

Univerzita Hradec Králové
Přírodovědecká fakulta

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Univerzita Hradec Králové
Přírodovědecká fakulta
Katedra fyzika

Difúzní mlžná komora ve fyzikálním vzdělávání

Bakalářská práce

Autor: Lenka Maťátková
Studijní program: Fyzika
Studijní obor: Fyzika se zaměřením na vzdělávání –
Matematika se zaměřením na vzdělávání
Vedoucí práce: RNDr. Daniel Jezbera



Zadání bakalářské práce

Autor: Lenka Mat'átková

Studium: S19FY019BP

Studijní program: B1701 Fyzika

Studijní obor: Fyzika se zaměřením na vzdělávání, Matematika se zaměřením na vzdělávání

Název bakalářské práce: **Difúzní mlžná komora ve fyzikálním vzdělávání.**

Název bakalářské práce AJ: Diffusion cloud chamber in learning process of physics.

Cíl, metody, literatura, předpoklady:

Cílem práce bude popsat difúzní mlžnou komoru a její využití ve vzdělávání. V teoretické části bude úvod do jaderné a částicové fyziky, princip mlžné komory a její využití ve fyzice. Součástí bude i vyzkoušení základních měření, které umožňuje difúzní mlžná komora umístěná v Laboratoři experimentů z moderní fyziky.

PHYWE – Laboratory Experiments 25204-00, *Visualisation of radioactive particles / Diffusion cloud chamber*

Beiser, A., *Úvod do moderní fyziky* 1978, Praha: Academia

Špolskuj, E., V., *Atomová fyzika II* 1958, Praha: Státní nakladatelství technické literatury

Zadávací pracoviště: Katedra fyziky,
Přírodovědecká fakulta

Vedoucí práce: RNDr. Daniel Jezbera

Oponent: doc. RNDr. Jan Šlégr, Ph.D.

Datum zadání závěrečné práce: 11.8.2021

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně a že jsem v seznamu použité literatury uvedla všechny zdroje, ze kterých jsem čerpala.

V Hradci Králové dne 28. 7. 2022

Lenka Maťátková

Poděkování:

Ráda bych poděkovala vedoucímu bakalářské práce RNDr. Danielu Jezberovi za jeho pomoc a odborné rady během vzniku práce.

Dále děkuji Univerzitě Hradec Králové za umožnění napsání této práce.

Anotace

MAŤÁTKOVÁ, Lenka. *Difúzní mlžná komora ve fyzikálním vzdělávání*. Hradec Králové, 2022.

Bakalářská práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Hradec Králové. Vedoucí bakalářské práce RNDr. Daniel Jezbera. 45 s.

Bakalářská práce se zabývá využitím difúzní mlžné komory ve vzdělávání. V teoretické části jsou zahrnuty základní informace o radioaktivitě, využití radioaktivity a o jejich detektorech s důrazem na mlžnou komoru. Praktická část je věnována experimentu vychýlení β^- částic v magnetickém poli, zobrazení vychýlení pomocí mlžné komory a kvantitativním měřením pomocí Geiger-Müllerova detektoru.

Klíčová slova

Difúzní mlžná komora, ionizující záření, β částice, magnetické pole

Annotation

MAŤÁTKOVÁ, Lenka. *Diffusion cloud chamber in learning process of physics*. Hradec Králové, 2022.

Bachelor Thesis at Faculty of Science University of Hradec Králové. Thesis Supervisor RNDr. Daniel Jezbera. 45 p.

The bachelor thesis deals with the use of diffusion cloud chamber in education. The theoretical part includes basic informations about radioactivity, the use of radioactivity and their detectors with an emphasis on the cloud chamber. The practical part is dedicated to experiment of deflection of β^- –particles in a magnetic field, imaging of the deflection using the cloud chamber and quantitative measurement using a Geiger-Müller detector.

Keywords

Diffusion cloud chamber, ionizing radiation, β particles, magnetic field

Obsah

Úvod.....	9
Teoretická část	10
1. Atom.....	10
2. Radioaktivita	10
2.1. Historie objevování radioaktivity.....	10
3. Ionizace.....	11
4. Druhy záření.....	11
4.1. Záření α	12
4.2. Záření β	12
4.3. Záření γ	13
4.4. Neutronové záření.....	13
5. Zákony radioaktivity	13
5.1. Aktivita.....	13
5.2. Zákon radioaktivní přeměny.....	13
5.3. Poločas rozpadu	14
6. Využití radioaktivity	15
6.1. V lékařství.....	15
6.2. V zemědělství.....	16
6.3. V průmyslu	16
6.4. V archeologii	16
6.5. Jaderná elektrárna.....	17
7. Přírodní zdroje radioaktivity	18
8. Radiační ochrana	18
8.1. Radiační havárie.....	19
9. Detektory ionizujícího záření.....	20
9.1. Detekční.....	20
9.1.1. Geigerův-Müllerův detektor	20
9.1.2. Polovodičové detektory.....	21
9.1.3. Scintilační detektory	22
9.2. Zobrazovací.....	22
9.2.1. Bublinová komora.....	22
9.2.2. Jiskrová komora.....	23
9.2.3. Difúzní mlžná komora	24

10. Difúzní mlžná komora ve vzdělávání.....	27
Praktická část.....	29
11. Pozorování	30
12. Měření.....	35
Závěr.....	42
Seznam použité literatury	43
Zdroje obrázků	45

Úvod

Poprvé jsem se s difúzní mlžnou komorou setkala, když jsem ve třetím ročníku na střední škole v rámci fyzikálního semináře navštívila Hvězdárnu v Hradci Králové. Difúzní mlžná komora mě velice zaujala a vidět díky ní částice záření, které je všude kolem nás, mi přišlo fascinující. Když jsem se dozvěděla, že katedra fyziky Univerzity Hradec Králové má zakoupené nějaké experimenty, které by se měly odehrávat v difúzní mlžné komoře a chtěli by je postupně zařadit do výuky, rozhodli jsme se s doktorem Jezberou, že v rámci mé bakalářské práce provedu experiment o vychýlení β^- částic v magnetickém poli.

Toto téma jsem si nevybrala jenom kvůli difúzní mlžné komoře, ale i proto, že je velmi úzce spjato s radioaktivitou, která patří mezi mé oblíbené části fyziky.

V teoretické části bych se ráda věnovala základním informacím o radioaktivitě. Jak byla postupně objevena, jaké máme druhy záření, jak lze radioaktivitu využít, aby z ní měl člověk užitek, i něco o radiační nehodě. Dále jelikož toto záření nelze spatřit pouhým okem, tak bych se ráda zajímala o nějaké detektory, mezi které patří právě i difúzní mlžná komora. V neposlední řadě bych se ráda podívala i na to, jak difúzní mlžná komora slouží ke vzdělávání žáků základních či středních škol a široké veřejnosti. Umožňuje totiž zviditelnění radioaktivních částic, především α a β , a tím inspiruje vzdělávání o radioaktivitě.

V praktické části bych ráda provedla již dříve zmíněný experiment. Chci experiment provést v difúzní mlžné komoře, jak je napsáno v návodu od firmy PHYWE, která je výrobcem difúzní mlžné komory, na které chci experiment provést. Pokud by nebyly výsledky pozorování dostačující, ráda bych experiment zopakovala mimo komoru a změnila rozložení trajektorií β^- částic s ohledem na úhel vychýlení.

Teoretická část

1. Atom

Atom je základní stavební jednotkou veškeré živé i neživé přírody. Skládá se z jádra a elektronového obalu, přičemž navenek je elektricky neutrální.

V elektronovém obalu se nachází záporné částice elektrony. [1]

Jádro obsahuje kladné částice protony a neutrální částice neutrony, které se dohromady označují jednotným názvem nukleony. Počet protonů v jádře je vyjádřen protonovým číslem Z . Počet neutronů vyjadřuje neutronové číslo N . Nukleony udává nukleonové číslo A , pro které platí: $A = Z + N$. Každý atom je charakterizován právě protonovým a nukleonovým číslem a zapisujeme ho A_ZX , kde X představuje daný atom. V jádře je soustředěna většina hmotnosti atomu. [1]

Nuklid je složen z atomů stejných chemických prvků o stejném nukleonovém čísle. [2]

Izotop je nuklid stejného chemického prvku, mění se zde počet neutronů v jádře, ale počet protonů zůstává zachován. [2]

2. Radioaktivita

Radioaktivita je schopnost spontánní jaderné přeměny nestabilního prvku na jiný, více stabilní, prvek, při které dochází k emisím radioaktivního záření. Také víme, že radioaktivní pochody se uskutečňují v jádře, tudíž radioaktivita je nezávislá na vnějších fyzikálních a chemických podmínkách, které ovlivňují elektronový obal. Radioaktivitu můžeme rozčlenit na přirozenou a uměle vytvořenou. Přirozená, jak z názvu již vyplývá, se vyskytuje v přírodě a je vytvářena přírodními nuklidy, zatímco umělá radioaktivita byla vytvořena člověkem za pomoci jaderných reakcí. [1][2][3]

V dnešní době je známo více než dva tisíce nuklidů. Z toho jen 266 je stálých, tedy jen malá část. Všechny ostatní nuklidy lze nalézt v přírodě nebo vznikají při jaderných reakcích. Ty jsou však nestabilní, a proto se samovolně přeměňují na jiné stabilnější nuklidy, a tedy jsou radioaktivní. [4]

2.1. Historie objevování radioaktivity

Přirozená radioaktivita byla poprvé objevena v roce 1896 a jejím objevitelem byl francouzský fyzik Antoine Henri Becquerel, který právě pracoval na studiu uranových solí. Jen o pár let později, konkrétně v roce 1898, Marie Curie-Sklodovská a její manžel Pierre Curie objevili dva nové chemické prvky, radium a polonium, a na nich prováděli své studie o radioaktivitě, pozorovali řetěz

spontánních jaderných přeměn. Vědci radioaktivitu objevili nejprve u těžkých prvků. Tyto prvky můžeme najít v přírodě, jsou to například uran, radium, aktinium a thorium. Po nějakém čase byla nalezena přirozená radioaktivita i u prvků s malými či středními atomovými hmotnostmi, jako jsou například draslík, rubidium nebo lutecium. [3][5]

Umělá radioaktivita byla vytvořena a zaznamenána až v roce 1934. Jejími objeviteli byli manželé Iréne a Jean Frédéric Joliot-Curieovi. Iréne byla dcerou Marie a Pierra Curie a spolu s manželem pokračovali v jejich práci. V dnešní době známe více než 600 radioaktivních izotopů, které jsme schopni si uměle vytvořit. [1][3]

3. Ionizace

Ionizací nazýváme proces, během kterého se elektricky neutrální atom či molekula přemění na ionty. Slovem ionizace popisujeme stav zkoumaného vzorku materiálu, ve kterém jsou obsaženy ionty. Rekombinace označuje opačný proces k procesu ionizace. [6]

Rozlišujeme dva typy iontů. Záporným iontům říkáme anionty a kladným kationty. Navázáním volného elektronu s neutrální částicí dojde v elektronovém obalu atomu ke vzniku záporného elektrického náboje. Tento náboj indikuje přítomnost elektronu ve valenční vrstvě atomu, přesněji řečeno, indikuje přítomnost jednoho nadbytečného elektronu. Takové částice s jedním nebo více nadbytečnými elektrony se nazývají anionty. [6]

Kationty naopak vzniknou oddělením elektronu z elektronového obalu. Aby k oddělení došlo, musí elektron přijmout energii, například v podobě elektromagnetického záření, tedy v podobě fotonů. [6]

Energii, kterou atom k odtržení elektronu potřebuje, nazveme ionizační energií. Ionizační energie je tedy minimální energie, kterou atom potřebuje, aby došlo k ionizaci a vznikl kationt. Tato energie má jednotku elektronvolt a platí pro ni vztah $1eV = 1,6 \cdot 10^{-19}J$. [6]

4. Druhy záření

Během jaderné přeměny nuklid vyzařuje radioaktivní záření. Je to jedna z forem ionizujícího záření. Ionizující proto, protože tímto zářením se z neutrálních atomů a molekul stávají ionty a to tím, že dojde k vyzařování částice z atomového obalu. [2]

Radioaktivní záření dělíme na:

1. Záření α
2. Záření β
3. Záření γ
4. Neutronové záření
5. Další typy elementárních částic [2]

4.1. Záření α

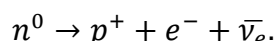
Záření α je proud jader helia ${}^4_2\text{He}$, též označovaných částice α . Toto záření je vyzařováno velmi těžkými nuklidy, aby došlo k ponížení počtu protonů v jádře a tím se snížilo i množství energie, kterou potřebují přitažlivé síly v jádře k jeho udržení v celku. Částice α jsou kladně nabitě, protože náboj dvou protonů není kompenzován elektrony z atomového obalu. [2]

K pohlčení záření α nám postačí papír o vyšší gramáži nebo několik centimetrů silná vrstva vzduchu. Záření α se při průletu elektrickým nebo magnetickým polem vychyluje ze své původní dráhy. [1]

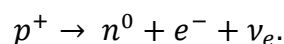
4.2. Záření β

Záření β se skládá z částic nesoucí náboj. Existují dva druhy tohoto záření a to β^- a β^+ . Konkrétně pro záření β^- to jsou elektrony, takže záření má záporný elektrický náboj, a pro záření β^+ jsou těmito částicemi pozitrony, takže záření má kladný elektrický náboj. Přitom pozitrony jsou antičástice k elektronům. [2]

Záření β^- vzniká v jádře rozpadem volného neutronu na proton, elektron a elektronové antineutrino podle rovnice



Záření β^+ vzniká též v jádře u prvků, které mají více protonů než neutronů. V tomto případě dochází k přeměně protonu na neutron, elektron a elektronové neutrino podle rovnice



K pohlčení záření β potřebujeme pouze tenkou vrstvu hliníku. Záření β se při vložení do elektrického nebo magnetického pole též vychyluje ze své původní dráhy. [1][2]

4.3. Záření γ

Elektromagnetické záření s velmi krátkou vlnovou délkou se nazývá záření γ . Jedná se o emisi fotonů s velkou energií, kvůli které je toto záření velice pronikavé. [2]

Jako ochrana před zářením γ nám slouží silné vrstvy těžkých kovů, jako je například olovo. Záření γ nenesení elektrický náboj, takže při vložení do elektrického nebo magnetického pole se nevychyluje, je u něj zachována původní trajektorie na rozdíl od záření α a β . [1]

4.4. Neutronové záření

Jedná se o záření, kdy dochází k emisi neutronů n^0 . Neutronové záření nenesení žádný náboj a je také velmi pronikavé. [1]

Na pohlcení neutronového záření potřebujeme materiály, které mají jádra o podobné hmotnosti jako je hmotnost neutronu, například vodu. Neutronové záření se při vložení do elektrického nebo magnetického pole rovněž nevychyluje stejně jako záření γ . [1]

5. Zákony radioaktivity

5.1. Aktivita

Aktivitou vzorku označujeme rychlost, s jakou se radioaktivní materiál přeměňuje, obvykle z těžších jader na lehčí. Aktivitu značíme písmenem A a je charakterizována vztahem

$$A = -\frac{dN}{dt}. \quad (1)$$

Písmeno N představuje počet jader a t jednotku času. Jelikož aktivita nám říká, jak rychle dochází k úbytku ve vzorku, bude podíl $\frac{dN}{dt}$ záporný, proto musíme před zlomek přidat znaménko mínus, aby byla výsledná hodnota kladná. Jednotkou aktivity je 1 Bq, resp. 1 becquerel, a vyjadřuje jednu radioaktivní přeměnu za sekundu. Před zavedením jednotky becquerel se používala jednotka Ci, resp. curie. Tato jednotka byla pojmenována po Pierru Curie. Mezi jednotkami curie a becquerel platí převodní vztah: $1Ci = 3,7 \cdot 10^{10} Bq$. [2][7][8]

5.2. Zákon radioaktivní přeměny

Vyjdeme-li ze vzorce (1) aktivity radioaktivního materiálu, můžeme psát

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N.$$

Písmenu λ se říká přeměnová, resp. rozpadová, konstanta, která nabývá pro každý izotop různé hodnoty. Z předchozího vztahu dostáváme rovnici

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N, \quad (2)$$

kterou budeme postupně upravovat

$$-dN = \lambda N dt$$

Tuto nově získanou rovnici vykrátíme N a zintegrujeme

$$\begin{aligned} \frac{dN}{N} &= -\lambda dt \\ \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} &= \int_{t_0}^t -\lambda dt \\ [\ln N]_{N_0}^N &= -\lambda [t]_{t_0}^t \\ \ln N - \ln N_0 &= -\lambda(t - t_0) \end{aligned}$$

Předpokládejme, že počáteční čas $t_0 = 0$ s a rovnici zlogaritmuje

$$\begin{aligned} \ln \frac{N}{N_0} &= -\lambda t \\ \frac{N}{N_0} &= e^{-\lambda t} \\ N &= N_0 e^{-\lambda t}. \end{aligned} \quad (3)$$

Výsledný vztah vyjadřuje zákon radioaktivní přeměny, kde N_0 představuje počet jader na začátku přeměny a N počet nepřeměněných jader po čase přeměny t . Ze vztahu je patrné, že množství dosud nepřeměněných jader klesá exponenciálně. [2]

5.3. Poločas rozpadu

Pojem poločas rozpadu zavádíme proto, že chceme určit dobu, za kterou se v daném vzorku přemění polovina jader. Označujeme ho písmenem T . Po uplynutí jednoho poločasu rozpadu se ve vzorku z původních N_0 jader přemění $\frac{N_0}{2}$ jader. Rovnici radioaktivní přeměny (3) můžeme tedy přepsat do tvaru

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T}.$$

Nyní celou rovnici můžeme vydělit N_0 a použít logaritmus

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} &= e^{-\lambda T} \\ \ln \frac{1}{2} &= -\lambda T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ln 1 - \ln 2 &= -\lambda T \\ \ln 2 &= \lambda T \\ T &= \frac{\ln 2}{\lambda}. \end{aligned} \quad (4)$$

Tento vzorec zároveň udává i vztah mezi poločasem rozpadu T a rozpadovou konstantou λ . Pro λ platí

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T}. \quad (5)$$

Proto můžeme zákon radioaktivní přeměny (3) psát též ve tvaru [2]

$$N = N_0 e^{-\frac{\ln 2}{T}t}. \quad (6)$$

6. Využití radioaktivity

Od objevení radioaktivity přišlo lidstvo na spoustu způsobů, jak toto záření využít v praxi. V této kapitole bych uvedla několik příkladů jejího využití.

6.1. V lékařství

Lékařská věda využívá vybrané radioaktivní nuklidy k zobrazování vnitřních orgánů nebo procesů v lidském těle. Daná látka ve formě roztoku se vpraví do těla, pomocí krevního oběhu je roznesena a dle svých vlastností se usazuje v orgánech. K tomuto účelu jsou vhodné nuklidy s krátkým poločasem rozpadu, řádově desítky minut až hodiny. Vyšetření pomocí radioaktivní látky pomáhá monitorovat základní životní pochody v lidském těle, například proudění krve. [9]

Radioaktivní prvky jsou obsaženy v léčivech a slouží k diagnostice, stopovacím vyšetřením či k terapii. Pomocí těchto látek se studují vzorky tělních tekutin a jejich složení. Použitá metoda odhalí přítomnost látky od koncentrace $1 \cdot 10^{-12}$ g v 1 litru. Při terapii se radiofarmaka hromadí v rakovinné tkáni a ozařují nádor zevnitř. [9]

U radioterapie se využívají silné zářiče gama, rentgenové záření a občas i záření z urychlovačů. Ve výjimečných případech se malé zářiče jehlovitého tvaru aplikují přímo do nádoru. Leksellův gama nůž slouží k léčbě nádorů a chorobných procesů v lidském těle. Vysílá mnoho slabých gama paprsků radionuklidu ^{60}Co na jedno místo. Paprsek samotný je bezpečný, ale součet účinků všech paprsků, je schopen nádor zničit. Leksellův gama nůž zničí pouze nádor, okolní tkáň je výrazně méně zasažena. [9]

Ozařování se ve zdravotnictví hojně využívá i ke sterilizaci zdravotnického materiálu. Sterilizace tímto způsobem je výhodná, neboť to lze použít i na neprodyšně uzavřené materiály, protože radiace je schopna proniknout obalem. [9]

V neposlední řadě se s radioaktivitou setkáme i v lázeňství. V České republice máme několik radiologických lázní, nejznámější v Jáchymově. Slouží k léčbě nemocí pohybového ústrojí a revmatických onemocnění pomocí koupelí ve vodě přírodně obohacené radioaktivním uranem. [9]

6.2. V zemědělství

V zemědělství se značné množství potravin zničí přirozeným způsobem, tedy hnilobou, škůdci, plísněmi či předčasným klíčením. Pokud ovšem potraviny ozáříme gama paprsky, například ^{60}Co , dojde k zahubení mikroorganismů, škůdců nebo k potlačení klíčivosti a díky tomu se prodlouží doba skladovatelnosti. Podobně se mohou sterilizovat potraviny i pro kosmonauty. V ozářených potravinách se radioaktivní prvky nevyskytují, nejsou tedy pro konzumenty nebezpečné. [10]

6.3. V průmyslu

Radioaktivní látky se v průmyslu používají pro podobné účely jako v lékařství. Využívají se na stopovací techniku k monitorování pohybu a rozdělení hmoty v určitých zařízeních a ke kontrolám opotřebovaných součástí. Radioaktivní zářiče jsou obsaženy v čidlech při výrobě papíru, skla či plastu a hlídají tloušťku materiálů nebo hladiny kapalin. Záření se používá i k barvení různých druhů skel na odstíny žluté, hnědé, kouřové či ametystové. [11]

Radioaktivitu, respektive radioaktivní látky, lze nalézt i v hlásiči kouře a požáru, který je složen z čidla obsahující radioaktivní zářič, ten vytváří v čistém vzduchu slabý proud částic α mezi elektrodami. Pokud je místnost plná kouře, dojde k narušení tohoto proudu a hlásič na situaci bude reagovat. [12]

Dalším využitím radioaktivity se zabývají vodohospodáři, kteří pomocí ní měří průtok v řekách či vodovodních potrubích. Pomocí ozařování se také mohou ošetřovat odpadní vody, ve kterých jsou obsaženy nebezpečné látky ještě předtím, než je voda přivedena do běžných čističek odpadních vod. Zářiče obsahující radiokobalt jsou schopny zabránit množení mikroorganismů, snižujících kvalitu pitné vody ve studních. [12]

6.4. V archeologii

Nejrozšířenější využití v technické oblasti je určování stáří organických archeologických pozůstatků a hornin pomocí radiouhlíkové analýzy. Podstatou tohoto procesu je měření zbytku radioaktivního izotopu ^{14}C . Jedná se o spolehlivou

metodu, pomocí které lze určit stáří biologického materiálu, například dřeva, kostí nebo textilií. Uhlík vzniká v atmosféře, váže se na molekulu O_2 , čímž vznikne oxid uhličitý, který fotosyntézou vniká do rostlin a v nich ve formě potravy do všech živých organismů. Za života se hladina ^{14}C drží v rovnovážném stavu, po smrti se ^{14}C začíná rozpadat. [11]

6.5. Jaderná elektrárna

Existuje mnoho různých typů elektráren podle toho, jak získávají energii k tvorbě tepla. Klasické tepelné elektrárny, které získávají teplo ze spalování, ať už uhlí nebo plynu. Obsahují spalovací kotel, kde tento proces probíhá. Jaderné elektrárny místo kotle mají jaderné reaktory. Teplo, které vznikne v reaktoru, v aktivní zóně, se odvádí a ve formě páry pohání turbínu. Ostatní následná zařízení jsou již stejná s ostatními elektrárnami. [4]

Jaderný reaktor nám poskytuje možnost udržet a řídit jadernou řetězovou reakci a neustále odvádět vznikající teplo. V reaktoru se nachází palivové články, řídicí tyče, moderátor a chladící médium. [4]

Za nejrozšířenější se považují v dnešní době tlakovodní reaktory. V tomto případě je moderátor i chladící médium v podobě vody. Do tlakovodních reaktorů se jako palivo používá obohacený uran ^{235}U . V aktivní zóně nalezneme velké množství palivových tyčí, uzavřených v ocelové tlakové nádobě, ve které se také nacházejí regulační tyče, které se v případě potřeby spouští shora mezi tyče palivové, a tím regulují řetězovou reakci. Voda sloužící jako médium proudí reaktorem pod tak vysokým tlakem, aby byla schopna zůstat v kapalném stavu i při teplotě blízké se $300^\circ C$. [4]

V České republice máme v současnosti dvě jaderné elektrárny. Jsou to Jaderná elektrárna Dukovany a Jaderná elektrárna Temelín.

Jako vůbec první jaderná elektrárna na našem území byla postavena Jaderná elektrárna Dukovany, která funguje se čtyřmi výrobními bloky. Ty obsahují tlakovodní jaderné reaktory typu VVER 440. V květnu 1985 byl poprvé spuštěn první reaktorový blok, postupně byly přidávány další a od července 1987 elektrárna vyrábí energii ve všech čtyřech blocích. V současnosti Jaderná elektrárna Dukovany vyrábí 4×510 MV. Předpokládá se, že elektrárna zůstane v provozu až do roku 2037, ale pravděpodobně bude možné tuto dobu ještě prodloužit až na rok 2047. Elektrárna svojí výrobou dokáže pokrýt více než 20 % celkové spotřeby energie v České republice. Od uvedení prvního bloku do provozu vyrobila elektrárna již více než 433 miliard kWh elektrické energie. Toto množství by pokrylo spotřebu všech domácností u nás na více než 28 let. [13]

Druhou jadernou elektrárnou v České republice je Jaderná elektrárna Temelín, nacházející se v jižních Čechách. Tato jaderná elektrárna je menší než Jaderná elektrárna Dukovany, neboť vyrábí energii pouze ve dvou výrobních blocích. Opět zde při stavbě byly použity tlakovodní reaktory, tentokrát VVER 1000 typu V 320.

V areálu elektrárny jsou prostory pro případnou výstavbu dalších dvou bloků. V současné době elektrárna dosahuje výkonu $2 \times 1078 \text{ MW}$. [14]

7. Přírodní zdroje radioaktivity

Lidé jsou přírodními zdroji radioaktivity ozařování už od vzniku života na Zemi a do veliké míry se tomu ani nelze vyhnout. Jsou to zdroje radioaktivního pozadí. Přírodní zdroje se dají rozdělit na několik skupin:

1. Kosmické záření – toto záření s vysokou energií přichází k Zemi ze Slunce a není možné se mu nijak vyhnout. Zde záleží na tom, v jaké nadmořské výšce se člověk pohybuje, neboť čím žije ve vyšších polohách, tím více záření na něj dopadá. Kosmické záření se skládá z 90 % z protonů, z 9 % z α částic a z 1 % z nuklidů. [15][16]
2. Přírodní radionuklidy – tyto prvky nalezneme v zemské kůře nebo v atmosféře, a tedy i přímo v našem životním prostředí a dají se rozdělit:
 - a) Kosmogenní radionuklidy – když na Zemi dopadne kosmické záření, dojde k interakci se stabilními prvky na vnějším obalu Země a během jaderných reakcí vznikají radionuklidy.
 - b) Primordiální radionuklidy – ke vzniku těchto částic došlo již dávno, ještě v ranných stádiích vesmíru, ale protože mají velmi dlouhý poločas rozpadu, stále se na Zemi vyskytují. Mnoho dalších takových radionuklidů, ale s trochu kratším poločasem rozpadu, se zde už neexistují nebo je jich už tak malé množství, že je skoro nelze zaznamenat.
 - c) Sekundární radionuklidy – tyto radionuklidy původně neexistovaly a vznikly z původních radionuklidů, které tvoří rozpadové řady. [15]

Vnější ozařování člověka z přírodních zdrojů pochází nejčastěji od prvků jako jsou ^{226}Ra , ^{232}Th a ^{40}K , které se nacházejí v horninách a půdách svrchní povrchové vrstvy Země. Přitom tato vrstva je široká jen desítky centimetrů. [15]

U člověka dochází i k vnitřnímu ozařování. V této oblasti zcela dominuje ^{222}Rn nebo ^{220}Rn a produkty vznikající během jejich přeměny. Dalším důležitým prvkem v oblasti vnitřního ozařování člověka je radioaktivní ^{40}K . Jeho koncentrace se v těle přísně homeostaticky udržuje a je u skoro všech osob stejná. Jedná se o hodnotu okolo 55 Bq/kg. [15]

8. Radiační ochrana

V průběhu našeho života jsme neustále ozařováni, jak z přírodních, tak i z umělých zdrojů záření a všechny činnosti člověka se vážou na hromadění dávek různé intenzity, například při dýchání se do nás dostávají radioaktivní látky přímo ze vzduchu, ve velmi malém množství se vyskytují v potravinách, ozařují nás

radioaktivní látky, nacházející se přímo v našem těle, ale setkáme se s nimi i při kontaktu s umělými zdroji záření. [17]

Radiační ochrana rozděluje ozáření na tři kategorie:

1. Ozáření při práci – do této kategorie spadají v podstatě všechna ozáření, která se stala v práci či jako důsledek pracovní činnosti
2. Ozáření lékařské – jedná se o veškerá ozáření, která jsou součástí různých vyšetření a postupů léčby prováděných na pacientech
3. Obecné ozáření obyvatel – sem patří všechna další ozáření, jako jsou ozáření z radioaktivních prvků a sloučenin, které se do okolí dostávají úmyslně z jaderných nebo jiných zařízení, ať už na území České republiky nebo ze zahraničí. Dále z vnějšího ozáření při blízkosti u zdroje jako jsou například čekárny v nemocnici, slabé ozáření ze zdrojů předváděných v rámci školní výuky nebo z testování jaderných zbraní. [17]

Pod systém radiační ochrany nezařazujeme ozáření, která spadají mimo kontrolu člověka. Mluvíme tedy o zdrojích jako je ^{40}K v lidském těle, kosmické záření přicházející ze Slunce nebo i přesuny do různých nadmořských výšek. [17]

V dnešní době radiační ochrana vychází ze současných znalostí o biologických účincích zařízení, ze současných obecných postojů společnosti vůči ochraně zdraví občanů při vlivech technického pokroku a životního prostředí, ale také z nutnosti praxe, protože musíme brát v úvahu veškeré případy ozáření, které se objevili nebo objeví a hledat pro ně řešení. [18]

8.1. Radiační havárie

Pokud dojde k neplánovanému ozáření nebo rozšíření radioaktivní látky, jedná se o mimořádnou situaci. Ty se rozdělují na dvě skupiny, radiační nehody a radiační havárie. Za radiační nehodu považujeme takový případ, u kterého dojde k nepřípustnému uvolnění radioaktivních látek nebo radiace, popřípadě když jsou ozáření lidé. Za radiační havárii považujeme radiační nehodu, u které je nezbytné provést opatření k ochraně občanů a životního prostředí. Když nastane radiační nehoda, její důsledky jsou převážně lokální, vznikají v prostorách, kde se ze zdroje záření pracuje, avšak radiační havárie má za následek širší zamoření, tedy nejen na pracovišti, ale i v okolním prostředí nastane únik radioaktivních látek do krajiny. [19]

Pro veškeré nehody a havárie jsou stejné základní principy havarijního plánování, odlišné budou pouze při výběru jednotlivých opatření a to, jak budou po sobě následovat. Výběr opatření k ochraně obyvatel se odvíjí od povahy nehody či havárie, jako rovněž od toho, jak dlouho trvá, a jak velké území zasáhne. [19]

V případě úniku se plánují a podle potřeby i realizují tyto okamžitá ochranná opatření:

1. Informování o úniku odpovědných úřadů
2. Varování ohrožených občanů
3. Jejich ukrytí a následná evakuace
4. Jódová profylaxe
5. Omezení pohybu osob v zamořeném prostředí
6. Dekontaminace obyvatel
7. Poskytnutí speciální zdravotní péče všem osobám, které byly ozářeny či kontaminovány

Mezi následná opatření řadíme dekontaminaci zasažených prostor a budov, regulaci zásobování potravinami, veterinární a zemědělská opatření a v nutných případech i dlouhodobější přemístění občanů do nezamořených oblastí. [19]

9. Detektory ionizujícího záření

Radioaktivní záření je pro nás ve své podstatě neviditelné, a proto máme potřebu si jej nějakým způsobem zaznamenat nebo dokonce dočasně zviditelnit. K tomuto účelu nám slouží detektory. V dnešní době existuje již více druhů detektorů, které by se daly rozdělit na dvě kategorie.

1. Detekční, které částice dokáží zaznamenat a popřípadě i spočítat jejich koncentraci v okolí. Do této kategorie můžeme zařadit Geiger-Müllerův detektor, polovodičové detektory i scintilační detektory.
2. Zobrazovací, díky kterým jsme schopni za určitých podmínek radioaktivní částice dočasně zviditelnit. Do této kategorie můžeme zařadit různé druhy komor, jako je bublinová, jiskrová či mlžná.

9.1. Detekční

9.1.1. Geigerův-Müllerův detektor

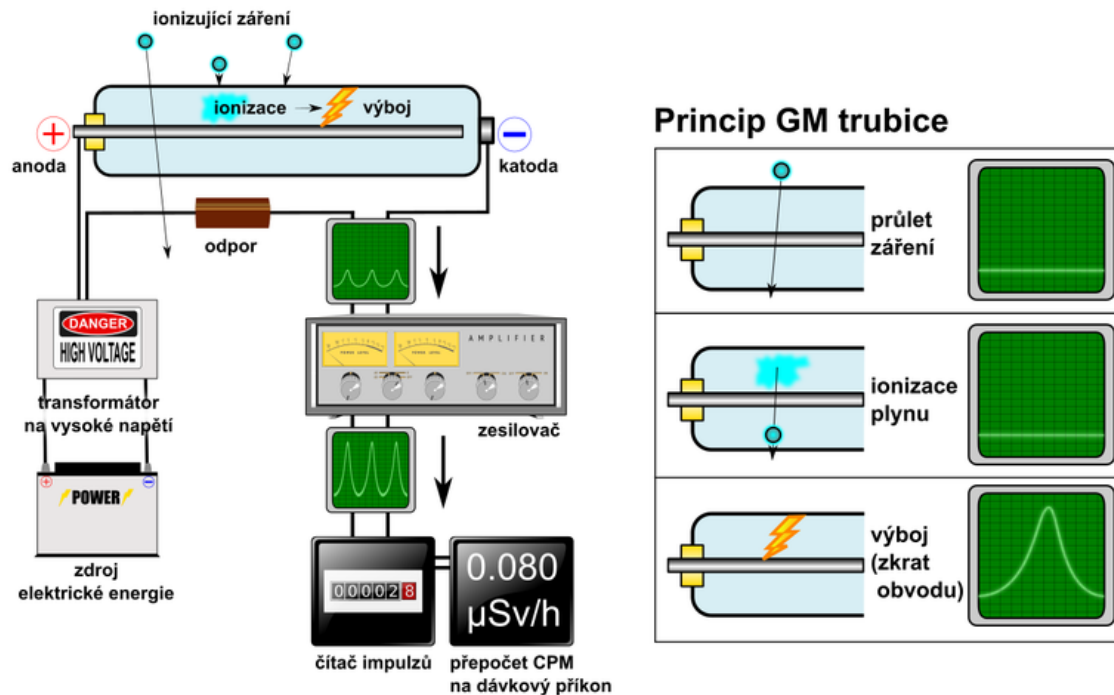
Geiger-Müllerův detektor byl zkonstruován dvěma německými vědci Hansem Geigerem a Waltherem Müllerem v první polovině 20. století. [20]

Detektor je naplněn směsí neonu s nějakým halogenem o nižším tlaku než okolním atmosférickým a je složen z válcové katody, která tvoří samotný plášť trubice, a anody v podobě tenkého drátku uvnitř. [20] [21]

Trubice je připojena ke zdroji vysokého napětí a mezi elektrodami je natolik velké napětí, že jediná částice, přilétnutím do detektoru, způsobí elektrický výboj v plynu, který je zaznamenán. [20] [21]

Projde-li detektorem částice záření, vytvoří ve směsi neonu a halogenu páry elektron-kladný iont ve svém blízkém okolí. Kladné ionty se díky elektrickému poli

mezi elektrodami pomalu přesouvají směrem ke katodě, kde dojde k jejich neutralizaci. Elektrony se naopak přesouvají k anodě při velkém zrychlení, tudíž během cesty mohou narazit na další molekuly plynu a ionizovat je. Tímto způsobem dojde k elektronové lavině, která zesílí původní signál a vytvoří proudový impuls. [20] Ten se přes zesilovač objeví na čítači pulzů. [21]



Obrázek 1: Zobrazení součástí Geiger-Müllerovi trubice

Aby byl detektor schopen zaznamenat i ostatní částice je potřeba vrátit ho do původního stavu. K tomu lze použít dvě cesty, zaprvé občasným snížením napětí na katodě a anodě, zadruhé halogen uvnitř trubice plní funkci zhasacího plynu. [20] [21]

Některé typy tohoto detektoru obsahují i reproduktor, který následně slouží jako jednoduchý indikátor intenzity záření. [21] Člověk slyší tukaní a jeho rychlost je úměrná počtu dopadajících částic.

9.1.2. Polovodičové detektory

Polovodičové detektory fungují na principu elektrických vlastností p/n rozhraní. Detektor je složen z prvku křemíku či germania jednoho typu, p nebo n, a následně pokryt vrstvou materiálu s polovodičovými vlastnostmi opačného typu. Připojíme-li detektor ke zdroji vysokého napětí tak, že záporná část se spojí s p částí rozhraní a kladná část zdroje k n části rozhraní, budou se volné záporné elektrony a kladné díry pohybovat směrem ke svým elektrodám. Na rozhraní vznikne prostor s malým počtem elektronů a děr, proto zde vznikne velký elektrický odpor. Tato oblast je velmi citlivá a schopná zaznamenat ionizující záření. [4]

Pokud se ionizující částice dostane do prostoru, citlivého na ionizující záření, vznikne ionizace podél trajektorie elektronu a díry. Elektron a díra se pohybují ke svým elektrodám, a tím dojde ke vzniku krátkého proudového impulsu, který je dále upraven na napěťový puls. [4]

S ohledem na vysokou výrobní cenu polovodičových detektorů se detektory využívají pouze na spektroskopii částic záření α a γ . [4]

9.1.3. Scintilační detektory

Scintilační detektory fungují na principu účinků excitace ionizujícího záření. Když dochází k absorpci záření, vždy se nějaká část energie spotřebuje, aby došlo ke vzniku excitovaných stavů v látce, která záření absorbuje. Existují i takové materiály, které jsou opticky průhledné, kdy se při deexcitaci excitační energie změní na světelnou energii a vytvoří světelný záblesk, dochází k luminiscenci. Tyto materiály se mohou použít, ke změření ionizujícího záření pomocí detekce vyzařovaného světla. K tomu, aby světelné záblesky mohly být zaznamenány slouží fotonásobič, který se používá k převedení záblesků na elektrické impulzy. [4]

9.2. Zobrazovací

9.2.1. Bublinová komora

Bublinová komora, vynalezená Donaldem Glaserem v roce 1952, je složena z nádrže, uvnitř které se nachází nestabilní, přehřátá průhledná kapalina. Jedná se například o vodík nebo směs neonu a vodíku o teplotě kolem 30°K , tedy kolem $-243,15^{\circ}\text{C}$. Kapalina v komoře je velmi citlivá na nabitě částice procházející komorou. Ty způsobují var z důvodu energie, kterou ionizací atomů ukládají, když kapalinou prochází. [22]

Bublinová komora funguje tak, že kapalina ve složení neon-vodík v poměru 2:1 se udržuje pod stálým tlakem o velikosti přibližně 5 atmosfér. Těsně předtím, než se paprsek částic dostane do komory, sníží se tlak kapaliny na 2 atmosféry, čímž dojde k jejímu přehřátí. Když částice z paprsku prochází kapalinou, ionizované atomy ukládají vyzářenou energii a to způsobuje, že kapalina podél jejich drah vře. Některé částice přicházející paprskem se mohou srazit s atomovým jádrem a produkty nabitých částic těchto reakcí ionizují kapalinu a způsobují vznik bublin. Tyto bubliny narostou do průměru asi 1 mm, jsou vyfoceny fotoaparátem s bleskem. Následně se tlak navýší, aby se bubliny ztratily a čeká se na další částice z paprsku. [22]

Doba mezi jednotlivými dávkami částic se může dle typu bublinové komory měnit. [22]



Obrázek 2: Gargamella, těžkovodní bublinová komora v CERNu

9.2.2. Jiskrová komora

Jiskrová komora byla vyvinuta v 60. letech 20. století, aby nahradila do té doby používanou bublinovou komoru. [23]

První jiskrová komora měla podobu kovových desek, které byly velmi tenké a byly seřazeny vedle sebe ve vzdálenosti několika milimetrů. Všechny desky se nacházely v neinertním plynu, velice vhodný byl například neon. Při průletu částice komorou zůstává viditelná stopa podobně jako v mlžné komoře. Hned poté, jak částice prolétne, dojde k použití pulzu vysokého napětí na kovové desky komory. V tomto okamžiku dojde ke vzniku jiskření podél ionizovaných drah, neboť zde vzniklo silné elektrické pole. Samotné jiskry můžeme pro představu přirovnat k bleskům během bouřky. Záznamy stop vzniklé v jiskrové komoře se mohou uchovat v podobě fotografií nebo jako zvukový záznam zachycený v komoře pomocí elektronických mikrofónů. Následně se díky záznamům mohou trajektorie dopočítat za pomoci počítačové analýzy. Jiskrová komora je zvenčí vybavena scintilačními detektory, díky kterým se mohou zaměřit částice prolétávající komorou. Tento jev se však odehrává v rozmezí desetin mikrosekund. Tento časový úsek je tak krátký, že ionty vzniklé v komoře nestihnou zaniknout, tudíž pulz vysokého napětí dokáže odhalit trajektorii částic bez jakýchkoli problémů. [23]

Pokud místo kovových desek použijeme vodivá vlákna na vzdálenost kolem jednoho milimetru, tak nově vzniklý pulz od jiskry se zaregistruje na jednom až dvou vláknech, nacházejících se nejbližší pulzu. Toto uspořádání nám dodá přesné informace o poloze trajektorie částice. [23]

Drátěná jiskrová komora je tisíckrát rychlejší než její předchůdce, bublinová komora. Drátěné jiskrové komory se mohly skládat do tří rozměrů a poskytovaly tedy trojrozměrné obrazy o trajektoriích částic. Počítače následně ze získaných

údajů byly schopny vypočítat energii a hybnost částic a provést jejich identifikaci. [23]

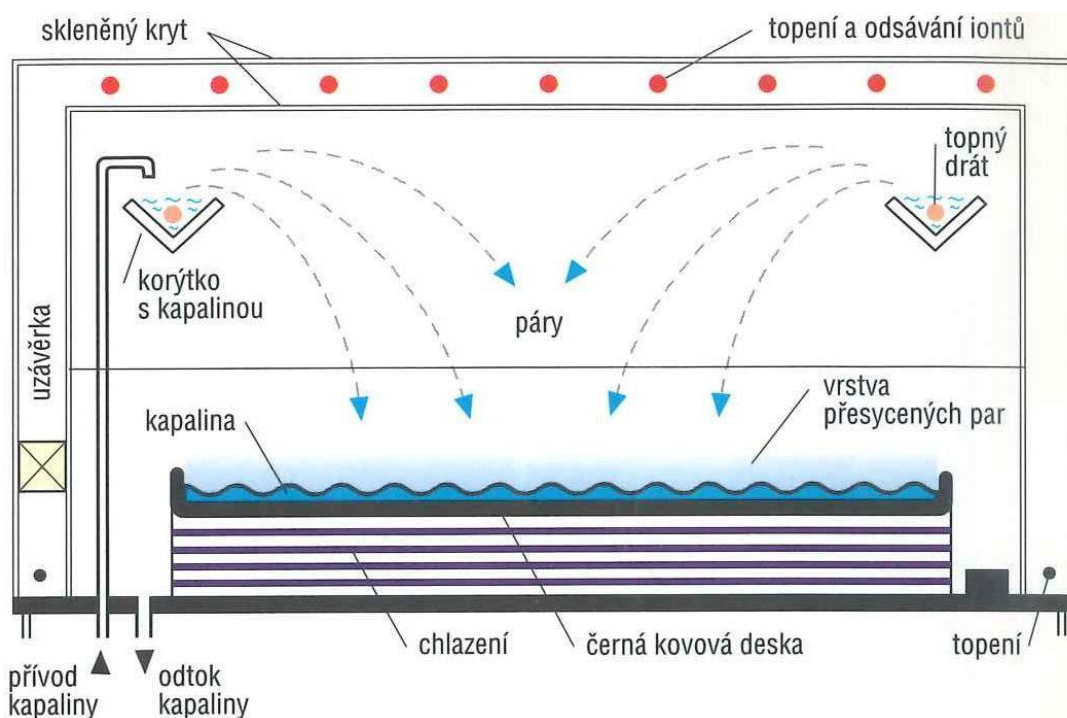
9.2.3. Difúzní mlžná komora

Difúzní mlžná komora se používá ke zviditelnění stop kosmického a pozemského záření tak, že je možné rozpoznat širokou škálu přírodních zdrojů záření. Dále je možné, právě díky mlžné komoře, vyzkoušet si různé experimenty s umělými zdroji záření. [16]

Mlžná komora se skládá ze základní a pozorovací komory. V základní komoře se nachází chlazení, napájení, nádrž na alkohol, alkoholové čerpadlo a programovatelný časový spínač. Pozorovací komora se nachází nad základní komorou. Její dno je tvořeno silnou černou kovovou deskou, která je po celé své ploše ochlazována na teplotu okolo -30°C pomocí chlazení. [16]

Horní deska a všechny boční stěny jsou tvořeny ze dvou skleněných krytů, které jsou rozmístěny nad sebou. Mezi horními deskami se nachází mřížka z tenkých drátků. Ty slouží k ohřívání této části komory, čímž nedochází ke kondenzaci. Drátky se udržují pod vysokým napětím, generují elektrické pole, které následně přitahuje ionty. V horní části se také nachází elektricky ohříváný kanál (korýtka), který najdeme po celém obvodu pozorovací komory. Do kanálku kape izopropylalkohol, který je přiváděn z nádrže. [16]

Alkohol se postupně odpařuje a z horní zahřáté části komory pomalu klesá ke dnu, kde je komora studená. V chladu se páry alkoholu kondenzují do drobných kapiček a odtéká zpět do nádrže. [16]

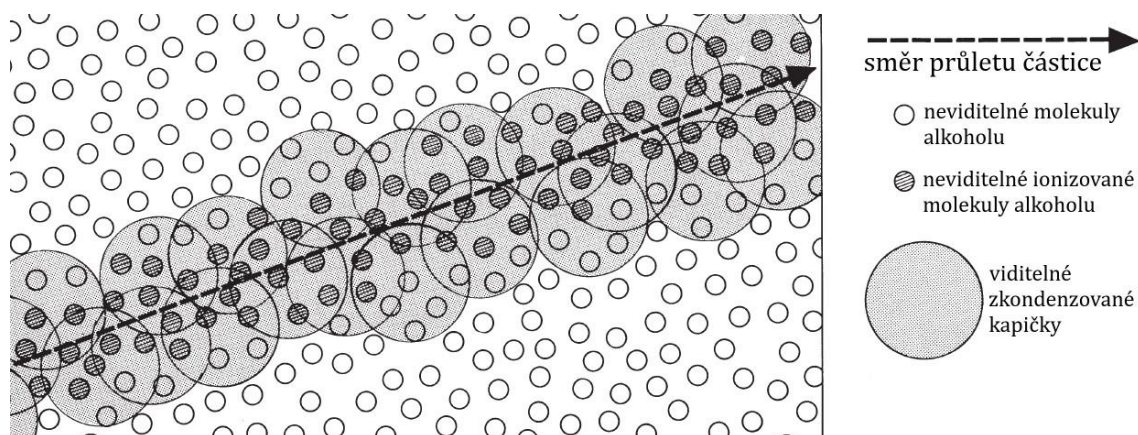


Obrázek 3: Vnitřní uspořádání difúzní mlžné komory



Obrázek 4: Difúzní mlžná komora nacházející se v Laboratoři experimentů moderní fyziky na Katedře fyziky Přírodovědecké fakulty Univerzity Hradec Králové

Nade dnem vzniká tenká vrstva přesycených alkoholových par. Pouze v této oblasti dochází k tomu, že nabité částice přicházející zevnitř nebo zvenku produkují nabití ionty. Ionizované molekuly alkoholu se navzájem přichytí, čímž vzniknou kondenzované kapičky, které vytvoří viditelnou stopu. Díky délce a podobě dráhy stopy dokážeme získat informace o druhu ionizované částice. [16]



Obrázek 5: Jak vznikají stopy radioaktivních částic v difúzní mlžné komoře

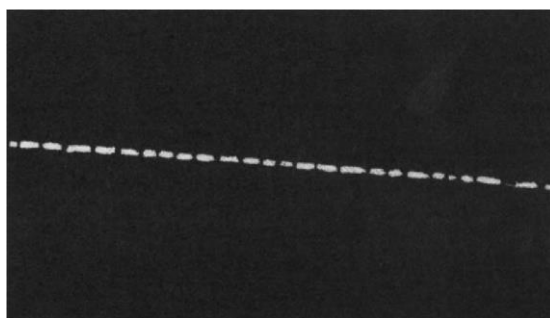
Pro ideální obraz by bylo dobré zamezit působení přímého slunečního záření, tedy v místnosti by mělo být temno. Mlžnou komoru je vhodné umístit do výšky 30-60 cm a pomocí nastavitelných nožiček vyrovnat hladinu alkoholu v kanálku do vodorovné polohy. [16]

Pro vložení umělého zdroje záření do komory slouží posuvně otevíratelný otvor umístěný v boční straně základní komory. Jako vhodný umělý zdroj by se dal použít zdroj thoria. [16]

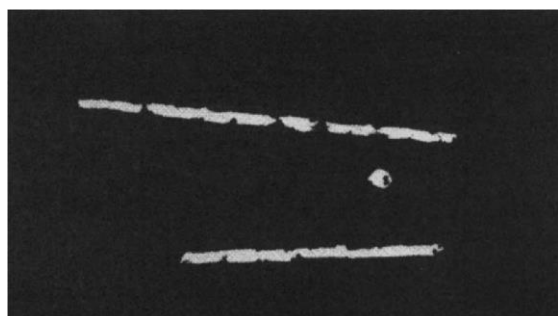
V difúzní mlžné komoře lze detekovat částice α , elektrony, protony, částice β a mezony. [16]



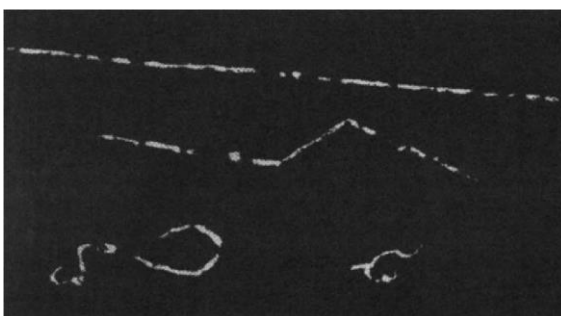
Obrázek 6: Stopa vytvořená částicí α .



Obrázek 7: Stopa vytvořená elektronem s vysokou energií.



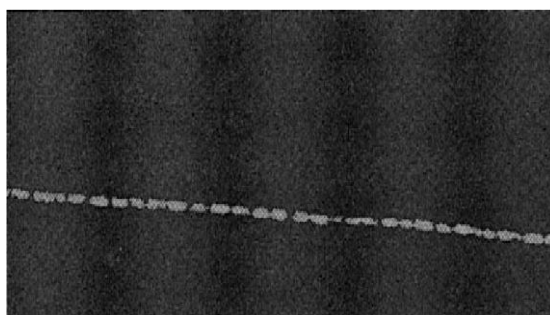
Obrázek 8: Stopa vytvořená protony.



Obrázek 9: Stopa vytvořená opakovanou odchylkou částice β .



Obrázek 10: Stopy generované částicemi β s malou energií.



Obrázek 11: Stopa generovaná mezonem.

Předchůdcem difúzní mlžné komory byla Wilsonova mlžná komora, která byla zároveň první sestrojenou mlžnou komorou. Sestrojil ji skotský fyzik Charles Thomas Rees Wilson v roce 1911 a fungovala na podobném principu jako difúzní

mlžná komora. Jejich největší rozdíl spočívá v chlazení komory. Ve Wilsonově mlžné komoře se nachází píst a vodní pára. Pístem byl rychle nasán vzduch, čímž došlo k expanzi uvnitř komory, díky které se plyn ochladil a došlo ke vzniku kondenzovaných kapiček tvořící mlhu. Pokud pak částice prošla komorou, ionizovala molekuly plynu a podél trajektorie se začaly shlukovat do útvarů podobným mrakům, čímž došlo ke zviditelnění částice. Difúzní mlžná komora má oproti této komoře tu výhodu, že je u ní chlazená celá plocha desky a to neustále. [23][24]

10. Difúzní mlžná komora ve vzdělávání

Difúzní mlžná komora se dnes více než k samotnému výzkumu používá jako pomůcka pro rozšíření vzdělanosti žáků nebo veřejnosti v oblasti záření, které nás každý den obklopuje. Difúzní mlžná komora je finančně náročná, takže se zpravidla nevyskytuje na základních či středních školách, ale pouze v institutech jako jsou univerzity. Široká veřejnost je může vyhledat například ve hvězdárně v Hradci Králové, v infocentru Jaderné elektrárny Dukovany nebo Jaderné elektrárny Temelín. Dále je může veřejnost vidět při různých populárně vzdělávacích akcích jako je Veletrh vědy, Festival vědy či noc vědců. [24][25][26]

Difúzní mlžná komora je vhodná učební pomůcka již pro žáky základních škol, kde se s radioaktivitou teprve seznamují a na mlžné komoře jim lze ukázat, že to není jen nějaká teorie, kterou by si oni měli zapamatovat. Lze jim takto názorně ukázat, že existuje záření α , záření β i jiné radioaktivní záření, a že jsme jím neustále obklopeni. Tedy díky difúzní mlžné komoře je můžeme seznámit jak se zářením radioaktivního pozadí, tak jim lze představit i umělé zářiče, jako jsou zářiče α a zářiče β .

Co se týče žáků na středních školách, ti jsou již obeznámeni s radioaktivitou, druhy záření, základy laboratorní práce a bezpečnosti při práci v laboratořích, je možné s difúzní mlžnou komorou více pracovat. Žáci by si během demonstrace mohli pořídit fotografie či videozáznamy stop částic, které v difúzní mlžné komoře uvidí. Následně by se provedla analýza fotografií, která by byla zakončena společnou diskusí s učitelem. Během diskuse bych se jako vyučující od žáků chtěla dozvědět, zda jsou schopni mi říct, co vidí na fotografiích, popřípadě o jaké druhy záření se jedná.

Pokusy s difúzní mlžnou komorou nemusí probíhat pouze při školním vyučování, jak již bylo zmíněno. Pokusy mohou být předváděny na různých populárně naučných akcích zabývajících se fyzikou či přírodními vědami obecně. Jelikož tyto akce připravují ve většině případů odborníci v oblasti fyziky a tyto akce bývají určeny široké veřejnosti, mohou se zde při demonstraci mlžné komory použít i umělé zdroje záření. Ty vysílají částice radioaktivního záření, a tím zvyšují počet částic uvnitř komory. Docílíme tak lepší vizuálního efektu pro pozorovatele.

Ne každý institut si může dovolit difúzní mlžnou komoru zakoupit, jedná se o velmi nákladné zařízení. Proto se často přistupuje ke koupi Wilsonovi mlžné komory, fungující na principu adiabatické expanze, která poslouží ke stejnému účelu jako difúzní mlžná komora. Staříčká Wilsonova mlžná komora z katedry fyziky Přírodovědecké fakulty Univerzity Hradec Králové je cenný muzeální exponát, ale dnes je možné za poměrně levné peníze koupit jednoduchou školní Wilsonovu mlžnou komoru.



Obrázek 12: Wilsonova mlžná komora nacházející se v Laboratoři experimentů moderní fyziky na Katedře fyziky Přírodovědecké fakulty Univerzity Hradec Králové



Obrázek 13: Školní Wilsonova mlžná komora

Praktická část

V praktické části práce jsem využila difúzní mlžné komory, sloužící k zobrazování ionizovaných částic, a zkoumala jsem trajektorii β^- částic, která by měla být ovlivněna magnetickým polem.

Elektrony β^- jsou vychylovány ze své přímé trajektorie působením magnetického pole popsaném Lorentzovou silou.

Lorentzova síla je síla, která působí na nabitou částici pohybující se uvnitř magnetického pole. Dané pole na nabitou částici působí silou

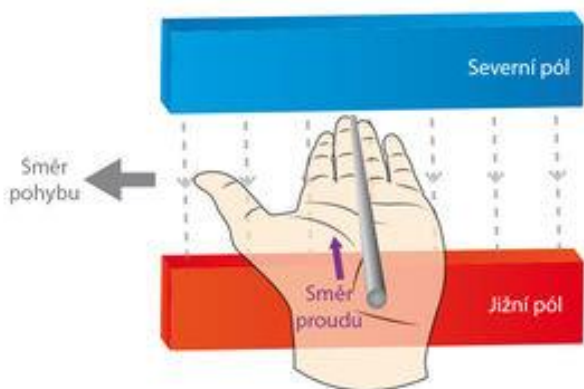
$$F_{mag} = B \cdot q \cdot v \cdot \sin\alpha, \quad (7)$$

kde B představuje magnetickou indukci, q náboj částice, v rychlost částice a α úhel, mezi trajektorií částic a indukčními čarami magnetického pole.

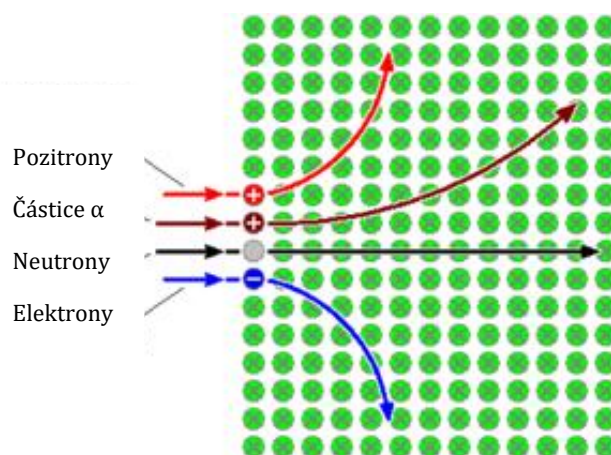
S pomocí vektorů lze vztah (7) vyjádřit ve tvaru

$$\vec{F}_{mag} = q\vec{v} \times \vec{B}. \quad (8)$$

V takovém případě je směr působící magnetické síly kolmý a lze jej určit pomocí Flemingova pravidla levé ruky, kdy prsty ukazují směr proudu, indukční čáry vstupují do dlaně, pak odtažený palec znázorňuje směr působící magnetické síly. [27]



Obrázek 14: Zobrazení Flemingova pravidla levé ruky



Obrázek 15: Trajektorie kladně, záporně a neutrálně nabitých částic v homogením magnetickém poli

Lorentzovu sílu, za působení magnetické i elektrostatické síly, pak můžeme spočítat ze vztahu

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}, \quad (9)$$

kde E znázorňuje intenzitu elektrického pole. [27]

Na obrázku 15 jsou nakresleny trajektorie různých radioaktivních částic v homogenním magnetickém poli. Křížky v zelených kolečkách značí, že magnetické pole vstupuje kolmo do obrázku. Neutron nemá náboj, proto ho elektrické pole

neovlivňuje a letí pořád stejným směrem. Pozitron a elektron jsou částice se stejnou hmotností a velkým elektrickým nábojem, ale opačným, proto se vychylují stejně, ale na opačnou stranu. Částice α má kladný náboj, tedy se ohýbá podobně jako pozitron. Její náboj je sice dvojnásobný, ale hmotnost je mnohokrát větší, takže se ve stejném magnetickém poli odchyluje výrazně méně než pozitron.

11. Pozorování

V pozorovací části jsem vložila radioaktivní zářič, jehož vyzářené částice jsem ovlivňovala magnetickým polem, před otvor do difúzní mlžné komory a pozorovala jsem v ní změny trajektorií vyzářených částic vzhledem k tomu v jakém postavení se magnety, způsobující magnetické pole, nacházely.

Pomůcky:

difúzní mlžná komora, školní radioaktivní zářič Sr 90, magnety, stojan

Postup:

1. Zapnula jsem difúzní mlžnou komoru a nechala jsem ji vychladit na vhodnou teplotu, tedy kolem $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mezitím jsem místnost zatemnila, aby mi denní světlo neovlivňovalo experiment. Dále jsem sestavila stojan, ve kterém měl následně být upevněn radioaktivní zářič.
2. Po vychlazení mlžné komory jsem nastavila stojan a umístila do něj radioaktivní zářič. Upravila jsem pomocí nastavování stojanu zářič tak, aby celé jeho okénko, kudy vysílá částice, mířilo do mlžné komory.
3. Pozorovala jsem trajektorie částic vysílaných ze zářiče, které se v mlžné komoře zobrazovaly.
4. Odstranila jsem radioaktivní zářič, umístila jsem magnety na stojan a následně jsem zářič opět vrátila na původní místo. Magnety jsem umístila tak, že severní pól byl umístěn nad jižním pólem magnetů (červený magnet ležel nad zeleným). Pozorovala jsem viditelné trajektorie částic, vycházející ze zářiče a porovnávala jsem, jak se trajektorie změnily, když byly vloženy do magnetického pole.
5. Otočila jsem postavení magnetů, tedy jižní pól ležel nad severním (zelený magnet ležel nad červeným). Opět jsem pozorovala trajektorie a jejich odlišnost od trajektorií při předchozím postavení magnetů.
6. Odstranila jsem radioaktivní zářič, odstranila jsem magnety, vypnula jsem difúzní mlžnou komoru.



Obrázek 16: Stojan s radioaktivním zářičem před difúzní mlžnou komorou nacházející se v Laboratoři experimentů z moderní fyziky na Katedře fyziky Přírodovědecké fakulty Univerzity Hradec Králové.



Obrázek 17: Stojan s radioaktivním zářičem před difúzní mlžnou komorou nacházející se v Laboratoři experimentů z moderní fyziky na Katedře fyziky Přírodovědecké fakulty Univerzity Hradec Králové. Pohled zblízka.

Výsledky pozorování:

1. Situace, kdy jsem do difúzní mlžné komory vložila radioaktivní zářič bez jakéhokoliv ovlivnění magnetickým polem.



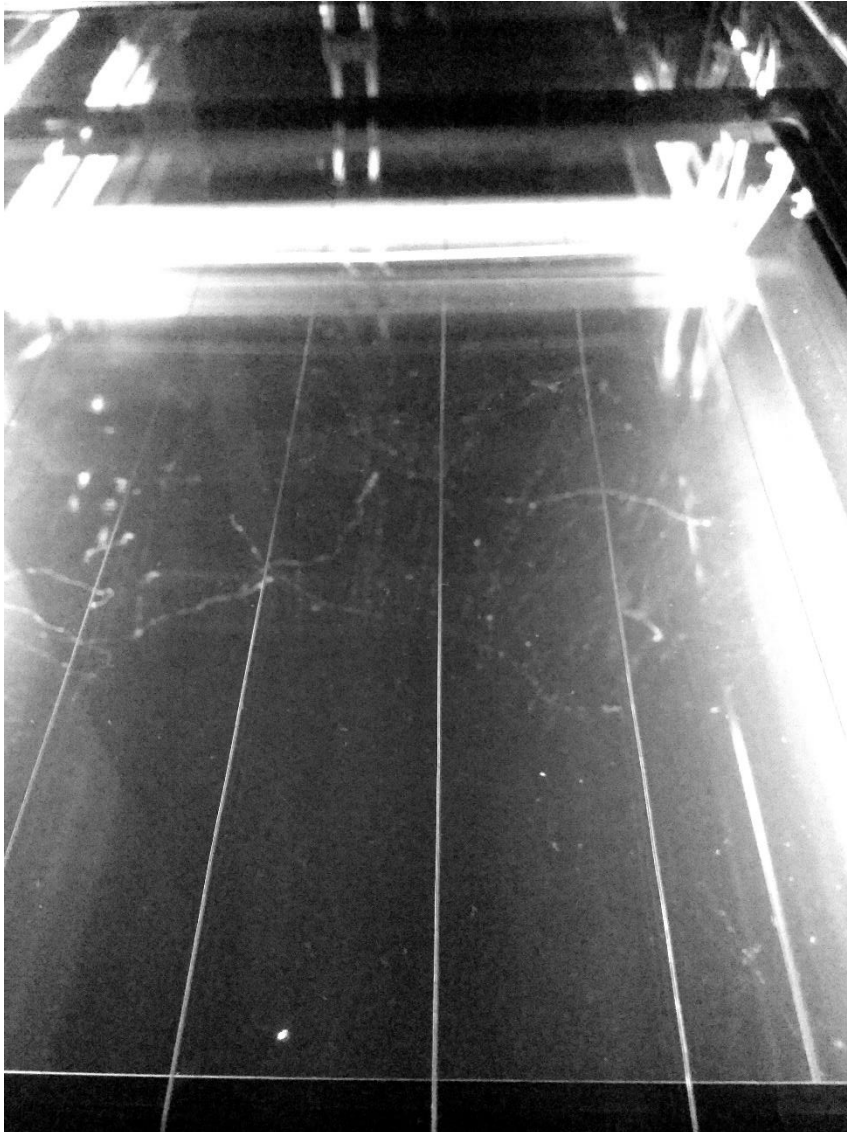
Obrázek 18: Trajektorie vysílaných částic v difúzní mlžné komoře bez magnetického pole

Při pohledu na obrázek 18 můžeme vidět, že trajektorie částic β^- , které jsou vysílány ze zářiče, jsou rozmístěny nejvíce v prostřední části komory, což by odpovídalo tvrzení, že trajektorie vysílaných částic bývají vždy přímé, pokud nedojde k vnějšímu zásahu.

Radioaktivní zářič není na obrázku zachycen, ale nachází se v postavení pod obrázkem v prostřední části.

Na obrázku je kromě velkého množství β^- částic dobře viditelná stopa α částice. Jedná se o nejširší stopu přibližně uprostřed obrázku, která vznikla radioaktivním rozpadem přímo v difúzní mlžné komoře.

2. Situace, kdy jsem do difúzní mlžné komory vložila radioaktivní zářič, na jehož vysílané částice působí magnetické pole. Magnety jsou v postavení, kde severní pól se nachází nad jižním.

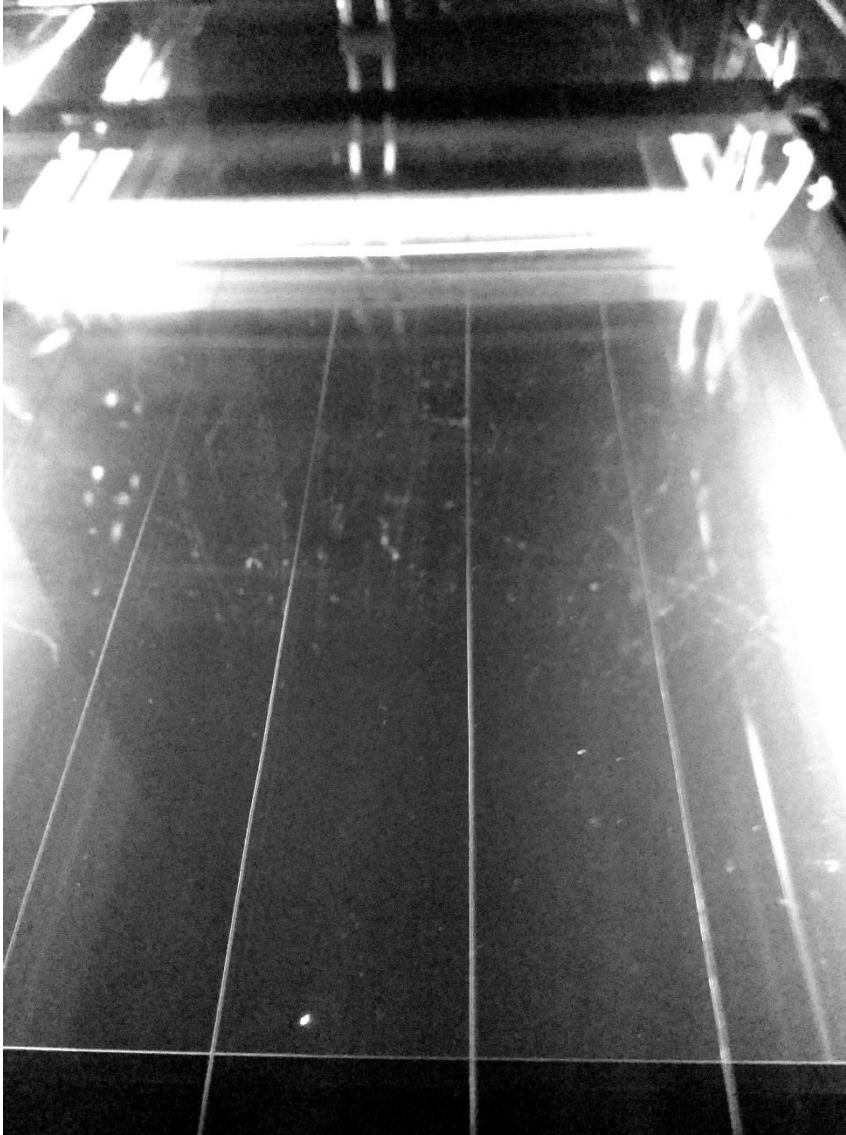


Obrázek 19: Trajektorie vysílaných částic v difúzní mlžné komoře s magnetickým polem, severní pól nahoře.

Při pohledu na obrázek 19 můžeme pozorovat změnu polohy většiny trajektorií β^- částic, kdy se mírně přesunuly směrem k pravé části komory. Radioaktivní zářič je ve stejném postavení jako v 1. situaci.

Zakřivené stopy, nacházející se převážně v levé polovině obrázku, jsou též stopy β^- částic. Jedná se o částice s nižší energií, což se projeví tím, že trajektorie není dlouhá přímka, ale komplikovaně zakřivená dráha, která vznikla tím, jak elektrony naráží na částice vzduchu a alkoholu. Tyto částice určitě nepochází ze zářiče, neboť trajektorie tomu nenaznačují.

3. Situace, kdy jsem do difúzní mlžné komory vložila radioaktivní zářič, na jehož vysílané částice opět působí magnetické pole. Magnety jsou ale v opačném postavení než v předchozí situaci, tedy jižní pól se nachází nad severním.



Obrázek 20: Trajektorie vysílaných částic v difúzní mlžné komoře s magnetickým polem, jižní pól nahoře.

Při pohledu na obrázek 20 opět pozorujeme změnu trajektorií β^- částic. Došlo k mírnému přesunu směrem k levé části komory. Radioaktivní zářič je ve stejném postavení jako v 1. situaci.

Na pravém okraji komory se opět nachází stopy β^- trajektorií, které nepocházejí od zářiče, tedy nejsou relevantní.

Diskuse pozorování:

Během experimentu jsem nejprve do mlžné komory vložila pouze radioaktivní zdroj a sledovala, jak se zobrazí trajektorie vyzařovaných částic. Trajektorie se zobrazovaly ve značném množství a v podstatě symetrickém rozložení na obě strany difúzní mlžné komory s nejvyšším počtem trajektorií v centrální části, tedy částice po vyzáření ze zářiče pokračovali po směru přímém. To, že trajektorie nesměřují do jednoho úhlu, ale do určitého rozsahu úhlů, je způsobeno tím, že zářič má určitou plochu, ve které částice vyzáruje.

Následně jsem mezi radioaktivní zářič a difúzní mlžnou komoru přidala magnety v takovém postavení, že severní pól se nacházel nad jižním. Magnety následně mezi sebou vytvořily magnetické pole, kterým musely vyzářené částice projít, a to ovlivnilo jejich trajektorii. Došlo k jejímu zakřivení, a proto se na obrázku zobrazuje více trajektorií blíže pravé straně mlžné komory.

K zakřivení trajektorií dochází kvůli Lorentzově síle a pouze v době, kdy vyzářená částice prochází magnetickým polem. Jakmile částice magnetické pole opustí, trajektorie se již dále nezakřivuje a částice pokračuje v cestě po přímé trajektorii.

Jako třetí část tohoto experimentu jsem zkoumala změnu reakce částic radioaktivního záření, když vyměníme postavení magnetů, tedy když se bude jižní pól nacházet nad severním. V tomto případě došlo opět vůči prvotnímu stavu k úpravě postavení trajektorií v mlžné komoře, ale tentokrát se trajektorie přiblížily k levé straně.

Po celou dobu experimentu bylo chvílemi obtížné odlišit, co jsou ještě trajektorie β^- částic, které přicházely do mlžné komory z radioaktivního zářiče, tedy ty trajektorie, které nás zajímaly, s těmi, které patřily částicím přirozeně se vyskytujícím v difúzní mlžné komoře. Vizuální vjem pro mě, jako pro pozorovatele, vypadal poněkud přehlednější než fotodokumentace, která je součástí této práce.

Experiment uvnitř difúzní mlžné komory, při kterém jsem pozorovala změnu polohy trajektorií β^- částic s ohledem na to, zda byly vloženy do magnetického pole či nikoliv a jaké bylo vzájemné postavení magnetů se ukázal být pouze kvalitativní. Tedy nebyla jsem schopna určit závislost množství částic na úhlu vychýlení, ačkoliv návod k mlžné komoře od výrobce takovéto kvantitativní měření naznačoval. [16]

12. Měření

Proto jsem se pro kvantitativní určení rozložení směru částic rozhodla experiment zopakovat mimo difúzní mlžnou komoru. Snahou opakování experimentu bylo s pomocí detektoru zjistit, jak je to se směry trajektorií β^- částic z kvantitativního hlediska.

Pomůcky:

školní radioaktivní zářič Sr 90, senzor radioaktivního záření (Vernier Radiation Monitor), úhlová stupnice, stojany, počítač

Zadání:

Proměřit rozložení vyzařovaných částic s ohledem na jejich úhel odklonu od přímé trajektorie.

- Měření 0 – měření proběhlo bez ovlivnění β^- částic magnetickým polem, bez magnetů.
- Měření 1 – měření proběhlo za působení magnetického pole, kdy magnety byly v takovém postavení, že severní se nacházel nad jižním.
- Měření 2 – měření proběhlo za působení magnetického pole, kdy magnety byly v takovém postavení, že jižní se nacházel nad severním.

Postup:

1. Sestrojila jsem si úhlovou stupnici, k tomuto účelu mi postačit list papíru velikosti A3. Výchozí bod jsem zvolila v polovině delší strany na jejím okraji. Z tohoto bodu jsem pomocí úhlooměru rozměřila stupnici po 10° . Směr kolmý na hranu papíru jsem označila jako 0° a od toho jsem doplnila všechny ostatní stupně tak, že v pravé části byly hodnoty stupňů záporné a v levé části kladné. Celkový rozsah stupnice činil celkem 180° .
2. Před výchozí bod stupnice jsem umístila do stojanu radioaktivní zdroj.
3. Do vzdálenosti 20 centimetrů na přímce označené hodnotou 0° od výchozího bodu jsem umístila senzor radioaktivního záření. Senzor jsem připojila k počítači s programem LoggerPro. Po dobu 60 sekund jsem měřila, kolik částic senzor zachytí.
4. Následně jsem senzor posunula po stupnici na další hodnotu a opět měřila 60 sekund. Takto jsem pokračovala, pokud jsem neproměřila všechny hodnoty na stupnici.
5. Nyní jsem před radioaktivní zdroj umístila magnety, které byly nad výchozím bodě stupnice. Nejprve jsem zvolila postavení, kdy se severní pól nacházel nad jižním.
6. Opakovala jsem stejný postup měření.
7. Následně jsem vyměnila vzájemné postavení magnetů a celý postup jsem ještě jednou zopakovala.
8. Všechny údaje získané během měření jsem graficky zpracovala.



Obrázek 21: Sestavená aparatura k měření rozložení β částic s ohledem na úhel odklonu od přímého směru.

Výsledky měření:

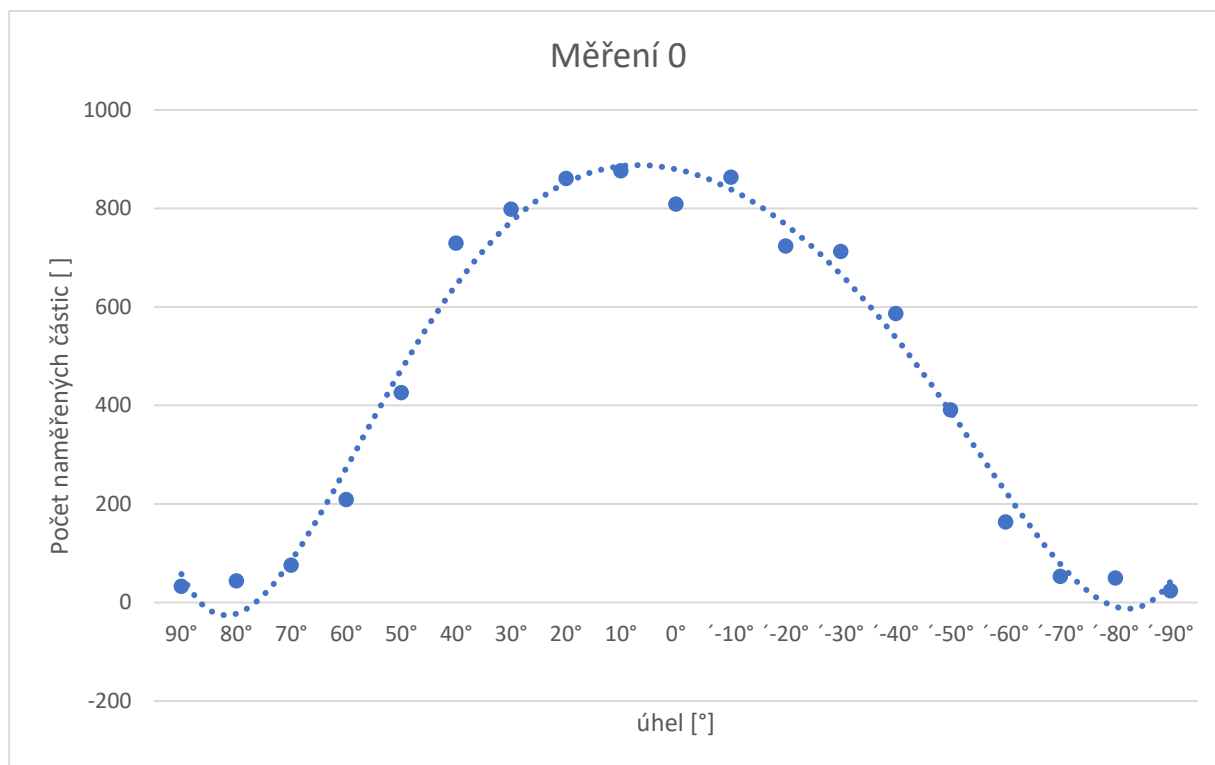
Tabulka 1: Tabulka naměřených hodnot

	Měření 0	Měření 1	Měření 2
Úhel [°]	Počet částic	Počet částic	Počet částic
0	809	691	787
10	877	716	929
20	861	639	981
30	799	712	1090
40	730	635	1280
50	426	352	1273
60	209	172	742
70	76	88	329
80	44	58	164
90	33	46	90
-10	864	709	719
-20	724	788	638
-30	713	977	567
-40	587	1054	435
-50	391	1111	181
-60	164	638	63
-70	53	350	42
-80	50	180	48
-90	24	123	27

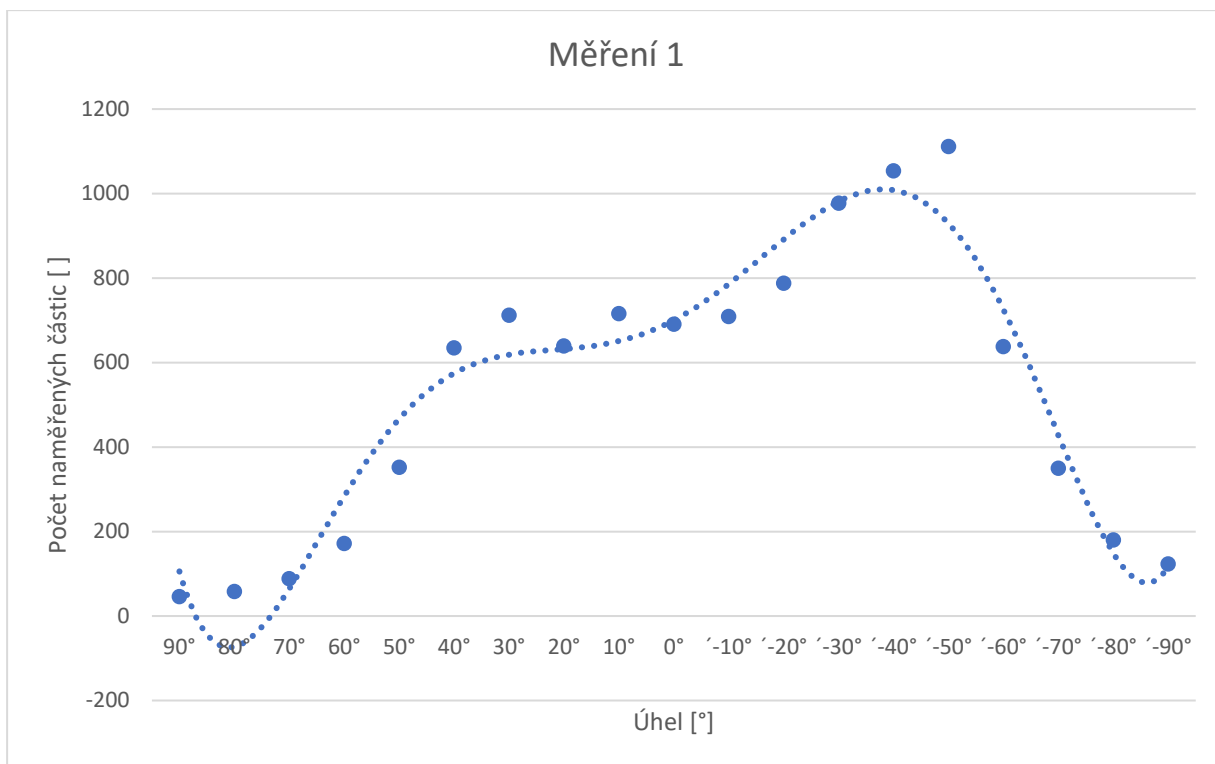
Zpracování výsledků měření:

Veškeré zpracování měření bylo vytvoření grafů zobrazujících odklon částic od přímého směru.

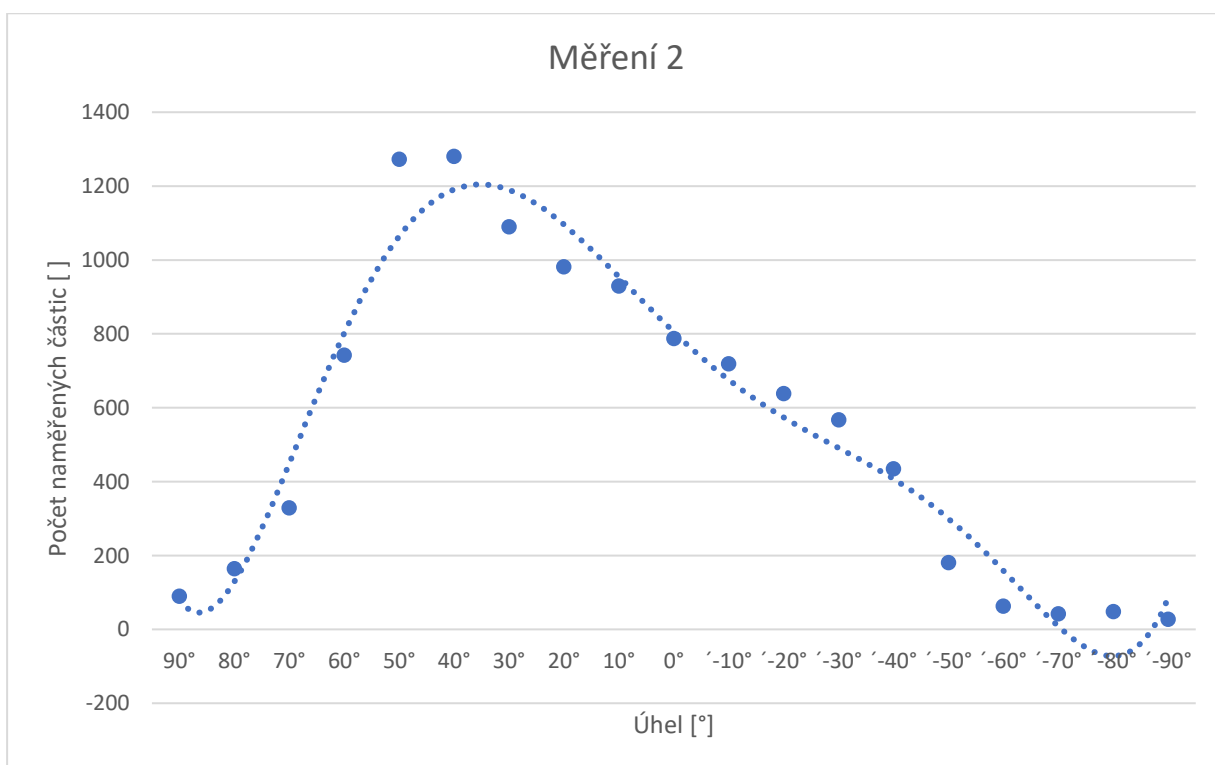
V grafech 1-3 jsou pravoúhlé osové diagramy zobrazující postupně měření bez magnetického pole, s magnetickým polem se severním pólem nahoře a s jižním pólem nahoře. Z důvodu náhodného radioaktivního záření jsou naměřené hodnoty poměrně rozházené, proto jsem se pokusila nalézt vhodnou regresní funkci, která by naměřené hodnoty proložila. Z možností, které poskytuje MS Excel se ukázal nejvhodnější polynom 6. stupně. Bohužel tento polynom v koncových bodech ukazuje konvexní průběh, který dokonce jde i do záporných hodnot, což je evidentně nesmysl. V ostatních dalších místech vypadá průběh proložené křivky velmi rozumně.



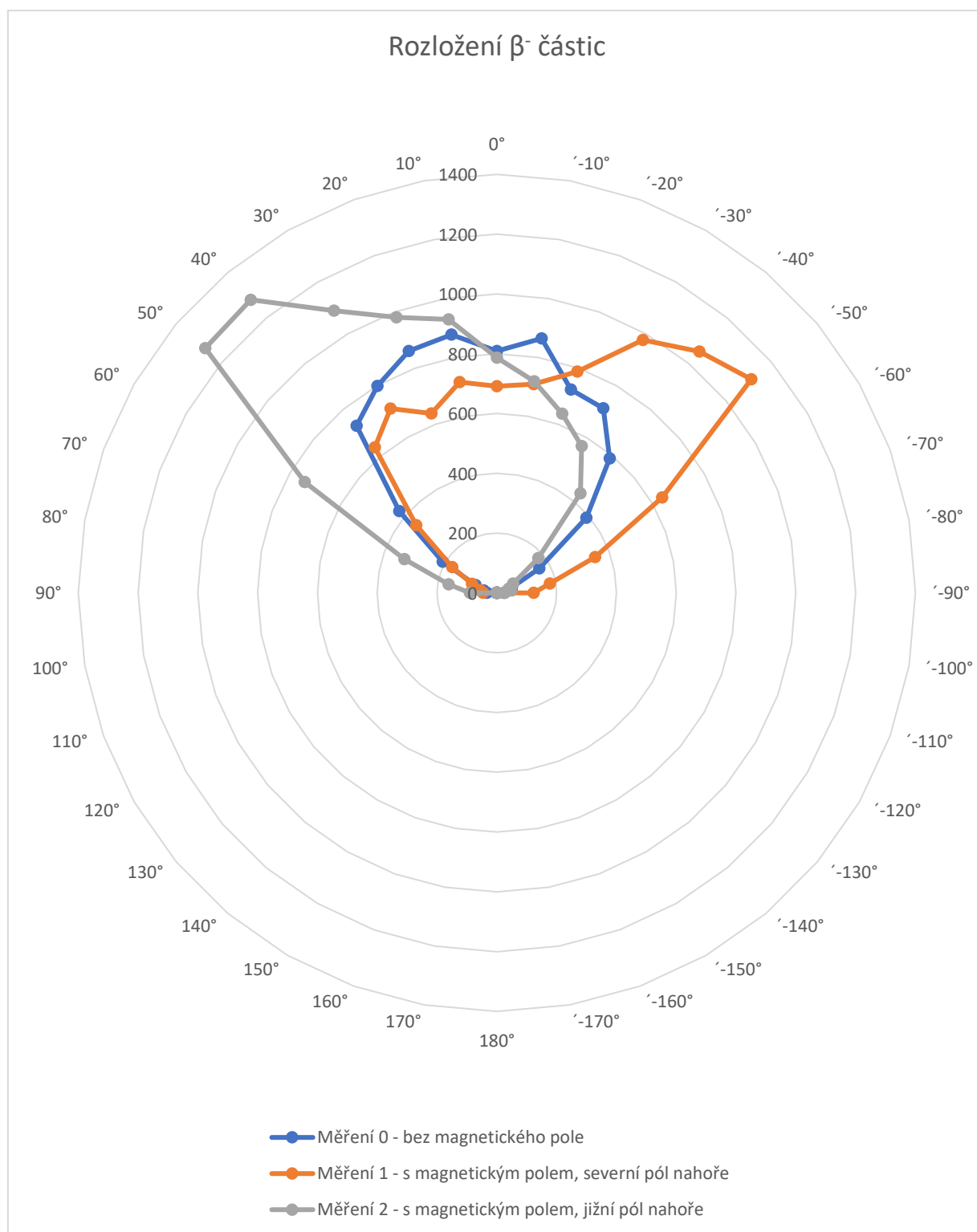
Graf 1: Výsledný graf z Měření 0. Závislost intenzity záření β částic v závislosti na úhlu odklonu od osy zářiče. Bez magnetického pole.



Graf 2: Výsledný graf z Měření 1. Závislost intenzity záření β částic v závislosti na úhlu odklonu od osy zářiče. S magnetickým polem, severní pól nahoře.



Graf 3: Výsledný graf z Měření 2. Závislost intenzity záření β částic v závislosti na úhlu odklonu od osy zářiče. S magnetickým polem, jižní pól nahoře.



Graf 4: Společný výsledný graf z naměřených hodnot z Tabulky 1. Rozložení intenzit zakreslené do polárního diagramu. Zářič v ose 0-180° směr 0°. Magnety pod a nad středem diagramu.

Diskuse měření:

Pomocí tohoto experimentu se podařilo kvantitativně určit rozložení trajektorií β^- částic. Na základě měření jsem si ověřila předpoklad, že při vložení β^- částic do magnetického pole se jejich trajektorie skutečně ohýbají. Tento jev je způsoben Lorentzovou silou. Z grafu 1 můžeme vidět, že rozložení β^- částic v případě, kdy na částice nepůsobí magnetické pole, tedy v Měření 0, se nachází v centrální části. To by souhlasilo s tvrzením, že vyzářené částice se mají pohybovat po přímé trajektorii. Rozptyl trajektorií je způsoben tím, že zdroj záření nevysílá částice z jednoho jediného bodu, ale jedná se o plochu, jejíž velikost nelze zanedbat. Dále k tomuto jevu může dojít, neboť vyzářené částice mají různou energii, tím i rychlost, a pak se jejich trajektorie též zakřívují různě.

V Měření 1 a v Měření 2 bylo dokázáno, že při vložení částic do magnetického pole se jejich trajektorie mění. Tento jev je dobře viditelný v grafu 4, kde si lze všimnout vychýlení křivek grafu vždy k jedné straně podle toho, v jakém postavení se magnety nacházely. Teoreticky by měly být průběhy pro obě měření symetrické vůči ose vyzařování 0° - 180° . Rozdíly jsou způsobeny tím, že záření je statisticky náhodné a uspořádání experimentu nelze udělat dokonale přesně.

Závěr

V rámci bakalářské práce jsem se zabývala problematikou radioaktivity, historií jejího objevení, druhy záření, přírodními zdroji radioaktivity, systémem radiační ochrany, a hlavně jejím využitím.

Značnou pozornost jsem věnovala detektorům radiačního záření, zejména pak difúzní mlžné komoře. Dozvěděla jsem se nové informace o její konstrukci a způsobech, jak detekuje různé částice. Mimo jiné, jsem se v teoretické části práce zamyslela nad tím, jaké jsou možnosti v používání difúzní mlžné komory ve vzdělávání žáků na školách i široké veřejnosti na populárně-naučných akcích.

V rámci praktické části jsem provedla experiment, při kterém jsem ovlivňovala β^- částice vyzařované z radioaktivního zářiče Sr 90 do difúzní mlžné komory pomocí magnetického pole. Ke zpracování tohoto experimentu jsem přiložila mnou pořízené fotografie stop v difúzní mlžné komoře. Bohužel na těchto fotografiích nejsou výsledky zcela zřetelné, jednalo se spíše o kvalitativní pozorování, a proto jsem se po domluvě s doktorem Jezberou rozhodla provést druhé měření. Toto měření se konalo mimo difúzní mlžnou komoru. Výsledky měření podpořily předpoklad o ovlivnění částic β^- magnetickým polem díky Lorenzově síle. Získané hodnoty jsem zanesla do grafů.

Difúzní mlžná komora je skvělým prostředkem, jak žákům i široké veřejnosti ukázat, že radioaktivita je všude kolem nás.

Seznam použité literatury

- [1] TARÁBEK, Pavol, Petra ČERVINKOVÁ a kolektiv. *Odmaturuj z fyziky. 2.* vydání-dotisk. Brno: didaktis, 2006. ISBN 80-7358-058-6.
- [2] ŠLÉGR, Jan. *Částice a pole*. Hradec Králové: GAUDEAMUS, Univerzita Hradec Králové, 2017. ISBN 978-80-7435-670-4.
- [3] ŠPOLSKIJ, E. V., Čestmír MUZIKÁŘ, Jaroslav PAČES, Jaroslav PERNEGR a Josef TUČEK. *Atomová fyzika II: Elektronový obal atomu a atomové jádro. 2.* vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958.
- [4] HÁLA, Jiří. *Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie*. Brno: Konvoj, 1998. ISBN 80-85615-56-8.
- [5] SODOMKA, Lubomír a Magdalena SODOMKOVÁ. *Nobelovy ceny za fyziku: 1901-1997*. Praha: SET OUT, 1997. ISBN 80-902058-5-2.
- [6] KEILOVÁ, Hana a kolektiv. *Malá encyklopedie chemie*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1976.
- [7] BEISER, Arthur a Josef ČADA. *Úvod do moderní fyziky*. Praha: Academia, 1978.
- [8] BROKLOVÁ, Zdeňka. *Učíme jadernou fyziku*. Praha. ISBN 978-80-254-1342-5. Materiál je součástí vzdělávacího programu ČEZ, a. s., Svět energie.
- [9] KRÁLOVÁ, Magda. Využití radioaktivity v lékařství. *Techmania Science Center: Eduportál* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/atomy-castice/vyuziti-radioaktivity-v-lekarstvi>
- [10] KRÁLOVÁ, Magda. Využití radioaktivity v zemědělství. *Techmania Science Center: Eduportál* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/atomy-castice/vyuziti-radioaktivity-v-lekarstvi/vyuziti-radioaktivity-v-zemedelstvi>
- [11] KRÁLOVÁ, Magda. Využití radioaktivity v průmyslu. *Techmania Science Center: Eduportál* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/atomy-castice/vyuziti-radioaktivity-v-lekarstvi/vyuziti-radioaktivity-v-prumyslu>
- [12] *Radioaktivita slouží* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/k23.htm>
- [13] Jaderná elektrárna Dukovany. *ČEZ* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/edu>
- [14] Jaderná elektrárna Temelín. *Svět energie: vzdělávací portál ČEZ* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderne-elektrarny-cez/jaderna-elektrarna-temelin>
- [15] Přírodní zdroje. *Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.: Radiační ochrana* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/prirodni-zdroje>
- [16] Visualisation of radioactive particles / Diffusion cloud chamber: P2520400. *PHYWE* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://www.phywe.com/experiments-sets/nobel-prize-experiments/visualisation-of-radioactive-particles-diffusion-cloud-chamber/a-10193/>

- [17] Principy radiační ochrany. *Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.: Radiační ochrana* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/principy-radiacni-ochrany>
- [18] Historie. *Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.: Radiační ochrana* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/historie>
- [19] Radiační havárie. *Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.: Radiační ochrana* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/radiacni-havarie>
- [20] Geigerův-Müllerův počítač. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/850-geigeruv-mulleruv-pocitac>
- [21] Jak funguje Geiger-Müllerův (GM) detektor?. *Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.: Otázky a odpovědi* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: https://www.suro.cz/cz/faq/copy_of_jak_funguje_geiger-mulleruv-gm-detektor?searchterm=Geiger+++Muller
- [22] How BC works. *Introduction to the BC site, Tutorial on how to read BC Pictures, Gallery of BC Pictures, BC Teaching Materials* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: https://hst-archive.web.cern.ch/archiv/HST2005/bubble_chambers/BCwebsite/index.htm
- [23] PETRÁSEK, Martin. Částicová fyzika: historie detektorů – mlžná, bubliková a jiskrová komora. In: CLOSE, Frank. *Částicová fyzika* [online]. Dokořán, 2008 [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://www.scienceworld.cz/neziva-priroda/casticova-fyzika-historie-detektoru-mlzna-bublikova-a-jiskrova-komora-475/>
- [24] Mlžná komora. *FZU: Fyzikální ústav Akademie věd České republiky* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/popularizace/materialy-pro-skoly/mlzna-komora>
- [25] Mlžná komora v Jaderné elektrárně Dukovany. *Nuledo* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://www.nuledo.com/reference/dukovany/>
- [26] Infocentrum Jaderné elektrárny Temelín. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/infocentra/temelin-136405>
- [27] Lorentzova síla. *WikiSkripta* [online]. 2016 [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Lorentzova_s%C3%ADla#:~:text=Lorentzova%20s%C3%ADla%20Lorentzova%20s%C3%ADla%20FL%20je%20s%C3%ADla%20kter%C3%A1,na%20pohybuj%C3%ADc%C3%AD%20se%20nabitou%20%C4%8D%C3%A1stici%20v%20magnetick%C3%A9m%20poli.

Zdroje obrázků

- Obrázek 1: Jak funguje Geiger-Müllerův (GM) detektor?. *Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.: Otázky a odpovědi* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: https://www.suro.cz/cz/faq/copy_of_jak_funguje_geiger-mulleruv-gm-detektor?searchterm=Geiger+++Muller
- Obrázek 2: How BC works. *Introduction to the BC site, Tutorial on how to read BC Pictures, Gallery of BC Pictures, BC Teaching Materials* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: https://hst-archive.web.cern.ch/archiv/HST2005/bubble_chambers/BCwebsite/index.htm
- Obrázek 3: DUFKOVÁ, Marie. Wilsonova difusní mlžná komora. *Třípól: Jaderná fyzika a energetika* [online]. 5. listopadu 2002 [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/jaderna-fyzika-a-energetika/620-wilsonova-difusni-mlzna-komora>
- Obrázek 4: Fotografie pořízena autorem
- Obrázek 5–11: Visualisation of radioactive particles / Diffusion cloud chamber: P2520400. *PHYWE* [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: <https://www.phywe.com/experiments-sets/nobel-prize-experiments/visualisation-of-radioactive-particles-diffusion-cloud-chamber/a-10193/>
- Obrázek 12: Fotografie pořízena autorem
- Obrázek 13: Wilson cloud chamber. *Leybold* [online]. [cit. 2022-07-27]. Dostupné z: <https://www.leybold-shop.com/physics/physics-equipment/atomic-and-nuclear-physics/sensors-for-alpha-beta-gamma-and-x-rays/clouds-and-ionisation-chambers/wilson-cloud-chamber-55957.html>
- Obrázek 14: Flemingovo pravidlo levé ruky. *WikiSkripta* [online]. [cit. 2022-07-26]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Flemingovo_pravidlo_lev%C3%A9_ruky
- Obrázek 15: Lorentzova síla. *WikiSkripta* [online]. 2016 [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Lorentzova_s%C3%ADla#:~:text=Lorentzova%20s%C3%ADla%20Lorentzova%20s%C3%ADla%20FL%20je%20s%C3%ADla%2C%20kter%C3%A1%20pohybuj%C3%ADc%C3%AD%20se%20nabitou%20%20%20v%C3%ADstici%20v%20magnetick%C3%A9m%20poli.
- Obrázek 16–21: Fotografie pořízena autorem