

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

# **ROČNÍKOVÁ PRÁCE**

## **z Fyziky**

### **Kalibrace HPGe detektoru**

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

Třída: L3A

Školní rok: 2021/2022

Jméno: **David**

Příjmení: **Škrob**

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

V Brně dne : .....

.....  
David Škrob

# Obsah

<b>1</b>	<b>Princip měření</b>	<b>5</b>
1.1	Nefotoelektrická detekce gama záření . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Vliv energie</b>	<b>7</b>
2.1	Teoretická ztráta . . . . .	7
2.2	Kalibrace detektoru . . . . .	7
2.3	Skutečná ztráta . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Vliv vzdálenosti</b>	<b>8</b>
3.1	Teoretická ztráta . . . . .	8
3.2	Skutečná ztráta . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Jiné vlivy</b>	<b>9</b>
4.1	Mrtvá doba detektoru . . . . .	9
4.2	Radiační pozadí . . . . .	10

## Zadání

Popište jak funguje polovodičová detekce gama záření. Pomocí sady kalibračních zářičů stanovte účinnost detekce gama záření HPGe (High Purity Germanium) detektorem pro vybranou měřicí pozici. Pomocí statistických metod a teoretických znalostí určete, s čím ztráty souvisí.

## Úvod

Co je vlastně gama záření? Gama záření je vysokoenergetické elektromagnetické záření, které vzniká v jádru atomu při radioaktivní přeměně.

Má ročníková práce se bude zabývat vlivům ztrát signálu gama záření v závislosti na vzdálenosti. Bude se též zabývat rozlišovací schopností detektoru při různých energiích fotonu. Snaha této práce je najít takové funkce, aby bylo možné tyto vlivy odfiltrovat, při měření neznámého vzorku.

Vzal jsem kalibrační vzorek, dal jsem ho na detektor, a pak počkal, než v peaku nebylo alespoň 10 000 záznamů. Poté jsem kalibrační vzorek schoval zpět do trezoru. Následně jsem analyzoval daná data, a z nich jsem vytvořil příslušné grafy.

Hlavním důvodem, proč se používají HPGe detektory: Jsou lepe schopné určit, o jakou energii se jedná, čehož můžeme využít při rozlišování jednotlivých radioaktivních izotopů. Tak můžeme zjistit, zda se v přepravě radioaktivních materiálů nesnaží někdo přepravit speciální jaderný materiál který by mohl být použit na výrobu jaderných zbraní.<sup>1</sup>

## Seznam použitých značek a symbolů

$e^-$  - elektron,  $m_e = 9.109\,383\,7 \times 10^{-31}$  kg

$e^+$  - pozitron, antičástice k  $e^-$

FWHM - Full width at half maximum - šířka křivky spektra naměřená mezi těmi body na ose y, které jsou polovinou peaku

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

HPGe - High-purity germanium - detektor z velmi čistého germania

---

<sup>1</sup><https://www.ortec-online.com/-/media/ametekortec/technical%20papers/homeland%20security%20applications%20and%20ch>

$\nu$  - frekvence fotonu

$m$  - hmotnost

$h$  - Planckova konstanta -  $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$  J s

$\hbar$  - redukovaná Plankova konstanta -  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$

$c$  - rychlost světla ve vakuu -  $299\,792\,458$  m s<sup>-1</sup>

$n$  - registrovaná četnost

$N$  - skutečná četnost

$\tau$  - mrtvá doba detektoru

$\gamma$  - gama záření - elektromagnetické záření, původem z jaderných reakcí

$\lambda$  - rozpadová konstanta -  $\frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$

$T_{1/2}$  - poločas přeměny - doba za jakou se přemění  $\frac{1}{2}$  celkového počtu jader

$\varepsilon$  - efektivita

$S_{peaku}$  - plocha peaku, bez pozadí

$A_0$  - aktivita kalibračního zářiče k referenčnímu datu

$I_\gamma$  - intenzita gama přechodu

$t_{real}$  - celková doba měření

$t_{live}$  - čistý čas měření

$t_0$  - doba mezi referenčním datem a datem měření

## 1 Princip měření

Když se do citlivé vrstvy detektoru (u germania díky speciální technice výroby velmi čistého germania v řádu cm, u křemíku mm)<sup>2</sup> dostane  $\gamma$  foton. Díky fotoelektrickému jevu, gama foton uvolní  $e^-$  z elektronového obalu. Asi 3 eV jsou potřeba na uvolnění  $e^-$  (v případě Germania

---

<sup>2</sup>G.F: Knoll str 415

asi 3.6 eV, v případě křemíku asi 2.9 eV)<sup>3 4</sup> tato energie je nutná na odtržení  $e^-$  od atomu, a zbylá 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 úměrný energii dopadajícího fotonu.“<sup>5</sup> Na diodu detektoru přivedeme v závěrném směru napětí, řádově tisíce V.<sup>6</sup> Jakmile se vytvoří pár  $e^-$  - díra, tak  $e^-$  se přesouvá ke kladně nabitě elektrodě, díra k záporně nabitě, vzniká proud, a ten potom zaznamenáváme.<sup>7</sup> [2] Použijeme referenční zdroj gama záření, u kterého známe jeho energii, aby jsme mohli detektor zkalibrovat.<sup>8</sup> HPGe detektory mají vyšší tepelný šum, který by při pokojové teplotě přehlušil měřený signál. Proto jej chladíme kapalným dusíkem, na teplotu  $-196^\circ\text{C}$ <sup>9 10</sup>

## 1.1 Nefotoelektrická detekce gama záření

Energii z dopadajících fotonů můžeme detekovat i pomocí 2 dalších jevů.

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.<sup>11</sup> Tento foton může dále reagovat v detektoru, až dokud se nedostane mimo citlivou vrstvu detektoru, nebo dokud není zcela pohlcen.

Druhým z nich je tvorba páru elektron pozitron, kdy pokud se  $\gamma$  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:

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

Z čehož vyplývá, že pokud měl foton větší energii, než 1022 keV ( $m_e = 9.109\,383\,7 \times 10^{-31}$  kg,  $E = mc^2 \implies E = 9.109\,383\,7 \times 10^{-31} \text{ kg} \cdot [299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}]^2 = 8.187\,105\,8 \times 10^{-14} \text{ J} = 510\,999 \text{ eV}$ , je energie  $e^-$  a protože  $e^-$  a  $e^+$ , potřebujeme 2 násobnou energii tj. 1 021 998 eV).

<sup>3</sup><https://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm>

<sup>4</sup><https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/radiation-detection/semiconductor-detectors/high-purity-germanium-detectors-hpge/principle-of-operation-of-hpge-detectors>

<sup>5</sup>Semiconductors for Room Temperature Nuclear Detector Applications, str. 23

<sup>6</sup><https://sci-hub.se/10.1109/TNS.1972.4326520>

<sup>7</sup>[https://en.wikipedia.org/wiki/Gamma\\_spectroscopy](https://en.wikipedia.org/wiki/Gamma_spectroscopy)

<sup>8</sup>[https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=195526](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=195526)

<sup>9</sup>Zlín 2011 SENZORY. Fyzikální principy, úpravy signálů

<sup>10</sup><https://www.radiation-dosimetry.org/what-is-advantage-and-disadvantage-of-germanium-detectors-definition/>

<sup>11</sup>[https://cs.wikipedia.org/wiki/Compton%C5%AFv\\_jev](https://cs.wikipedia.org/wiki/Compton%C5%AFv_jev)

Pokud má  $\gamma$  záření větší energii, tak tato energie je převedena na hybnost  $e^-$  a  $e^+$  <sup>12 13</sup>

## 2 Vliv energie

### 2.1 Teoretická ztráta

U vlivu energie řešíme, jaké rozlišení má detektor při dané energii. Používáme při tom FWHM, kde můžeme snadno určit, jak je peak široký, a kdy by nám již 2 peaky splynuly v jeden.<sup>14</sup> [2] „Systémy s malým germaniovým detektorem mají FWHM přibližně 150-250 eV při 5,9 keV, kdy se FWHM zvyšuje na 400-600 eV při 122 keV. Větší koaxiální detektory mají hodnoty FWHM 800-1200 eV při 122 keV, kdy se zvýší na 1,7-2,3 keV při 1333 keV.“[1]

### 2.2 Kalibrace detektoru

Při kalibraci jsem použil software GAMWIN, který je vyvinut českou firmou, a je určený na ovládání a kalibraci gama detektorů. K změřeným kalibračním vzorkům (<sup>241</sup>Am, <sup>57</sup>Co, <sup>60</sup>Co, <sup>137</sup>Cs, <sup>88</sup>Y, <sup>65</sup>Zn) jsem našel na <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/nucSearch.asp> jejich energie gama rozpadu. Tyto energie jsem přiřadil k datům, jenž jsem naměřil, a program GAMWIN tyto data proložil vhodnou funkcí.[2] <sup>15</sup>

### 2.3 Skutečná ztráta

Na výpočet efektivity detektoru, jsem použil rovnici (2). První člen je zde pro počítání efektivity. Druhý člen je na kompenzaci pro přeměnu mezi referenčním datem a datem měření. Třetí člen je zde pro kompenzaci přeměny během měření.

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

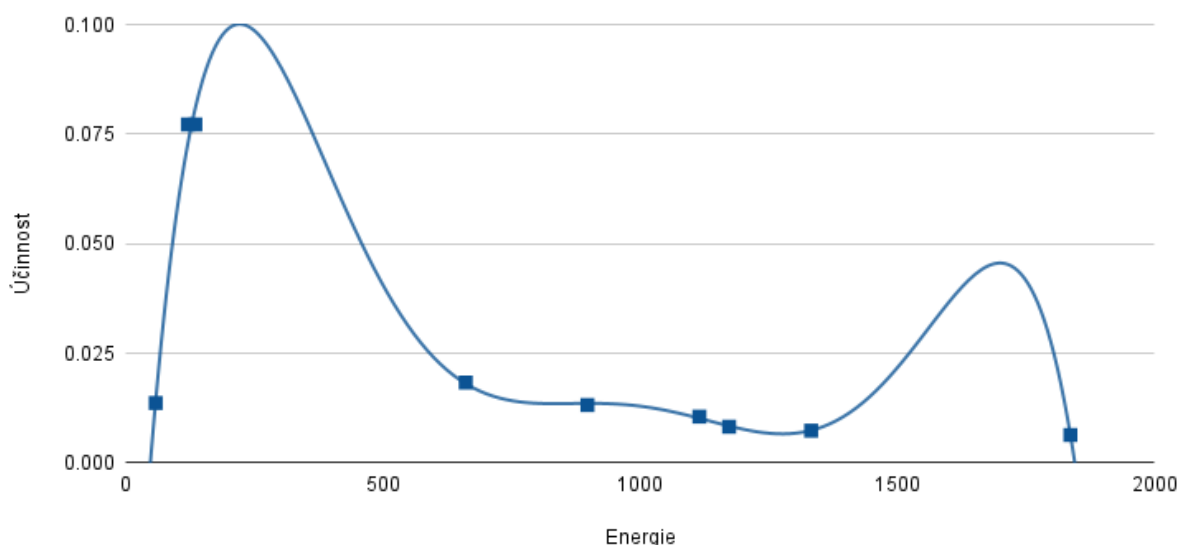
<sup>12</sup>Pair Production. (2021, February 5). Monroe Community College. <https://phys.libretexts.org/@go/page/10492>

<sup>13</sup>Semiconductors for Room Temperature Nuclear Detector Applications, str. 23

<sup>14</sup><https://www.stellarnet.us/what-is-full-width-at-half-maximum-fwhm/>

<sup>15</sup><https://www.nuviatech-instruments.com/cz/Produkt/nusoft-gamwin/>

Účinnost vs energie pro pozici 5 mm nad detektorem



Graf 1: závislost účinnosti na energii, pro pozici 5 mm nad detektorem

### 3 Vliv vzdálenosti

#### 3.1 Teoretická ztráta

Jak dobře známe, tak platí zákon převrácených čtverců, který nám říká, že intenzita klesá se čtvercem vzdálenosti.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{h_1^2}{h_2^2} \implies I_1 = I_2 * \frac{h_1^2}{h_2^2} \quad (3)$$

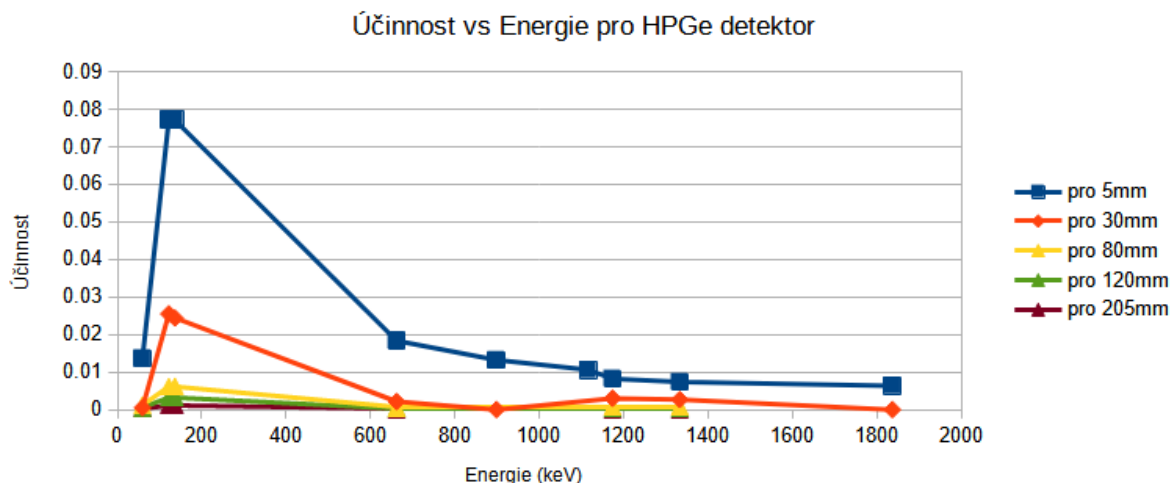
I přes to, že neměříme ve vakuu a vzorek pokládáme na plastovou destičku, tak tyto ztráty zanedbáme, protože budou mnohonásobně menší než ztráty způsobené zákonem převrácených čtverců. (abychom ztratili polovinu fotonů o energii 100 eV, tak bychom potřebovali 35 m vysoký sloup vzduchu)<sup>16</sup>

#### 3.2 Skutečná ztráta

Na grafu 2 vidíme, že účinnost se vzdáleností rychle klesá. Dále si můžeme povšimnout, že citlivost na energii zůstává stejná, takže pokles účinnosti je zde zcela závislý na vzdálenosti.

<sup>16</sup><https://www.nuclear-power.com/nuclear-power/reactor-physics/interaction-radiation-matter/interaction-gamma-radiation-matter/gamma-ray-attenuation/half-value-layer/>





Graf 2: porovnání závislosti účinnosti na energii při různých vzdálenostech

## 4 Jiné vlivy

### 4.1 Mrtvá doba detektoru

Mrtvá doba detektoru, je doba, kdy detektor není citlivý na detekci dalšího fotonu. Při měření ji vyjadřujeme jako procentní podíl z celkového času měření.

Dělíme ji na nekumulativní a kumulativní.

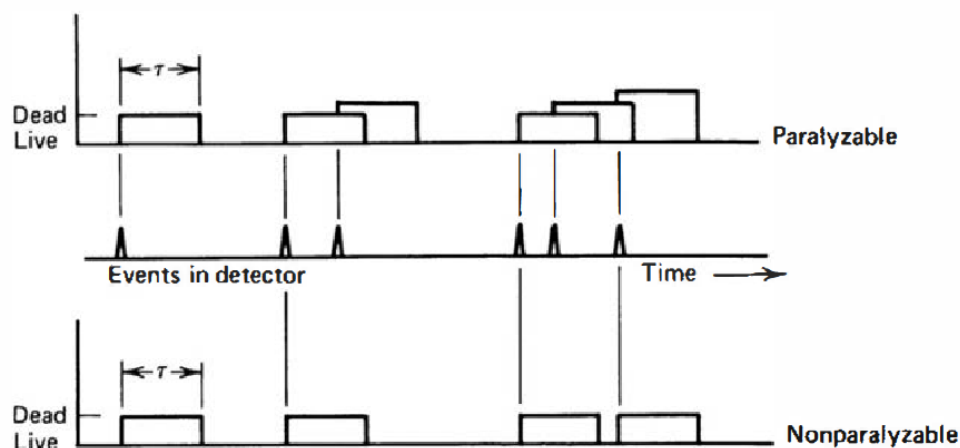
Nekumulativní - foton, který není registrován, nemá vliv na samotný detektor. Většinou je způsobena tím, že detekční člen dokáže registrovat fotony rychleji než elektronika stíhá zpracovávat signál.

$$n = \frac{N}{1 + N * \tau} \quad (4)$$

Kumulativní - foton, který není registrován, prodlouží mrtvou dobu detektoru. Je způsobena tím, že je přehlcen detekční člen. Při zvyšování četnosti je zpočátku odezva téměř lineární, při dalším navýšení četnosti počet registrovaných impulzů začne klesat.

$$n = N * e^{-N * \tau} \quad (5)$$

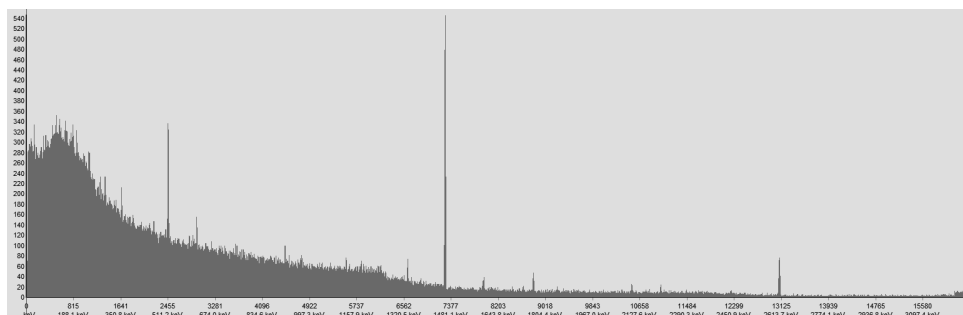
Mrtvou dobu můžeme měřit několika způsoby, mezi nejrozšířenější patří „metoda postupného oddalování (nebo přibližování) zdroje, až dokud není dosažena maximální četnost, kterou je detektor schopen měřit. Další zvyšování četnosti již nevede k zvyšování počtu zaznamenaných impulzů.“[2]



Obrázek 1: kumulativní (paralyzibilní) a nekumulativní (neparalyzibilní) mrtva doba

## 4.2 Radiační pozadí

V Zemské kůře jsou radioaktivní prvky, které vyzařují gama záření. Z vesmíru se při různých dějích vytváří  $\gamma$  záření. Tyto záření jsou sice málo intenzivní, ale vytváří šum na detektoru.



Obrázek 2: spektrum měření přirozeného pozadí

Na obrázku 2 vidíme, že nejvyšší naměřená hodnota je zhruba 540 záznamů. Toto pozadí jsem měřil 2 dny, takže to znamená, že detektor je dobře odstíněný.

## Poznámky a odkazy

## Závěr

Díky mé ročníkové práci jsem si mohl prohlédnout moderní laboratoře na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT. Povedlo se mi detektor nakalibrovat v programu GAMWIN a spočítat jeho efektivitu.

## Seznam použité literatury

### Seznam literatury, pramenů a internetových zdrojů

- [1] KNOLL, Glenn Frederick, Radiation Detection and Measurement, 4th Edition, University of Michigan, John Wiley & Sons, Inc., 2010, 819 s. ISBN: 978-0-470-13148-0
- [2] Jaderně energetická zařízení - Laboratorní cvičení, Brno, FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2021, 34 s.

### Seznam tabulek, grafů, příloh

### Seznam použitých odborných výrazů

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

Comptonův jev -  $\gamma$  (popř. rentgenový) foton narazí na  $e^-$ , předá část své hybnosti  $e^-$  a 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  $e^+$ ,  $e^-$ . Objeví 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.