



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Korekcije krive efikasnosti HPGe detektora usled pravog koincidentnog sumiranja programom EFFTRAN

-MASTER RAD-

Mentor:
Prof. dr Dušan Mrđa

Kandidat:
Anja Bartula

Novi Sad, 2018.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr Dušanu Mrđi na predloženoj temi, podršci i korisnim savetima pri izradi ovog rada.

Zahvaljujem se članovima komisije, prof. dr Kristini Bikit-Šreder i prof. dr Igoru Saviću.

*Veliko HVALA svim profesorima sa Katedre za nuklearnu fiziku!
Na kraju, najveću zahvalnost dugujem svojoj porodici na strpljenju i moralnoj podršci, te poverenju koje su mi ukazali u toku studija.*

SADRŽAJ

1. UVOD.....	4
2. INTERAKCIJA ZRAČENJA SA MATERIJOM.....	5
2.1 Interakcija fotona sa materijom	6
2.1.1 Fotoelektrični efekat	6
2.1.2 Komptonovo rasejanje	7
2.1.3 Kreacija elektron – pozitron parova.....	8
2.1.4 Ukupni presek za interakciju fotona sa materijom	8
3. OSNOVNI POJMOVI GAMA SPEKTROMETRIJE.....	10
3.1 Geometrija između izvora i detektora	10
3.2 Osnovne karakteristike detektora.....	10
3.2.1 Osetljivost.....	11
3.2.2 Odziv detektora.....	11
3.2.3 Energetska rezolucija	11
3.2.4 Efikasnost detektora.....	12
3.2.5 Vreme odziva.....	13
3.2.6 Mrtvo vreme	13
4. POLUPROVODNIČKI DETEKTORI	14
4.1 Besprimesni germanijum.....	14
4.2 Osnovni tipovi HPGe detektora.....	14
5. PRAVO KOINCIDENTNO SUMIRANJE.....	15
6. EKSPERIMENTALNI RAD.....	16
6.1.HPGe detektor proizvođača Canberra.....	16
6.2 Izvor zračenja.....	18
6.3 Rezultati merenja	20
7. RAČUNANJE KOREKCIIONOG FAKTORA ZA PRAVO KOINCIDENTNO SUMIRANJE POMOĆU PROGRAMA EFFTRAN	24
7.1 Opis programa EFFTRAN	24
7.2 Rezultati primene numeričkog programa EFFTRAN za određivanje korekcionih faktora za koincidentno sumiranje	24
7.3 Rezultati merenja nakon računanja korekcionog faktora numeričkim programom EFFTRAN	32
8. POREĐENJE EFIKASNOSTI DOBIJENE EKSPERIMENTALNO I NAKON RAČUNANJA KOREKCIIONOG FAKTORA	34
9. ZAKLJUČAK.....	35
LITERATURA	36
BIOGRAFIJA	37

1. UVOD

Danas, gama spektrometrija predstavlja visoko razvijenu granu eksperimentalne fizike. Važno mesto zauzima u fundamentalnim istraživanjima, posebno u nuklearnoj fizici i fizici elementarnih čestica. Potrebe savremene fizike dovele su do stvaranja velikog broja različitih vrsta detektora, koji su konstruisani tako da detektuju određene vrste čestica u određenom vremenskom intervalu. Najširu primenu imaju poluprovodnički detektori, pri čemu su posebno značajni HPGe detektori zbog mogućnosti primene na niskim energijama.

Da bi se mogao analizirati spektar snimljen od nepoznatih izvora zračenja, prethodno je potrebno izvršiti kalibraciju detektora. Interpretacija snimljenih spektara koji potiču od nepoznatih izvora, zavisi od izvršene energetske kalibracije i kalibracije efikasnosti detekcije gama zraka. Efekat pravog koincidentnog sumiranja razmatra se kada su u pitanju merenja niskih aktivnosti, sa ciljem postizanja veće tačnosti pri obradi spektra.

U prvom delu ovog rada prikazan je opis nekih osnovnih načina interakcije gama fotona sa materijom. Sledi pregled osnovnih karakteristika detektora, nakon čega je opisan princip rada poluprovodničkih detektora. Date su i osnovne teorije pravog koincidentnog sumiranja. Izvršena je kalibracija efikasnosti HPGe detektora u intervalu 59 keV do 1896 keV. Ispitan je uticaj na krivu efikasnosti efekat pravog koincidentnog sumiranja. Na kraju, izvršeno je poređenje i diskusija dobijenih rezultata.

2. INTERAKCIJA ZRAČENJA SA MATERIJOM

Pod opštim pojmom zračenje podrazumevaju se fotoni gama i zakočnog zračenja, kao i nanelektrisane i nenanelektrisane čestice koje poseduju određenu kinetičku energiju. Iznos energije koju bi čestice ili fotoni trebali imati da bi se mogli smatrati zračenjem, mora biti veći od energije ionizacije atoma materijala kroz koji se prostiru. Ukoliko je ta energija niža, mali je broj mehanizama putem kojih čestice ili fotoni mogu interagovati sa materijom i vršiti razmenu energije. Prilikom prolaska kroz neku materijalnu sredinu zračenje u najvećoj meri vrši ionizaciju, pa se takvo zračenje naziva ionizujuće zračenje. To ne znači da se osim ionizacije ne odigravaju i neki drugi procesi putem kojih čestice zračenja gube svoju energiju.

Putem ionizacije (ili ekscitacije), pojedinačne čestice nekog zračenja predaju energiju orbitalnim elektronima. To znači da se nakon jednog takvog procesa energija čestice smanji za upravo onaj iznos koliki je predat elektronu. Na taj način čestice zračenja troše svoju energiju sve dok ona ne padne do nivoa kada ionizacija više nije moguća. Alfa čestice zahvate dva elektrona i pretvore se u atome helijuma koji vremenom dođu u termalnu ravnotežu sa okolnim molekulima. Beta čestice bivaju zahvaćene od strane atoma i nastavljaju svoj život kao obični elektroni. Fotonima se energija može smanjivati kroz rasejanja na elektronima, ali takođe mogu i u potpunosti nestati nakon što kompletну energiju izgube prilikom fotoelektričnog efekta ili stvaranja para elektron-pozitron. Dakle, konačna sudbina svakog ionizujućeg zračenja je da se u potpunosti apsorbuje i nestane prilikom prolaska kroz neku materijalnu sredinu.

Da bi neka čestica bila detektovana ona mora ostaviti neki trag o svom prisustvu u medijumu kroz koji prolazi. Detektori bi trebali da nam pomognu da uočavamo čestice i nezavisno od njihove veličine i oblika, njihov rad je zasnovan na elektromagnetnim interakcijama čestica sa materijom. Potrebno je naglasiti, da čestice kao što su neutroni imaju veoma malu verovatnoću da interaguju sa materijom, zbog čega ih je vrlo teško detektovati. Mehanizmi kojim čestice gube energiju na svom putu kroz neku sredinu zavisi od vrste čestica i njihovih osobina.

Pri prolasku nanelektrisanih čestica kroz neku sredinu, mogu se odigrati sledeći procesi:

- Neelastični sudari sa atomskim elektronima materijala
- Elastično rasijanje na jezgrima
- Čerenkovljevo zračenje
- Zakočno zračenje
- Nuklearne reakcije

Ponašanje fotona pri prolasku kroz materiju prilično se razlikuje od ponašanja nanelektrisanih čestica. Procesi koji se odvijaju pri prolasku elektromagnetskog zračenja kroz sredinu su:

- Fotoelektrični efekat
- Komptonovo rasejanje (uključujući Tomsonovo i Rejlijevo rasejanje)
- Kreacija parova
- Reakcije nuklearne disocijacije

Poslednje navedeni proces je moguć, ali vrlo retko se dešava, pri čemu nije uzet u obzir.

Kako je tema rada detektovanje γ -zračenja, u nastavku je detaljnije opisana interakcija elektromagnetskog zračenja sa materijom.

2.1 Interakcija fotona sa materijom

Kad se foton sudari sa česticom, on ili se rasprši ili se apsorbuje. Kako foton nije nanelektrisan, nisu mogući neelastični sudari sa atomskim elektronima koji su karakteristični kod nanelektrisanih čestica. U tabeli 1. su date osnovne karakteristike fotona.

FOTON	
Kompozicija	Elementarna čestica
Statistika	Bose – Einsteinova
Interakcija	Elektromagnetna
Simbol	γ
Masa	0
Nanelektrisanje	0
Spin	1
Parnost	-1

Tabela 1. Osobine fotona

Foton sa materijom interaguje kroz jedan od tri osnovna procesa:

- Fotoelektrični efekat
- Komptonovo rasejanje
- Kreacija parova

2.1.1 Fotoelektrični efekat

Photoelektrični efekat je proces prilikom kog foton biva apsorbovan od strane atomskog elektrona, koji potom napušta atom. Energija izbačenog elektrona iznosi:

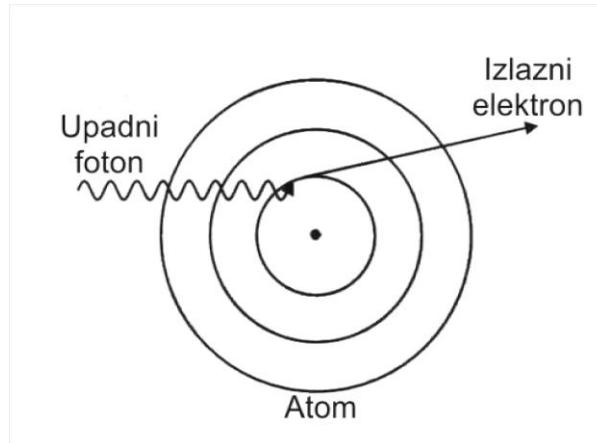
$$E = h\nu - E_v$$

gde je E_v energija veze elektrona u atomu, ν je frekvencija fotona, h Plankova konstanta. Presek za photoelektrični efekat može se izraziti na sledeći način:

$$\sigma = \text{const.} \cdot Z^{4,5} \cdot E_{\gamma}^{-3}$$

gde je Z redni broj atoma sredine, a E_{γ} energija upadnog fotona.

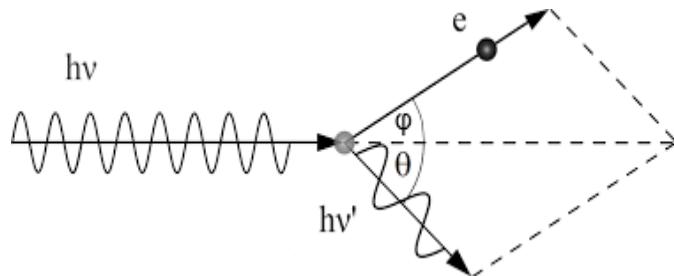
Iz ove jednačine mogu se uočiti dve značajne činjenice. Jedna je da presek za fotoefekat zavisi od rednog broja atoma sredine, što ukazuje na to da su materijali velikog rednog broja dobri apsorberi elektromagnetskog zračenja. A druga pokazuje da je presek obrnuto srazmeran energiji upadnog fotona, zbog čega možemo zaključiti da je fotoefekat dominantan proces na niskim energijama, dok na visokim energijama postaje zanemarljiv.



Slika 1. Šematski prikaz fotoelektričnog efekta

2.1.2 Komptonovo rasejanje

Komptonovo rasejanje je pojava rasejanje fotona na slobodnom elektronu ili na vezanom elektronu čija je energija veze mnogo manja od upadnog fotona.



Slika 2. Šematski prikaz Komptonovog rasejanja

Primenom zakona održanja energije i impulsa može se dobiti relacija za energiju rasejanog fotona i relacija koja pokazuje vezu između uglova φ i θ , pri čemu je φ ugao između pravca kretanja upadnog fotona i elektrona nakon rasejanja, dok je θ ugao između pravca kretanja upadnog i rasejanog fotona. Takođe, može se dobiti i izraz za kinetičku energiju nakon sudara:

$$hv' = \frac{hv}{1 + \gamma(1 - \cos\theta)}$$

$$T = hv - hv' = hv \left(\frac{\gamma(1 - \cos\theta)}{1 + \gamma(1 - \cos\theta)} \right)$$

$$\operatorname{ctg}\varphi = (1 + \gamma) \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}$$

Formula za diferencijalni efikasni presek Komptonovog rasejanja jedna je od prvih koja je dobijena kvantnom elektrodinamikom i poznata je kao Klein-Nishina formula:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r^2}{2} \frac{1}{(1+\gamma(1-\cos\theta))^2} \left(1 + \cos^2\theta + \frac{\gamma^2(1-\cos\theta)^2}{1+\gamma(1-\cos\theta)} \right)$$

gde je r je klasični radijus elektrona.

Tomsonovo rasejanje je rasejanje fotona na slobodnim elektronima pri niskim energijama pri čemu Klein-Nishina formula daje jednačinu za efikasni presek u obliku:

$$\sigma = \frac{8\pi}{3} r^2$$

Rejljevo rasejanje je rasejanje fotona od celog atoma pri čemu svi atomski elektroni učestvuju kao koherentna celina, pa se nekad naziva i koherentno rasejanje. Tomsonovo i Rejljevo rasejanje ne prenose mnogo energije materiji kroz koju prolaze.

2.1.3 Kreacija elektron – pozitron parova

U polju jezgra može doći do stvaranja para elektron – pozitron, kada je energija fotona veća od dvostrukе vrednosti energije mirovanja elektrona (1.022 MeV). Višak energije, koja iznosi $E\gamma = 2m_e c^2$, se raspodeljuje između dve čestice kao kinetička energija. Elektron i pozitron se usporavaju u okolnom materijalu. Pozitron na kraju reaguje sa nekim elektronom i anihilira se. Ako do ovoga dođe nakon što pozitron izgubi svoju kinetičku energiju, pri anihilaciji nastaju dva fotona sa energijama oko 511 keV. Ova dva fotona se emituju u suprotnim smerovima u skladu sa zakonom održanja impulsa.

Približno se može reći da se efikasni presek za proizvodnju parova menja sa Z kao Z^2 .

2.1.4 Ukupni presek za interakciju fotona sa materijom

Ukupni presek za interakciju fotona sa materijom određuje se kao zbir preseka za fotoefekat, Komptonov efekat i kreaciju para:

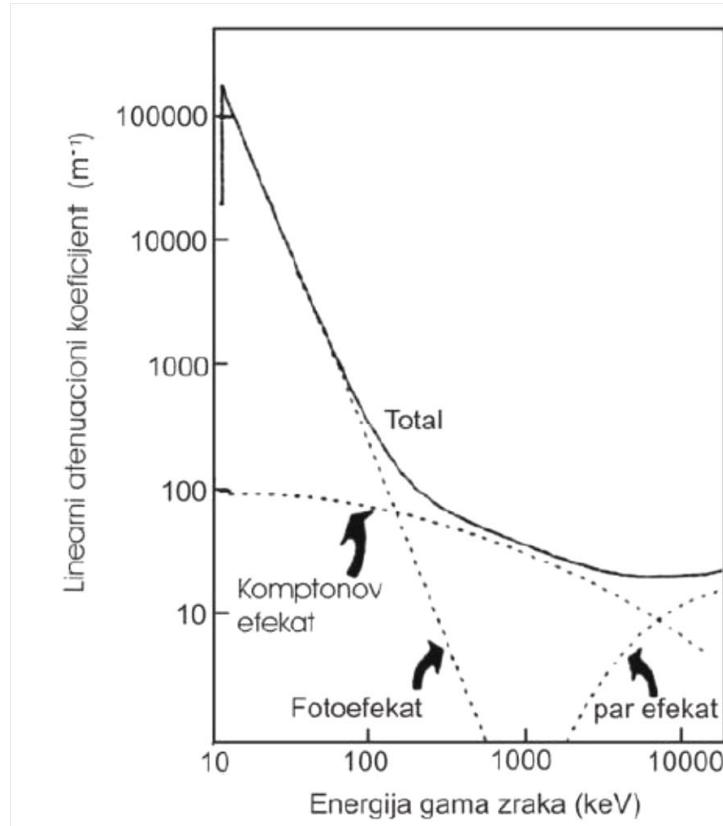
$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

Od efikasnog preseka za odigravanje nekog procesa zavisi linearni atenuacioni koeficijent. Ova zavisnost izražava se sledećom relacijom:

$$\mu = \sigma \cdot \rho \cdot \frac{Na}{M}$$

gde je ρ gustina materijama, M je molekulska masa, a Na je Avogadrovo broj.

Na slici 3 prikazani su linearni atenuacioni koeficijenti za fotoefekat, Komptonovo rasejanje i kreaciju para i ukupni atenuacioni koeficijent u funkciji energije. Vidi se da je Komptonov efekat prisutan u celom intervalu datih energija sa blagim padom. Fotoefekat je dominantan na nižim energijama, dok na energijama iznad 1022 keV kreacija para elektron–pozitron postaje dominantan proces.



Slika 3. Linearni atenuacioni koeficijent u zavisnosti od energije

3. OSNOVNI POJMOVI GAMA SPEKTROMETRIJE

Gama zraci nastaju pri deekscitaciji pobuđenih stanja u jezgrima atoma. Svaki foton γ zraka ima određenu energiju koja je karakteristična za izvor iz koga potiče zračenje. Mereći energije tih fotona, možemo odrediti iz kog izvora oni potiču.

U gama spektrometriji se najvažniji parametri zračenja, emitovane energije i relativni intenziteti pojedinih energetskih prelaza, određuju na taj način što se snima spektar, pa se zatim vrši njegova analiza. Konačni spektar zavisiće od karakteristika detektora, geometrije između detektora i izvora i količine materijala između njih.

Jedan od zadataka gama spektrometrije je identifikacija prisutnih jezgara u nepoznatim uzorcima. Spektar emitovanih fotona pri raspodu jezgara daje indirektnu informaciju o samom jezgru koje se raspalo. Određivanje koncentracije aktivnosti ispitivanog uzorka moguće je kompletnom obradom spektra, što se čini uz pomoć softvera za gama spektrometriju. Uz predhodno izvršenu energetsку kalibraciju spektrometra, softver može automatski identifikovati prisutna jezgra.

3.1 Geometrija između izvora i detektora

Veliki uticaj na posmatrani spektar ima debljina izvora. Sa većom debljinom, ima više Komptonovog rasejanja što smanjuje intenzitet registrovanih foto vrhova. Pošto se fotoni sa manjom energijom više atenuiraju od fotona sa većom energijom, ovaj efekat je izražen na nižim energijama. Zračenje može biti atenuirano i u materijalu između izvora i detektora. Od oblika izvora i detektora, kao i od njihovog međusobnog položaja zavisi količina materijala kroz koju će zračenje prolaziti.

3.2 Osnovne karakteristike detektora

Postoji veliki broja različitih tipova detektora čestica. Ipak, svi se zasnivaju na istom principu - energija koju zračenje pri prolasku kroz aktivnu zapreminu detektora predaje, pretvara se u neki drugi oblik, pogodan za merenje i obradu. Kod najvećeg broja savremenih detektora, informacije se konvertuju u električne signale, koji omogućavaju lakšu i precizniju obradu. U detektore koji su danas najviše u upotrebi spadaju ionizacione komore, scintilacioni detektori, fotomultiplikatori, poluprovodnički detektori itd. Dakle, izbor detektora koji će se koristiti u konkretnom slučaju zavisi od vrste zračenja koje se detektuje i od osnovnih karakteristika samog detektora.

Pod osnovnim karakteristikama detektora podrazumevaju se sledeće osobine:

- Osetljivost
- Odziv detektora
- Energetska rezolucija
- Efikasnost detektora
- Mrtvo vreme
- Vreme odziva

3.2.1 Osetljivost detektora

Osetljivost je sposobnost detektora da proizvede koristan signal za određenu vrstu zračenja na određenoj energiji. Osetljivost detektora za dati tip zračenja određene energije zavisi od više faktora:

- presek za ionizaciju u detektoru
- mase detektora
- inherentnog detektorskog šuma
- zaštitnog materijala oko detektora

Presek i masa detektora određuju verovatnoću da se deo ili celokupna energija upadnog zračenja pretvori u ionizaciju unutar detektora. Ionizujući signal mora biti jači od određenog minimuma da bi bio od koristi, a taj minimum zavisi od šuma detektora i propratne elektronike.

3.2.2 Odziv detektora

Većina detektora je u stanju da pruži neku informaciju o energiji upadnog zračenja, pošto je stepen ionizacije proporcionalan gubitku energije zračenja unutar osjetljive zapremine detektora. Ako je detektor dovoljno velik da se zračenje potpuno apsorbuje, ionizacija daje mjeru energije zračenja.

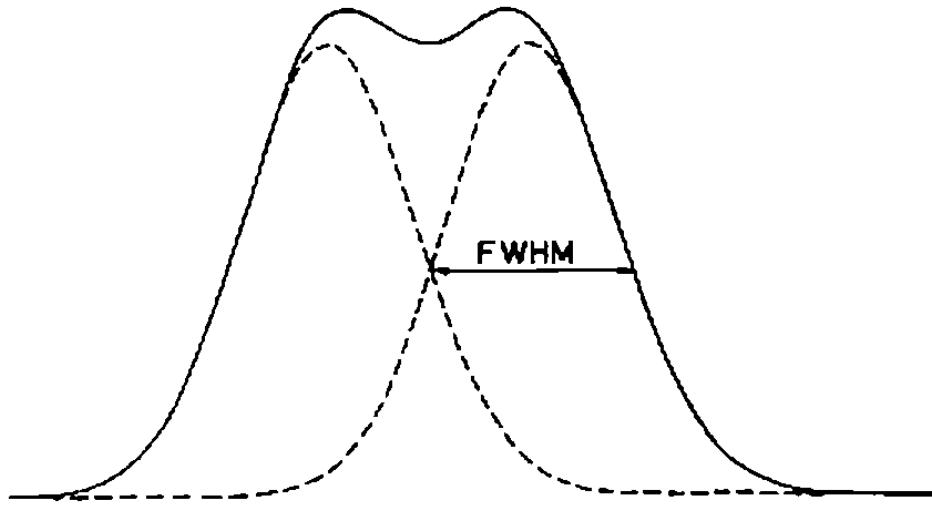
Uopšte, izlazni signal električnih detektora je u obliku strujnog signala. Veza između energije upadnog zračenja i visine izlaznog signala predstavlja odziv detektora. Za mnoge detektore odziv je linearan ili aproksimativno linearan u određenom energetskom intervalu.

3.2.3 Energetska rezolucija

Za detektore koji su tako napravljeni da mere energiju upadnog zračenja, najvažniji faktor je energetska rezolucija. Energetska rezolucija pokazuje do koje mere je detektor u stanju da razlikuje dve linije bliskih energija. Idealno svaka energija bi bila predstavljena jednim pikom delta funkcije, ali u realnom slučaju svaki pik ima oblik Gausove raspodele sa konačnom širinom. Rezolucija se uglavnom daje u odnosu na poluširinu maksimuma (FWHM - full width at half maximum) i dve energije koje upadaju u ovaj interval se smatraju nerazloživim (Slika 4). Ako širinu linije izrazimo kao ΔE , onda je relativna rezolucija na energiji E data kao:

$$R = \frac{\Delta E}{E}$$

Rezolucija se uglavnom izražava u procentima, gde na primer NaI scintilacioni detektor ima oko 8% - 9% rezoluciju za γ - zrake od 1 MeV, dok germanijumski detektor ima rezoluciju reda 0.1%.



Slika 4. Definisanje energetske rezolucije

Ako je cela energija zračenja apsorbovana, onda postoji mnogi procesi koji mogu prouzrokovati fluktuaciju broja ionizacionih događaja. Fano faktor je broj koji se uvodi da bi se opisao uticaj ovih fluktuacija i uzimajući u obzir ovaj faktor formula za energetsku rezoluciju je:

$$R = 2.35 \frac{\sqrt{FJ}}{J}$$

gde se faktor 2.35 odnosi na standardnu devijaciju Gausijana na njegov FWHM, J je stepen ionizacije i F Fano faktor. Fano faktor je funkcija svih fundamentalnih procesa koj mogu dovesti do transfera energije u detektoru koji zapravo zavise od detektorskog medijuma. Kod poluprovodničkih detektora uglavnom je $F < 1$.

3.2.4 Efikasnost detektora

Efikasnost detekcije je mera verovatnoće da zračenje određene energije emitovano iz izvora bude apsorbovano u aktivnoj zapremini detektora. Kod detekcije zračenja razmatramo dve vrste efikasnosti: absolutna efikasnost i sopstvena efikasnost detektora.

Absolutna ili ukupna efikasnost se definiše kao broj registrovanih događaja u odnosu na ukupan broj događaja:

$$\epsilon = \frac{N_r}{N_u}$$

i ona je funkcija geometrije detektora i verovatnoće interakcije unutar detektora.

Sopstvena efikasnost predstavlja odnos registrovanih događaja sa brojem događaja koji su realno pogodili detektor:

$$\epsilon = \frac{\text{registrovani dogadaji}}{\text{događaji koji pogadaju detektor}}$$

3.2.5 Vreme odziva

Vreme odziva je vreme koje je potrebno detektoru da formira signal nakon pristizanja zračenja do njega. Poželjno je da ovo vreme bude što je moguće kraće. Vreme trajanja signala je takođe vrlo bitno. Tokom ovog perioda, drugi događaj se ne može registrovati jer detektor nije osetljiv na zračenje ili zato što će se drugi događaj sumirati sa prvim. Ovo doprinosi mrtvom vremenu detektora i ograničava da stvaran broj upadnih fotona bude registrovan.

3.2.6 Mrtvo vreme

Mrtvo vreme je vreme koje je potrebno detektoru da obradi neki događaj i uglavnom je povezano sa dužinom trajanja strujnog signala. U zavisnosti od tipa, detektori mogu biti osetljivi ili neosetljivi za druge događaje unutar ovog intervala. U slučaju neosetljivog detektora svaki drugi događaj koji upadne u ovaj interval se izgubi, dok je kod osetljivog moguće gomilanje signala što ga izobličuje i na kraju je moguć gubitak informacije o oba događaja.

Kod računanja mrtvog vremena treba uzeti u obzir sve pojedinačne delove detektorskog sistema pošto svaki od njih ima svoje mrtvo vreme. Postoje dva osnovna tipa mrtvog vremena: produženo i neproduženo, ili paralizujuće i neparalizujuće. U slučaju produženog mrtvog vremena novi događaj koji stigne u toku mrtvog vremena starog dodaje svoje mrtvo vreme od momenta kada je stigao. Odavde se lako vidi da je, ako su događaji dovoljno česti, moguće da mrtvo vreme traje veoma dugo za koje vreme je element paraliziran. Neparalizujuće mrtvo vreme odgovara detektoru koji je neosetljiv tokom mrtvog vremena, pa novi događaj neće produžiti mrtvo vreme starog.

4. POLUPROVODNIČKI DETEKTORI

Poluprovodnički detektori bazirani su na kristalu poluprovodnika, najčešće silicijuma i germanijuma. Princip rada poluprovodničkih detektora analogan je gasnim detektorima. Prednost poluprovodničkih detektora ogleda se u tome što je energija potrebna za stvaranje para elektron – pozitron oko deset puta manja od energije potrebne za stvaranje para elektron – ion kod gasnih detektora. Zbog veće gustine samog materijala imaju veću zaustavnu moć.

Germanijumski detektori su značajno pogodniji za detekciju zračenja od silicijumskih. To se ogleda u značajno većem rednom broju koji za Ge iznosi $Z=32$, dok za Si iznosi $Z=14$. Zbog ove činjenice presek za fotoefekat je oko 60 puta veći kod germanijuma nego kod silicijuma. Kristal germanijuma mora biti ohlađen na niske temperature (temperature tečnog azota) zbog manje širine zabranjene zone. Germanijumskim detektorima moguće je detektovati i nanelektrisane čestice.

4.1 Besprimesni germanijum

Napredak u poluprovodničkoj tehnologiji doveo je do mogućnosti stvaranja skoro čistog germanijuma sa koncentracijama jednog atoma primeše na 10^{10} atoma germanijuma u cm^3 . Pogodnost detektora sa germanijumom ovako velike čistoće je u tome što se ne moraju sve vreme održavati na niskim energijama. Besprimesni germanijumski detektori (HPGe – High Purity Germanium) konstruisani su i rade na isti način kao i Ge(Li) detektor. Imaju p-i-n strukturu sa inverzno polarisanim pn spojem, što rezultira stvaranjem jakog električnog polja unutar besprimesnog sloja. Kada foton dospe u besprimesni sloj dolazi do interakcije sa elektronima i formira se veliki broj parova elektron-šupljina. Količina stvorenih parova proporcionalna je energiji upadnih fotona.

4.2 Osnovni tipovi HPGe detektora

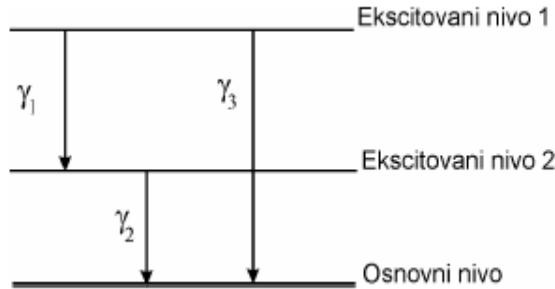
HPGe detektori mogu se razlikovati po svom obliku, geometriji i osnovnim karakteristikama. U zavisnosti od toga, svaki detektor je pogodan za merenja u određenom energetskom opsegu.

- Koaksijalni detektori - imaju najširi energetske opseg. Mogu da detektuju gama zrake od ispod 5 keV pa do nekoliko MeV. Imaju oblik kružnog cilindra. Jedna od njihovih specifičnih prednosti je što mogu da procesiraju fotone od jednog do drugog kraja cilindra i preko cele bočne strane, što rezultuje velikom korisnom površinom i velikom verovatnoćom za interakciju.
- Polu-planarni detektori - koriste se u opsegu od ispod 5 keV do nekoliko stotina keV. Imaju mnogo veću energetsku rezoluciju od koaksijalnih. Oblik im je cilindrični, pri čemu imaju širinu veću od dužine i detektuju fotone samo jednom površinom.
- Detektori x-zraka - dizajnirani su za energije od 500 eV do preko 60 keV. Malih su dimenzija, ali imaju najbolju energetsku rezoluciju od svih detektora u čvrstom stanju. Kod ovih detektora sastav materijala ulaznog prozora određuje donju granicu energije koja se može posmatrati.

5. PRAVO KOINCIDENTNO SUMIRANJE

Veliki broj radioaktivnih raspada pretka u osnovno stanje potomka se dešava uz emisiju nekoliko gama- ili X- zraka u kaskadi. Za dva zraka kažemo da su detektovani u pravoj koincidenciji, ako su dva gama zraka sa različitim energijama emitovani u kaskadi nuklearnog raspada i detektovani u toku vremena razlaganja spektrometra.

Detektor registruje zbir energija od oba gama kvanta. Drugim rečima, kao da je registrovao foton čija je energija zbir ove dve. Događaji su ili izgubljeni ili dodati za vrh ukupne energije za posmatrani gama zrak. Svako određivanje aktivnosti bazirano je na analizi vrha ukupne energije i zbog toga je u cilju veće tačnosti pri obradi spektra potrebno izvršiti korekciju vrha ukupne energije na efekte pravih koincidencija. Na slici 5 prikazan je primer kaskadnog emitovanja.



Slika 5. Gama zraci emitovani u kaskadi

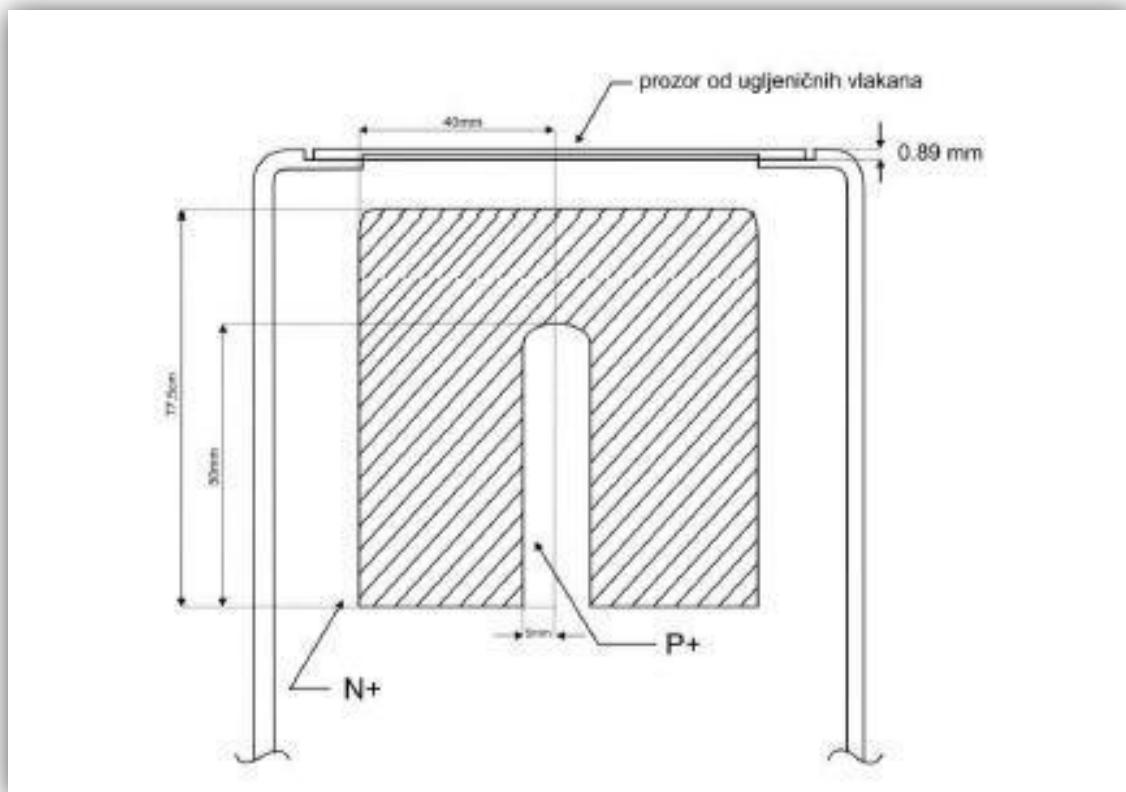
Vrhovi ukupne energije γ_1 i γ_2 imaju gubitak u odboru zbog kaskadnog sumiranja, dok će zrak γ_3 imati višak odbroja pod vrhom ukupne energije zbog kaskadnog sumiranja. Koincidentni gama zraci u detektoru mogu deponovati samo deo svoje energije i na taj način doprineti fonu. Oni zraci koji su u detektoru deponovali deo svoje energije nemaju uticaj na efikasnost i na intenzitet linije. Efekat pravih koincidencija je geometrijski zavistian. Verovatnoća da dva ili više kaskadnih gama zraka budu apsorbovana u aktivnoj zapremini detektora je veća ukoliko se izvor i detektor nalaze na maloj udaljenosti.

6. EKSPERIMENTALNI RAD

6.1. HPGe detektor proizvođača Canberra

Germanijumski detektor korišten u ovom eksperimentu je koaksijalnog tipa. Ima relativnu efikasnost 100%, odnosno istu apsolutnu efikasnost kao NaI (Tl) detektor na 1332 keV. Poprečni presek ovog detektora prikazan je na slici 6. Prozor detektora je debljine 0.89 mm i izrađen je od kompozita karbonskih vlakana velike čvrstoće. Ovako sačinjen prozor omogućava propuštanje više od 85% fotona energije iznad 15 keV i gotovo 100% fotona energije iznad 20%.

Detektor je smešten u masivni slojeviti olovni oklop. Unutrašnji sloj oklopa obložen je slojem bakra i kalaja. Za hlađenje ovog detektora koristi se tečni azot.



Slika 6. Poprečni presek detektora proizvođača Canberra

Spoljašnji izgled detektora prikazan je na slici 7, dok je eksperimentalna postavka detektora sa odgovarajućim referentnim materijalom prikazana na slici 8.



Slika 7. Spoljašnji izgled detektora proizvođača Canberra



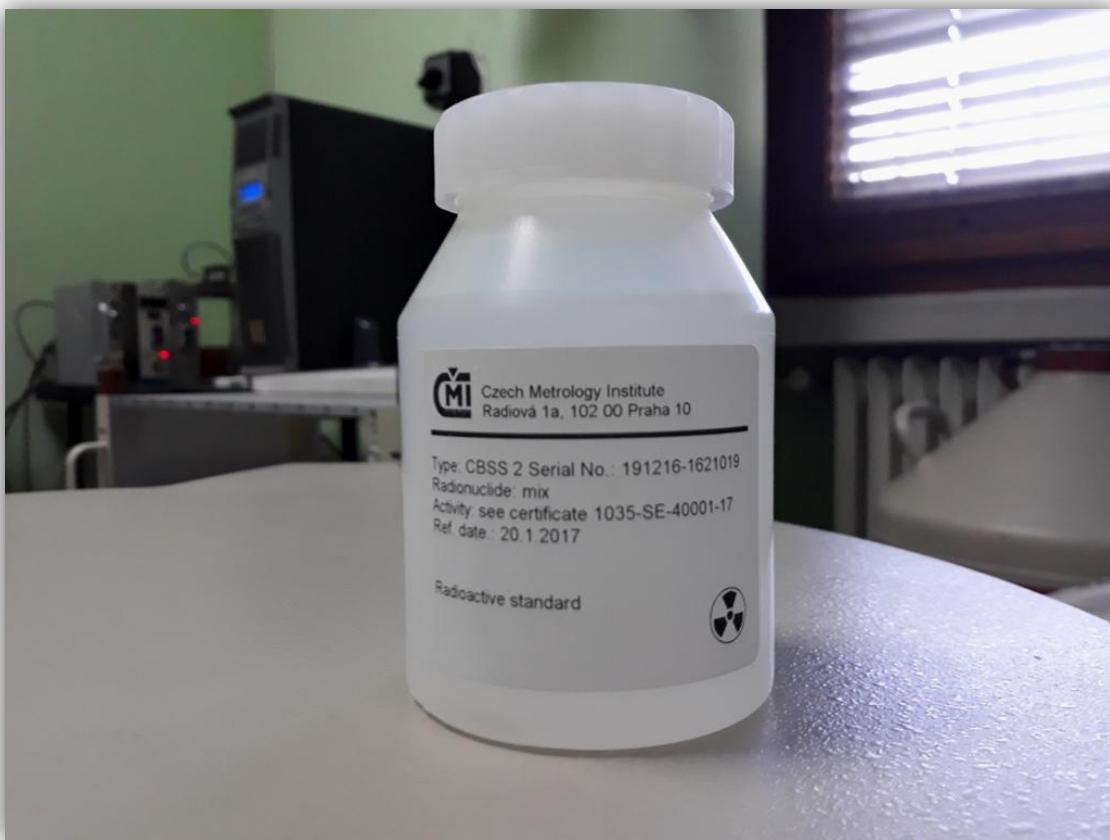
Slika 8. Eksperimentalna postavka detektora sa odgovarajućim referentnim materijalom
(izvorom zračenja)

6.2 Izvor zračenja

Kao izvor zračenja korišten je uzorak, prikazan na slici 9, sa Češkog Meteorološkog Instituta – standardni referentni materijal. Uzorak potiče od 20.01.2017. godine. Zaštitni slojevi plastike u toku snimanja nisu bili uklonjeni.

Merenje je izvršeno u aprilu 2018. godine. Za potrebe našeg eksperimenta korišteno je 245g standardnog referentnog materijala, koji se homogeno raspršuje u silikonskoj smoli. Maseni sastav matrice standardnog referentnog materijala čini C 32,4%, H 8,16%, O 21,6% i Si 37,9%.

Sertifikat standardnog referentnog materijala sa Češkog Meteorološkog Instituta prikazan je na slici 10.



Slika 9. Standardni referentni materijal sa Češkog Meteorološkog Instituta

EKSPERIMENTALNI RAD


Czech Metrology Institute
 Okružní 31, 638 00 Brno, Czech Republic
 phone +420 545 666 111
www.cmi.cz

Workplace: Regional Branch Prague, Radiová 1136/3, 102 00 Praha 10
 Ionizing Radiation Building, Radiová 1288/1a
 Phone: +420 266 020 497

CERTIFICATE

Certificate No.:	1035 - SE - 40001-17	Type:	CBSS 2	Serial No.:	191216-1621019
Radionuclide	Half-life, days	Activity,	kBq	Combined standard uncertainty, %	
Am-241	158004	5,302		3,1	
Cu-109	461,9	19,68		1,5	
Co-139	137,64	1,671		1,3	
Co-57	271,8	1,306		1,9	
Co-60	1925,2	5,315		1,1	
Cs-137	10976	2,938		1,3	
Sn-113	115,99	3,573		2,2	
Sr-85	64,85	5,632		1,9	
V-88	106,63	7,422		1,5	
Cr-51	27,704	20,50		1,9	
Ru-152	4938,8	3,302		1,2	

Mass: 245,0 g Density: 0,98 ± 0,01 g/cm³ Volume: 250,0 ± 2,5 cm³
 Radionuclide impurities: gamma < 0,1 % Homogeneity better than: 1 %

Description:
 Radioactive material is homogeneously dispersed in silicone resin. Composition of the matrix: C - 0,324 H - 0,0816 O - 0,236 Si - 0,379 (mass ratio).

Measuring method:
 Preparation issues from standard ER solutions whose activities were determined by suitable absolute method. Final control is based on gamma spectrometry on HPGe detector.

Note:
 As the criterion of homogeneity standard deviation of the activity value of 1 cm⁻³ element was chosen ($n=10$). The volume is calculated from the mass and the density.

Date of the certificate issue: 4.12.2017 Certificate validity: 3 years
 (6 months for Cr-51)

Customer:
 Faculty of Sciences, University Novi Sad
 Trg Dositeja Obradovića 3
 21000 Novi Sad
 Serbia


 Control: Ing. Vlasta Zdyčková, RNDr., Pavel Dvorský, CSc.
 Ing. Jiri Šimáček MBA
 Deputy Director of RB Prague

Slika 10. Sertifikat radioaktivnog materijala sa Češkog Meteorološkog Instituta

U tabeli 2, prikazani su radionuklidi koji se javljaju u odgovarajućem uzorku, zajedno sa odgovarajućim periodima poluraspada za svaki radionuklid i početnim aktivnostima.

Radionuklid	T ^{1/2} [u danima]	A ₀ [Bq]	A [Bq]
²⁴¹ Am	158004	5302	5291.45
¹⁰⁹ Cd	461.9	19680	9957.35
¹³⁹ Ce	137.64	1671	169.84
⁵⁷ Co	271.8	1306	410.32
⁶⁰ Co	1925.2	3315	2815.11
¹³⁷ Cs	10976	2938	2854.96
¹¹³ Sn	115.09	3573	232.03
⁸⁵ Sr	64.85	5632	43.98
⁸⁸ Y	106.63	7422	387.99
⁵¹ Cr	27.704	20500	0.239
¹⁵² Eu	4938.8	3302	3098.17

Tabela 2. Radinuklidi u standardnom referentnom materijalu
(A₀ - početna aktivnost, A – aktivnost u trenutku merenja)

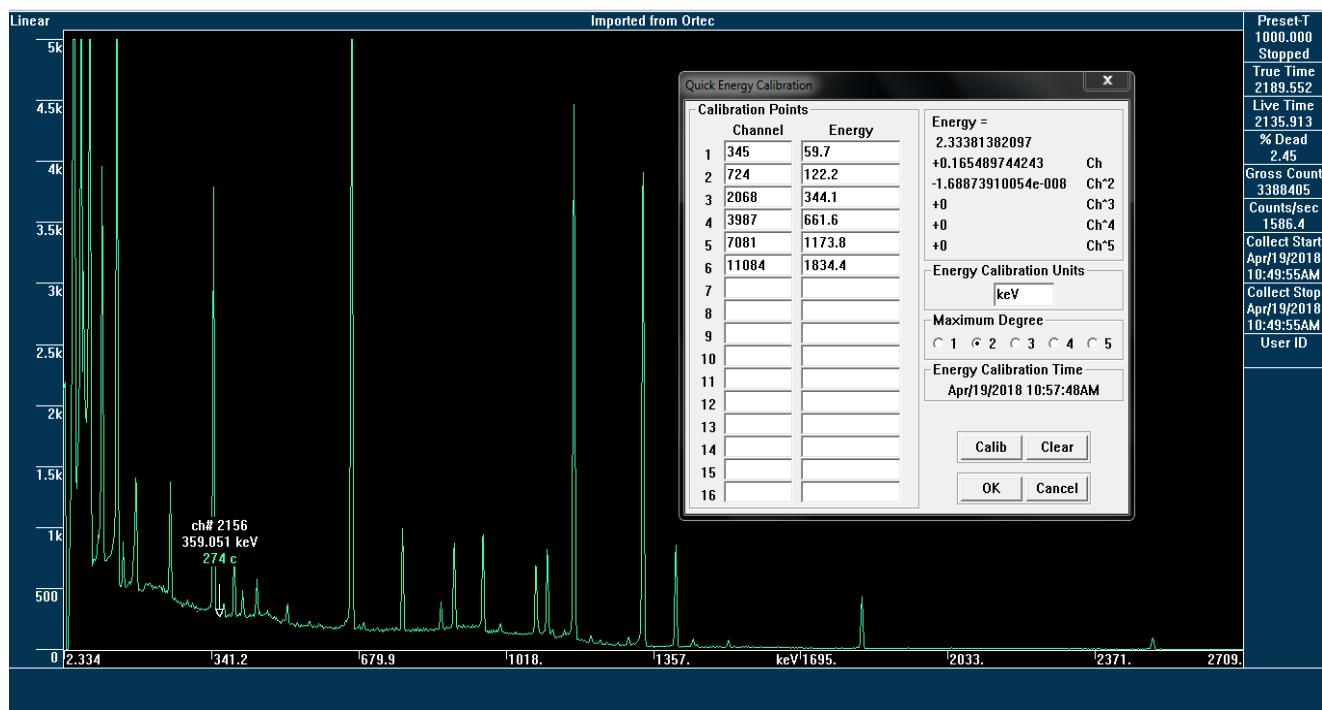
6.3 Rezultati merenja

U radu je određivana energetska efikasnost poluprovodničkog HPGe detektora, proizvođača Canberra. Kalibracija efikasnosti je određena u intervalu od 59 keV do 1846 keV, što je prikazano na slici 11. Snimanje spektra izvršeno je 19.04.2018. godine. Merenje je trajalo 2189.552 s (true vreme – vreme koje je proteklo u toku snimanja), sa ukupnim živim vremenom od 2135.913 s (live vreme – vreme tokom kojeg je detektor bio osetljiv za zračenje), te je mrtvo vreme iznosilo 2,45%. Za obradu spektara korišten je program APTEC, dok su fitovanja krivih efikasnosti vršena u program TABLE CURVE 2D.

Nakon energetske kalibracije dobijenog spektra očitane su vrednosti neto brzine brojanja R za odabrane pikove. Vrednosti kvantnog prinosa fotona odabrane energije p^γ očitane su sa spektra. Početna aktivnost za svaki radionuklid data je na Sertifikatu sa Češkog Meteorološkog Instituta, dok je aktivnost u trenutku merenja za svaki radinuklid izračunata po formuli:

$$A = A_0 \cdot 2^{\frac{-t}{T^{1/2}}}$$

gde je A₀ - početna aktivnost, T^{1/2} - vreme poluraspada i t = 454 dana, vreme proteklo od referentnog datuma datog uzorka do početka snimanja spektra.



Slika 11. Izgled spektra sa prozorom za kalibraciju

Nakon izračunate aktivnosti za svaki radionuklid, efikasnost detekcije je izračunata prema sledećoj formuli:

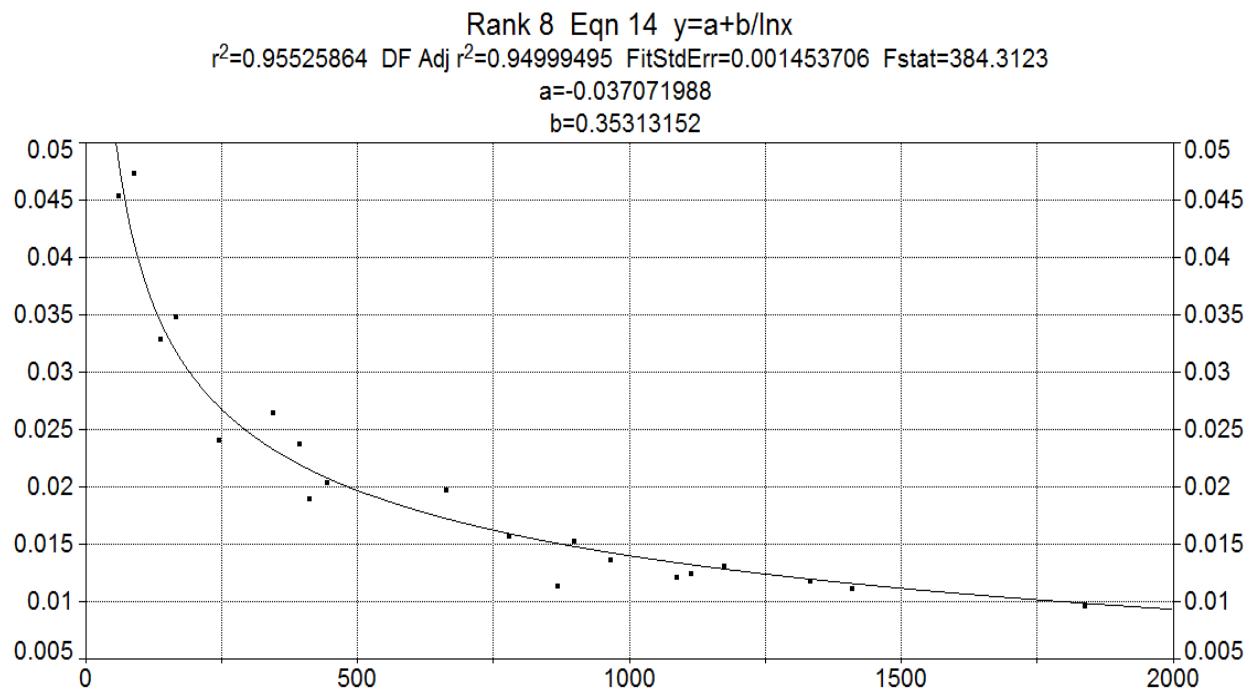
$$\varepsilon = \frac{R}{Ap^\gamma}$$

gde je R - neto brzina brojanja, A – aktivnost izvora zračenja i p^γ - verovatnoća za emisiju fotona date energije. Merna nesigurnost određena je kao standardna devijacija pojedinačnih mernih nesigurnosti. Tabela 3. prikazuje dobijene rezultate.

E [keV]	p γ [%]	R [cps]	ε	$\varepsilon \pm \Delta\varepsilon$	$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} \cdot 100\%$	$\frac{1}{(\Delta\varepsilon)^2}$
59.5409 (^{241}Am)	35.92	86.4279	0.0455	0.0455(6)	1.32	$2.8 \cdot 10^6$
88.0336 (^{109}Cd)	3.66	17.2853	0.0474	0.0474(11)	2.32	$8.3 \cdot 10^5$
136.4736 (^{57}Co)	10.71	1.45231	0.0330	0.0330(24)	7.27	$1.7 \cdot 10^5$
165.8575 (^{139}Ce)	79.90	4.73849	0.0349	0.0349(8)	2.29	$1.6 \cdot 10^6$
244.6874 (^{152}Eu)	7.55	5.66947	0.0242	0.0242(5)	2.07	$4.0 \cdot 10^6$
344.2785 (^{152}Eu)	26.59	21.9524	0.0266	0.0266(4)	1.50	$6.3 \cdot 10^6$
391.698 (^{113}Sn)	64.97	3.60439	0.0239	0.0239(8)	3.35	$1.6 \cdot 10^6$
411.1165 (^{152}Eu)	2.238	1.32309	0.0191	0.0191(15)	7.85	$4.4 \cdot 10^5$
443.965 (^{152}Eu)	3.120	1.98176	0.0205	0.0205(11)	5.37	$8.3 \cdot 10^5$
661.657 (^{137}Cs)	84.99	48.1497	0.0198	0.0198(3)	1.52	$1.1 \cdot 10^7$
778.9045 (^{152}Eu)	12.97	6.33898	0.0158	0.0158(3)	1.90	$1.1 \cdot 10^7$
867.380 (^{152}Eu)	4.243	1.51635	0.0115	0.0115(8)	6.96	$1.6 \cdot 10^6$
898.042 (^{88}Y)	93.7	5.60627	0.0154	0.0154(4)	2.60	$6.3 \cdot 10^6$
964.079 (^{152}Eu)	14.50	6.17581	0.0137	0.0137(3)	2.19	$1.1 \cdot 10^7$
1085.837 (^{152}Eu)	10.13	3.83064	0.0122	0.0122(4)	3.28	$6.3 \cdot 10^6$
1112.076 (^{152}Eu)	13.41	5.19083	0.0125	0.0125(3)	2.40	$1.1 \cdot 10^7$
1173.228 (^{60}Co)	99.85	37.0125	0.0132	0.0132(2)	1.52	$2.5 \cdot 10^7$
1332.492 (^{60}Co)	99.9826	33.4662	0.0119	0.0119(2)	1.68	$2.5 \cdot 10^7$
1408.013 (^{152}Eu)	20.85	7.2515	0.0112	0.0112(2)	1.79	$2.5 \cdot 10^7$
1836.070 (^{88}Y)	99.346	3.72271	0.0097	0.0097(3)	3.09	$1.1 \cdot 10^7$

Tabela 3. Računanje efikasnosti detekcije za određene energije

U program Table Curve 2D nacrtan je grafik $\varepsilon = \varepsilon(E)$ i prema našoj proceni izabrana je kriva koja je najviše odgovarala od ostalih ponuđenih krivih u ovom programu. Bilo je potrebno dobiti što je moguće jednostavniji oblik funkcionalne zavisnosti.



Slika 12. Kriva efikasnosti dobijena eksperimentalno

Za krivu koja je prikazana na slici 12, jednačina ima oblik $y = a + \frac{b}{\ln x}$. Vrednost konstante a koja u njoj figuriše iznosi $a = -0.037966762$, a vrednost konstante b je $b = 0.35764545$. Izabrana kriva pokazuje dobru raspodelu, sa nešto većim greškama na početku, za koje se smatra da su nastale zbog niskih energija.

U drugom delu ovog rada upoređićemo eksperimentalno dobijenu raspodelu sa raspodelom dobijenom računanjem korekcionog faktora za pravo koincidentno sumiranje korišćenjem programa EFFTRAN.

7. RAČUNANJE KOREKCIJONOG FAKTORA ZA PRAVO KOINCIDENTNO SUMIRANJE POMOĆU PROGRAMA EFFTRAN

7.1 Opis programa EFFTRAN

Korekcioni faktori za koincidentno sumiranje zavise od geometrije merenja i karakteristika samog detektora, tako da korišćenje nekih opštih tablica sa korekcionim faktorima, ne daje dovoljno precizne rezultate.

Kao najbolje rešenje izdvaja se da se za dati detektorski sistem i datu geometriju merenja odrede odgovarajući korekcioni faktori za koincidentno sumiranje. Sve više su u upotrebi brojni softverski paketi čija se numerička analiza zasniva na principu Monte Carlo simulacije, kao što je na primer EFFTRAN.

Numerički program EFFTRAN predstavlja Monte Carlo softver zasnovan na metodi transfera efikasnosti, u kojoj se za određivanje totalne efikasnosti koristi ili gausijanska ili Monte Carlo integracija po zapremini detektora i uzorka. Njegovom primenom mogu da se odrede i korekcioni faktori za koincidentno sumiranje. Ulazni podaci koje koristi EFFTRAN su parametri detektora koji se obično nalaze u specifikaciji proizvođača, a to su: dimenzije i materijal kristala, držača kristala, kućišta i prozora detektora, kao i debljina mrtvog sloja. Takođe, kao ulazni podaci, potrebni su i parametri koji se odnose na uzorak, a koji uključuju dimenzije i materijal posude u kojoj se nalazi uzorak, količinu, tj. masu i visinu punjenja, kao i hemijski sastav uzorka.

7.2 Rezultati primene numeričkog programa EFFTRAN za određivanje korekcionih faktora za koincidentno sumiranje

Korekcioni faktori za koincidentno sumiranje izračunati su korišćenjem programa EFFTRAN za poznate karakteristike koaksijalnog poluprovodničkog HPGe detektora p-tipa i karakteristike posmatranog izvora.

Na slici 13 i 14 prikazan je izgled osnovnih karakteristika detektora i izvora prilikom korišćenja programa EFFTRAN.

**RACUNANJE KOREKCIJONOG FAKTORA ZA PRAVO KOINCIDENTNO SUMIRANJE POMOĆU
PROGRAMA EFFTRAN**

Detector

Crystal diameter	80.00	mm	End cap (housing) diameter	99.40	mm
Crystal length	77.50	mm	End cap (housing) thickness	1.30	mm
Bulletization (crystal rounding) radius	0.00	mm	End cap (housing) material	aluminium	
Top dead layer	0.00	mm	Window thickness	0.89	mm
Side dead layer	0.00	mm	Window-to-crystal gap	5.00	mm
Crystal hole (cavity) length	50.00	mm	Window material	CFRP	
Crystal hole (cavity) diameter	10.00	mm			
Crystal material	Ge		Mount cup (holder) thickness	1.30	mm
			Mount cup (holder) material	aluminium	
			Absorber diametre	102.00	mm
			Absorber thickness	1.50	mm
			Absorber material	plexiglass	

Detector

Load

Store

Slika 13. Osnovne karakteristike detektora prikazane u numeričkom programu EFFTRANU

Source

Source filling height	69.00	mm
Source material	SiResin13	
Container diameter	69.00	mm
Container bottom thickness	0.50	mm
Container side wall thickness	0.50	mm
Container material	plexiglass	
Container-to-absorber gap*	0.00	mm

Load

Store

Slika 14. Osnovne karakteristike izvora prikazane u numeričkom programu EFFTRANU

RAČUNANJE KOREKCIIONOG FAKTORA ZA PRAVO KOINCIDENTNO SUMIRANJE POMOĆU PROGRAMA EFFTRAN

U nastavku rada prikazan je izgled računanja korekcionog faktora pomoću softvera EFFTRAN za svaki poseban radionuklid. Treba napomenuti da korekcioni faktor nije izračunat za ^{85}Sr i ^{51}Cr , obzirom da njihove odgovarajuće gama linije nisu detektovane u spektru zbog kratkog perioda poluraspada pomenutih radionuklida.

Slika 15. Računanje korekcionog faktora za radionuklid ^{60}Co programom EFFTRAN

Slika 16. Računanje korekcionog faktora za radionuklid ^{137}Cs programom EFFTRAN

**RACUNANJE KOREKCIJONOG FAKTORA ZA PRAVO KOINCIDENTNO SUMIRANJE POMOĆU
PROGRAMA EFFTRAN**

**True Coincidence Summing
Correction Factors**

E [keV] Correction
Factor

7	1.713
14	1.393
122	1.099
136	0.958
230	1.533
340	1.319
352	1.189
367	1.115
570	1.348
692	1.077
706	0.749

Correction factors

for the selected nuclide

CO-57

Store

Correction Factors

Minimum Energy 50 keV

The calculation always uses the detector model from the "Detector" sheet and the source description from the "Source" sheet. No experimental data are used or required.

The correct use of the calculated correction factors is to multiply the measured peak areas with them.

Gamma-gamma, gamma-X and X-X coincidences are taken into account and the correction factors for X-rays and gamma rays are provided.

The minimum energy is the lowest energy to which the setup (detector + sample) is sensitive. Its value may influence some results quite considerably. Setting it too low, however, may result in slow execution.

Slika 17. Računanje korekcionog faktora za radionuklid ^{57}Co programom EFFTRAN

**True Coincidence Summing
Correction Factors**

E [keV] Correction
Factor

12	1.096
14	1.092
17	1.087
21	1.083
26	1.090
33	1.073
43	1.179
51	0.000
56	1.235
60	1.010
65	0.030
67	1.165
70	1.011
76	0.064
97	1.085
99	1.149

Correction factors

for the selected nuclide

AM-241

Store

Correction Factors

Minimum Energy 50 keV

The calculation always uses the detector model from the "Detector" sheet and the source description from the "Source" sheet. No experimental data are used or required.

The correct use of the calculated correction factors is to multiply the measured peak areas with them.

Gamma-gamma, gamma-X and X-X coincidences are taken into account and the correction factors for X-rays and gamma rays are provided.

The minimum energy is the lowest energy to which the setup (detector + sample) is sensitive. Its value may influence some results quite considerably. Setting it too low, however, may result in slow execution.

Slika 18. Računanje korekcionog faktora za radionuklid ^{241}Am programom EFFTRAN

True Coincidence Summing Correction Factors

E [keV]	Correction Factor
Correction factors <i>for the selected nuclide</i>	Store <i>Correction Factors</i>
EU-152	Minimum Energy 50 keV

The calculation always uses the detector model from the "Detector" sheet and the source description from the "Source" sheet. No experimental data are used or required.

The correct use of the calculated correction factors is to multiply the measured peak areas with them.

Gamma-gamma, gamma-X and X-X coincidences are taken into account and the correction factors for X-rays and gamma rays are provided.

The minimum energy is the lowest energy to which the setup (detector + sample) is sensitive. Its value may influence some results quite considerably. Setting it too low, however, may result in slow execution.

Slika 19. Računanje korekcionog faktora za radionuklid ^{152}Eu programom EFFTRAN

*RAČUNANJE KOREKCIJONOG FAKTORA ZA PRAVO KOINCIDENTNO SUMIRANJE POMOĆU
PROGRAMA EFFTRAN*

E [keV]	Fc	E [keV]	Fc	E [keV]	Fc
6	2.034	441	1.270	810	0.995
7	1.957	444	1.521	839	1.607
8	1.274	482	1.635	842	1.636
41	1.490	489	1.714	867	1.687
43	1.174	494	1.500	901	1.161
47	1.451	496	1.112	906	2.027
48	1.465	503	1.395	919	1.524
49	1.071	511	1.195	926	1.655
50	1.167	520	1.389	931	0.668
122	1.421	523	1.641	937	1.406
126	1.781	527	1.150	959	1.568
148	1.552	534	1.244	963	1.269
193	1.420	538	0.473	964	1.402
208	1.941	557	1.870	974	1.136
209	1.475	558	1.244	990	1.425
213	1.721	561	1.126	1005	0.423
239	1.605	563	1.694	1086	1.091
245	1.640	564	1.480	1090	1.151
252	1.616	566	0.679	1109	0.969
270	1.358	572	1.561	1112	1.335
271	1.509	586	1.274	1171	0.638
275	1.720	616	1.477	1206	0.898
286	0.016	644	1.464	1213	1.652
296	1.710	656	1.717	1250	1.004
315	1.594	665	2.066	1261	0.803
316	2.177	671	1.448	1293	1.062
325	1.275	675	1.903	1299	1.177
329	1.499	679	1.420	1315	1.000
331	1.740	687	1.462	1348	1.093
340	1.968	689	1.350	1364	1.623
344	1.122	703	0.961	1390	1.616
352	1.399	713	1.386	1408	1.350
357	1.818	719	1.699	1458	1.055
368	1.435	728	1.360	1528	1.231
386	1.784	765	1.256	1606	0.720
388	1.399	769	1.600	1608	0.847
411	1.323	779	1.182	1635	0.094
416	1.661	795	1.416	1644	1.000
423	1.619	806	1.428	1647	0.934

Tabela 4. Odgovarajuće energije i korekcijski faktori za radionuklid ^{152}Eu računati programom EFFTRAN (boldovani su prikazane one vrednosti energije i odgovarajući korekcijski faktori koji su korišteni u ovom eksperimentalnom radu)

RAČUNANJE KOREKCIIONOG FAKTORA ZA PRAVO KOINCIDENTNO SUMIRANJE POMOĆU PROGRAMA EFFTRAN

Slika 20. Računanje korekcionog faktora za radionuklid ^{109}Cd programom EFFTRAN

Slika 21. Računanje korekcionog faktora za radionuklid ^{139}Ce programom EFFTRAN

RAČUNANJE KOREKCIIONOG FAKTORA ZA PRAVO KOINCIDENTNO SUMIRANJE POMOĆU PROGRAMA EFFTRAN

Slika 22. Računanje korekcionog faktora za radionuklid ^{113}Sn programom EFFTRAN

Slika 23. Računanje korekcionog faktora za radionuklid ^{88}Y programom EFFTRAN

*RAČUNANJE KOREKCIJONOG FAKTORA ZA PRAVO KOINCIDENTNO SUMIRANJE POMOĆU
PROGRAMA EFFTRAN*

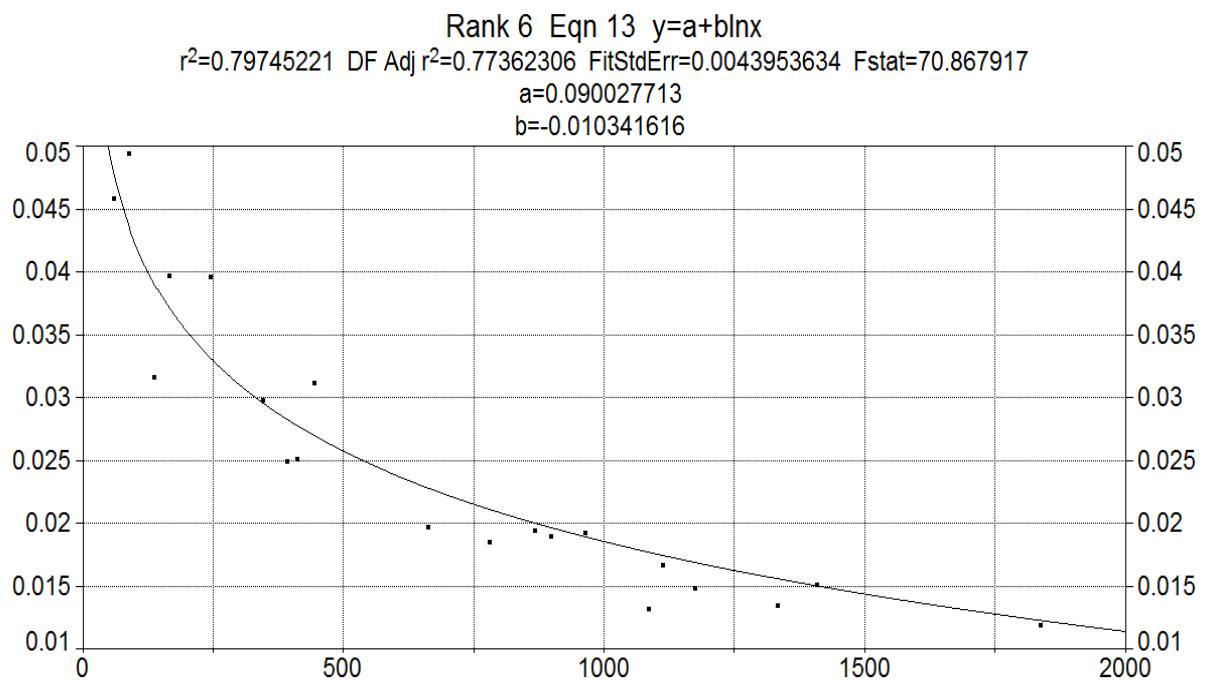
7.3 Rezultati merenja nakon računanja korekcionog faktora numeričkim programom EFFTRAN

Tabela 4. prikazuje dobijene efikasnosti nakon računanja korekcionog faktora korišćenjem softvera EFFTRAN. Naime, dobijene efikasnosti su rezultat množenja predhodno dobijenih eksperimentalnih efikasnosti sa izračunatim korekcionim faktorom. Grafik prikazan na slici 28, predstavlja korigovanu krivu efikasnosti za koju je uzet u obzir efekat pravog koincidentnog sumiranja.

E [keV]	Fc	ε^*	$\Delta\varepsilon^*$
59.5409 (^{241}Am)	1.010	0.0459	0.0006
88.0336 (^{109}Cd)	1.044	0.0495	0.0007
136.4736 (^{57}Co)	0.958	0.0317	0.0024
165.8575 (^{139}Ce)	1.139	0.0398	0.0015
244.6874 (^{152}Eu)	1.640	0.0397	0.0023
344.2785 (^{152}Eu)	1.122	0.0299	0.0005
391.698 (^{113}Sn)	1.047	0.0250	0.0009
411.1165 (^{152}Eu)	1.323	0.0252	0.0029
443.965 (^{152}Eu)	1.521	0.0312	0.0031
661.657 (^{137}Cs)	1.000	0.0198	0.0003
778.9045 (^{152}Eu)	1.182	0.0186	0.0005
867.380 (^{152}Eu)	1.687	0.0195	0.0023
898.042 (^{88}Y)	1.231	0.0190	0.0006
964.079 (^{152}Eu)	1.402	0.0193	0.0007
1085.837 (^{152}Eu)	1.091	0.0133	0.0004
1112.076 (^{152}Eu)	1.335	0.0167	0.0005
1173.228 (^{60}Co)	1.134	0.0149	0.0002
1332.492 (^{60}Co)	1.138	0.0135	0.0002
1408.013 (^{152}Eu)	1.350	0.0152	0.0004
1836.070 (^{88}Y)	1.243	0.0120	0.0003

Tabela 5. Računanje efikasnosti nakon izračunatog korekcionog faktora korišćenjem programa EFFTRAN

*RAČUNANJE KOREKCIIONOG FAKTORA ZA PRAVO KOINCIDENTNO SUMIRANJE POMOĆU
PROGRAMA EFFTRAN*



Slika 24. Kriva efikasnosti dobijena nakon primene korekcija na pravo koincidentno sumiranje

**POREDENJE EFIKASNOSTI DOBIJENE EKSPERIMENTALNO I NAKON RAČUNANJA
KOREKCIIONOG FAKTORA**

**8. POREĐENJE EFIKASNOSTI DOBIJENE EKSPERIMENTALNO I
NAKON RAČUNANJA KOREKCIIONOG FAKTORA**

U tabeli 5 prikazano je poređenje dobijenih vrednosti za efikasnost koja je dobijena eksperimentalno i efikasnost koja je dobijena računanjem korekcionog faktora.

E [keV]	ε (bez korekcije)	ε^* (sa korekcijom)	$\frac{\varepsilon^* - \varepsilon}{\varepsilon^*} * 100\%$
59.5409 (^{241}Am)	0.0455	0.0459	0.9
88.0336 (^{109}Cd)	0.0474	0.0495	4.2
136.4736 (^{57}Co)	0.0330	0.0317	- 4.1
165.8575 (^{139}Ce)	0.0349	0.0398	12.3
244.6874 (^{152}Eu)	0.0242	0.0397	39.0
344.2785 (^{152}Eu)	0.0266	0.0299	11.0
391.698 (^{113}Sn)	0.0239	0.0250	4.4
411.1165 (^{152}Eu)	0.0191	0.0252	24.2
443.965 (^{152}Eu)	0.0201	0.0312	35.6
661.657 (^{137}Cs)	0.0198	0.0198	0
778.9045 (^{152}Eu)	0.0158	0.0186	15.1
867.380 (^{152}Eu)	0.0115	0.0195	41.0
898.042 (^{88}Y)	0.0154	0.0190	18.9
964.079 (^{152}Eu)	0.0137	0.0193	29.0
1085.837 (^{152}Eu)	0.0122	0.0133	8.3
1112.076 (^{152}Eu)	0.0125	0.0167	25.1
1173.228 (^{60}Co)	0.0132	0.0149	11.4
1332.492 (^{60}Co)	0.0119	0.0135	11.9
1408.013 (^{152}Eu)	0.0112	0.0152	26.3
1836.070 (^{88}Y)	0.0097	0.0120	19.2

Tabela 6. Poređenje dobijenih vrednosti za efikasnost bez i sa korekcijom na pravo koincidentno sumiranje

9. ZAKLJUČAK

Pokazali smo značaj efekta pravog koincidentnog sumiranja kada su u pitanju voluminozni cilindrični izvori. Utvrđeno je da je pomenuti efekat najizraženiji za ^{152}Eu , za koji se korekcije na koincidentno sumiranje kreću i do 41%. Za ^{88}Y korekcija na koincidentno sumiranje se kreće oko 19%, za ^{139}Ce 12%, za ^{60}Co 11%, za ^{109}Cd i ^{113}Sn oko 4%, za ^{57}Co -4%, dok za ^{137}Cs ne postoji korekcija na pravo koincidentno sumiranje.

Dobijeni rezultati pokazuju neophodnost uzimanja u obzir efekata pravog koincidentnog sumiranja prilikom kalibracije efikasnosti HPGe detektora.

Iako savremeni softveri za akviziciju i obradu gama spektara omogućuju uključenje pomenutog efekta pri kalibraciji detektora, pokazuje se da korišteni softverski paket EFFTRAN ima prednost u smislu jednostavnosti korišćenja, broja radionuklida koji su obuhvaćeni mogućnošću korekcija, kao i preciznim zadavanjem geometrije i matrice izvora, i unošenjem detaljnih podataka o detektoru.

Korekcija rezultata je naročito važna u slučaju detektora proširenog mernog opsega koji imaju tanak prozor od berilijuma ili karbonskih vlakana (kakav je detektor korišten u ovom radu). Dodatne korekcije na koincidentno sumiranje, koje nisu razmatrane u ovom radu odnose se na efekte slučajnih koïncidencija, a koje su značajne prilikom visokih brzina brojanja detektora, odnosno u slučaju izvora visokih aktivnosti.

LITERATURA

- Burcham, W.E., *Nuklearna fizika – uvod (sa fizikom čestica)*, Naučna knjiga, Beograd (1974)
- Leo, W.R., *Tehniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Springer – Verlag, Berlin Heidelberg, New York (1994)
- N. Jovančević, M. Papuga, *Efficiency of HPGe Detectors in Gamma Spectroscopy*, Novi Sad, 2008
- V. Peyres, E. Garcia-Torano, *Efficiency calibration of an extended-range Ge detector by a detailed Monte Carlo simulation*, Spain 2007
- Semkow, T., Mehmood, G.Parekh, P.Virgil, M.,1990. *Coincedence Summing in Gamma-Ray Spectroscopy*. Elsevier Science Publisher B.V.
- Sima, O., Arnold, D. *Accurate computation of coincidence summing corrections in low level gamma-ray spectrometry*. Applied Radiation and Isotopes (2000)
- Morel, J., Chauvent, B., Kadachi, A., *Coincidence-summing Corrections in Gamma-ray Spectrometry for Normalized Geometries*. Pergamon Press, Great Britain
- Krmar M., *Uvod u nuklearnu fiziku*, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad, 2013
- D. Karamanis, *Efficiency simulation of HPGe and Si(Li) detectors in γ - and X- ray spectroscopy*, Greece, 2003
- *Gamma and X-Ray Detection*, Canberra Catalog, Canberra Industries (2010)
- Tomas Nemes, *Uticaj efekta pravog koincidentnog sumiranja na efikasnost poluprovodničkih gama spektrometara*, Univerzitet u Novom Sadu, 2005
- Tatjana Pivnički, *Određivanje efikasnosti HPGe detektora u niskoenergetskom opsegu*, Univerzitet u Novom Sadu, 2012
- Ivan Budinčević, *Kalibracija efikasnosti germanijumskog detektora i poređenje eksperimentalnih rezultata sa rezultatima dobijenim programskim paketom Geant-4*, Univerzitet u Novom Sadu, 2010
- Tim Vidmar, *EFFTRAN – A Monte Carlo efficiency transfer code for gamma-ray spectrometry*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2005

BIOGRAFIJA

Anja Bartula je rođena 09.08.1994. godine u Sokocu. Osnovnu školu i gimnaziju „Sveti Vasilije Ostroški“, završila je takođe u Sokocu. Po završetku gimnazije, 2013. godine upisuje Prirodno-matematički fakultet u Novom Sadu, smer profesor fizike, koji završava 2017. godine. Iste godine, upisuje master akademske studije nuklearne fizike.



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

<i>Redni broj:</i>	
RBR	
<i>Identifikacioni broj:</i>	
IBR	
<i>Tip dokumentacije:</i>	Monografska dokumentacija
TD	
<i>Tip zapisa:</i>	Tekstualni štampani materijal
TZ	
<i>Vrstna rada:</i>	Master rad
VR	
<i>Autor:</i>	Anja Bartula
AU	
<i>Mentor:</i>	Prof. dr Dušan Mrđa
MN	
<i>Naslov rada:</i>	Korekcije krive efikasnosti HPGe detektora usled pravog koincidentnog sumiranja programom EFFTRAN
NR	
<i>Jezik publikacije:</i>	Srpski (latinica)
JP	
<i>Jezik izvoda:</i>	Srpski/engleski
JI	
<i>Zemlja publikovanja:</i>	Republika Srbija
ZP	
<i>Uže geografsko područje:</i>	Vojvodina
UGP	
<i>Godina:</i>	2018
GO	
<i>Izdavač:</i>	Autorski reprint
IZ	
<i>Mesto i adresa:</i>	Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
MA	
<i>Fizički opis rada:</i>	9 poglavlja/41 strana/6 tabela/24 slika/14 referenci
FO	
<i>Naučna oblast:</i>	Fizika
NO	
<i>Naučna disciplina:</i>	Nuklearna fizika
ND	

<i>Predmetna odrednica/ ključne reči:</i>	HPGe detektori, kalibracija efikasnosti, koincidentno sumiranje
PO	
UDK	
<i>Čuva se:</i>	Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu
ČU	
<i>Važna napomena:</i>	Nema
VN	
<i>Izvod:</i>	Cilj ovog rada je poređenje eksperimentalne kalibracije efikasnosti sa rezultatima za efikasnost dobijena nakon računanja korekcionog faktora programom EFFTRAN
IZ	
<i>Datum prihvatanja teme od NN veća:</i>	26.11.2018.
DP	
<i>Datum odbrane:</i>	30.11.2018.
DO	
<i>Članovi komisije:</i>	
KO	
<i>Predsednik:</i>	dr Kristina Bikit-Šreder, naučni saradnik
<i>član:</i>	dr Dušan Mrđa, redovni profesor
<i>član:</i>	dr Igor Savić, vanredni profesor

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

<i>Accession number:</i>	
ANO	
<i>Identification number:</i>	
INO	
<i>Document type:</i>	Monograph publication
DT	
<i>Type of record:</i>	Textual printed material
TR	
<i>Content code:</i>	Final paper
CC	
<i>Author:</i>	Anja Bartula
AU	
<i>Mentor/comentor:</i>	Dušan Mrđa, Ph.D, full professor
MN	
<i>Title:</i>	Corrections of HPGe detector efficiency curve due to true coincidence summing by program EFFTRAN
TI	
<i>Language of text:</i>	Serbian (Latin)
LT	
<i>Language of abstract:</i>	English
LA	
<i>Country of publication:</i>	Republic of Serbia
CP	
<i>Locality of publication:</i>	Vojvodina
LP	
<i>Publication year:</i>	2018
PY	
<i>Publisher:</i>	Author's reprint
PU	
<i>Publication place:</i>	Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
PP	
<i>Physical description:</i>	9 chapters/41 pages/6 tables/24 pictures/14 literature
PD	
<i>Scientific field:</i>	Physics
SF	
<i>Scientific discipline:</i>	Nuclear Physics
SD	

<i>Subject/ Key words:</i>	HPGe detectors, calibration of efficiency, coincident summing
SKW	
UC	
<i>Holding data:</i>	Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4
HD	
<i>Note:</i>	None
N	
<i>Abstract:</i>	The aim of this paper is to compare the experimental calibration of efficiency with the detection efficiency results obtained after the correction factor calculation with EFFTRAN
AB	
<i>Accepted by the Scientific Board:</i>	26.11.2018. god.
ASB	
<i>Defended on:</i>	30.11.2018. god.
DE	
<i>Thesis defend board:</i>	
DB	
<i>President:</i>	dr Kristina Bikit – Šreder, research associate
<i>Member:</i>	dr Dušan Mrđa, full professor
<i>Member:</i>	dr Igor Savić, associate professor