

**Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola Brno, Sokolská,
příspěvková organizace**

MATURITNÍ PRÁCE

z Fyziky

Měření koncentrace U-235 pomocí nedestruktivních metod

Studijní obor: Technické lyceum 78-42-M/01

Školní rok: 2022/2023

Třída: L4A

Jméno: **David**

Příjmení: **Škrob**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a použil jsem literárních pramenů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

V Brně dne :

.....
David Škrob

Obsah

| | |
|--|-----------|
| Zadání | 3 |
| Úvod | 5 |
| 1 Uran | 6 |
| 1.1 Zpracování rudy | 6 |
| 1.2 Možnosti obohacování | 6 |
| 1.3 Způsoby měření obohacení | 6 |
| 2 Fyzikální princip měření | 6 |
| 2.1 Druhy detektorů | 6 |
| 2.1.1 Geigerův–Müllerův počítač | 6 |
| 2.1.2 Scintilační detektory | 7 |
| 2.1.3 Polovodičové detektory | 7 |
| 2.2 Principy měření gamma záření | 7 |
| 2.2.1 Fotoelektrický efekt | 7 |
| 2.2.2 Comptonův jev | 8 |
| 2.2.3 Tvorba párů e^- a e^+ | 8 |
| 3 Kalibrace HPGe detektoru | 8 |
| 3.1 Energetická kalibrace | 8 |
| 3.2 Účinnostní kalibrace | 9 |
| 3.3 Opravné faktory | 9 |
| 3.3.1 Nelinearita | 9 |
| 3.3.2 Samoabsorbce | 9 |
| 4 Měření | 9 |
| 4.1 Postup měření | 9 |
| 4.2 Výsledky měření | 9 |
| Seznam použitých odborných výrazů | 13 |

Zadání

Hlavní cíl: Osvojit si metodiku měření obohacení uranových vzorků pomocí gama spektrometrie

Postup:

1. Proveďte rešerši metodik založených na gama spektrometrii používaných pro vyhodnocování stupně obohacení uranu v neznámých vzorcích.
2. Proveďte nastavení HPGe detektoru s ohledem na energetický rozsah gama fotonů emitovanou z uranových vzorků a následně změřte efektivitu pro vybranou měřicí pozici.
3. Na základě porovnání měření gama spektra rozpadové řady u vzorků se známým a neznámým obohacením určete množství U-235 v neznámých vzorcích.
4. Měření opakujte pro několik vzorků a výsledky následně porovnejte.

Úvod

Zvolil jsem jako nedestruktivní analýzy uranových vzorků gama spektroskopii pomocí HPGe polovodičového detektoru gama záření. Díky tomu že se jedná o zcela nedestruktivní metodu, používá se při kontrole radioaktivního nákladu, zda neobsahuje izotopy, jenž by mohli sloužit pro jaderný terorismus.

Gama záření je vysokoenergetické elektromagnetické záření, které vzniká v jádru atomu při radioaktivních přeměnách. Rozdíl mezi zářením gama a zářením rentgenovým je v původu záření. Rentgenové záření vzniká v atomovém obalu, a má většinou nižší energii (1 keV až v extrémních případech 6000 keV). Gama záření pochází z atomového jádra, má vyšší energie (100 keV, ale někdy i tak málo jako 0.007 keV).

Tato maturitní práce se bude zabývat určování obohacení vzorků uranu. Bude tedy určovat poměr $^{235}_{92}\text{U}$ vůči celkové hmotnosti vzorku.

1 Uran

1.1 Zpracování rudy

1.2 Možnosti obohacování

1.3 Způsoby měření obohacení

2 Fyzikální princip měření

Celý princip spočívá v tom, že při dopadu gama fotonu na detektor, dojde k pohlcení a předání energie fotonu některému z e^- , který pak buď předá svou energii na foton (scintilační detektor), nebo měříme jeho energii (polovodičové detektory), nebo převede tuto energii na energii chemickou.

2.1 Druhy detektorů

Henri Becquerel se v roce 1896 snažil přijít na to, jestli fosforující materiály nevydávají podobné záření jako nově objevené Rentgenové záření. Během čehož položil vzorek sulfidu uranu na fotocitlivý papír, který byl ještě zabalený, ale gamma záření se podařilo proniknout skrz obal, na což přišel jakmile fotocitlivý papír vyvolal. Následně dělal mnoho dalších pokusů, aby potvrdil, že se nejedná o nějaký již známý efekt. [7]

2.1.1 Geigerův–Müllerův počítač

Geigerův–Müllerův počítač funguje na principu, že když záření proniká vzduchem tak je schopno ionizovat molekuly vzduchu. Máme tedy 2 desky mezi kterými je vzduch, jakmile se vzduch ionizuje, díky velkému napětí na deskách dojde k lavinové ionizaci, která nám spojí obvod, což detekujeme na počítačím zařízení. Jsme tedy schopni určit kolik záření nám proniká, ale už nejsme schopni říci o jaký druh záření se jedná, a natož o jakou energii.

Geigerův–Müllerův počítač je vhodný pouze v případech, kdy nepotřebujeme znát o jaký druh záření se jedná. Což je například když kontrolujeme zda je stínění dostatečné, chceme-li se přesvědčit, zda je vzorek radioaktivní a také je hojně využíván v oblasti jaderné bezpečnosti.[]

2.1.2 Scintilační detektory

Scintilační detektory fungují na principu fluorescence a fosforescence, kde γ foton excituje e^- v atomu scintilační látky, který když padá zpět z excitovaného stavu vyzáří foton viditelného světla, který následně zaznamenáváme.[5, 2]

2.1.3 Polovodičové detektory

Polovodičový detektor je schopen měřit energii s jakou foton dopadá díky tomu že při fotoelektrickém jevu foton předá veškerou svou energii e^- a ten pak dale vytrhává e^- z el. obalu, díky čemuž jsme schopni určit jakou energii foton měl.

2.2 Principy měření gamma záření

Gamma záření s detektorem reaguje řadou fyzikálních dějů, mezi hlavní však patří fotoelektrický jev, Comptonův jev a tvorba párů e^- a e^+ . Pro tuto práci bude nejdůležitější fotoelektrický jev, protože se snažíme určit energii relativně málo energetickým gama fotonů, které ani nejsou dostatečně silné aby dokázali vytvořit pár e^- a e^+ [6]

2.2.1 Fotoelektrický efekt

Když se do citlivé vrstvy detektoru (u germania díky speciální technice výroby velmi čistého germania v řádu cm, u křemíku v řádu mm) [5] dostane γ foton, tak díky fotoelektrickému jevu gama foton uvolní e^- z elektronového obalu. Asi 3 eV jsou potřeba na uvolnění e^- z valenční vrstvy. (V případě Germania asi 3.6 eV, v případě křemíku asi 2.9 eV) [11, 9].

Tato energie je nutná na odtržení e^- od atomu. Zbývá energie gama fotonu se stane kinetickou energií e^- . „V polovodiči fotoelektron ztratí svou kinetickou energii při interakci elektromagnetickými silami s elektrony v polovodičové mřížce, čímž vzniká mnoho párů elektron-díra. Počet vytvořených párů elektron-děra je přímo úměrný energii dopadajícího fotonu.“ [1] Na diodu detektoru přivedeme v závěrném směru napětí, řádově tisíce V [10]. Jakmile se vytvoří pár e^- díra, tak se e^- přesouvá ke kladně nabitě elektrodě, díra k záporně nabitě, vzniká proud, a ten potom zaznamenáváme [4, 5].

2.2.2 Comptonův jev

Prvním z nich je Comptonův jev, kde gama foton část své energie předá e^- , který je vychýlen ze své původní dráhy. Foton změní směr pohybu a zvýší se jeho vlnová délka. [8] Tento foton může dále reagovat v detektoru, až dokud se nedostane mimo citlivou vrstvu detektoru, nebo dokud není zcela pohlcen.

2.2.3 Tvorba párů e^- a e^+

Druhým z nich je tvorba páru elektron-pozitron, kdy pokud se γ foton přiblíží k jádru atomu, tak se z jeho energie vytvoří pár e^- , e^+ . Musí se vytvořit oba, aby platil zákon zachování náboje. Jejich vytvoření neporušuje zákon zachování hmoty, protože platí teorie relativity, ze které vyplývá:

$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2 \quad (1)$$

Kde E je energie fotonu, m je hmotnost e^- a e^+ , kteří se vytvoří a p je hybnost, která je rozdělena mezi ně a jádro atomu, u kterého se tato přeměna stane. Pokud měl foton větší energii než 1022 keV^1 . Pokud má γ záření větší energii, tak tato energie je převedena na hybnost e^- a e^+ [1, 3].

3 Kalibrace HPGe detektoru

Aby jsme byli schopni správně určit jakou mají energii neznámé vzorky musíme před tím určit jaké kanály přísluší jaké energii a jak je detektor na dané energie citlivý.

3.1 Energetická kalibrace

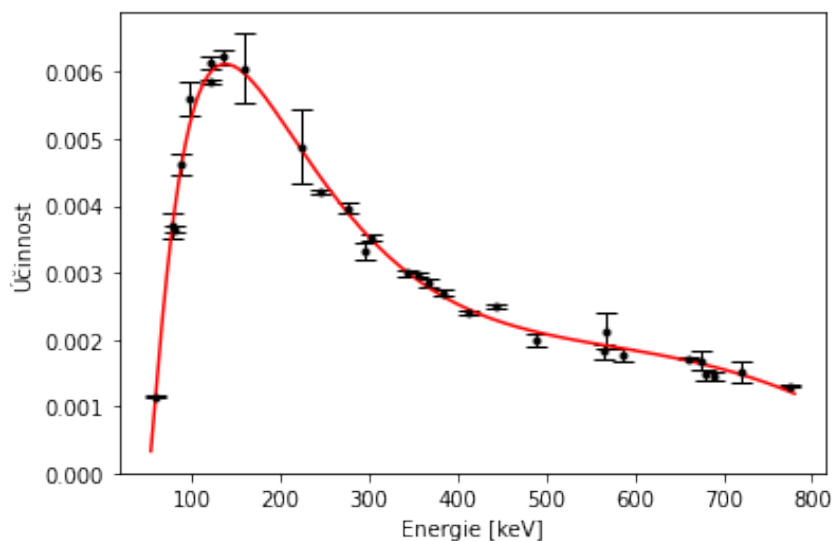
Při kalibraci jsem použil software GAMWIN, který je určený na ovládání a kalibraci gama detektorů. K změřeným kalibračním vzorkům (^{241}Am , ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{109}Cd) jsem našel na *Database WWW Table of Radioactive Isotopes*³ jejich energie gama rozpadu. Tyto energie jsem přiřadil k datům, která jsem naměřil, a následně jsem je proložil lineární funkcí. [4]

¹eV je jednotka energie, je definována jako kinetická energie, kterou ve vakuu e^- dostane při urychlení napětím 1 V. Energie komára je 1×10^{12} eV, jednotka je proto využívána v místech, kde jsou energie velmi malé, jako například v částicové fyzice.

² $m_e = 9.109\,384 \times 10^{-31} \text{ kg}$, $E = mc^2 \implies E = 9.109\,384 \times 10^{-31} \text{ kg} \cdot [299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}]^2 = 8.187\,106 \times 10^{-14} \text{ J} = 510.999 \text{ keV}$, je energie e^- a protože vytváříme pár e^- a e^+ , potřebujeme 2 násobnou energii tj. 1021.998 keV

³<http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/nucSearch.asp>

3.2 Účinnostní kalibrace



Graf 1: Závislost účinnosti na energii, pro pozici 80 mm nad detektorem.

Na výpočet efektivity detektoru, jsem použil rovnici (2), která určí pro danou energii peakovou účinnost.

$$\varepsilon = \frac{S_{peaku} \lambda \frac{t_{real}}{t_{live}}}{A_0 I_\gamma} \cdot \frac{1}{e^{-\lambda t_0}} \cdot \frac{1}{1 - e^{-\lambda t_{real}}} \quad (2)$$

Kde ε je peaková účinnost, S_{peaku} je plocha peaku, bez plochy radiačního pozadí, λ poločas přeměny t_{real} je doba, jak dlouho probíhalo celé měření, t_{live} doba, jak dlouho detektor měřil (doba měření bez mrtvé doby detektoru), A_0 referenční aktivita kalibračního zdroje, I_γ je tabulková intenzita kalibračního zdroje a t_0 je doba mezi měřením a měřením referenční aktivity.

3.3 Opravné faktory

3.3.1 Nelinearita

3.3.2 Samoabsorbce

4 Měření

4.1 Postup měření

4.2 Výsledky měření

Závěr

Seznam literatury, pramenů a internetových zdrojů

1. BEER, Albert; WILLARDSON, Robert; WEBER, Eicke. *Semiconductors for Room Temperature Nuclear Detector Applications*. Vol. 43. San Diego, California: Academic Press, 1995. ISBN 0-12-752143-7.
2. BIRKS, J. B. *The Theory and Practice of Scintillation Counting: International Series of Monographs in Electronics and Instrumentation*. 1st ed. Ed. by FRY, D. W.; COSTRELL, L.; KANDIAH, K. Pergamon, 1964. ISBN 9781483156064.
3. D'ALESSANDRIS, Paul. *Pair Production* [online]. 2021-02-05. [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://phys.libretexts.org/@go/page/10492>.
4. *Jaderně energetická zařízení - Laboratorní cvičení*. Brno: FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2021.
5. KNOLL, Glenn F. *Radiation Detection and Measurement*. 4th ed. Chichester, England: John Wiley & Sons, 2010. ISBN 978-0-470-13148-0.
6. KRÁL, Dušan. *STUDIUM VYUŽITÍ THORIA V JADERNÝCH REAKTORECH ŘÍZENÝCH URYCHLOVAČEM*. Technická 12, Brno, 2019. bakalářská práce. Ústav elektroenergetiky Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně.
7. L'ANNUNZIATA, Michael F. *Radioactivity: Introduction and History*. 1. vyd. Elsevier Science, 2007. ISBN 978-0-444-52715-8. Dostupné také z: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=a9cc1b463678e32aa495b1e65089dad9>.
8. MACKŮ, Robert. *Meze klasické fyziky, fotoelektrický jev, Comptonův posuv, dualismus vlna-částice, vlnová funkce* [přednáška]. FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2021.
9. NUCLEAR POWER. *Principle of Operation of HPGe Detectors* [online]. [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/radiation-detection/semiconductor-detectors/high-purity-germanium-detectors-hpge/principle-of-operation-of-hpge-detectors>.

10. PEHL, Richard H; CORDI, Richard C; GOULDING, Fred S. High-purity germanium: Detector fabrication and performance. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 1972, vol. 19, no. 1, s. 265–269.
11. ULLMANN, Vojtěch. *Detekce a spektrometrická analýza fotonového a korpuskulárního záření pro výzkum, technologické aplikace a medicínu* [online]. [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm>.

Seznam použitých značek, symbolů a zkratek

A_0 – aktivita kalibračního zářiče k referenčnímu datu

c – rychlost světla ve vakuu

e^- – elektron

e^+ – pozitron, antičástice k e^-

ε – efektivita

eV – elektron volt – je to energie, kterou má jeden elektron urychlený napětím 1 V

FWHM – Full Width at Half Maximum – šířka na poloviční výšce peaku

γ – gama záření – elektromagnetické záření, původem z jaderných reakcí

h – Planckova konstanta – $6.626\,070 \times 10^{-34}$ J s

\hbar – redukovaná Planckova konstanta – $\hbar = \frac{h}{2\pi}$

HPGe – High-Purity Germanium – detektor z velmi čistého germania

I_γ – intenzita gama přechodu

λ – rozpadová konstanta

n – registrovaná četnost

N – skutečná četnost

ν – frekvence fotonu

S_{peaku} – plocha peaku, bez pozadí

t_0 – doba mezi referenčním datem a datem měření

$T_{1/2}$ – poločas přeměny – doba, za kterou se přemění $\frac{1}{2}$ celkového počtu jader

t_{live} – čistý čas měření

t_{real} – celková doba měření

τ – mrtvá doba detektoru

Seznam použitých odborných výrazů

Fotoelektrický jev – jev, při kterém foton vytrhne elektron z elektronového obalu. Popsal jej Albert Einstein v roce 1905. Nezáleží na intenzitě světla, pouze na jeho frekvenci.

Comptonův jev – γ (popř. rentgenový) foton narazí na e^- , předá část své hybnosti e^- . Foton (protože ztratí část energie) má v důsledku nižší frekvenci (= větší vlnovou délku), a je vychýlen od původního směru. Objevil jej Arthur Holly Compton v roce 1923.

Vytváření páru pozitron elektron – Foton s energií alespoň 1020 keV se v blízkosti atomového jádra přemění na pár e^+ , e^- . Objevíli jej Blackett a Occhialini v roce 1933.

Elektromagnetické záření – postupné vlnění magnetického a elektrického pole. Objevil je Michael Faraday v roce 1845.

Spektroskopie – obor fyziky, který se snaží zachytit vliv elektromagnetického záření na danou látku.

Tabulka 1: table from .csv file.

| <i>energie</i> keV | pro5mm | pro30mm | pro80mm | pro120mm | pro205mm |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 59.5412 | 0.013 669 | 0.000 511 | 0.001 210 | 0.000 579 | 0.000 216 |
| 122.0614 | 0.077 195 | 0.025 505 | 0.006 107 | 0.003 138 | 0.001 191 |
| 136.4743 | 0.077 205 | 0.0244 | 0.006 226 | 0.003 221 | 0.001 228 |
| 661.657 | 0.018 320 | 0.002 159 | 0.000 578 | 0.000 311 | 0.000 122 |
| 898.042 | 0.013 213 | 0.000 001 | | | |
| 1115.546 | 0.010 566 | | | | |
| 1173.237 | 0.008 241 | 0.003 043 | 0.000 864 | 0.000 470 | 0.000 186 |
| 1332.501 | 0.007 374 | 0.002 688 | 0.000 771 | 0.000 417 | 0.000 166 |
| 1836.063 | 0.006 371 | 0.000 001 | | | |