Kanadě, dále pak v Kazachstánu, Austrálii a Rusku. Nejčastějším

způsobem těžby je těžba povrchová, ale celkem běžně se praktikuje i těžba v hlubinných dolech, nebo takzvaným chemickým loužením<sup>14</sup>.

Uraninit, známý též pod názvem smolinec, je nejdůležitější rudou pro získávání uranu a radia. Právě proto je často těžen za účelem výroby paliva do jaderných elektráren nebo využití v lékařství. Dříve se těžil i v České republice, například v Jáchymově. Právě díky kusu rudy z tohoto dolu objevili v roce 1898 Marie a Pierre Curieovi prvek radium (Králová, 2007b). Jeho chemický vzorec je  $\text{UO}_2$ . „Nejběžnější je na hydrotermálních žilách spolu s kalcitem a křemenem nebo na tzv. pětiprvkové formaci<sup>15</sup> (Vávra a spol., 2022).“ Mezi nejvýznamnější naleziště na světě patří Rock Landing, Barringer Hill nebo Annaberg.

### 5.1.2 Radiobaryt

Radiobarytem rozumíme baryt s obsahem radia, jeho chemický vzorec je  $(\text{Ba,Ra})\text{SO}_4$ . Žlutý až tmavě šedozelený baryt obsahuje mikrokrystaly pyritu a je radioaktivní, což je způsobeno přítomností radia, které nahrazuje část barya v krystalové mřížce (Virt, 2021). „Na území České republiky se radiobaryt těžil v Jeníkově, hojná naleziště jsou například v USA a také v Německu.

## 5.2 Předměty

Některé běžně využívané předměty obsahují minimální množství radioaktivních izotopů přírodního i umělého původu. Kromě níže zmíněných předmětů najdeme stopy radioaktivních prvků například v zářivkových startérech, nádobí s uranovou glazurou nebo detektorech kouře.

### 5.2.1 Uranové sklo

Uranové sklo je žluto-zelené sklo zbarvené příměsí uranu. Používalo se na výrobu pohárů, váz a dalších podobných předmětů. V běžném kousku vyrobeném z tohoto typu materiálu bychom našli asi 2 % uranu (Ramesis, 2021).

### 5.2.2 Historické letecké kompas a další podobné předměty

Pro popisování ciferníků různých historických předmětů se dříve používaly fluorescenční barvy s přídavkem radia. Dnešní materiály používané na výrobu fosforeskujících předmětů už ale naštěstí radioaktivní prvky neobsahují.

---

<sup>14</sup> Loužení je způsob těžby, kdy jsou do rudy vyvrtány díry, do kterých je následně nalit louhovací roztok (kyselina). Tato kyselina rozpustí rudu a tím dojde k zisku potřebné složky, která se pak dále zpracovává až do konečné podoby (AZo mining, 2014).

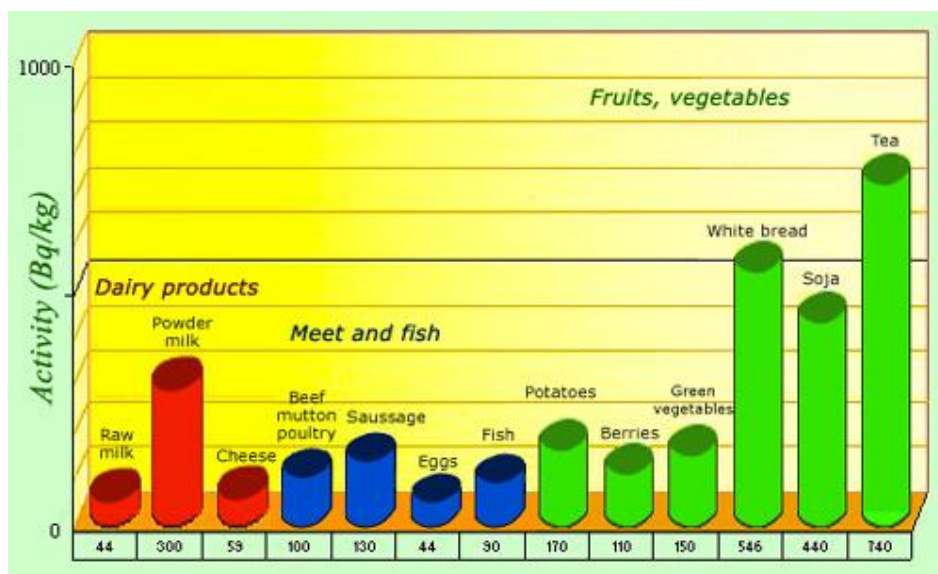
<sup>15</sup> Pětiprvková formace nerostů se vyznačuje současným výskytem rud kobaltu, niklu, stříbra, bismutu a uranu na jednom nalezišti (Periodická tabulka, 2017).

### 5.2.3 Zdroje světla GTLS

GTLS, neboli gaseous tritium light source je zdroj světla využívající radioaktivní tritium v plynném skupenství. „Rozkládající se tritium uvolňuje elektrony, které zevnitř kapsle dopadají na luminiscenční vrstvu a emitují světlo (3H-Tritium, 2022).“ Tyto typy svítidel byly využívány v armádě (ve zbraňových mířidlech, pro značení zákopů, vymezení oblastí střelby, pro nouzové čtení map a kompasů), jelikož se jedná o velice spolehlivý zdroj světla. Dnes jsou ale volně v prodeji například přívěsky na klíče, hodinky se svítícími ručičkami nebo kompasy. Tyto výrobky v konstrukčním provedení zajišťujícím odstínění záření beta, lze považovat za bezpečné, což dokládá i stanovisko SÚJB: „SÚJB tedy považuje za prokázané, že zdravotní riziko spojené s ozářením fyzické osoby způsobené manipulací s uvedenými výrobky je dostatečně nízké a lze jej považovat z hlediska radiační ochrany za zanedbatelné, resp. nevyžadující regulaci (SÚJB, 2019).“

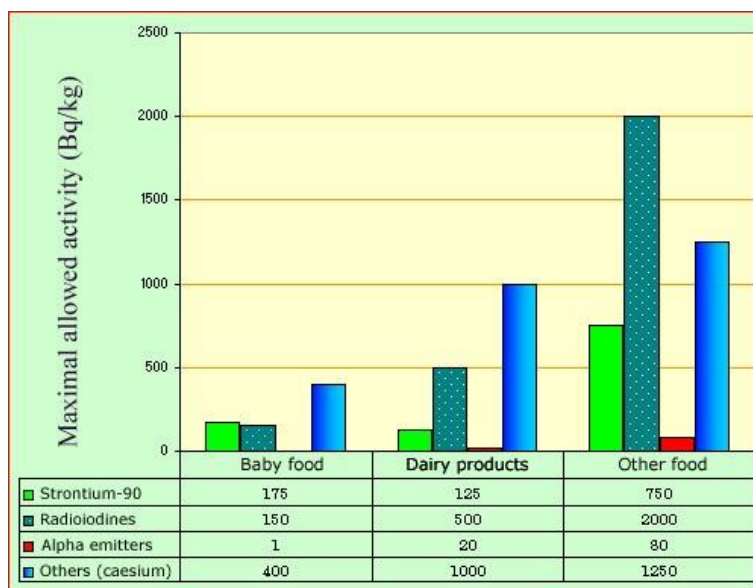
## 5.3 Potraviny

I některé potraviny obsahují stopové množství radioaktivních prvků (viz Obr. 13). Pro ilustraci uvádím pár příkladů.



Obr. 13: Naměřená radioaktivita v některých potravinách. Dostupné z:

[https://radioactivity.eu.com/static/e2cd5783e0bcf1a1cebd09b2b9a3e83/d1f95/Activite\\_Aliments\\_En.jpg](https://radioactivity.eu.com/static/e2cd5783e0bcf1a1cebd09b2b9a3e83/d1f95/Activite_Aliments_En.jpg)



Obr. 14: Maximální povolená dávka různých radioaktivních prvků v dětských příkrmech, mléčných produktech a ostatních potravinách (týká se evropských zemí). Dostupné z:

[https://radioactivity.eu.com/static/6abd067c96b68b91a044b04ce7406c26/d1f95/LimitesFood\\_En.jpg](https://radioactivity.eu.com/static/6abd067c96b68b91a044b04ce7406c26/d1f95/LimitesFood_En.jpg)

### 5.3.1 Banány

V banánech se vyskytuje již dříve zmíněný radioaktivní izotop draslíku  $^{40}\text{K}$ , který se pomocí beta záření přemění na izotop vápníku  $^{40}\text{Ca}$  (SÚRAO, 2019). Až teprve po sněžení 50 milionů banánů naráz bychom do těla dostali smrtelnou dávku (cca. 5 Sv). Podle banánu byla pojmenována i veličina dávky Banana equivalent dose (BED)<sup>16</sup>.

### 5.3.2 Para ořechy

V para ořechích najdeme na rozdíl od banánů radioizotopy radia. Přesněji řečeno  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$  a  $^{228}\text{Ra}$ . Ani tady není ale třeba se bát, jelikož hodnoty dosahují mezi 16 a 105 Bq.kg<sup>-1</sup> (Martins a spol., 2012).

### 5.2.3 Houby

Houby, vedle přirozeně se vyskytující radioaktivních prvků, mají tendenci akumulovat i radionuklidy umělé. Zde má největší radiobiologický význam především izotop cesia  $^{137}\text{Cs}$ , který se do ekosystémů dostal zejména následkem havárie elektrárny v Černobylu a také v důsledku testování jaderných zbraní v atmosféře.  $^{137}\text{Cs}$  má poločas rozpadu cca 30 let a je tedy součástí životního prostředí i v současnosti. Lesní houby patří v České republice k nejvíce konzumované potravní komoditě lesního ekosystému. I když tvoří minoritní složku spotřebního koše, mohou, vzhledem k řádově vyšším aktivitám, významně přispívat k celkové dávce z ingesce způsobené  $^{137}\text{Cs}$  (Škrkal a spol., 2012). Na druhou stranu, vzhledem

<sup>16</sup> Banana equivalent dose je veličina popisující dávku jednoho banánu, což je přibližně 0,1 μSv (Goronovski, 2018).

k typickým aktivitám  $^{137}\text{Cs}$  v houbách na území ČR, jsou radiobiologická rizika spojená s jejich konzumací velmi nízká a jejich spotřeba není z tohoto pohledu nijak regulována.

#### **5.2.4 Pramenitá voda**

Vzhledem k tomu, že voda protéká pod zemí, je celkem jasné, že i ona bude přirozeně radioaktivně zářit. Mezi nejčastější radioaktivní izotopy v pramenité vodě patří produkty přírodních rozpadových řad. Nejvíce radioizotopů nalezneme ve vodách protékajících žulou nebo vulkanickými horninami (CNRS, 2022).

## 6 PRAKTICKÁ ČÁST

### 6.1 Výzkumná otázka

Je možné zjistit radioaktivitu banánů, para ořechů, uraninitu a etalonů ionizujícího záření<sup>17</sup> (viz Obr. 17) pomocí difúzní mlžné komory?

### 6.2 Použité přístroje

#### 6.2.1 Mlžná komora Phywe

K pozorování byla použita mlžná komora PJ 80/3 značky Phywe umístěná v Informačním centru Jaderné elektrárny Temelín (viz Obr. 15). Reakční deska má rozměry 80 x 80 cm a jako médium používá isopropylalkohol.



Obr. 15: Mlžná komora v Informačním centru Jaderné elektrárny Temelín. Foto autorka

---

<sup>17</sup> Etalon je měřidlo, sloužící k realizaci a uchovávání této jednotky nebo stupnice a k jejímu přenosu na měřidla nižší přesnosti (ČMI, 2022).



Obr. 16: Dávkořač isopropylalkoholu v mlžné komoře. Foto autorka

### 6.2.2 Radiometr

K měření číselných hodnot dávkového příkonu byl použit radiometr FH 40G-L10 značky Thermo Scientific (viz nahoře uprostřed na Obr. 16) zapůjčený Laboratoři radiační kontroly okolí sídlící v Českých Budějovicích. Jedná se o Geigerův-Müllerův počítač schopný měřit dávkový příkon, dávku i ekvivalentní dávku (viz kap. 6.3).

## 6.3 Měření radioaktivity

Při měření radioaktivity je třeba rozlišovat pojmy aktivita, dávka, dávkový příkon a ekvivalentní dávka.

### 6.3.1 Aktivita

„Aktivita [A] vyjadřuje počet radioaktivních přeměn daného radionuklidu za jednotku času. Becquerel je jednotka, ve které se vyjadřuje aktivita radioaktivní látky. Aktivitu 1 Bq má látka, ve které dochází k jednomu radioaktivnímu rozpadu za sekundu (SÚRO, 2022).“ Čas potřebný k přeměně poloviny jader přítomných na začátku se označuje jako poločas přeměny.

### 6.3.2 Dávka

„Absorbovaná dávka [D] je podíl energie, kterou ionizující záření předá látce o určité hmotnosti (SÚRO, 2022).“ Její jednotka je Gray (Gy), ale častěji použijeme její násobky, například mikrogray. Pro měření dávky radioaktivity se využívá dozimetr.

### 6.3.3 Dávkový příkon

„Dávkový příkon je dávka předaná látce za určitou dobu. Její jednotka je  $\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$  (SÚRO, 2022).” Také se často používá  $\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$  nebo spíše jeho násobky. Pro měření dávkového příkonu můžeme použít například Geigerův-Müllerův počítač.

### 6.3.4 Ekvivalentní dávka

„Ekvivalentní dávka [HT] je absorbovaná dávka upravená na radiační účinnost daného typu ionizujícího záření (alfa, beta, gama) pomocí tzv. radiačního váhového faktoru (SÚRO, 2022).” Její jednotkou je Sievert (Sv), ale častěji se využívají mikrosieverty.

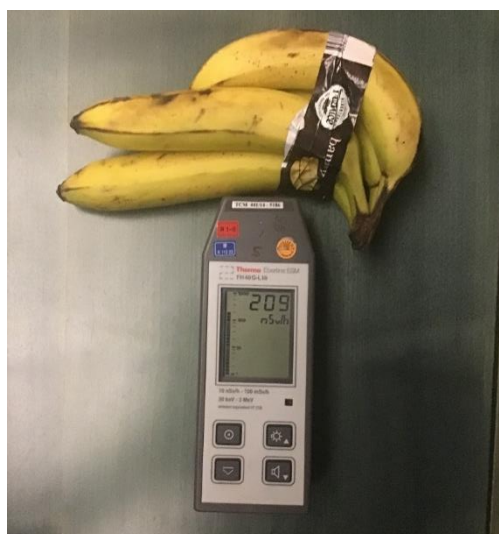
## 6.4 Výzkumný vzorek



Obr. 17: Zkoumané předměty a radiometr. Foto autorka

### 6.4.1 Banány

Byly použity banány I. jakosti odrůdy Cavendish (viz Obr. 18). Zakoupeny byly v Albertu a země původu je Kolumbie. Jejich radioaktivita je blíže popsána v kapitole 5.3.1.



Obr. 18: Banány. Foto autorka

### 6.4.2 Para ořechy

Para ořechy byly taktéž zakoupeny v Albertu a pochází z Bolívie. Více o jejich radioaktivitě je možné dohledat v kapitole 5.3.2.

### 6.4.3 Uraninit

Zkoumány byly dva různé uraninity. Jeden pochází z lokality Zálesí u Javorníka (viz Obr. 19) a byl zapůjčen od Laboratoře radiační kontroly okolí sídlící v Českých Budějovicích a druhý zapůjčilo Informační centrum Jaderné elektrárny Temelín, u něj je původ bohužel neznámý. Více o uraninitu se dozvíte v kapitole 5.1.1.



Obr. 19: Uraninit. Foto autorka

### 6.4.4 Etalon $^{241}\text{Am}$

K experimentu byly použity i dva etalony  $^{241}\text{Am}$  zapůjčené Laboratoří radiační kontroly okolí sídlící v Českých Budějovicích. U prvního uvádí dodavatel referenční aktivitu 90,9 Bq a u druhého z nich 499,5 kBq (viz Obr. 20).

Americium je uměle vyrobený radioaktivní kov. Vzniká, neutronovou aktivací plutonia v jaderných reaktorech nebo při testech jaderných zbraní (EPA, 2022a). Jedná se hlavně o alfa zářič, ale vyzařuje také záření gama. Vyskytuje se i v přírodě, a to právě po testech jaderných zbraní. Nalezneme ho v půdě, vodě a rostlinách. Občas ho ale použijí i výrobci detektorů kouře. Nejčastěji se vyskytujícím izotopem americia je právě  $^{241}\text{Am}$ .



Obr. 20: Etalon  $^{241}\text{Am}$ . Foto autorka

### 6.4.5 Etalon $^{232}\text{Th}$

Dalším předmětem výzkumu byl etalon thoria 232 v kapalné formě (viz Obr. 21).

$^{232}\text{Th}$  je nejběžněji se vyskytujícím izotopem thoria v přírodě. Jedná se o mírný alfa a gama zářič (EPA, 2022b). Thorium se naprosto běžně vyskytuje ve stopovém množství v půdě, vodě, horninách i živočiších. Umělé izotopy thoria jsou vzácné a téměř nikdy nevstupují do životního prostředí. Z thoria se vyrábí například keramika, čočky fotoaparátů a dalekohledů a dalo by se použít i na výrobu jaderného paliva.



Obr. 21: Etalon  $^{232}\text{Th}$ . Foto autorka

## 6.5 Metody

V této práci byly použity dva typy měření. Nejdříve byl změřen dávkový příkon a pak byl zkoumaný vzorek pozorován pomocí stop v mlžné komoře.

### 6.5.1 Měření dávkového příkonu

Dávkový příkon byl měřen pomocí radiometru FH 40G-L10 (viz kap. 6.2.2). Měření bylo z důvodu snížení statistické chyby opakováno čtyřikrát a z výsledků byl spočítán aritmetický průměr.

### 6.5.2 Pozorování pomocí mlžné komory

Z důvodu zjištění zda dojde k vyvolání viditelné odezvy, byl výzkumný vzorek položen na sklo mlžné komory, a následně bylo pozorováno, zda se objeví stopy ionizujícího záření.

Měření ale nebyla příliš přesná z důvodu nedostatečného odstínění okolí měřeného vzorku. Byla tudíž ovlivňována vzorky z okolí i přirozeným pozadím.

## 6.6 Výsledky

### 6.6.1 Dávkový příkon

Tabulka 1 ukazuje čtyři naměřené hodnoty dávkového příkonu každého z šesti vzorků a také přirozeného pozadí. V posledním sloupci vidíme průměrný dávkový příkon vypočítaný z naměřených hodnot. U  $^{232}\text{Th}$  nebyl dávkový příkon změřen.

Tab. 1: Hodnoty dávkového příkonu jednotlivých výzkumných vzorků.

| Výzkumný vzorek  | Měření 1<br>[nSv.h <sup>-1</sup> ] | Měření 2<br>[nSv.h <sup>-1</sup> ] | Měření 3<br>[nSv.h <sup>-1</sup> ] | Měření 4<br>[nSv.h <sup>-1</sup> ] | Průměr<br>[nSv.h <sup>-1</sup> ]     |
|------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| Přirozené pozadí | 154                                | 150                                | 160                                | 168                                | <b>158</b>                           |
| Banán            | 193                                | 200                                | 202                                | 197                                | <b>197,25</b>                        |
| Para ořechy      | 202                                | 199                                | 196                                | 188                                | <b>196,25</b>                        |
| Uraninit 1       | $2,71 \cdot 10^3$                  | $2,69 \cdot 10^3$                  | $2,86 \cdot 10^3$                  | $2,80 \cdot 10^3$                  | <b><math>2,765 \cdot 10^3</math></b> |
| Uraninit 2       | $150 \cdot 10^3$                   | $152 \cdot 10^3$                   | $149 \cdot 10^3$                   | $151 \cdot 10^3$                   | <b><math>150,5 \cdot 10^3</math></b> |
| Americium 1      | 173                                | 178                                | 173                                | 175                                | <b>174,15</b>                        |
| Americium 2      | 228                                | 230                                | 236                                | 239                                | <b>233,25</b>                        |

### 6.6.2 Difúzní mlžná komora

Nejdříve byla pozorována mlžná komora bez přiloženého výzkumného vzorku, tedy pouze přirozené pozadí (viz Obr. 22). Mezi nejčastěji pozorované částice patřily částice alfa, dále

byly také viděny elektrony nebo pozitrony a i protony. Zahlédnuto bylo i několik stop po Thoriové rozpadové řadě.

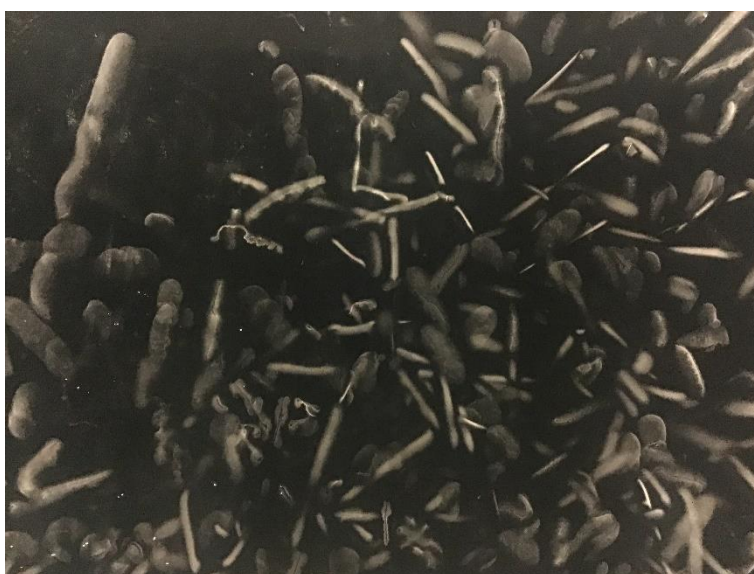


Obr. 22: Radioaktivita přirozeného pozadí zachycená pomocí difúzní mlžné komory. Foto autorka

Poté byly jednotlivé vzorky pokládány na vrchní sklo mlžné komory. U banánů, para ořechů, prvního kusu uraninitu a obou etalonů americia nebyla v pozorovací oblasti mlžné komory pozorována žádná změna.

Po položení druhého kusu uraninitu byl v místě jeho kontaktu se skleněnou deskou zahlédnut v pozorovací oblasti mírný nárůst zobrazených stop ionizujícího záření. Tento děj ale trval jen velmi krátce.

Po vpuštění roztoku s izotopem  $^{232}\text{Th}$  bylo ihned zaznamenáno zhuštění výskytu stop ionizujícího záření, zejména pak částice alfa (viz Obr. 23).



Obr. 23: Stopy ionizujícího záření v mlžné komoře po vpuštění  $^{232}\text{Th}$ . Foto autorka

## 6.7 Diskuze

### 6.7.1 Dávkový příkon

V již dříve napsaných textech jsou k nalezení výsledky měření dávkového příkonu. V diskuzi je porovnáme se zde naměřenými hodnotami.

Nejdříve se zaměříme na přírodní pozadí. Jeho ekvivalentní dávka je na území České republiky průměrně 3200  $\mu\text{Sv}$  (SÚRAO, 2019). V Jaderné elektrárně Temelín byl nejvyšší z průměrně naměřených dávkových příkonů v den provádění měření (1. 12. 2022) 138  $\text{nSv}\cdot\text{h}^{-1}$  (SÚJB, 2022). To je v porovnání s naším měřením (viz Tab. 1) celkem nízké číslo.

Dávkový příkon banánu bychom podle literatury ani neměli naměřit. Jeho hodnota je totiž velmi nízká: 353  $\text{pSv}\cdot\text{h}^{-1}$ . I v tomto případě je námi naměřená hodnota mnohonásobně vyšší.

Co se ořechů týče, je aktivita podle literatury 3,1 10-12  $\text{Ci}^{18}$  (Turner, 1958), což se rovná 115  $\text{mBq}$ . Aktivitu nelze jednoduše porovnávat s dávkovým příkonem. Používáme k tomu konverzní faktor [h], jehož jednotkou je  $\text{Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$ . „Je to koeficient, udávající efektivní dávku v těle způsobenou přijetím jednotkové aktivity 1 Bq dané radioaktivní látky do organismu (Ullmann, 2022a).” Hodnoty tohoto faktoru jsou závislé na mnoha skutečnostech. Jedná se o druh radionuklidu, sloučeninu, ve které se radionuklid nachází a způsob, jakým radionuklid do organismu vnikl. Nejčastěji jsou uváděny hodnoty pro požití ( $h_{\text{ing}}$ ) a vdechnutí ( $h_{\text{inh}}$ ). Tyto faktory se udávají pro tzv. referenčního člověka, tedy hmotnost 70 kg. Přesnější hodnoty dávek z vnitřní kontaminace se stanovují na základě modelů metody MIRD<sup>19</sup>. Tento faktor se navíc vztahuje pouze k vnitřnímu ozáření a ne při expozici vnějším ozářením emitovaném vzorkem.

U uraninitu je velice těžké porovnávat dávkový příkon s literaturou. Záleží totiž hodně na jeho složení, respektive zastoupení jednotlivých radioaktivních prvků.

U americia by bylo vhodné porovnat výsledky s referenčními hodnotami aktivity uvedenými dodavatelem. Zde to ale také z důvodu uvedeného výše nejde jednoduše převést.

---

<sup>18</sup> Curie je starší jednotka používaná k vyjadřování radioaktivity. Jeho původní definice byla 1 Ci je ekvivalent počtu rozpadů, kterým projde jeden gram  $^{226}\text{Ra}$  za jednu sekundu (Connor, 2019).

<sup>19</sup> MIRD (Medical Internal Radiation Dose) je komplexní metoda, zahrnující fyzikální a biologické faktory pro stanovení radiačních dávek v jednotlivých orgánech z vnitřní distribuce radioaktivních látek (Ullmann, 2022a).

## 6.7.2 Difúzní mlžná komora

Jak již bylo popsáno v kapitole 6.6.2, změnu v pozorovací části difúzní mlžné komory jsme pozorovali pouze po přiložení uraninitu s vyšším naměřeným dávkovým příkonem a po vpuštění roztoku s radioizotopem thoria.

Dle kapitoly 4 byly výsledky našeho pozorování přirozeného pozadí očekávatelné. Pozorovali jsme totiž všechny částice popsané jako často pozorovatelné (viz kap. 4.1), dokonce se nám podařilo zahlédnout i Thoriovou rozpadovou řadu řazenou do skupiny částice z umělých zářičů (viz kap. 4.3).

Jev pozorovaný po přiložení uraninitu s vyšším naměřeným dávkovým příkonem si nedokážeme vysvětlit.

Po vpuštění roztoku s radioizotopem thoria jsme pozorovali okamžitý nárůst počtu pozorovaných stop vzniklých podél dráhy částice alfa. Tento jev jsme předpokládali podle popisu v kapitole 6.4.5.

I přes to, že etalony  $^{241}\text{Am}$  vykazují ze všech pozorovaných vzorků nejvyšší naměřenou ekvivalentní dávku, nepozorovali jsme v difúzní mlžné komoře žádnou změnu oproti přirozenému pozadí. Je tomu tak zřejmě kvůli stínicímu efektu skla difúzní mlžné komory (červeně viz Obr. 23). Přes něj totiž nemůže proniknout záření alfa (viz kap. 4.1.3), které tyto etalony vyzařují.



Obr. 23: Tloušťka skla difúzní mlžné komory. Foto autorka

## 7 ZÁVĚR

V této práci jsem se zabývala difúzní mlžnou komorou. Vysvětlila jsem princip tohoto typu mlžné komory a popsala historii jejího vývoje. Dále jsem uvedla několik informací o jednotlivých pozorovatelných částicích ionizujícího záření a přidala údaje o některých radioaktivních předmětech. Provedla jsem měření pomocí radiometru a pozorovala odezvy v pozorovací oblasti difúzní mlžné komory po přiložení jednotlivých vzorků. Své cíle jsem naplnila a díky seminární práci jsem si vyzkoušela manipulaci s různými radioaktivními materiály a profesionální měřicí technikou. Při všech manipulacích s radioaktivními vzorky bylo samozřejmostí uplatňování pravidel radiační ochrany. Této zkušenosti si cením a jsem ráda, že mi to bylo umožněno.

# POUŽITÁ LITERATURA

3H-TRITIUM. Tritium a GTLS. In: 3H-Tritium [online]. 2022 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://www.3h-tritium.cz/tritium-a-gtls>

ALDEBARAN. Sluneční koróna. In: *Blýskání Petra Kulhánka* [online]. 2011 [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/zvuky/blyskani/docs/18.html>

AZO MINING. Leaching - Mining Fundamentals. In: AZo mining [online]. 29. 4. 2014 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://www.azomining.com/Article.aspx?ArticleID=1227>

BOHÁČOVÁ, Martina. Kosmické záření: Od balonových výstupů k částicovým detektorům. *Vesmír* [online]. 5. 7. 2000, 2000(7) [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2000/cislo-7/kosmicke-zareni.html>

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE. Radioactivity in food: In our glasses and on our plates .... In: RADIOACTIVITY.EU.COM [online]. 2022 [cit. 2022-12-18]. Dostupné z: [https://radioactivity.eu.com/in\\_daily\\_life/radioactivity\\_food](https://radioactivity.eu.com/in_daily_life/radioactivity_food)

CONNOR, Nick. What is Curie – Unit of Radioactivity – Definition. In: Radiation Dosimetry [online]. 14. 12. 2019 [cit. 2022-12-23]. Dostupné z: <https://www.radiation-dosimetry.org/what-is-curie-unit-of-radioactivity-definition/>

ČESKÁ METEOROLOGICKÁ SPOLEČNOST. Pára přesycená. In: Elektronický meteorologický slovník [online]. 2017a [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/heslo/2534>

ČESKÁ METEOROLOGICKÁ SPOLEČNOST. Glórie. In: Elektronický meteorologický slovník [online]. 2017b [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/heslo/986>

ČESKÝ METROLOGICKÝ INSTITUT. Základní pojmy. In: Český metrologický institut [online]. 2022 [cit. 2022-12-18]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/node/537>

ČT24. Čeští studenti dodali CERNu unikátní mlžnou komoru. In: Česká televize [online]. 2. 7. 2016 [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/domaci/1832780-cesti-studenti-dodali-cernu-unikatni-mlznou-komoru>

ELLIS, Jessica. What is Uranium Ore?. In: All the Science [online]. 24. 12. 2022 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://www.allthescience.org/what-is-uranium-ore.htm>

FYZIKÁLNÍ ÚSTAV AKADEMIE VĚD ČESKÉ REPUBLIKY. Mlžná komora [online]. 1998 [cit. 2022-09-15]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/popularizace/materialy-pro-skoly/mlzna-komora>

GORONOVSKI, Andrei. Banana Equivalent Dose. In: European Training Network for Zero-Waste Valorisation of Bauxite Residue [online]. 24. 1. 2018 [cit. 2023-01-06]. Dostupné z: <https://etn.redmud.org/banana-equivalent-dose/>

HOJCSKOVÁ, Pavlína. Comptonův jev. In: SPECT [online]. 12. 3. 2009 [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: <http://pet-spect.fbmi.cvut.cz/spect/index.php/fyzikalni-zakony/interakce-fotonu-s-hmotou/comptonuv-jev.html>

KRÁLOVÁ, Magda. Difuze. In: Eduportál Techmania [online]. 2007a [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/struktura-latek/kineticka-teorie-latek/difuze>

KRÁLOVÁ, Magda. Objev radioaktivity. In: Eduportál Techmania [online]. 2007b [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/kvanta/objev-radioaktivity>

KRÁLOVÁ, Magda. Záření alfa. In: Eduportál Techmania [online]. 2007c [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/atomy-castice/prirozena-radioaktivita/zareni-alfa>

KRÁLOVÁ, Magda. Záření beta. In: Eduportál Techmania [online]. 2007d [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/atomy-castice/prirozena-radioaktivita/zareni-beta>

KUSALA, Jaroslav. Jaderné reakce. In: Jaderná energetika [online]. 2004 [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/k31.htm>

NULEDO s. r. o. O mlžných komorách. Nuledo [online]. 2022a [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://www.nuledo.com/>

NULEDO s. r. o. Reference. Nuledo [online]. 2022b [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: <https://www.nuledo.com/reference/>

MARTINS, Maristela, Ariane Mendonça PACHECO, Ana Cyra Santos LUCAS, Avacir Casanova ANDRELLO, Carlos Roberto APPOLONI a Jose Junior Mendonça XAVIER. Brazil nuts: determination of natural elements and aflatoxin. Acta Amazonica [online]. 2012, 42(1), 157-164 [cit. 2022-12-15]. ISSN 0044-5967. Dostupné z: doi:10.1590/S0044-59672012000100018

MOTAL, Pavel a Martin VESELÝ. Rozhledy matematicko-fyzikální: Mlžná komora [online]. 83. 2008 [cit. 2022-11-13]. Dostupné z: [https://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/146256/Rozhledy\\_083-2008-3\\_2.pdf](https://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/146256/Rozhledy_083-2008-3_2.pdf)

PERIODICKÁ TABULKA. Uran. In: Periodická tabulka [online]. 2017 [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/92.html>

RAMESIS. Radiace kolem nás. In: Ramesis [online]. 2021, 26. 12. 2021 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: [https://www.suro.cz/aplikace/ramesis-wiki/index.php/Radiace\\_kolem\\_n%C3%A1s](https://www.suro.cz/aplikace/ramesis-wiki/index.php/Radiace_kolem_n%C3%A1s)

REICHL, Jaroslav a Martin Všeticka. Částice a antičástice. In: Encyklopedie fyziky [online]. 2006a [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/898-castice-a-anticastice>

REICHL, Jaroslav a Martin Všeticka. Detektory částic. In: Encyklopedie fyziky [online]. 2006b [cit. 2022-11-13]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/846-detektory-castic>

REICHL, Jaroslav a Martin Všeticka. Světelné hodiny a odvození vztahu pro dilataci času. In: Encyklopedie fyziky [online]. 2006c [cit. 2022-11-13]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/index.php/main.article/view/673-svetelne-hodiny-a-odvozeni-vztahu-pro-dilataci-casu>

RUDA, Aleš. Meteorologické prvky a jejich klimatologické charakteristiky [online]. 2014 [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz\\_geogr/web/pages/03-prvky.html](https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz_geogr/web/pages/03-prvky.html)

SELLA, Andrea. Wilson's cloud chamber. Chemistry World [online]. 2015, 24. 7. 2015 [cit. 2022-09-17]. Dostupné z: <https://www.chemistryworld.com/opinion/wilsons-cloud-chamber/8765.article>

SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ. Radioaktivita a odpady: Staráme se o naši bezpečnou budoucnost. Praha, 2019

STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST. Monitorování radiační situace. Státní úřad pro jadernou bezpečnost [online]. 2022 [cit. 2022-12-23]. Dostupné z: [https://www.sujb.cz/aplikace/monras/?lng=cs\\_CZ](https://www.sujb.cz/aplikace/monras/?lng=cs_CZ)

STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST. Opatření obecné povahy [online]. 21. 10. 2019, 7 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: [https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/OOP\\_spotrebnivyrobky.pdf](https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/OOP_spotrebnivyrobky.pdf)

STÁTNÍ ÚSTAV RADIAČNÍ OCHRANY. Základní pojmy. In: Státní ústav radiační ochrany, v. v. i. [online]. 2022 [cit. 2022-12-18]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/zakladni-pojmy>

ŠKRKAL, Jan, Petr RULÍK, Karin FANTÍNOVÁ a Jan HELEBRANT. Mapa kontaminace lupenatých hub lesního ekosystému České republiky <sup>137</sup>Cs v letech 2004 – 2011. Státní ústav radiační ochrany, v. v. i. [online]. 2012(25) [cit. 2023-01-06]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/files/2021-03/Mapa-kontaminace-lupenatych-hub-CR-Zprava-SURO-2012-25.pdf>

THE NOBEL PRIZE. C.T.R. Wilson: Biographical. The Nobel Prize [online]. 2022 [cit. 2022-11-13]. Dostupné z: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1927/wilson/biographical/>

TURNER, R. C.; RADLEY, J. M.; MAYNEORD, W. V. The naturally occurring alfa-ray activity of foods. Health physics, 1958, 1.3: 268-275.

ULLMANN, Vojtěch. Biologické účinky ionizujícího záření. Astro Nukl Fyzika [online]. 2022a [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: <https://astronuklfyzika.cz/strana2.htm>

ULLMANN, Vojtěch. Ionizující záření. Astro Nukl Fyzika [online]. 2022b [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: <https://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm>

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Radionuclide Basics: Americium-241. In: United States Environmental Protection Agency [online]. 5. 7. 2022a [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/radiation/radionuclide-basics-ameridium-241>

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Radionuclide Basics: Thorium. In: United States Environmental Protection Agency [online]. 5. 7. 2022b [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/radiation/radionuclide-basics-thorium>

VÁVRA, Václav, Jindřich ŠTELCL a Zdeněk LOSOS. Uraninit. In: Atlas minerálů [online]. 2022 [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <http://mineraly.sci.muni.cz/oxidy/uraninit.html>

VIRT, Martin. Jeníkov. In: Minerály Chomutovska [online]. 2021 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://mineraly.cv.webgarden.cz/rubriky/menu/lokality/jenikov>

WOITHE, Julia. CLOUD CHAMBER: Do-it-yourself manual [online]. 2016, s. 16 [cit. 2022-09-15]. Dostupné z: [https://scoollab.web.cern.ch/sites/default/files/documents/20200521\\_JW\\_DIYManual\\_CloudChamber\\_v7.pdf](https://scoollab.web.cern.ch/sites/default/files/documents/20200521_JW_DIYManual_CloudChamber_v7.pdf)