



Zdravotně
sociální fakulta
Faculty of Health
and Social Studies

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Zdravotně sociální fakulta
Katedra radiologie, toxikologie a ochrany obyvatelstva

Bakalářská práce

**Porovnání plastového scintilačního detektoru
s detektorem NaI(Tl), jejich užitných a dozimetrických
vlastností**

1. Plastový scintilační detektor

2. NaI(Tl) detektor

Vypracoval: Jiří Vávra

Vedoucí práce: Ing. Jan Singer, CSc.

České Budějovice 2014

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá ionizujícím zářením, především pak jeho detekcí neboli měřením a to dvěma scintilačními detektory ionizujícího záření, plastovým scintilačním detektorem a detektorem jodidu sodného aktivovaného thaliem neboli NaI(Tl).

V první kapitole je nejprve rozebíráno ionizující záření z obecného hlediska, např. co je to ionizující záření a radioaktivita, uvedeny a vysvětleny druhy radioaktivních přeměn, dále jsou vysvětleny interakce ionizujícího záření. Následně zobrazen průchod ionizujícího záření hmotou a v krátkosti zdroje ionizujícího záření. Poté jsou uvedeny veličiny a jednotky charakterizující pole záření v prostoru a působení záření na látku. Jelikož se ve své bakalářské práci nezabývám účinky ionizujícího záření na organismus, nejsou zde uvedeny veličiny a jednotky s tím spjaté.

Po informacích týkajících se ionizujícího záření jsou obecné informace o scintilačních detektorech, jaké ideální vlastnosti by měl mít scintilační materiál, princip scintilačních detektorů. Především pak informace o uvedených detektorech a jejich vlastnosti.

Cílem práce je porovnání plastového scintilačního detektoru a detektoru NaI(Tl), které jsou v dnešní době velmi často využívány. Porovnat užité vlastnosti těchto detektorů, které se používají v dozimetrii, v průmyslu, ve zdravotnictví, aj. Porovnat účinnost, rozlišení, energetické závislosti, aj. pomocí měření s bodovými zářiči.

Pro účinné porovnání byly k měření použity detektory o stejné velikosti, dále pak radionuklidové zdroje emitující ionizující záření s různými energiemi v celém rozsahu měření. Veškerá měření probíhala po dostatečně dlouhou dobu a v olověném stínění, aby nedocházelo k rušení okolním (přírodním) zářením.

Ve výsledných spektrech jsou vyznačeny píky daných radionuklidů, aby byl zřetelný rozdíl v rozlišení u použitých detektorů, dále je graficky znázorněn světelný výtěžek detektorů.

Provedl jsem energetickou kalibraci obou detektorů, účinnostní kalibraci pouze u detektoru NaI(Tl), u plastového detektoru nebylo možné tuto kalibraci realizovat především z důvodu špatného rozlišení tohoto detektoru a z toho vyplývající nedostatek

kalibračních bodů. Tento problém měl za následek, že energetická kalibrační křivka u plastového detektoru není lineární, tudíž není úplně optimální. U detektoru NaI(Tl) jsou obě vytvořené křivky v podstatě ideální.

Z naměřených spekter a jejich vyhodnocení vyplývá, že detektor NaI(Tl) má znatelně lepší rozlišovací schopnost a lepší světlený výtěžek. Proč tedy a k čemu používat plastový scintilační detektor? O tom je diskutováno v závěru bakalářské práce. I přesto, že mají plastové detektory horší spektrometrické vlastnosti, se používají velmi často. Především proto, že jsou několika násobně levnější a dají vyrábět ve velkých rozměrech a různých tvarech za přijatelnou cenu. Slouží k rychlé selekci, tedy zjištění, zda měřený objekt vyzařuje ionizující záření či nikoliv. Zatímco NaI(Tl) detektory se používají k identifikaci radionuklidů vzhledem k svému poměrně vysokému rozlišení.

Klíčová slova: Ionizující záření, scintilační detektory, plastový detektor, NaI(Tl) detektor, dozimetrie.

Abstract

This bachelor thesis deals with ionizing radiation, especially with its detection by another name measurement, in two scintillation detectors of ionizing radiation, a plastic scintillation detector and the detector of thallium-activated sodium iodide by another name NaI (Tl).

The first description of an ionizing radiation in general terms is in the first chapter, eg. what is ionizing radiation and radioactivity, types of radioactive decay are listed and explained, further there are explained the interaction of ionizing radiation. Subsequently there are shown the passage of ionizing radiation by the material and in shortly way sources of ionizing radiation. Then there are quantities and units characterizing the radiation field in the space and the radiation exposure to the substance. As I do not deal with the effects of ionizing radiation on the organism in my bachelor thesis, there are not listed quantities and units associated with it.

After information about ionizing radiation there is general information about scintillation detectors, which ideal properties should have scintillation material, the principle of scintillation detectors. In particular, there are information about mentioned detectors and their properties.

The aim of the thesis is to compare the plastic scintillation detector with the detector NaI (Tl), which are used very often nowadays. Then to compare functional characteristics of these detectors, which are used in dosimetry, in industry, healthcare, and others. Then to compare efficiency, resolution, energy dependence, etc. with using the measurement of point emitters.

There were used to measure the detectors of the same size for effective comparison, then radionuclide sources emitting the ionizing radiation with different energies in the entire measurement range. All measurements were made over a sufficiently long period and in the lead shielding to avoid interference from other (natural) radiation.

The resulting spectras are indicated by peaks of the radionuclides to be a distinct difference in the resolution at used detectors, then there is graphically illustrated the light yield of detectors.

I performed the energy calibration of both detectors, the efficiency calibration of the detector only at NaI (Tl) detector. It was not possible to implement this calibration at a plastic detector mainly due to the bad resolution of the detector and the resulting lack of calibration points. This problem has resulted that the energy calibration curve is not linear at a plastic detector; therefore, it is not entirely optimal. Both formed curves are essentially ideal at the detector NaI (Tl).

It is shown from the measured spectras and their evaluation that the detector NaI (Tl) has a significantly better resolution and better light yield. So why and for what to use a plastic scintillator detector? The fact is discussed at the end of this thesis. Although plastic detectors have low spectrometric properties, they are used very often. Mainly because they are several times cheaper and they can be produced in large sizes and different shapes for a reasonable price. They are used for quick selection, thus determining whether the measured object emits ionizing radiation or not. NaI (Tl) detectors are used to identify radionuclides because of their relatively high resolution.

Keywords: Ionizing radiation, scintillation detectors, plastic detector, NaI(Tl) detector, dosimetry.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejich internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne (datum)

.....

(jméno a příjmení)

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Janu Singerovi, CSc. za odborné vedení bakalářské práce a trpělivost při jejím zpracování. Dále pak mému nadřízenému Václavu Holečkovi za cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

Obsah

Úvod	10
1. Současný stav.....	11
1.1 Stručná historie	11
1.2 Ionizující záření a radioaktivita	11
1.2.1 Radioaktivní přeměna	12
1.2.2 Přeměna alfa	13
1.2.3 Přeměna beta.....	14
1.2.4 Přeměna γ	17
1.3 Interakce ionizujícího záření.....	18
1.3.1 Interakce přímo ionizujícího záření	18
1.3.2 Interakce nepřímo ionizujícího záření	19
1.4 Průchod ionizujícího záření hmotou	21
1.5 Zdroje ionizujícího záření	22
1.6 Veličiny a jednotky ionizujícího záření	23
1.6.1 Veličiny charakterizující zdroje ionizujícího záření	23
1.6.2 Veličiny charakterizující pole záření v prostoru	23
1.6.3 Veličiny charakterizující působení záření na látku.....	24
1.7 Scintilační detektory ionizujícího záření	26
1.7.1 Plastový detektor.....	29
1.7.2 Detektor jodidu sodného aktivovaný thaliem	30
2. Cíle práce a hypotézy.....	31
3. Metodika	32
4. Výsledky	33
5. Diskuze	40
6. Závěr	44
7. Seznam použitých zdrojů.....	45
Přílohy.....	50

Seznam použitých zkratk

NaI(Tl) – jodid sodný aktivovaný thaliem

Záření X – záření rentgenové

Úvod

Ionizující záření se stává stále více diskutovaným tématem a má na náš život významný vliv. V určitých případech může léčit, použití však musí být kontrolováno odborným personálem, jinak má vliv především negativní. Proto by detekce a měření ionizujícího záření nemělo být zanedbáváno, ať už se jedná o přírodní záření nebo umělé zdroje, mělo by být kontrolováno.

Cílem práce je porovnání plastového scintilačního detektoru a detektoru NaI(Tl), porovnat užité vlastnosti těchto detektorů, které se používají v dozimetrii, v průmyslu, ve zdravotnictví, aj. Porovnat účinnost, rozlišení, energetické závislosti, aj. pomocí měření s bodovými zářiči.

Hypotézou práce je, zda se účinnost, rozlišení a jiné dozimetrické parametry u obou detektorů liší.

Toto téma práce jsem si vybral, protože pracuji jako servisní technik radiometrie a je mi tudíž blízké, občas se setkávám s případy, kdy není jasné, který z detektorů použít. Práce může být přínosem pro snadnější výběr mezi těmito detektory, díky reálnému porovnání např. uvedeným spektrům apod.

1. Současný stav

1.1 Stručná historie

Prvním poznaným druhem ionizujícího záření bylo záření X (neboli rentgenové záření), tento objev publikoval v prosinci 1895 Conrad Röntgen. I když nebyla známa jeho podstata, dostalo se rychle do centra pozornosti fyziků i lékařů. Rentgenka se stala součástí vybavení mnoha laboratoří i ordinací. Dlouho však nezůstala jediným známým zdrojem ionizujícího záření.

Již v roce 1896 profesor Antoine Henri Becquerel zveřejnil své zjištění, že soli uranu emitují neznámé paprsky, které způsobují zčernání fotografické emulze a ionizaci vzduchu. Na jeho výzkumy navázali Pierre a Marie Curieovi, kteří nazvali tento jev **radioaktivitou**. Tím byly přírodní radioaktivní nuklidy poznány jako další zdroje ionizujícího záření. [1]

1.2 Ionizující záření a radioaktivita

Základním projevem působení níže uvedených druhů záření na hmotu je ionizace, tento jev dal záření jméno: ionizující záření.

Ionizující záření je tok hmotných částic nebo fotonů elektromagnetického záření, které mají schopnost ionizovat atomy prostředí nebo excitovat jejich jádra. Podle mechanismu ionizace látky rozlišujeme 2 základní typy ionizujícího záření: záření přímo ionizující a záření nepřímo ionizující. [2]

Některé nuklidy v přírodě jsou nestabilní, samovolně se přeměňují na stabilnější a při tomto procesu se uvolňuje přebytečná energie ve formě ionizujícího záření. Tento děj se nazývá **radioaktivita** a je v přírodě velice rozšířen. Jadernými reakcemi, například v jaderném reaktoru, je možno vyrobit mnoho dalších radionuklidů, které v přírodě neexistují. [3]

1.2.1 Radioaktivní přeměna

Radioaktivní přeměna je možná pouze za podmínky, kdy energetická hladina jádra bude před rozpadem vyšší než po rozpadu. Energetický rozdíl je pak realizován jednak klidovou hmotností emitovaných částic a jednak jejich kinetickou energií.

Přeměnová konstanta, charakterizuje rychlost přeměny a značíme ji „ λ “. Základní jednotkou je $[s^{-1}]$.

Známe-li počet jader (N) a rozpadovou konstantu (λ) daného souboru, můžeme spočítat jeho aktivitu ze vztahu:

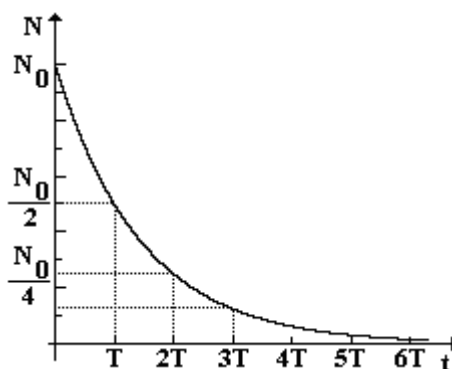
$$A = \lambda * N$$

Základní jednotkou aktivity je [Bq]. [4, 5]

Poločas rozpadu T

Poločas radioaktivní přeměny (rozpadu) je doba, za kterou se počet atomů radionuklidu (i jeho aktivita) zmenší na polovinu. Za další poločas přeměny se ze zbývajících poloviny opět rozpadne polovina jader atd. Z původního počtu radioaktivních jader N_0 po uplynutí doby t ve vzorku zůstane N radioaktivních jader.[6]

$$N = N_0 * e^{-\lambda t} = N_0 * 2^{-\frac{t}{T}}$$



Obrázek 1 - Graf radioaktivního rozpadu, zdroj: fyzika.jreichl.com

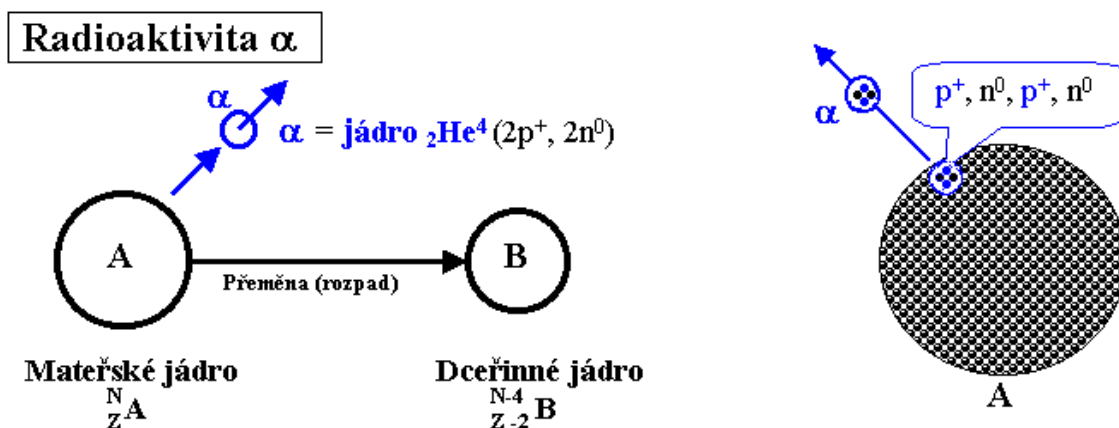
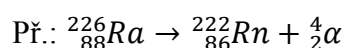
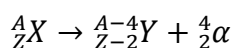
Poločas rozpadu je pro daný radionuklid konstanta, kterou nelze nijak ovlivnit.

1.2.2 Přeměna alfa

Při této jaderné přeměně se vyzařuje částice α , která je jádrem helia. Z mateřského jádra odnáší částice α 4 nukleony¹, vzniklé dceřiné jádro bude tudíž mít o 2 protony a 2 neutrony méně (tj. celkem o 4 nukleony méně). [7]

Charakteristiky přeměny α :

- Spektrum záření α je čárové (diskrétní).
- Energie emitovaných částic je 4 až 10 MeV => silné ionizační účinky
- Poločas rozpadu 10^{-2} s až 10^{17} let.



Obrázek 2 - Základní schéma radioaktivity α , zdroj: Vojtěch Ullmann

Vzhledem k malému doletu stačí k odstínění tenká vrstva v podstatě libovolného materiálu. Všeobecně je známo, že pro odstínění postačuje list papíru.

Alfa záření je nebezpečné v případě průniku radionuklidů, které ho emitují do lidského organismu, kde ho nic neodstíní a dochází tak k vnitřnímu ozáření neboli vnitřní kontaminaci.

¹ 2 protony a 2 neutrony

1.2.3 Přeměna beta

Rozpad beta je nejrozšířenější typ radioaktivní přeměny a tyto radionuklidy mají největší praktický význam. Přibližně 80% všech radionuklidů podléhá přeměnám beta.

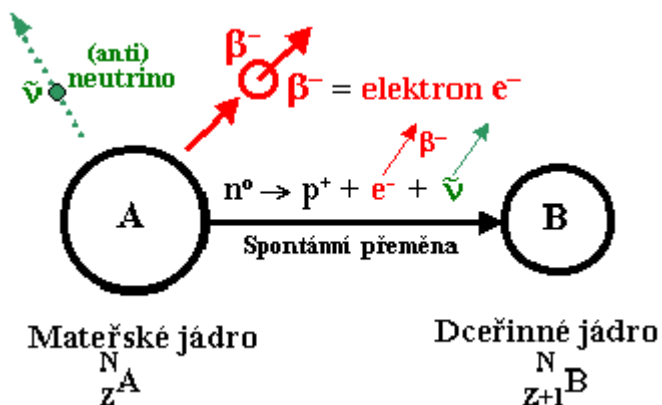
Tento proces je charakteristický pro jádra, kde nepanuje optimální poměr mezi počtem protonů a neutronů. Při přeměnách β se nemění počet nukleonů v jádře – mluvíme tedy o izobarických přeměnách. Dochází pouze k vyrovnání vzájemného poměru počtu protonů a neutronů v jádře. [4, 5]

Charakteristiky přeměn β :

- Spektrum záření β je spojité.
- Energie emitovaných částic je 10 keV až 10 MeV.
- Poločas rozpadu 10^{-2} s až 10^5 let.

Přeměna β^-

Proces je typický pro jádra s přebytkem neutronů. Některý z přebývajících neutronů se „přemění“ na proton, ten zůstává v jádře, zatímco částice β^- (elektron) vyletí ven jako proud elektronů a odnáší rozdíl energií mezi body A a B.



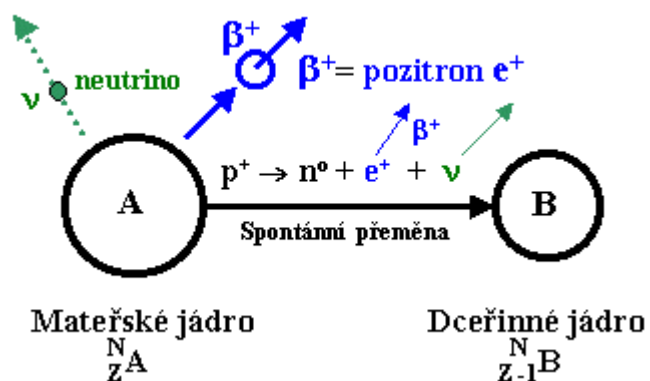
Obrázek 3 - Základní schéma radioaktivity β^- ; zdroj: Vojtěch Ullmann

Při přeměně β^- se nukleonové číslo nemění², mění se protonové číslo, které se zvýší o 1. [5, 7]

² Mluvíme o tzv. izobarické přeměně

Přeměna β^+

Proces je typický pro jádra s přebytkem protonů. Některý z přebývajících protonů se „přemění“ na neutron, ten zůstává v jádře, zatímco částice β^+ (pozitron) vyletí ven jako proud pozitronů a odnáší rozdíl energií mezi jádry A a B.

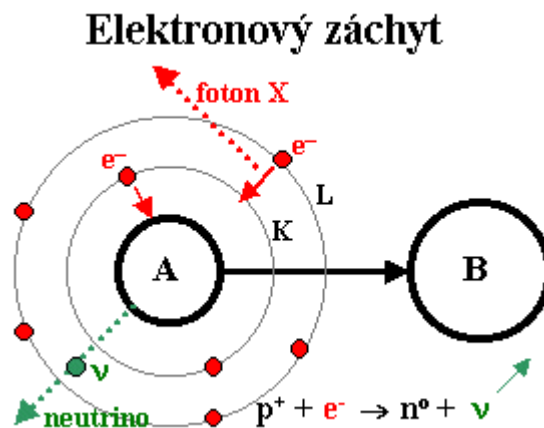


Obrázek 4 - Základní schéma radioaktivity β^+ , zdroj: Vojtěch Ullmann

Při přeměně β^+ se nukleonové číslo nemění, mění se protonové číslo, které se zmenší o 1. [5, 7]

Elektronový záchyt

Vyskytuje se u jader s přebytkem protonů a je konkurenčním procesem přeměny β^+ .



Obrázek 5 - Základní schéma elektronového záchytu, zdroj: Vojtěch Ullmann

Jeden z přebývajících protonů v jádře se „přemění“ na neutron takovým způsobem, že si stáhne jeden z elektronů, které kolují kolem jádra, a spojí se s ním.

Při elektronovém záchytu nevysílá jádro žádné korpuskulární záření³. Při elektronovém záchytu dochází pouze k vyzáření charakteristického rentgenového záření.

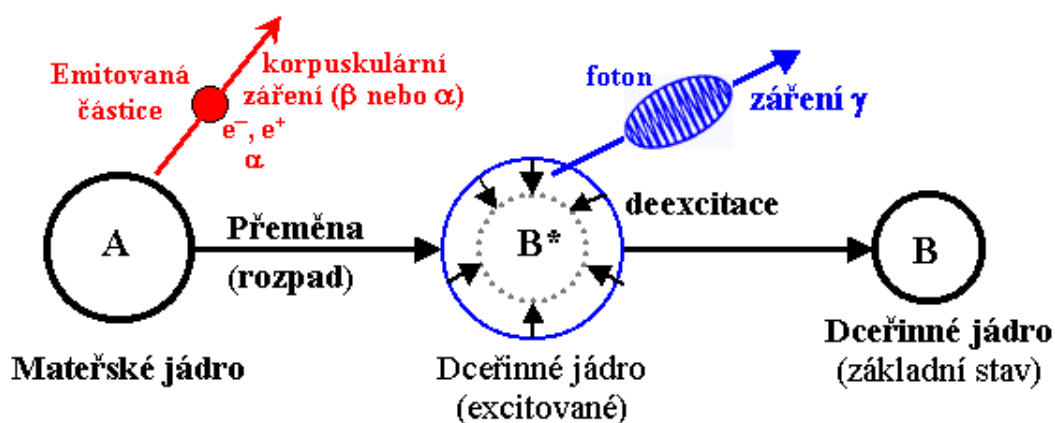
Při přeměně elektronového záchytu se nukleonové číslo nemění, mění se protonové číslo, které se zmenší o 1. [5, 7]

³ Rozdíl energií se rozdělí mezi vazebnou energii a antineutrino.

1.2.4 Přeměna γ

Gama záření je elektromagnetické záření (proud fotonů) s velmi krátkou vlnovou délkou řádu 10^{-11} až 10^{-13} m. [9]

Po jakékoliv radioaktivní přeměně vzniká dceřiné jádro B většinou v energeticky excitovaném stavu B'. Deexcitací jádra B' je vyzářen energetický rozdíl ve formě fotonu γ . Jádro B pak již zůstává v základním stavu.



Obrázek 6 - Schéma přeměny jádra a excitace – radioaktivita γ , zdroj: Vojtěch Ullmann

Při okamžitém izomerním přechodu přechází atomové jádro z energeticky vyšší hladiny na energeticky nižší hladinu. Tento jev je doprovázen emisí γ záření.

Při přeměně γ se nemění nukleonové číslo ani protonové číslo. Záření gama má čárové spektrum. [5]

1.3 Interakce ionizujícího záření

1.3.1 Interakce přímo ionizujícího záření

Přímo ionizující záření je tvořeno elektricky nabitou částicí schopné tak přímo ionizaci způsobit, dále dělíme na interakce těžkých a lehkých nabitých částic.

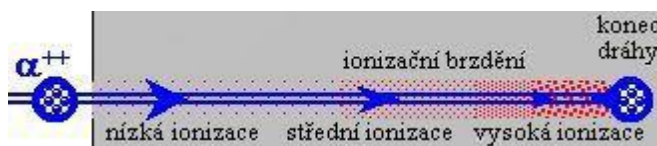
Pro oba typy částic platí jedna důležitá vlastnost: Nabité částice ztrácí svoji energii především na konci své dráhy.

Těžké nabité částice jsou například alfa částice, protony atd.

Lehké nabité částice jsou především elektrony a pozitrony. [2]

Těžké nabité částice (α , protony, štěpné trosky)

- Základní interakce
 - ionizace
 - excitace
- Dráha je přímá.
- Dolet je velmi krátký.

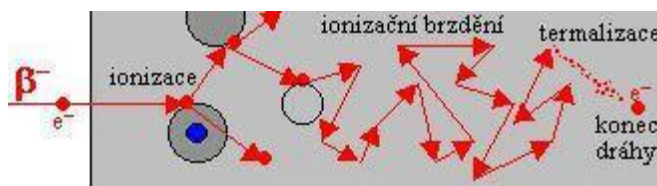


Obrázek 7 - Schématické znázornění průchodu částic α látkou a mechanismus ionizace,

zdroj: Vojtěch Ullmann

Lehké nabité částice (β^+ , β^-)

- Základní interakce
 - ionizace
 - brzdné záření
 - anihilace
 - čerenkovo záření
- Dráha je delší a je „cik cak“
- Dolet je delší. [5]



Obrázek 8 - Schématické znázornění průchodu částic β^- látkou a mechanismus ionizace,

zdroj: Vojtěch Ullmann

1.3.2 Interakce nepřímo ionizujícího záření

Nepřímo ionizující záření je záření, které nenes elektrický náboj. Jedná se o fotony (záření γ nebo X) a neutrony.

Interakce fotonů

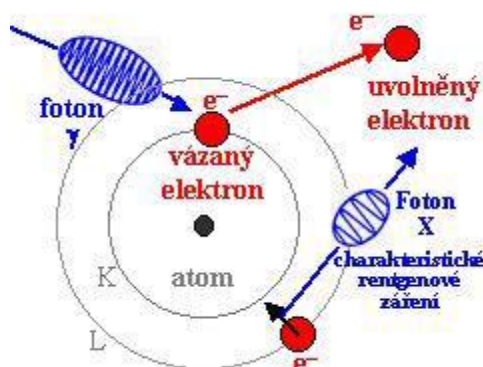
Těchto interakcí je celá řada, následující patří mezi nejvýznamnější.

- **Fotoelektrický jev – fotoefekt**

Fotoefekt nastává nejčastěji u záření γ s nižšími energiemi a v látkách s velkým protonovým číslem Z .

Foton záření γ se srazí s elektronem vázaným v atomovém obalu, **předá mu celou svou energii a zanikne**. Elektron, který získal energii fotonu, se uvolní z vazby v atomu a vyletí z elektronového obalu.

Na místo uprázdněné po elektronu okamžitě přeskočí z vyšší slupky v atomovém obalu elektron, přičemž energetický rozdíl vazbové energie na vyšší a nižší slupce se vyzáří ve formě charakteristického rentgenového záření.

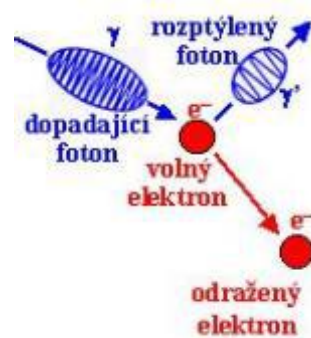


Obrázek 9 - Fotoelektrický jev, zdroj: Vojtěch Ullmann

- **Comptonův rozptyl**

Comptonův rozptyl se nejvíce uplatňuje u záření γ středních a vyšších energií a v látkách s nízkým protonovým číslem Z .

Pokud se foton záření γ srazí s elektronem volným nebo jen slabě vázaným, **předá mu jen část své energie**, pružně se od něj odrazí a **bude pokračovat ve svém pohybu ve změněném směru a s nižší energií**.



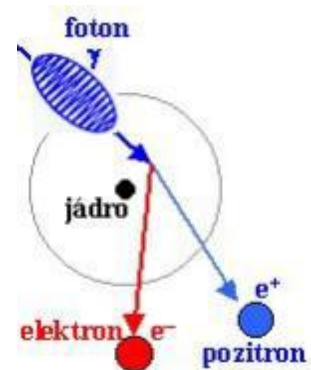
Obrázek 10 - Comptonův rozptyl, zdroj: Vojtěch Ullmann

- **Tvorba elektron-pozitronových párů**

Tvorba párů se nejvíce uplatňuje u záření γ o energii nad 2 MeV.

Pokud do látky vletí foton záření γ o dostatečně velké energii, pak **při svém průletu kolem atomového jádra se foton γ může přeměnit na dvojici částic elektron+pozitron.**

Z této dvojice zůstává v látce jako trvalá částice jen elektron. Pozitron po zabrzdění anihiluje s některým z dalších elektronů za vzniku dvou fotonů záření γ o energii 511 keV. [2, 5]



Obrázek 11 - Tvorba elektron-pozitronových párů, zdroj: Vojtěch Ullmann

Interakce neutronů

Rozptyly neutronů na jádře

- Pružný rozptyl
- Nepružný rozptyl

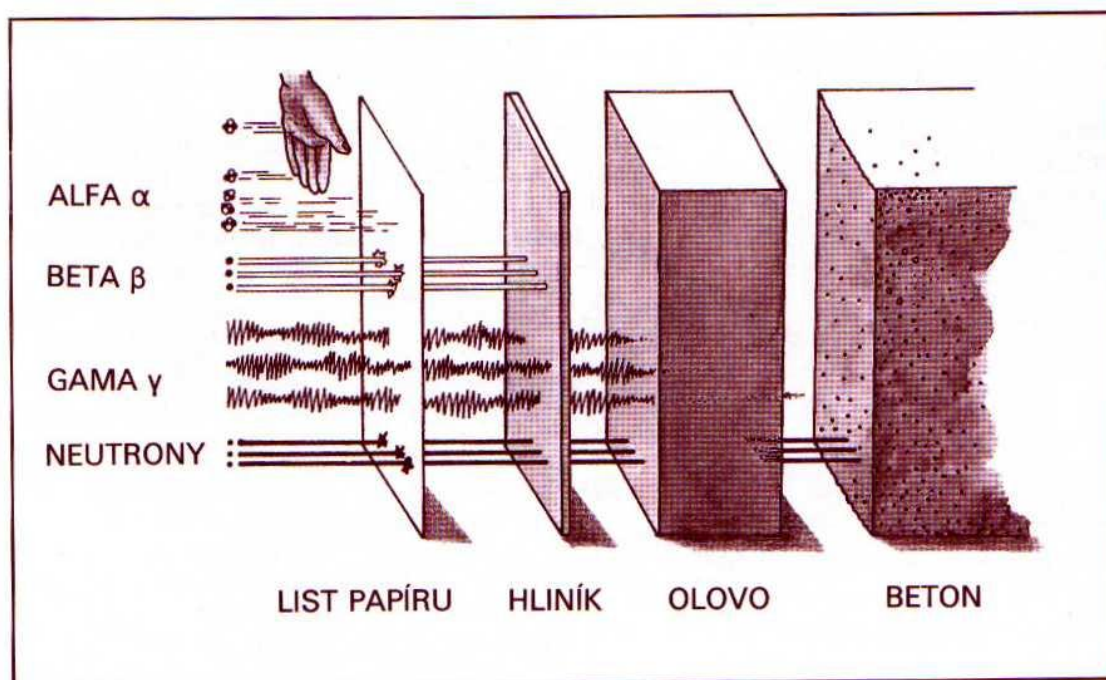
Záchyty neutronů jádrem

- Radiační záchyt
- Neutronové jaderné reakce s emisí nabitých částic
- Štěpení jader

1.4 Průchod ionizujícího záření hmotou

Ionizující záření ztrácí při průchodu absorbující látkou svou energii, způsob ztráty energie závisí na druhu ionizujícího záření a na fyzikálních vlastnostech absorbující látky.

Pro představu je zde uvedený obrázek 12, který zobrazuje materiály, jakými lze odstínit jednotlivé záření.



Obrázek 12 - Průchod ionizujícího záření hmotou, zdroj: neznámý

1.5 Zdroje ionizujícího záření

Zdrojů ionizujícího záření lze najít mnoho. Můžeme je však rozdělit do dvou základních skupin:

- **Přírodní zdroje ionizujícího záření**

Mezi přírodní zdroje patří především kosmické záření, dále pak přírodní radionuklidy vyskytující se v přírodě, např. ^{40}K , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{238}U . Z toho radon má největší podíl na průměrném ozáření osob žijících v ČR a to zhruba 40 % celkového ozáření.

- **Umělé zdroje ionizujícího záření**

Jsou to např. rentgenky, urychlovače, umělé radionuklidy, jaderné reaktory aj. [10]

Klasifikaci zdrojů ionizujícího záření definuje Vyhláška 307/2002 ve znění platných předpisů.

1.6 Veličiny a jednotky ionizujícího záření

1.6.1 Veličiny charakterizující zdroje ionizujícího záření

Aktivita: **A**

$$A = \frac{dN}{dt} \quad [\text{Bq}]$$

kde **dN** je změna počtu částic (počet radioaktivních přeměn),
dt je časový interval;

Používá se také aktivita vztažená na jednotky objemu, hmotnosti, času nebo plochy.

1.6.2 Veličiny charakterizující pole záření v prostoru

Nejobecnější veličinou je **tok částic**

$$N = \frac{dN}{dt}$$

kde **dN** je přírůstek počtu částic za jednotku času **dt**.

Fluence: **Φ**

Definuje rozložení pole záření, neboli počet částic, které nám prošly daným místem v prostoru

$$\Phi = \frac{dN}{da}$$

kde **dN** je počet částic na jednotku plochy **da**.

Změna fluence **d Φ** za jednotku času **dt** nebo tok částic **dn** na jednotku plochy **da** se nazývá

příkon fluence: **φ**

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dt}$$

nebo

hustota toku částic: **φ**

$$\varphi = \frac{dn}{da}$$

[11]

1.6.3 Veličiny charakterizující působení záření na látku

Dávka: D

Dávka je definována pro všechny druhy záření – přímo i nepřímo ionizující záření. Je definována jako podíl střední sdělené energie danému objektu a hmotnosti tohoto objektu.

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm} \quad [\text{Gy}]$$

kde $d\bar{\varepsilon}$ je střední sdělená energie,

dm je hmotnost objektu;

Dávkový příkon: D

Přírůstek dávky za jednotku času.

$$D = \frac{dD}{dt} \quad [\text{Gy/s}]$$

Kerma: K

Kerma je definována pouze pro nepřímo ionizující záření (fotony, neutrony), a to jako podíl součtu počátečních kinetických energií částic vzniklých v jednotce objemu působením nepřímo ionizujícího záření a hmotnosti tohoto objektu.

$$K = \frac{dE_k}{dm} \quad [\text{Gy}]$$

kde dE_k je kinetická energie částic vzniklých nepřímo ionizujícím zářením,

dm je hmotnost objektu;

Kermový příkon: K

Přírůstek kermy za jednotku času.

$$K = \frac{dK}{dt} \quad [\text{Gy/s}]$$

Expozice: X

Expozice je definována pouze pro nepřímo ionizující záření (pro fotony ve vzduchu), a to jako podíl součtu elektrických nábojů částic jednoho znaménka, které vznikly v jednotce objemu působením nepřímo ionizujícího záření a zároveň v jednotce zanikly, a hmotnosti toho objektu.

$$X = \frac{|dQ|}{dm} \quad [\text{C/kg}]$$

Expoziční příkon: X

Přírůstek expozice za jednotu času.

$$X = \frac{dX}{dt} \quad [\text{C/kg} \cdot \text{s}]$$

[11]

1.7 Scintilační detektory ionizujícího záření

Detekce ionizujícího záření pomocí scintilačního světla produkovaného v určitých materiálech je jednou z nejstarších metod pro záznam. Scintilační proces zůstává jednou z nejvíce užitečných metod dostupných pro detekci a spektroskopii širokého sortimentu záření.

Scintilátory mohou být:

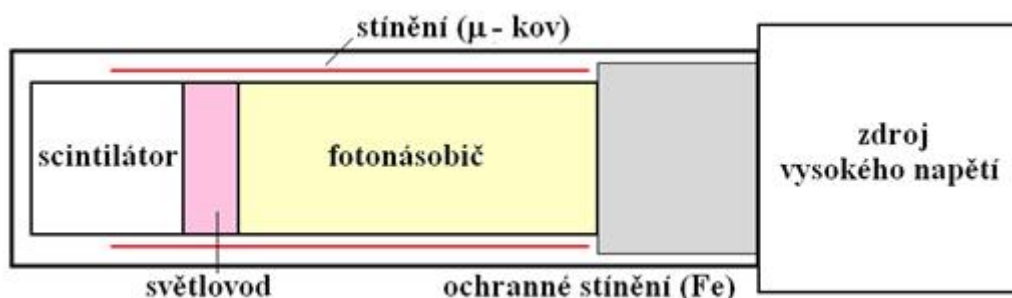
- Organické
- Anorganické

Ideální scintilační materiál by měl mít následující vlastnosti:

1. Měl by přeměňovat kinetickou energii nabitých částic na detekovatelné světlo s vysokou scintilační účinností.
2. Tato přeměna by měla být lineární, světelný přínos by měl být úměrný odevzdané energii v co nejširším rozsahu, jak je možné.
3. Materiál by měl být transparentní k vlnové délce vlastního vyzařování pro dobrý světelný sběr.
4. Doba rozpadu vyvolané luminiscence by měla být tak krátká, aby mohly být rychle generovány signálové impulsy.
5. Materiál by měl být dobré optické kvality a vyráběný ve velikostech dostatečně velkých, aby měl praktické využití.
6. Jeho index lomu by měl být v blízkosti skla, aby umožnil účinné spojení scintilačního světla s fotonásobičem nebo jiným světelným snímačem. [12]

Žádný materiál současně nesplňuje všechna tato kritéria, a volba konkrétního scintilátoru je vždy kompromis mezi nimi, a dalšími faktory. Nejvíce široce používané scintilátory zahrnují anorganické alkalické halogenidové krystaly, z nichž jodid sodný je nejoblíbenější na organické bázi kapalin a plastů. Anorganické látky mají nejlepší světelný výkon a linearitu, ale s několika výjimkami jsou relativně nízké jejich doby

odezvy. Organické scintilátory jsou obecně rychlejší, ale mají menší výtěžek světla. Zamýšlené použití má také významný vliv na volbu scintilátoru. [12]



Obrázek 13 - Scintilační detektor, zdroj: fyzika.jreichl.com

Ionizující záření vniká do scintilátoru (scintilačního krystalu), kde se absorbuje a část jeho energie se přemění na záblesk neboli scintilaci viditelného světla. Vzniklá scintilace je tvořena většinou několika stovkami sekundárních fotonů, v závislosti na absorbované energii primárního detekovaného kvanta. Ke scintilátoru je opticky přiložen fotonásobič – speciální elektronka, která s vysokou citlivostí převádí scintilační světlo na elektrické impulsy. Detektor s fotonásobičem jsou umístěny v světlotěsném krytu, aby nedocházelo ke vstupu rušivého okolního světla. [14, 15]

Detektor je zařízení, které po interakci záření v citlivém objemu, vydá měřitelný signál/odezvu (např. elektrickou, optickou, ...).

Spektrometr – detektor, jehož odezva je úměrná energii záření.

Na detektor navazuje řetězec pro zpracování signálu a zdroj napětí – **trasa**.

Výstupem z detektoru je četnost impulsů n :

$$n = \frac{N}{t} = \eta * Y * A$$

kde N – počet impulsů,

t – doba měření,

Y – výtěžek (poměr emitovaných částic k počtu přeměn),

A – aktivita radionuklidu,

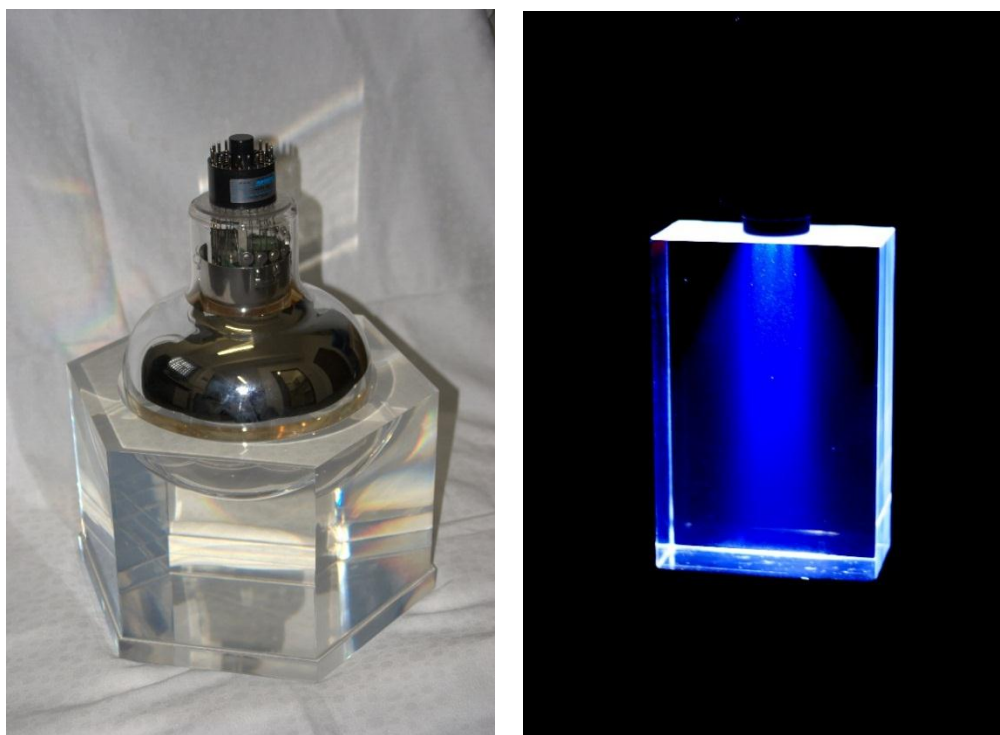
η – účinnost detekce (je funkcí geometrie měření, absorpce mezi radionuklidem a detektorem, pravděpodobnosti žádané interakce v detektoru a zapojení detektoru – mrtvé doby);

Mrtvá doba – čas, kdy detektor a jeho trasa není schopna zpracovávat další signál (protože zpracovává předchozí).

1.7.1 Plastový detektor

Jedná se o organický scintilační detektor. Plastové detektory mají velmi široké možnosti uplatnění. V tenkých vrstvách detekují protony, elektrony a beta částice s malým pozadím. Ve větším objemu jsou vhodné pro měření gama záření. Vedle měření v laboratořích jsou plastové detektory vhodné i na měření v terénu, při výzkumu kosmického záření, v radiační ochraně životního prostředí atd.

Plastové scintilátory jsou charakteristické krátkou dobou dosvitu a vysokou odolností proti velké intenzitě dávky. Výhodou plastových scintilátorů je jejich dobrá propustnost světla v širokém spektru fotonů. Ve své podstatě jsou plastové scintilátory tuhé roztoky aktivátorů v polymeru. Vzhledem k lehkosti, jak mohou být tvarovány a vyráběny, se plasty staly velmi užitečnou formou scintilačních detektorů. Jsou dostupné v různých velikostech deskových, válcových a fóliových typů. Vzhledem k tomu, že materiál je relativně levný, plasty jsou často jedinou praktickou volbou, jsou-li zapotřebí velkoobjemové pevné scintilátory. [12, 15]



Obrázek 14 - Vyleštěné plastové scintilátory, zdroj: Václav Holeček

1.7.2 Detektor jodidu sodného aktivovaný thaliem

Detektor jodidu sodného aktivovaný thaliem označovaný jako **NaI(Tl)** je nejběžnější scintilační detektor. Jedná se o anorganický scintilační detektor. Používá se především k měření γ záření. Vedle jejich primárního použití pro detekci a spektrometrii gama záření se tyto scintilátory také používají pro detekci měkkého rentgenového záření. Díky velkému světelnému výtěžku, vysoké detekční účinnosti a dobrému energetickému rozložení jsou tyto scintilátory dále používány v biologii, lékařských aplikacích, geologii, v průmyslových aplikacích, monitorování životního prostředí atd.

Jodid sodný je silně hygroskopický, proto musí být krystaly hermeticky uzavřeny – zapouzdřeny. Z přední strany bývají uzavřeny skleněným okénkem, které zajišťuje výstup luminiscenčního světla do fotonásobiče.

Detektory NaI(Tl) větších rozměrů bývají instalovány v tzv. celotělových počítačích, které se používají k detekci radioaktivních nuklidů v lidském těle. [15, 16]



Obrázek 15 - Zapouzdřené NaI(Tl) scintilátory, zdroj: Václav Holeček

2. Cíle práce a hypotézy

Cílem mé práce bylo porovnání dvou typů scintilačních detektorů, které jsou v dnešní době hojně používány. Předmětem práce je plastový scintilační detektor a detektor NaI(Tl). Zpracovat dostupné informace o obou detektorech a ověřit je pomocí měření. Porovnat užité vlastnosti těchto detektorů, které se používají v dozimetrii, v průmyslu, ve zdravotnictví, aj. Porovnat účinnost, rozlišení, energetické závislosti, aj. pomocí měření s bodovými zářiči.

3. Metodika

Metodikou mé bakalářské práce bylo v první řadě zpracovat informace o daných detektorech z dostupné odborné literatury, internetu apod., abych mohl následně provést reálná měření a zjištěné informace potvrdit, vyvrátit či doplnit.

K měření jsem použil plastový scintilační detektor a detektor NaI(Tl) o stejné velikosti a to 3x3 palce, aby výsledky byly lépe srovnatelné.

Před prováděným měřením jsem nastavil optimální vysoké napětí a zesílení pro každý detektor, aby výsledná spektra byla dobře porovnatelná.

Bodové radionuklidové zdroje jsem použil ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{137}Cs a ^{60}Co (viz. certifikáty v příloze) jsou to takové zářiče, které neemitují záření o mnoha energiích, každý však s rozdílnou energií v různé části spektra, aby výsledné spektrum bylo přehledné. Veškerá provedená měření byla měřena po dobu 900 sekund (Live Time⁴) v olověném stínění o tloušťce 5cm, aby nedocházelo k rušení přírodním zářením a pozadí tak bylo minimální.

Po měření jsem provedl energetickou a účinnostní kalibraci, abych mohl spektrum analyzovat, vyhodnotit a porovnat dané detektory.

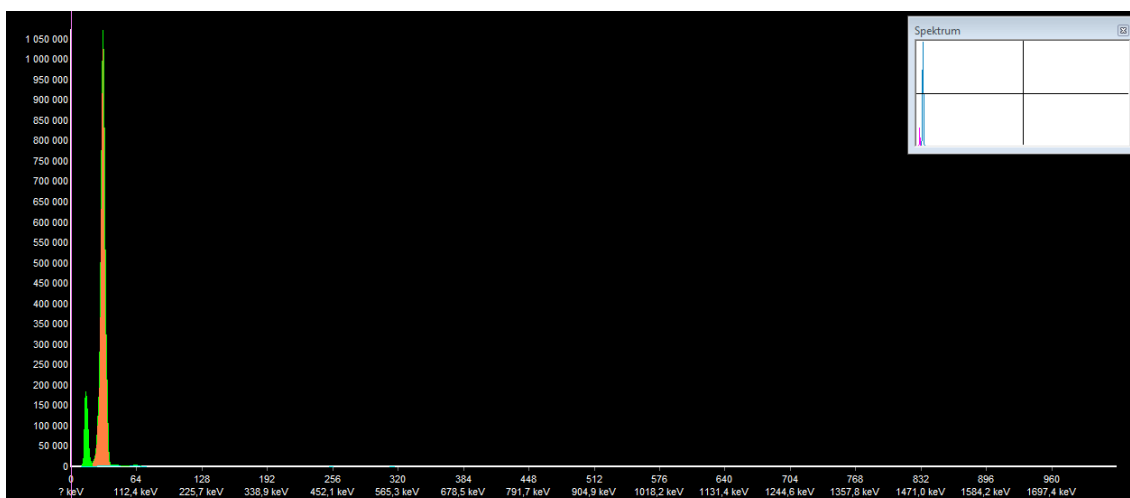
⁴ Live Time – čas měření s odečtením mrtvé doby

4. Výsledky

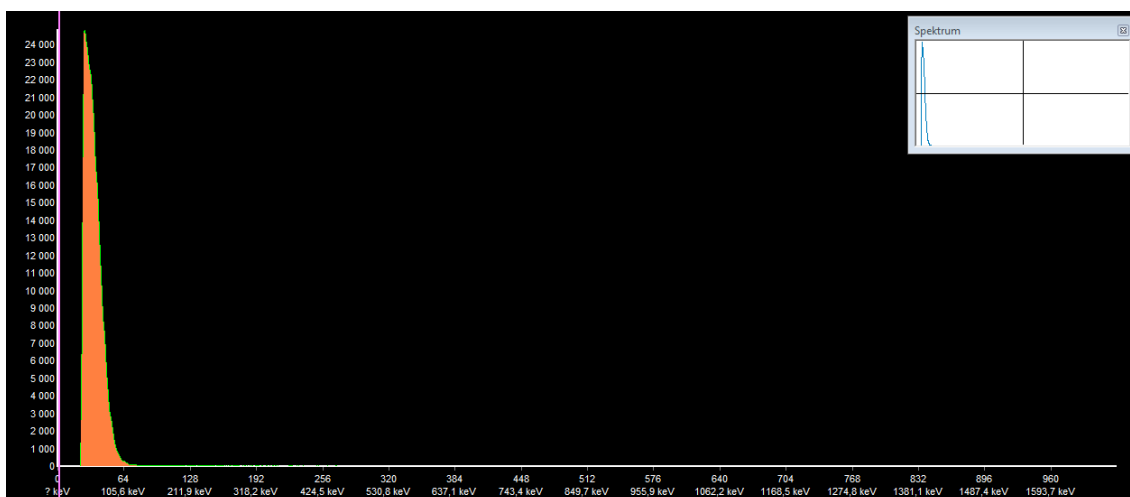
V Tabulka 1 jsou použité radionuklidové zdroje, kde je uvedena jejich aktivita, energie záření a intenzita dané energie.

Tabulka 1 - Přehled použitých radionuklidů a jejich fyzikální vlastnosti

Radionuklid	Poločas rozpadu [roky]	Energie [keV]	Intenzita [%]	Aktivita ke dni měření [kBq]
²⁴¹Am	432,2	59,54	36	477,7
¹³³Ba	10,51	81	32,90	37,79
		302,85	18,34	
		356,01	62,05	
¹³⁷Cs	30,07	661,6	85,21	345,18
⁶⁰Co	5,27	1173,24	99,90	217,72
		1332,5	99,98	

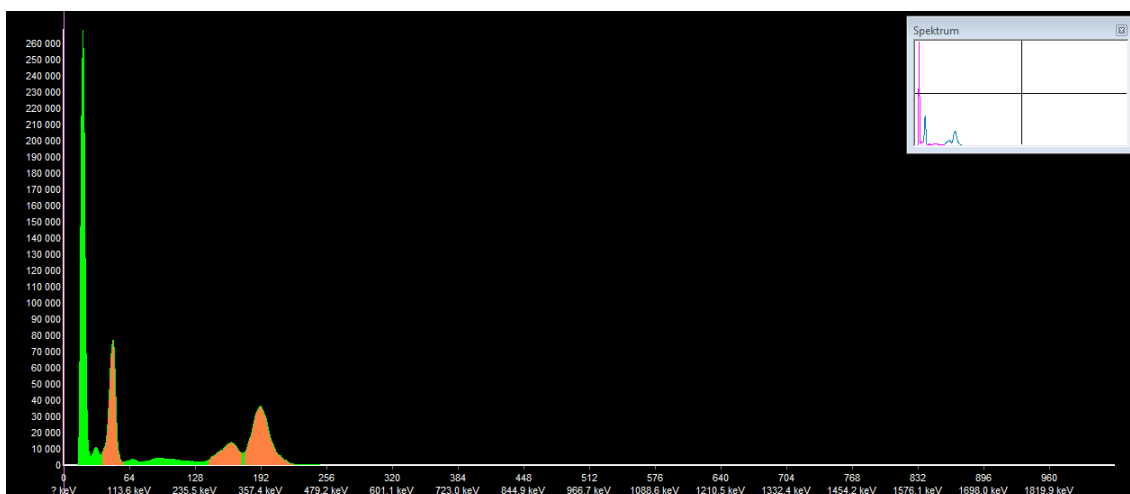


Obrázek 16 - Spektrum z NaI(Tl) detektoru s radionuklidovým zdrojem ^{241}Am

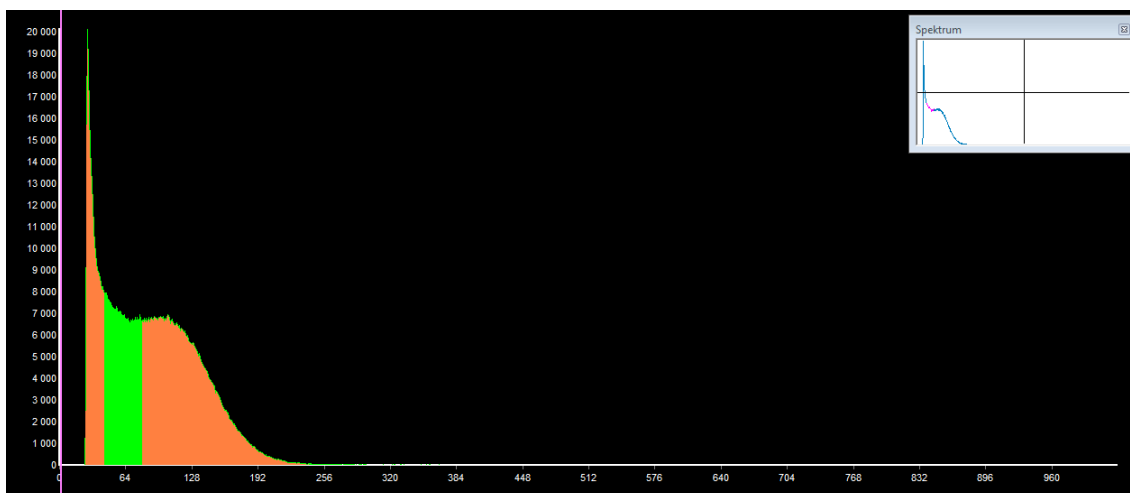


Obrázek 17 - Spektrum z plastového detektoru s radionuklidovým zdrojem ^{241}Am

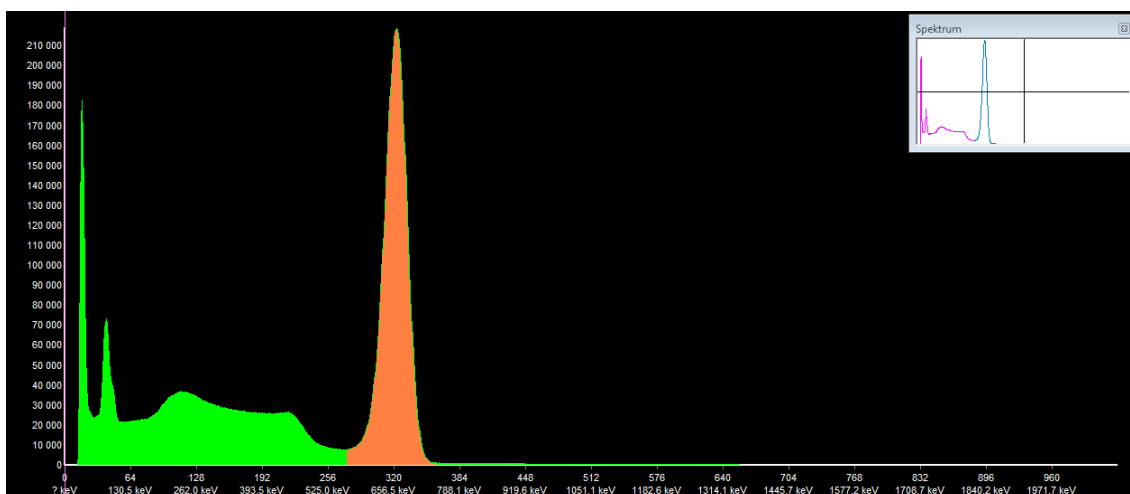
Na dvou výše uvedených naměřených spektrech (viz. obrázek 16, 17) nevidíme Comptonův rozptyl od ^{241}Am , jelikož je mimo měřitelný rozsah použitých detektorů. Rozdíl v rozlišení není v tomto případě tak velký, jako na dále uvedených spektrech při měření ostatních radionuklidů.



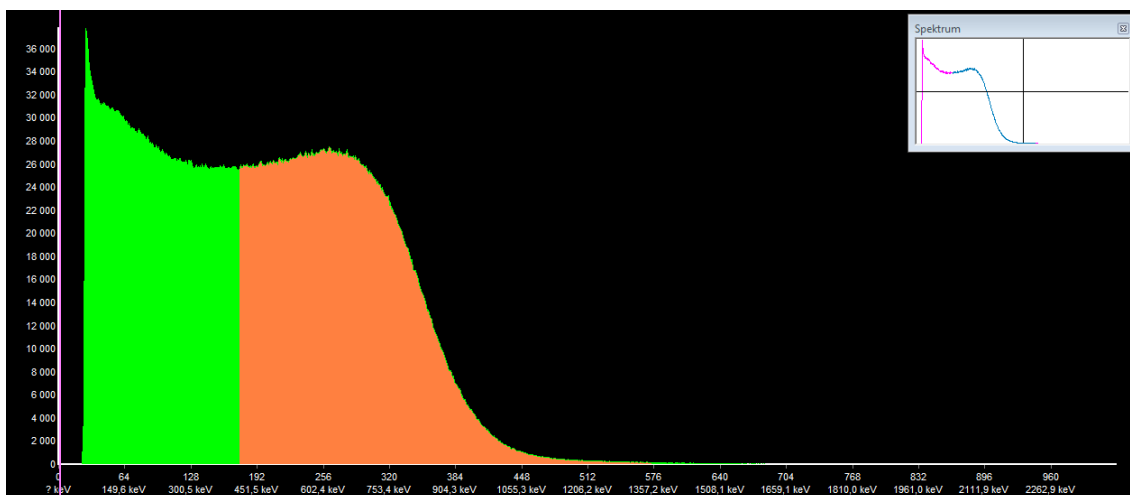
Obrázek 18 - Spektrum z NaI(Tl) detektoru s radionuklidovým zdrojem ^{133}Ba



Obrázek 19 - Spektrum z plastového detektoru s radionuklidovým zdrojem ^{133}Ba

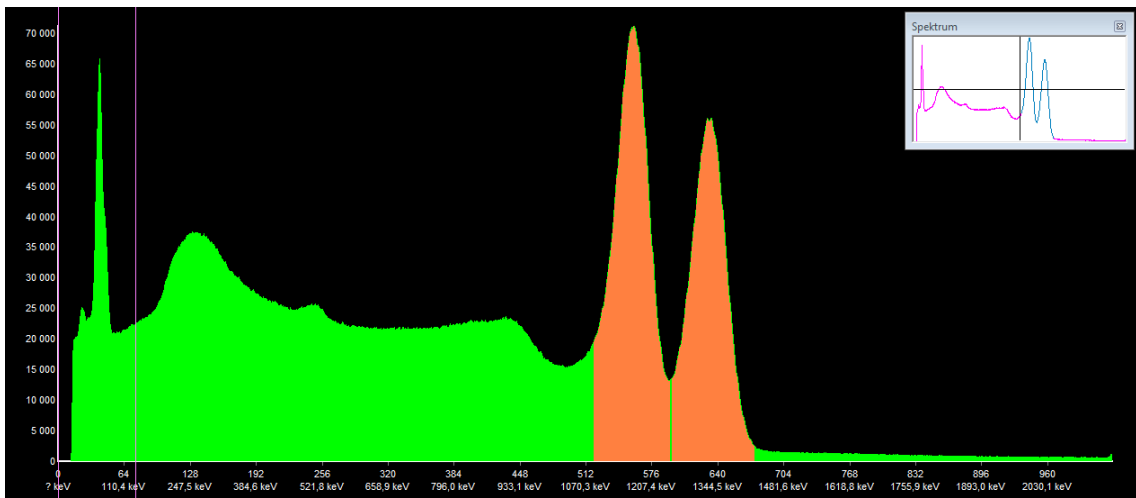


Obrázek 20 - Spektrum z NaI(Tl) detektoru s radionuklidovým zdrojem ^{137}Cs

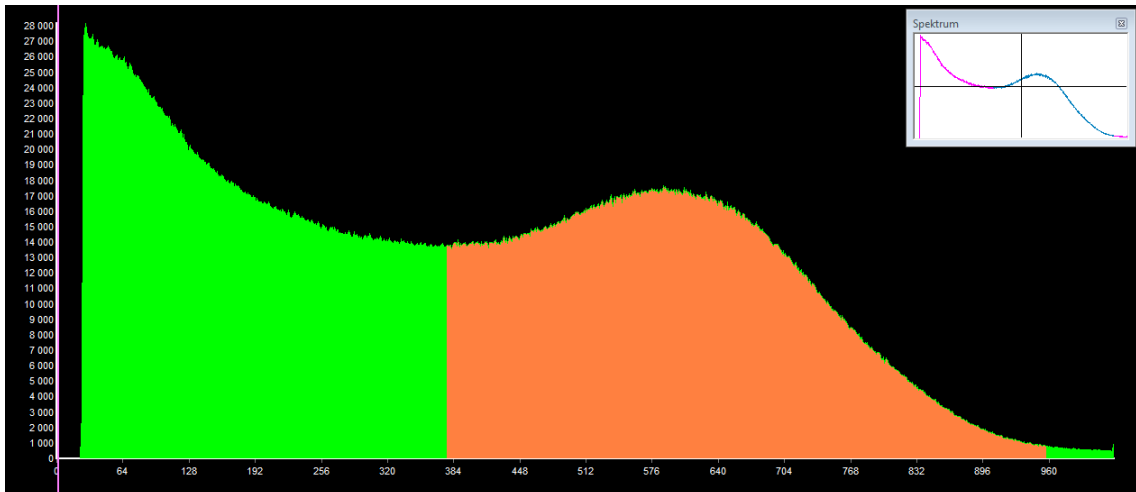


Obrázek 21 - Spektrum z plastového detektoru s radionuklidovým zdrojem ^{137}Cs

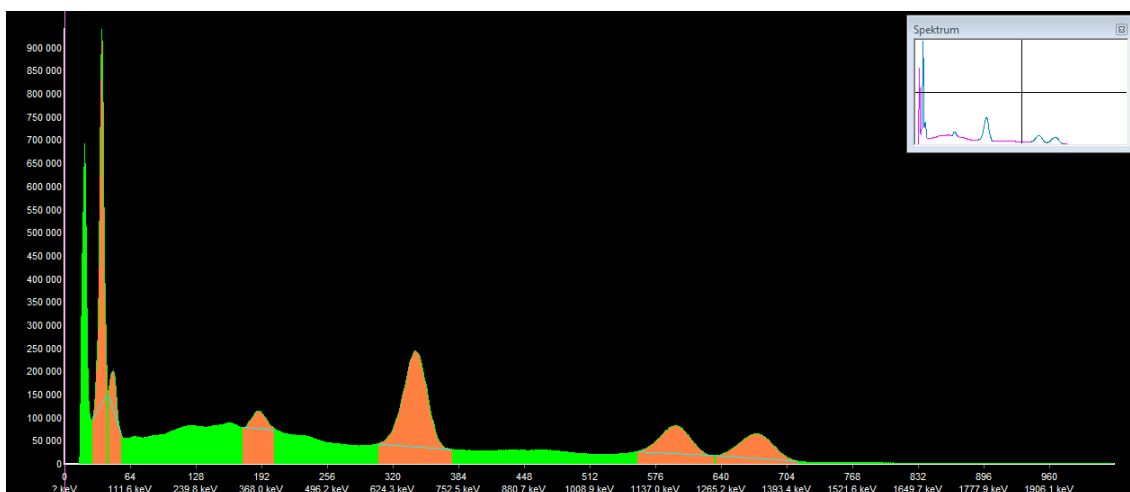
Na spektru (viz. obrázek 20) z NaI(Tl) detektoru můžeme opět vidět pík s poměrně dobrým rozlišením, podle kterého jsme schopni určit, že se jedná o radionuklid ^{137}Cs . Na spektru z plastového detektoru (viz. obrázek 21) je těžko identifikovatelný vrchol píku, nejsme schopni stanovit s určitou přesností, kde začíná pík a kde končí Comptonův rozptyl. Tudíž nejsme schopni v případě neznámého vzorku určit, o jaký radionuklid se jedná, ale můžeme říci pouze to, že se jedná o střední energie.



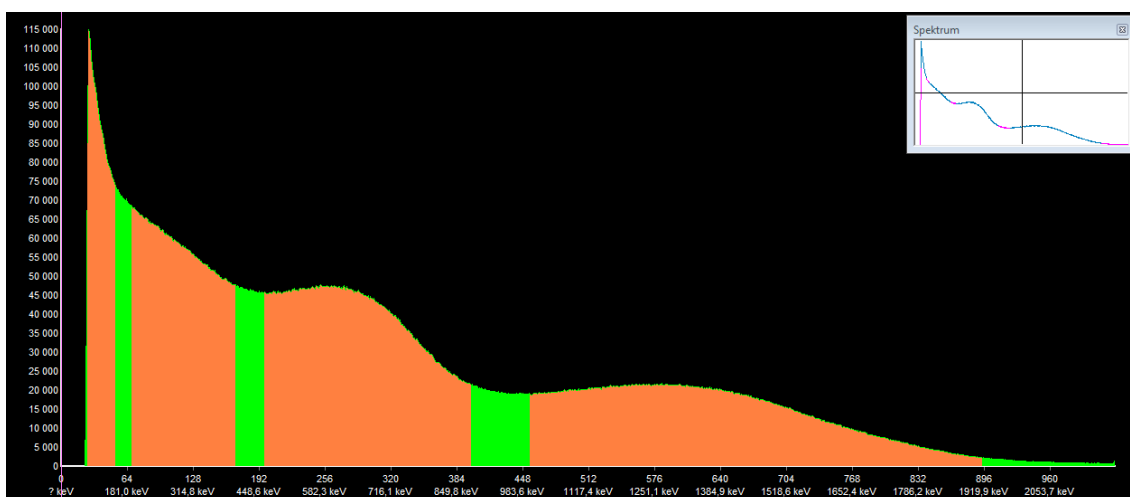
Obrázek 22 - Spektrum z NaI(Tl) detektoru s radionuklidovým zdrojem ^{60}Co



Obrázek 23 - Spektrum z plastového detektoru s radionuklidovým zdrojem ^{60}Co



Obrázek 24 - Spektrum z NaI(Tl) detektoru s radionuklidovými zdroji ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{137}Cs a ^{60}Co



Obrázek 25 - Spektrum z plastového detektoru s radionuklidovými zdroji ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{137}Cs a ^{60}Co

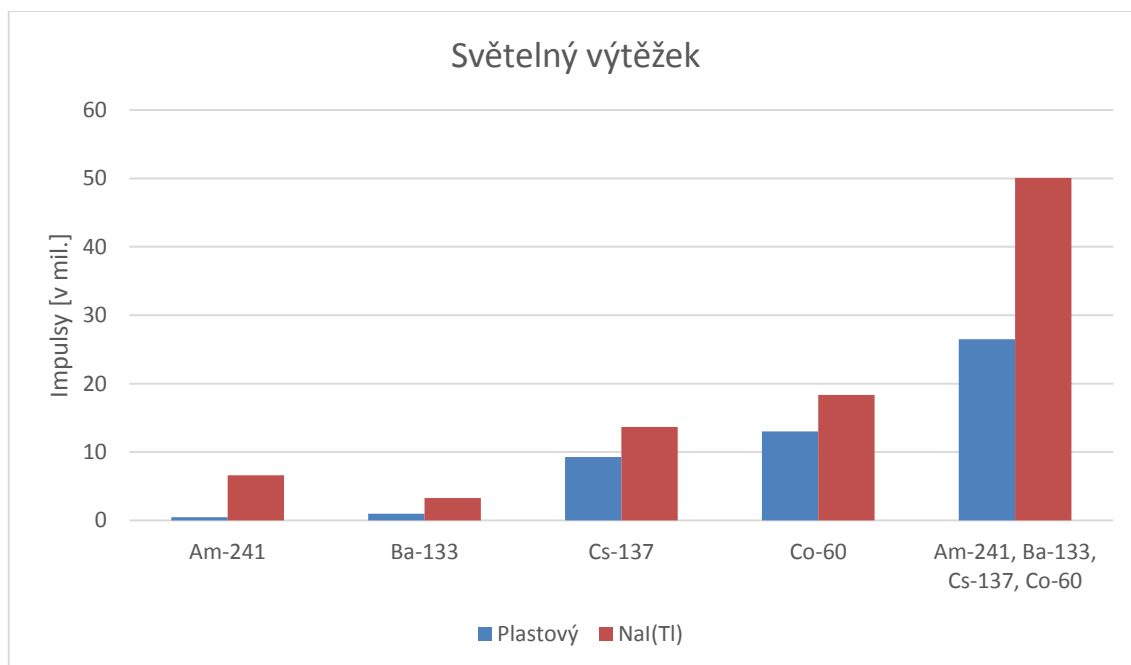
U spektra z NaI(Tl) vidíme, že i v případě smíšeného zdroje jsme schopni s poměrně vysokou pravděpodobností určit jednotlivé radionuklidy. Na spektru z plastového detektoru je vidět zřetelně horší rozlišení oproti detektoru NaI(Tl).

Tabulka 2 – Světelný výtěžek

Použitý radionuklid	Plastový detektor [impulsy]	NaI(Tl) detektor [impulsy]
^{241}Am	453 158	6 601 202
^{133}Ba	985 290	3 293 633
^{137}Cs	9 245 256	13 654 159
^{60}Co	12 983 438	18 330 204
^{241}Am , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{60}Co	26 488 995	50 088 174

V tabulce 2 jsou uvedeny počty impulsů z jednotlivých měření s daným radionuklidem, jedná se však vždy o celkový počet impulsů v celém rozsahu měřeného spektra.

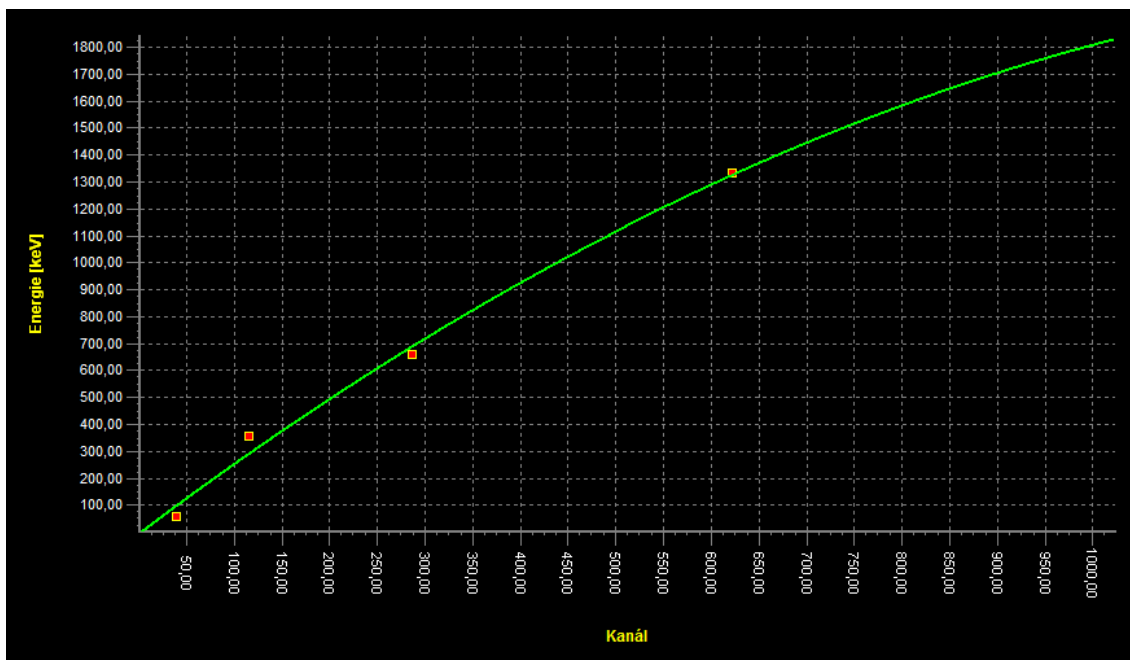
Niže jsou zobrazeny tyto hodnoty v grafu 1 pro lepší přehlednost a porovnatelnost. Z grafu 1 vyplývá, že detektor NaI(Tl) má znatelně lepší výtěžek světla oproti plastovému detektoru.



Graf 1 – Porovnání světelného výtěžku

5. Diskuze

Výrobce obou použitých detektorů je firma ENVINET a.s., analyzátor jsem použil od firmy ORTEC a to tzv. „digiBASE“ (viz. příloha), k měření a vyhodnocení spekter pak software GAMWIN od firmy ENVINET a.s.



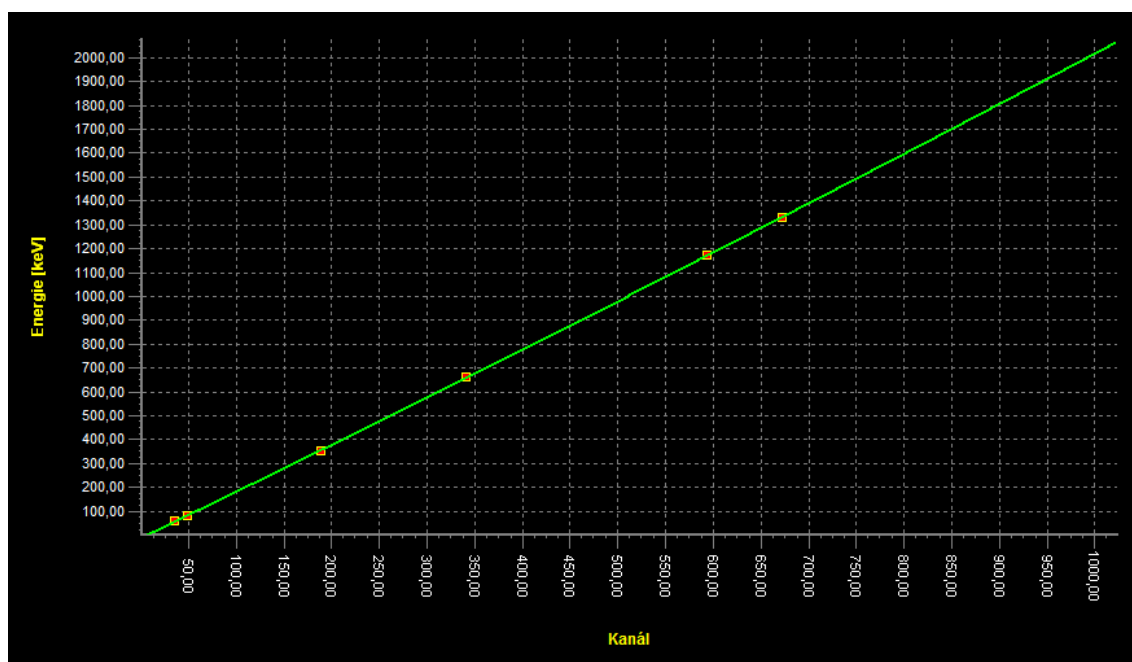
Graf 2 – Plastový detektor – křivka energetické kalibrace

Na grafu 2 můžeme vidět, že křivka energetické kalibrace plastového detektoru není plně lineární a některé kalibrační body leží mimo tuto křivku, což je způsobeno špatným rozlišením těchto detektorů a nemožností definovat přesně daný pik k určité energii záření. Špatné rozlišení má za následek také to, že nejsme schopni určit více než čtyři píky neboli mít více než čtyři kalibrační body.

Plastové scintilační detektory mají znatelně horší rozlišení oproti detektorům NaI(Tl), proto jsou vhodné a používají se především pouze k zjišťování, zda měřený materiál je kontaminován či nikoliv. S plastovými scintilačními detektory nejsme schopni určit, o jaký radionuklid se jedná, jsme však schopni rozlišit nízké, střední a vysoké energie.

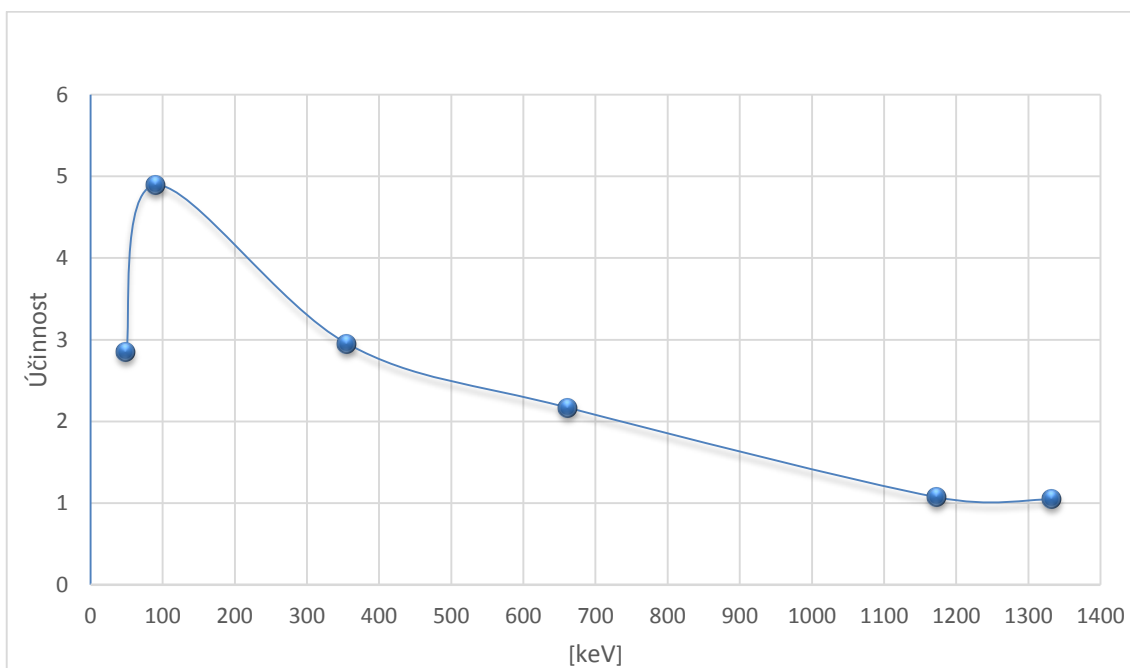
Vzhledem k horšímu rozlišení spektra v podstatě není možno provést účinnostní kalibraci a proto vypočítat účinnost detektoru, jelikož pro účinnostní kalibraci je nutné dostatečné množství píků v celém požadovaném rozsahu měření. Jak je možno vidět na uvedených spektrech, píky z plastového detektoru nejsou dostačující pro vytvoření kalibrační účinnostní křivky. Pro vytvoření křivky jsou nutné minimálně 3 body, abychom však získali rozumnou křivku, je jich zapotřebí více. U plastových detektorů se předpokládá účinnost v rozmezí 40 – 65 % podle vlnové délky scintilace.

Nicméně existují však specializované programy pro modelace (výpočet) účinnostních kalibrací (metodou „Monte Carlo“) pro různé typy detektorů o různých geometriích např. software Effmaker, Angle aj.



Graf 3 – NaI(Tl) detektor – křivka energetické kalibrace

U grafu 3 energetické kalibrace je vidět, že křivka detektoru NaI(Tl) je lineární a kalibrační body leží přímo na ní. Pokud budeme takto zkalibrovaným detektorem měřit neznámý vzorek, jsme schopni určit, o jaký nuklid se jedná, jelikož budeme poměrně přesně znát jeho energii. Každý radionuklid emituje ionizující záření o určité energii, jedné či více.



Graf 4 – NaI(Tl) detektor – křivka účinnostní kalibrace

Křivka účinnostní kalibrace detektoru NaI(Tl) je vyobrazena v grafu 4. Kde můžeme vidět, že je poměrně zdařilá, abychom získali lepší křivku, bylo by ideální mít ještě jeden kalibrační bod mezi druhým a třetím bodem a další kalibrační body ke konci křivky. Abychom tohoto dosáhli, bylo by zapotřebí dalších radionuklidů s emisí o těchto určitých energiích.

Pro detektor NaI(Tl) o velikosti 3x3 palce se předpokládá účinnost 100 % za ideálních podmínek, považuje se za standard mezi detektory, účinnost ostatních detektorů se porovnává právě s ním. Mnou naměřená účinnost použitého detektoru vyšla 70 %, což je zobrazeno na obrázku 26.

Live Time [s]	Čistá plocha peaku	En. tolerance [keV]	
900	163364,119444444	5	Výpočet
Aktivita CO-60 [Bq]	Aktivita CO-60 [Bq] (korigovaná)	Rel. účinnost [%]	
223600	216084,1	70,0	
Referenční datum	Začátek měření vzorku		
28.4.2014	1.8.2014		

Obrázek 26 - Výpočet relativní účinnosti detektoru

Díky svým vlastnostem bývají plastové detektory instalovány do portálových monitorů vozidel, vlaků aj., které se používají např. v kovošrotech a železárnách, kde se klade na tuto kontrolu v poslední době stále větší důraz. Slouží k zjištění, zda se nenachází v kovovém odpadu nějaký radioaktivní materiál, aby následně docházelo k vytváření „čisté“ oceli. Používají se také v celnících a na letištích v terminálech ke kontrole, aby nedocházelo k pašování radioaktivního materiálu. Dále jsou plastové scintilační detektory instalovány např. u mobilních dekontaminačních linek. V elektrárnách na vstupních a výstupních bránách.

V tenkých plastových fóliích se pak využívají také pro detekci beta záření, např. pro podlahové detektory nebo pro detektory měřící kontaminaci noh a rukou.

Detektory NaI(Tl) se používají k identifikaci zdrojů v elektrárnách při měření sudů s odpadem. V letecké spektrometrii, k detekci radionuklidů v potravinách např. veterinární ústavy. Pro zjišťování radiochemické čistoty radiofarmaka např. F-18. Studnové detektory se používají pro měření krve po radioterapeutickém výkonu. K měření koncentrací přírodních radionuklidů v geologii a geofyzice.

Detektory NaI(Tl) se běžně vyrábí pouze do velikosti 5x5 palce, výroba krystalů větších rozměrů je možná, nicméně je o dost náročnější a stává se pak ekonomicky nevýhodnou.

6. Závěr

Proč vlastně používat plastové scintilační detektory, když detektory NaI(Tl) mají lepší světelný výtěžek? Ačkoliv mají spektrometrické vlastnosti horší, patří mezi často používané typy detektorů a to hned z několika důvodů. Jedním z hlavních důvodů je, že jsou několika násobně levnější. Dají se vyrobít v podstatě v jakémkoliv tvaru (studnové typy, příčně vrtané plasty, kuželovité plasty apod.), především pak ve velkých rozměrech (např. 1000x100x50 mm) a i přesto jsou stále ekonomicky přijatelné. Slouží především k zjišťování, zda měřený objekt vyzařuje ionizující záření či nikoliv.

Zatímco plastové scintilační detektory se používají k rychlé selekci, detektory NaI(Tl) se používají při dohledávání a k následné identifikaci radionuklidů.

Detektory NaI(Tl) jsou používány ve velké míře, především pro svoje poměrně vysoké rozlišení za přijatelnou cenu a navíc bez nutnosti chlazení.

Hypotéza byla potvrzena, porovnávané detektory mají odlišnou účinnost, rozlišení, světelný výtěžek a jiné dozimetrické vlastnosti.

7. Seznam použitých zdrojů

- [1] Principy a praxe radiační ochrany. Praha, 2000, 619 s. ISBN 80-238-3703-6.
- [2] Radiační ochrana pro vybrané pracovníky velmi významných zdrojů, Ing. Bohumil Koláček (Učební texty pro přípravu personálu JE).
- [3] Úvod do radiační ochrany – pro kurzy alfa, gama a delta kromě specializace radiační ochrana v modulu 2, Ing. Bohumil Koláček (Učební texty pro přípravu personálu JE).
- [4] Základy radiační ochrany, Ing. Bohumil Koláček a kolektiv (Učební texty pro přípravu personálu JE).
- [5] Radiační ochrana pro vybrané pracovníky služeb významných z hlediska radiační ochrany – služby vykonávané v kontrolovaných pásmech pracovišť s otevřenými zářiči, Ing. Dana Brounková ((Učební texty pro přípravu personálu JE).
- [6] ČEZ. Výzkum a vzdělávání: Pro pedagogy - Klub Svět energie [online]. [cit. 2014-03-16]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyzkum-a-vzdelavani/pro-pedagogy/klub-svet-energie/clenove-klubu.html>
- [7] ULLMANN, Vojtěch. AstroNuklFyzika: Jaderná a radiační fyzika, nukleární medicína: 1.2. Radioaktivita. Ullmann V.: "AstroNuklFyzika" [online]. [cit. 2014-03-16]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika2.htm>
- [8] Základy radiační ochrany, Ing. Bohumil Koláček a kolektiv (Učební texty pro přípravu personálu JE).
- [9] ŠVEC, Jiří. Radioaktivita a ionizující záření: doplňující učební text pro předměty Bakalářská fyzika, Aplikovaná fyzika, Ochrana před zářením. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství. 36 s. ISBN 80-866-3462-0.
- [10] KUNA, Pavel a Leoš NAVRÁTIL. Klinická radiobiologie. 1. vyd. Praha: Manus, 2005, 222 s. ISBN 80-865-7109-2.
- [11] SINGER, Jan. Dozimetrie ionizujícího záření. 1. vyd. V Českých Budějovicích: Jihočeská univerzita, Zdravotně sociální fakulta, 2005, 67 s. ISBN 80-704-0752-2.

- [12] KNOLL, Glenn F. 3rd ed. Michigan: John Wiley, 2000, xiv, 802 s. ISBN 04-710-7338-5.
- [13] Fyzika: Fyzika mikrosvěta: Fyzika částic: Detektory částic. Multimediální Encyklopedie Fyziky [online]. 2006 [cit. 2014-07-08]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/854-scintilacni-detektory>
- [14] ULLMANN, Vojtěch. AstroNuklFyzika: Jaderná a radiační fyzika: 2.4. Scintilační detektory. Ullmann V.: "AstroNuklFyzika" [online]. [cit. 2014-07-08]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm#4>
- [15] ENVINET, Katalog detektorů – Divize technologie detektorů.
- [16] HÁLA, Jiří. Radioaktivita ionizující záření, jaderná energie. 1. vyd. Brno: Konvoj, 1998, 310 s. ISBN 80-856-1556-8.
- [17] SINGER, Jan a HEŘMANSKÁ. Principy radiační ochrany. 1. vyd. České Budějovice: Jihočeská univerzita, Zdravotně sociální fakulta, 111 s. ISBN 80-704-0708-5.
- [18] JINDŘIŠKA HEŘMANSKÁ, Jan Singer. Klinická dozimetrie. 1. vyd. V Českých Budějovicích: Jihočeská univerzita, Zdravotně sociální fakulta, 2005. ISBN 978-807-0407-592.
- [19] KNOLL, Glenn F. Radiation detection and measurement. 2nd ed. New York: Wiley, c1989, xix, 754 p. ISBN 04-718-1504-7.
- [20] TSOULFANIDIS, Nicholas. Measurement and detection of radiation. 2nd ed. Washington, DC: Taylor, c1995, xxii, 614 p. ISBN 15-603-2317-5.
- [21] NAVRÁTIL L., ROSINA J. a kolektiv, Medicínská biofyzika. 1.vyd., GRADA Publishing, a.s., 2005. 524 s. ISBN 80-247-1152-4.
- [22] HRAZDIRA I., MORNSTEIN V., Lékařská biofyzika a přístrojová technika. Neptun, 2001, dotisk 2004. 379 s. ISBN 80-902896-1-4.
- [23] BLAŽEK O. a kolektiv, Radiologie a nukleární medicína. 1.vyd., Avicemum / Zdravotnické nakladatelství, Praha, 1989. 424 s. ISBN 80-060-89.
- [24] Encyklopedie fyziky.; [online], Poslední revize – neuvedeno [cit. 2014-07-08], Dostupné z URL: <http://fyzika.jreichl.com/>

- [25] Zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (Atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů, v platném znění.
- [26] NAVRÁTIL, Oldřich. Jaderná chemie. 1. vyd. Přeložil Jiří Příhoda. Praha: Academia, 1985, 301 s.
- [27] JOSEF GERNDT, Petr Průša. Detektory ionizujícího záření. 2., přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 80-010-4710-5.
- [28] KLEINKNECHT, K. Detectors for particle radiation. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 1998, x, 246 p. ISBN 05-216-4854-8.
- [29] IAEA (2003): Guidelines for radioelement mapping using gamma-ray spectrometry data. IAEA-TECDOC-1363, IAEA, Vienna.
- [30] AHMED, Syed Naeem. Physics and engineering of radiation detection. 1st ed. London: Academic Press, 2007, xxiv, 764 p. ISBN Physics and Engineering of Radiation Detection.

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Graf radioaktivního rozpadu, zdroj: fyzika.jreichl.com	12
Obrázek 2 - Základní schéma radioaktivity α , zdroj: Vojtěch Ullmann	13
Obrázek 3 - Základní schéma radioaktivity β^- , zdroj: Vojtěch Ullmann	14
Obrázek 4 - Základní schéma radioaktivity β^+ , zdroj: Vojtěch Ullmann.....	15
Obrázek 5 - Základní schéma elektronového záchytu, zdroj: Vojtěch Ullmann	16
Obrázek 6 - Schéma přeměny jádra a excitace – radioaktivita γ , zdroj: Vojtěch Ullmann	17
Obrázek 7 - Schématické znázornění průchodu částic α látkou a mechanismus ionizace,	18
Obrázek 8 - Schématické znázornění průchodu částic β^- látkou a mechanismus ionizace,	18
Obrázek 9 - Fotoelektrický jev, zdroj: Vojtěch Ullmann.....	19
Obrázek 10 - Comptonův rozptyl, zdroj: Vojtěch Ullmann.....	19
Obrázek 11 - Tvorba elektron-pozitronových párů, zdroj: Vojtěch Ullmann.....	20
Obrázek 12 - Průchod ionizujícího záření hmotou, zdroj: neznámý.....	21
Obrázek 13 - Scintilační detektor, zdroj: fyzika.jreichl.com	27
Obrázek 14 - Vyleštěné plastové scintilátory, zdroj: Václav Holeček	29
Obrázek 15 - Zapouzdřené NaI(Tl) scintilátory, zdroj: Václav Holeček.....	30
Obrázek 16 - Spektrum z NaI(Tl) detektoru s radionuklidovým zdrojem ^{241}Am	34
Obrázek 17 - Spektrum z plastového detektoru s radionuklidovým zdrojem ^{241}Am	34
Obrázek 18 - Spektrum z NaI(Tl) detektoru s radionuklidovým zdrojem ^{133}Ba	35
Obrázek 19 - Spektrum z plastového detektoru s radionuklidovým zdrojem ^{133}Ba	35
Obrázek 20 - Spektrum z NaI(Tl) detektoru s radionuklidovým zdrojem ^{137}Cs	36
Obrázek 21 - Spektrum z plastového detektoru s radionuklidovým zdrojem ^{137}Cs	36
Obrázek 22 - Spektrum z NaI(Tl) detektoru s radionuklidovým zdrojem ^{60}Co	37
Obrázek 23 - Spektrum z plastového detektoru s radionuklidovým zdrojem ^{60}Co	37
Obrázek 24 - Spektrum z NaI(Tl) detektoru s radionuklidovými zdroji ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{137}Cs a ^{60}Co	38

Obrázek 25 - Spektrum z plastového detektoru s radionuklidovými zdroji ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{137}Cs a ^{60}Co	38
Obrázek 26 - Výpočet relativní účinnosti detektoru	43

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Přehled použitých radionuklidů a jejich fyzikální vlastnosti	33
Tabulka 2 – Světelný výtěžek	39

Seznam grafů

Graf 1 – Porovnání světelného výtěžku	39
Graf 2 – Plastový detektor – křivka energetické kalibrace	40
Graf 3 – NaI(Tl) detektor – křivka energetické kalibrace	41
Graf 4 – NaI(Tl) detektor – křivka účinnostní kalibrace	42

Přílohy



ČESKÝ METROLOGICKÝ INSTITUT
INSPEKTORÁT PRO IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ



Radiová 1, 102 00 Praha 10

CERTIFIKÁT

Číslo certifikátu: 9031 - OL - 234/14 Typ: EG 3 Výrobní číslo: 031011-1099061

Radionuklid: Am-241

Poločas: 157800 dnů

Aktivita: 477,9 kBq

Radionuklidové nečistoty: gama < 0,1 %

Referenční datum: 28.4.2014

Kombinovaná standardní nejistota: 0,3 %

Popis:

Odvážená část etalonového roztoku je nanesena na filtrační papír v polystyrenovém pouzdře. Po vysušení je pouzdro uzavřeno a zapečeno.

Měřicí metoda:

Aktivita etalonu je vypočtena z hmotnosti etalonového roztoku a kontroluje se relativním měřením toku fotonů gama. Měrná aktivita etalonového roztoku je stanovena vhodnou absolutní metodou.

Poznámka:

Pouzdro etalonu spolu s vrstvou reflektoru běžných NaI(Tl) scintilátorů dostatečně filtrují beta záření příslušného radionuklidu. Pouze u typů EG 1 a EG 3 s Ce-144 je mezi etalonem a scintilátorem třeba vložit min. 3,2 mm Al.

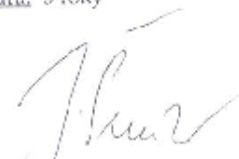
Klasifikace zdroje podle vyhlášky SÚJB 307/2002 Sb.: drobný

Datum vydání certifikátu: 10.4.2014

Platnost certifikátu: 3 roky

Zákazník:




Ing. Jiří Šurán, MBA
pověřen řízením IIZ


Kontrola: RNDr. Richard Blud'ovský, CSc.

Tel.: +420 266 020 497 fax: +420 266 020 466



ČESKÝ METROLOGICKÝ INSTITUT
INSPEKTORÁT PRO IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ



Radiová 1, 102 00 Praha 10

CERTIFIKÁT

Certifikát č. : 931 - OL - 278/02

Typ: EG 3

Výrobní č.: 10042001-354016

Technická norma: ČSN 404421

Radionuklid: 133Ba

Poločas: 3897 dnů

Aktivita: 83,82 kBq

Radioaktivní nečistoty: gama < 0,1 %

Referenční datum: 15.6.2002

Kombinovaná standardní nejistota: 0,5 %

Popis:

Odvážená část etalonového roztoku je nanášena na filtrační papír v polystyrenovém pouzdře. Po vysušení je pouzdro uzavřeno a zalepeno.

Měřicí metoda:

Aktivita etalonu je vypočtena z hmotnosti etalonového roztoku a kontroluje se relativním měřením toku fotonů gama. Měrná aktivita etalonového roztoku je stanovena vhodnou absolutní metodou.

Poznámka:

Pouzdro etalonu spolu s vrstvou reflektoru běžných NaI(Tl) scintilátorů dostatečně filtrují beta záření příslušného radionuklidu. Pouze u typů EG 1 a EG 3 s ¹⁴⁴Ce je mezi etalonem a scintilátorem třeba vložit min. 3,2 mm Al.

Datum vydání certifikátu: 6.6.2002

Platnost certifikátu: 3 roky

Zakazník:

Kontrola: RNDr. R. Blud'ovský, CSc.



RNDr. Pavel Dryák, CSc.
ředitel

Telefon: 02-66020497 Fax: 02-66020466



ČESKÝ METROLOGICKÝ INSTITUT
INSPEKTORÁT PRO IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ



Radiová 1, 102 00 Praha 10

CERTIFIKÁT

Číslo certifikátu: 9031 - OL - 233/14 Typ: EG 3 Výrobní číslo: 110113-12/31/7

Radionuklid: Cs-137

Poločas: 11019 dnů

Aktivita: 346,8 kBq

Radionuklidové nečistoty: gama < 0,1 %

Referenční datum: 28.4.2014

Kombinovaná standardní nejistota: 0,6 %

Popis:

Odvážená část etalonového roztoku je nanášena na filtrační papír v polystyrenovém pouzdře. Po vysušení je pouzdro uzavřeno a zalepeno.

Měřicí metoda:

Aktivita etalonu je vypočtena z hmotnosti etalonového roztoku a kontroluje se relativním měřením toku fotonů gama. Měrná aktivita etalonového roztoku je stanovena vhodnou absolutní metodou.

Poznámka:

Pouzdro etalonu spolu s vrstvou reflektoru běžných NaI(Tl) scintilátorů dostatečně filtrují beta záření příslušného radionuklidu. Pouze u typů EG 1 a EG 3 s Co-144 je mezi etalon a scintilátor třeba vložit min. 3,2 mm Al.

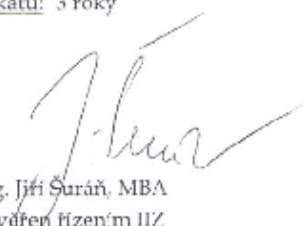
Klasifikace zdroje podle vyhlášky SÚJB 307/2002 Sb.: drobný

Datum vydání certifikátu: 10.4.2014

Platnost certifikátu: 3 roky

Zákazník:




Ing. Jiří Šuráň, MBA
pověřen řízením IIZ


Kontrola: RNDr. Richard Blud'ovský, CSc.

Tel.: +420 266 020 497 fax: +420 266 020 466



CERTIFIKÁT

Číslo certifikátu: 9031 - OL - 232/14 Typ: EG 3X Výrobní číslo: 230413-1378017

Radionuklid: Co-60

Poločas: 1925,4 dnů

Aktivita: 223,6 kBq

Radionuklidové rečistoty: gama < 0.1 %

Referenční datum: 28.4.2014

Kombinovaná standardní nejistota: 0,4 %

Popis:

Cdvážená část etalonového roztoku je nanášena na filtrační papír v polystyrenovém pouzdře. Po vysušení je pouzdro uzavřeno a zalepeno.

Měřicí metoda:

Aktivita etalonu je vypočtena z hmotnosti etalonového roztoku a kontroluje se relativním měřením toku fotonů gama. Měrná aktivita etalonového roztoku je stanovena vhodnou absolutní metodou.

Poznámka:

Pouzdro etalonu spolu s vrstvou reflektoru běžných NaI(Tl) scintilátorů dostatečně filtrují beta záření příslušného radionuklidu. Pouze u typů EG 1 a EG 3 s Ce-144 je mezi etalon a scintilátor třeba vložit min. 3.2 mm Al.

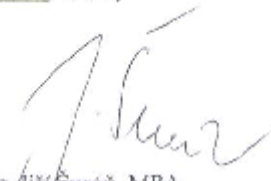
Klasifikace zdroje podle vyhlášky SÚJB 307/2002 Sb.: nevýznamný

Datum vydání certifikátu: 10.4.2014

Platnost certifikátu: 3 roky

Zákazník:




Ing. Jiří Šuráň, MBA
pověřen řízením IIZ


Kontrola: RNDr. Richard Blud'ovský, CSc.

ORTEC[®]

digiBASE[™]

14-Pin PMT Tube Base with Integrated Bias Supply, Preamplifier,
and MCA (with Digital Signal Processing) for NaI Spectroscopy

USB Interface... All In One... Digital Signal Processing

GO DIGITAL... Power Up With digiBASE...

- Full featured digital MCA and gain stabilizer for ultimate stability
- Fast data acquisition for maximum throughput
- The ultimate in Fine Time Resolution with "List Mode"
- Multi-detector arrays made simple with USB Connection
- 0 to +1200-V Detector Bias Voltage
- Includes MAESTRO-32 advanced MCA software. (ScintiVision-32 optional.)



The digiBASE is a 14-pin photomultiplier tube base for gamma-ray spectroscopy applications with NaI(Tl) scintillation detectors. The unique concept of the digiBASE combines a miniaturized preamplifier and detector high voltage (0 to +1200 V bias) with powerful digital signal processing, multichannel analyzer, and special features for fine time resolution measurements — all contained in a low-power (<500 mA), lightweight (10 oz, 280 g), small-size (63 mm diameter x 80 mm length) tube base with a USB connection. Everything you need to connect to your NaI(Tl) detector is included in the tube base. Furthermore, there is no need to open your computer to install an interface card, or for using external NIM-based components. The digiBASE includes MAESTRO-32 MCA emulation software and is available with ScintiVision-32 for complete quantitative analysis.

Simple Installation

Installation is simple via the USB interface of the PC. Just load the software, establish communications using ORTEC CONNECTIONS-32 software and begin making measurements. It's that simple!