



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



**KOMPARATIVNA ANALIZA SVOJSTAVA OLOVNIH ZAŠTITA
ZA GAMA-SPEKTROMETRIJU**

-DIPLOMSKI RAD-

Mentor:
Dušan Mrđa

Kandidat:
Marija Voštinar

Novi Sad 2010.

SADRŽAJ:

Uvod	3
1. Gama zraci	4
2. Interakcija fotona sa materijom	5
2.1 Fotoefekat	5
2.2 Komptonovo rasejanje	6
2.3 Stvaranje para	7
2.4 Atenuacija fotona.....	7
3. Interakcija neutrona.....	8
4. Detektori	9
4.1. Scintilacioni detektori.....	9
4.1.1. NaI (Tl) detektor.....	9
4.2. Poluprovodnički detektori	10
4.2.1. Ge-detektor.....	11
5. Komponente fona.....	12
5.1. Gama zračenje iz okruženja u kome se nalazi detektor.....	12
5.2. Radioaktivnost u konstrukcionim materijalima detektora.....	14
5.3. Radionečistoće u materijalu štita.....	15
5.4. Kosmičko zračenje.....	16
5.5. Radon i njegovi potomci.....	16
6. Eksperimentalni rezultati	18
6.1. Opis detektora i detektorskih zaštita korišćenih u eksperimentu	18
6.1.1. Detektor relativne efikasnosti 32%	18
6.1.2. Detektor relativne efikasnosti 100%	19
6.2. Snimljeni spektri.....	20
6.2.1. Detektor relativne efikasnosti 32%	20
6.2.2. Detektor relativne efikasnosti 100%	26
6.3. Ispitivanje svojstava olovnih zaštita detektora.....	32
6.3.1. Olovna zaštita detektora relativne efikasnosti 32%	32
6.3.2. Olovna zaštita detektora relativne efikasnosti 100%	33
6.3.3. Upoređivanje kvaliteta zaštite detektora relativne efikasnosti 32% i 100%	36
Zaključak	41
Literatura	42
Biografija	43

Uvod

Ge detektor će čak i u odsustvu radioaktivnog izvora detektovati izvesne događaje. Ovi događaji predstavljaju fon i prevashodno su posledica prirodnih radioaktivnih elemenata koji se nalaze u okruženju detektora u vazduhu, podlozi, građevinskim materijalima, pa čak i samim materijalima od kojih je izgrađen detektor.

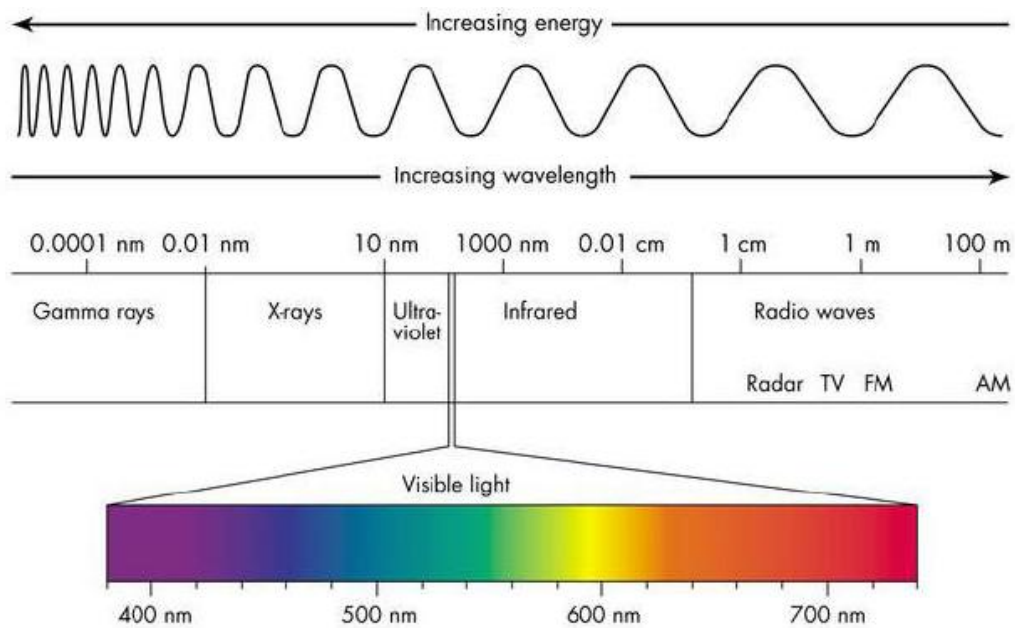
Prirodna radioaktivnost potiče iz tri radioaktivna niza U^{238} , U^{235} i Th^{232} , i iz K^{40} , a deo fona potiče i od kosmičkog zračenja, i interakcije kosmičkih neutrona sa materijom (n, γ) i (n, n') (neutroni mogu interagovati sa štitom detektora kao i samim detektorom generišući gama zračenje).

Prilikom izgradnje detektora biraju se takvi materijali koji su što je moguće manje kontaminirani. Radi zaštite detektora od nepoželjnog fona, detektor se smešta u štit, i ako je moguće postavlja duboko ispod površine Zemlje. Zaštita detektora izrađuje se od različitih materijala velike gustine (olovo, gvožđe). U ovom eksperimentu korišćene su olovne zaštite a detektori se nalaze u površinskoj laboratoriji, korišćena su dva detektora relativnih efikasnosti 32% i 100%.

Cilj eksperimenta je upoređivanje svojstava olovnih zaštita, tj. utvrđivanje koja od njih bolje redukuje fonski doprinos.

1. GAMA ZRACI

Gama zraci su visoko-energetski elektromagnetni talasi, koji nastaju deekscitacijom pobuđenih stanja u jezgrima atoma. Pobuđeno jezgro atoma (potomak) nastaje α ili β raspadom ili kao posledica neke nuklearne reakcije (npr. fisije) nekog drugog jezgra (roditelja/pretk). Za izvor gama zraka obično se uzima jezgro pretka iako γ foton nastaje deekscitacijom jezgra potomka. Pošto fotoni nastaju deekscitacijom jezgra, zaključujemo da fotoni gama zraka imaju tačno određene energije. Ove energije jednake su razlici energija stanja između kojih se vrši prelaz od koje oduzimamo energiju uzmake jezgra (zakon održanja impulsa). Energija uzmake jezgra se u većini slučajeva može zanemariti, zbog vrlo male mase emitovanog fotona, tj. velike mase jezgra. Gama zraci zauzimaju određeno mesto na energetskej elektromagnetnoj skali (što se može videti na slici 1.1.).



Slika 1.1. : Spektar elektromagnetnih zraka

2. INTERAKCIJA FOTONA SA MATERIJOM

Gama fotoni sa supstancijom, tj. sa atomima koji čine datu supstanciju mogu interagovati na različite načine, od kojih su najbitniji fotoelektrični efekat, Komptonovo rasejanje i stvaranje para elektron-pozitron, koje ćemo ukratko objasniti. Svi ovi procesi stvaraju slobodne elektrone koji u supstanciji stvaraju parove jon-elektron ili elektron-šupljina, koji nam služe za detekciju fotona ili određivanje energije fotona.

2.1. Fotoefekat

Fotoelektrični efekat je interakcija fotona sa vezanim elektronom. Foton se u potpunosti apsorbuje, i pod uslovom da ima dovoljnu energiju da raskine vezu elektrona sa jezgrom, izbacuje elektron iz elektronskog omotača. Slobodni elektron odnosi neku količinu energije fotona u vidu svoje kinetičke energije. Zakon održanja energije u ovom slučaju glasi:

$$h\nu = A_i + T_e$$

gde ν predstavlja frekvenciju upadnog fotona, A_i energiju veze elektrona sa jezgrom, T_e je kinetička energija slobodnog elektrona a energija uzmaca jezgra se zanemaruje u većini slučajeva.

Elektron koji je napustio elektronski omotač, ostavio je prazno mesto na nekoj od ljusaka, usled čega dolazi do deekscitacije nekog od elektrona sa viših nivoa, pri čemu se emituje foton ili više fotona, energije koja odgovara energiji X-zraka, ili dolazi do emisije Ožeevih elektrona.

Ukoliko se proces odvija u kompaknoj materiji, verovatno će energija oslobođenog elektrona biti u potpunosti apsorbovana pre izlaska iz materije. Isto će se dogoditi i sa emitovanim X-zracima, odakle sledi da će se u većini slučajeva celokupna energija predati okolnoj materiji. Bitno je naglasiti da je ovaj efekat dominantan na niskim energijama, dok je na visokim gotovo zanemarljiv.

Presek za fotoefekat je teško izračunati zbog kompleksnosti Dirakove talasne funkcije za atomske elektrone. Međutim ovde će biti date neke relacije koje opisuju presek na različitim energijama.

Za nerelativističke energije ($E_\gamma \ll m_e c^2$)

$$\sigma_{pe} = 4\alpha^4 \sqrt{2} Z^5 \varphi_0 \left(\frac{m_e c^2}{E_\gamma} \right)^{\frac{7}{2}}$$

gde je $\varphi_0 = 6,651 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$, a $\alpha = \frac{1}{137}$ (konstanta fine strukture), E_γ je energija upadnog fotona, Z atomski broj jezgra materijala, m_e masa elektrona a c brzina svetlosti u vakuumu.

Za relativističke energije:

$$\sigma_{pe} \approx \frac{Z^5}{7} \frac{1}{(h\nu)^2} \quad \text{za } E_\gamma < m_e c^2$$

$$\sigma_{pe} \approx \frac{Z^5}{h\nu} \quad \text{za } E_\gamma > m_e c^2$$

2.2. Komptonovo rasejanje

Komptonov efekat je interakcija fotona sa slabo vezanim elektronom (slobodnim elektronom), ali za razliku od fotoefekta ovde ne dolazi do potpune apsorpcije upadnog fotona. Efekat se karakteriše činjenicom da dolazi do „sudara“ fotona i elektrona, pri čemu se deo energije fotona preda elektronu. Elektron se rasejava pod nekim uglom, dok se energija upadnog fotona menja za energiju koju je predao elektronu. Foton se takođe rasejava pod nekim uglom. Da bismo opisali ovaj efekat potrebno je da upotrebimo zakon održanja energije i impulsa, usled čega dobijamo da je energija rasejanog elektrona:

$$E_e = E \left[1 - \frac{1}{1 + \varepsilon (1 - \cos\theta)} \right]$$

gde je E_e energija elektrona, $E=h\nu$ energija upadnog fotona, $\varepsilon = \frac{E}{m_0 c^2}$ ($m_0 c^2 = 511 \text{KeV}$,

predstavlja energiju mirovanja elektrona) a θ je ugao pod kojim se rasejava foton. Bitno je naglasiti da za male uglove rasejanja energija elektrona teži nuli, tako da se energija upadnog fotona veoma malo menja. Maksimum energije elektrona iznosi

$$E_e^{\max} = \frac{2\varepsilon}{1 + 2\varepsilon} E$$

i zove se Komptonova ivica.

Bitno je naglasiti da za visokoenergetske fotone može doći do niza Komptonovih efekata u materijalu, tako što svaki rasejani foton izaziva novi Komptonov efekat. Da bi na kraju došlo do fotoelektrične apsorpcije. Približno se presek za Komptonov efekat može prikazati kao

$$\sigma_k \approx \frac{Z}{h\nu}$$

Ukupni presek za Komptonov efekat dobijamo integracijom Klajn-Nišina jednačine po $d\Omega$

$$\sigma_k = 2\pi r_e^2 \left\{ \frac{1 + \varepsilon}{\varepsilon^2} \left[\frac{2(1 + \varepsilon)}{1 + 2\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon} \ln(1 + 2\varepsilon) \right] + \frac{1}{2\varepsilon} \ln(1 + 2\varepsilon) - \frac{1 + 3\varepsilon}{(1 + 2\varepsilon)^2} \right\}$$

2.3. Stvaranje para

Stvaranje para elektron-pozitron (e^-e^+) je efekat koji može da se odigra jedino u prisustvu masivnog jezgra, kada foton koji proizvodi par ima minimum energije od $2m_0c^2 = 1022 \text{ keV}$, što je energija mirovanja 2 elektrona (energije mirovanja elektrona i pozitrona su jednake). Zapravo do stvaranja para dolazi u Kulonovom polju jezgra kada imamo foton dovoljno velike energije. Novonastali par ostatak energije fotona ($E_\gamma - 2m_0c^2$) odnosi u vidu kinetičke energije podeljene na ove dve čestice. Elektron i pozitron se usporavaju u okolnom materijalu. Pozitron će gubiti energiju u materijalu, i kad izgubi svu svoju kinetičku energiju doćiće do anihilacije pozitrona sa nekim elektronom pri čemu će nastati par fotona energije 511 keV , koji će se razleteti pod uglom od 180° zbog zakona održanja impulsa. Ovi fotoni će dalje interagovati sa materijom Komptonovim efektom, i na kraju će doći do fotoelektrične apsorpcije, tj. celokupna kinetička energija pozitrona biće apsorbovana u materiji. Elektron će vršiti jonizaciju materije, i tako gubiti energiju.

Približno se može reći da je presek za stvaranje para $\sigma \approx Z^2$.

Ukupan presek za stvaranje para je dosta komplikovana funkcija koja u slučaju kad nema ekranizacije iznosi

$$\sigma_p = 4Z^2 \alpha r_e^2 \left[\frac{7}{9} \left(\ln \frac{2E_\gamma}{m_e c^2} - f(Z) \right) - \frac{109}{54} \right]$$

dok u slučaju kompletnog ekraniranja iznosi

$$\sigma_p = 4Z^2 \alpha r_e^2 \left[\frac{7}{9} \left(\ln \left(183Z^{-\frac{1}{3}} \right) - f(Z) \right) - \frac{1}{54} \right]$$

gde je α konstanta fine strukture.

2.4. Atenuacija fotona

Atenuacija fotona u materiji može se opisati pomoću linearnog atenuacionog koeficijenta μ , koji predstavlja karakteristiku same materije. Ako posmatramo snop fotona intenziteta I_0 koji pada na neki materijal debljine d , nakon prolaska fotona kroz sloj materije dx intenzitet snopa fotona smanjiće se za dI , što možemo predstaviti kao

$$dI = I(x + dx) - I(x) = -\mu I(x) dx$$

ili posle integracije u granicama $[0, d]$

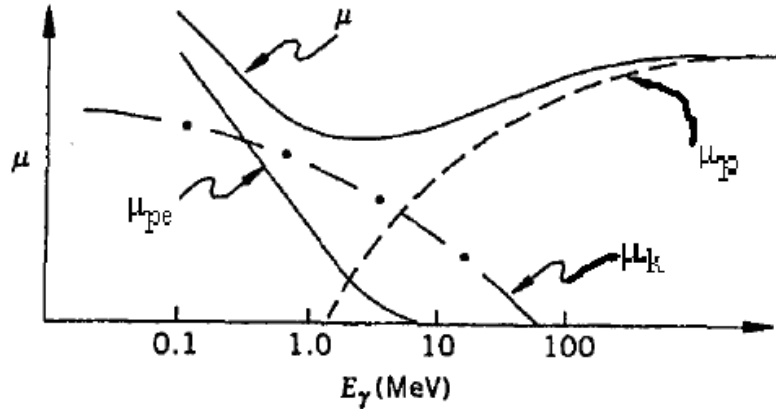
$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

gde je I_0 upadni intenzitet, d debljina materijala, I intenzitet fotona nakon prolaska kroz materijal debljine d a μ linearni atenuacioni koeficijent materijala.

Svi ranije navedeni efekti utiču na smanjenje intenziteta, i njihov kompletan uticaj na intenzitet upadnih fotona prikazan je ovim zakonom. Ukupni linearni atenuacioni

koeficijent može se prikazati kao zbir linearnih atenuacionih koeficijenata za fotoefekat, Komptonov efekat i stvaranje para

$$\mu = \mu_{pe} + \mu_k + \mu_p$$



Slika 2.4.1. : Zavisnost atenuacionih koeficijenata od energije, gde je μ_{pe} koeficijent fotoefekta, μ_k koeficijent koji se odnosi na Komptonov efekat a μ_p koeficijent koji karakteriše stvaranje para

3. INTERAKCIJA NEUTRONA

Neutroni imaju približno istu masu kao i protoni, isti spin, ali su električno neutralni. Zbog svoje neutralnosti ne mogu da interaguju Kulonovom interakcijom, ali interaguju jakim nuklearnom silom.

Kada niskoenergetski (termalni) neutroni interaguju sa materijom, mogu izazvati ekscitaciju jezgara. Ekscitacija se javlja kao posledica zahvata neutrona od strane jezgra. Nakon određenog vremena jezgro se vraća u početno stanje emisijom fotona, i ta interakcija se obeležava kao (n,γ). Emitovani gama zraci detektuju se posredstvom karakterističnih interakcija sa materijom.

Neelastično rasejanje brzih neutrona se takođe može detektovati. Prilikom neelastičnog rasejanja deo kinetičke energije neutrona biva predat jezgru što dovodi do njegovog pobuđivanja i uzmaka. Ovo dalje uzrokuje emisiju energije u vidu gama kvanta, koja nam omogućava da odredimo prisustvo neutrona. Ova interakcija označava se (n, n').

Neutroni se proizvode u interakcijama kosmičkih miona sa materijom i mogu da imaju energije i do nekoliko MeV-a, što znači da ih teško možemo zaustaviti u interakcijama sa materijom.

4. DETEKTORI

Detekcija čestice u smislu njene lokalizacije (u prostoru i vremenu), identifikacije, određivanja njene mase i energije, impulsa, zatim proučavanje sudara i raspada različitih čestica, zavisi od mogućnosti detekcije tih događaja. Detektori predstavljaju više ili manje kompleksne uređaje konstruisane upravo radi detektovanja čestica i njihovih interakcija. U opštem slučaju postoji mnogo različitih detektora, pa iako ni jedan detektor ne može ispuniti sve zahteve, postoje multifunkcionalni detektori koji mogu odrediti dve ili više karakteristika odjednom.

Neki od tipova detektora su:

1. gasni detektori
2. scintilacioni brojači
3. poluprovodnički detektori
4. kalorimetri...

Ovde će biti opisani samo scintilacioni i poluprovodnički detektori. U eksperimentu su korišćeni poluprovodnički Ge detektori, međutim efikasnost Ge detektora izražava se u odnosu na scintilacioni NaI detektor, usled čega će ukratko biti opisan i ovaj tip detektora.

4.1. Scintilacioni detektori

Scintilacioni detektori zasnivaju se na pojavi da prolaskom X i γ zraka, α i β čestica dolazi do pojave luminiscencije u nekim supstancama. Prolaskom ovih zraka i čestica kroz neke vrste supstance (kao što su: cinksulfid, plastični scintilatori, natrijum-jodid...) dolazi do ekscitacije atoma unutar ovih supstanci, nakon čega mora doći do deekscitacije (za oko 10^{-17} s) usled čega se emituje svetlost. Bitno je da posmatrana supstanca bude transparentna za sopstvenu svetlost, inače ne možemo detektovati luminiscenciju.

Scintilacioni detektori sastoje se od luminiscentne supstance (u tečnom, čvrstom ili gasovitom stanju), fotokatode i fotomultiplikatora. Luminiscentna supstanca je obično kristal u kome se jonizujućim zračenjem izaziva pojava svetlosti, koja je vrlo slaba pa se svetlosni signal konvertuje i pojačava u fotomultiplikatoru.

Scintilacione brojače karakteriše:

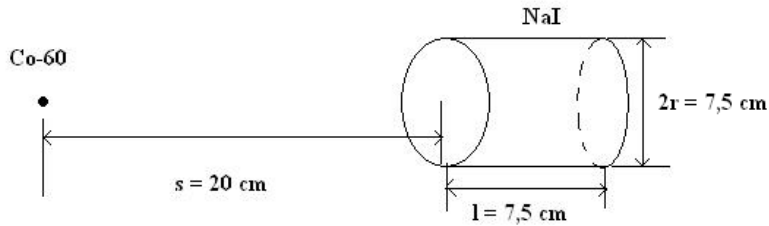
1. velika efikasnost (u odnosu na gasne brojače),
2. velika brzina i kratko vreme razlaganja
3. velika mogućnost izbora geometrijskih formi
4. mogu biti spektrometri čestica, ili spektrometri za određivanje energije nuklearnog zračenja

Nama najznačajniji scintilacioni detektor je NaI (Tl) detektor.

4.1.1. NaI (Tl) detektor

NaI (Tl) spada u scintilacione detektore, koji kao scintilator imaju monokristal NaI sa primesama Tl. NaI je higroskopan, usled čega njegova izolacija mora da poseduje i zaštitu od vlage. Karakteriše ga: dobar efikasni presek (velika verovatnoća za fotoefekat), velika gustina, veliki svetlosni prinos, dugo vreme gorenja (u odnosu na organske scintilacione detektore). Ovaj detektor je široko primenjivan za detekciju i spektrometriju γ zračenja. Njegova efikasnost detekcije je visoka, usled čega se efikasnosti Ge-detektora

upoređuju sa njegovom efikasnošću, tj. na taj način se izračunava relativna efikasnost Ge-detektora. U eksperimentu su korišćeni Ge-detektori relativne efikasnosti 32% i 100%. Relativna efikasnost Ge-detektora u odnosu na efikasnost NaI (Tl) detektora, definisana je za energiju 1332 keV tačkastog izvora Co^{60} postavljenog na 20 cm od kape detektora. Pod ovakvim uslovima (slika 4.1.1.) fotopik eksterna NaI (Tl) detektora dimenzija 7,5 x 7,5 cm (3 x 3 inča) iznosi $\varepsilon = 1,2 \times 10^{-3}$ (ε predstavlja efikasnost detekcije NaI (Tl) detektora).



Slika 4.1.1. : Scintilacioni NaI detektor i tačkasti izvor Co^{60}

4.2. Poluprovodnički detektori

Poluprovodnički detektori funkcionišu na principu pobuđivanja elektrona iz valentne u provodnu zonu materijala detektora kao posledice interakcije upadne čestice sa detektorom. Novonastalo prazno mesto u valentnoj zoni-šupljina, ponaša se kao pozitivno naelektrisanje. U principu, poluprovodnički detektori predstavljaju jonizacione komore u čvrstom stanju, gde se parovi elektron-šupljina ponašaju kao parovi elektron-jon u gasnoj komori. Detektor se proizvodi u obliku diode, tj. predstavlja p-n spoj (akceptorski i donorski poluprovodnik respektivno). Poluprovodnički kristal (dioda) je usendvičen između dve veoma tanke elektrode. Napon se na p-n dovodi tako da imamo inverzno polarisanu diodu, čime povećavamo potencijalnu barijeru, odnosno električno polje u njoj, usled čega imamo veću detekcionu oblast. Pod dejstvom električnog polja dolazi do nagomilavanja elektrona i šupljina na elektrodama generisanim upadnom česticom što daje signal proporcionalan gubitku energije upadne čestice. Bitna karakteristika je da je ovaj signal linearan, tj. proporcionalan je jonizacionom gubitku. Prednost ovih detektora je mogućnost detekcije čestica veoma male energije. Mogućnost detekcije čestica veoma male energije je posledica toga što za proizvodnju ovih detektora koristimo poluprovodničke materijale. Njih karakteriše širina zabranjene zone od oko 1eV, odakle sledi da je za stvaranje para elektron-šupljina dovoljna energija 3-4eV. Kao poluprovodnički materijali se najčešće upotrebljavaju germanijum (Ge) i silicijum (Si). Posledica ovih karakteristika je da se dobri signali dobijaju čak i sa detektorima sačinjenim od veoma tankih pločica Si-kristala, 200-300 μm debljine. Ovi detektori mogu da izmere veoma male udarne parametre, što omogućava određivanje izvora čestice, tj. da li je detektovana čestica nastala nekakvim sudarom, ili radioaktivnim raspadom neke druge čestice.

Dva serijski vezana silicijumska detektora mogu da izmere kinetičku energiju i brzinu bilo koje nisko-energetske čestice ili nuklearnog fragmenta, što omogućava određivanje mase mirovanja date čestice.

Ova vrsta detektora se masovno koristi u nuklearnoj fizici, ali od skora se koristi i u fizici elementarnih čestica (čak i u CERN-u (LHC)).

4.2.1. Germanijumski detektor

Germanijumski detektor spada u poluprovodničke detektore. Širina zabranjene zone Ge kristala iznosi 0,72 eV. Karakteriše ga: velika moć razlaganja, dobra efikasnost (mada zaostaju za scintilacionim detektorima).

Prednost ove vrste detektora je odlična energetska rezolucija i linearnost. Ove karakteristike ih čine idealnim detektorima za γ -spektometriju. Nedostatak je to što je za stvaranje para elektron-šupljina dovoljna mala energija, tako da na sobnim temperaturama imaju veliki šum koji može postojati i bez zračenja, zbog čega se poluprovodnički detektori uvek održavaju na temperaturi tečnog azota.

5. KOMPONENTE FONA

Fon predstavlja ometajuće zračenje iz okruženja detektora, tj. ono zračenje koje otežava ili onemogućava detekciju nama značajnih događaja. Da bismo što više eliminisali nepoželjni fon, detektor se smešta duboko pod Zemlju, ili se konstruiše odgovarajuća zaštita (štit).¹

U ovom poglavlju upoznaćemo se sa uzrocima neželjenog zračenja, tj. fona.

Komponente fona su:

1. Gama zračenje iz okruženja u kojem se nalazi detektor
2. Radioaktivnost u konstrukcionim materijalima detektora
3. Radionečistoće u materijalu štita
4. Kosmičko zračenje
5. Radon i njegovi potomci
6. Neutroni prirodnog porekla

5.1. Gama zračenje iz okruženja u kome se nalazi detektor

Prirodno prisutna radioaktivnost uglavnom potiče iz tri poznata radioaktivna niza čiji su rodonačelnici Th^{232} , U^{238} i U^{235} . Pored ovih nizova, izvori prirodne radioaktivnosti su i K^{40} , V^{50} , Rb^{87} ... Od svih ovih najbitniji je K^{40} koji pored elemenata iz tri niza najviše doprinosi prirodnoj radioaktivnosti. Radioizotopi Th^{232} , U^{238} i U^{235} imaju ekstremno duge periode poluraspada, čak nekoliko redova veličine veće periode poluraspada od njihovih potomaka sa najdužim periodima poluraspada. Ovo uzrokuje sekularnu radioaktivnu ravnotežu pri kojoj je aktivnost svakog potomka jednaka aktivnosti rodonačelnika niza. Međutim treba uzeti u obzir i činjenicu da se neki elementi mogu raspadati i drugim kanalima raspada. U tom slučaju je aktivnost novonastalog potomka konstantan deo aktivnosti rodonačelnika niza, i zavisi od verovatnoće raspada pretka po kanalu raspada u kome je potomak nastao. U realnim slučajevima dolazi do narušavanja ravnoteže:

- Th i U mogu biti separisani tokom vremena zbog različite rastvorljivosti i dugog perioda poluraspada, što može uzrokovati neravnotežu svih potomaka Th^{230} u odnosu na U^{238} (tj. aktivnost Th^{230} se razlikuje od aktivnosti U^{234}).
- Hemijska separacija prirodnim putem Ra i U, što dovodi do neravnoteže Ra^{226} u odnosu na U^{238} , čak i u slučaju kad predhodna ravnoteža nije narušena.
- Potpuna ravnoteža između Rn^{222} i U^{238} , se nikako ne može očekivati jer je Rn inertan gas koji u većoj ili manjoj meri emanira iz matrice u kojoj se generiše.

Uranijuma u Zemljinoj kori ima $2,4 \times 10^{-4}\%$, zastupljen je u izotopima:

U^{238} 99,2739% , U^{235} 0,7204% i U^{234} 0,0057%.

Th^{232} je u litosferi zastupljen sa $7,5 \times 10^{-4}\%$, i jedini je izotop Th.

K u Zemljinoj kori ima 2,4%. Ima dva stabilna izotopa, i to K^{39} 93,2581% , K^{41} 6,7302%

¹ U eksperimentu su korišćeni Ge-detektori na površini Zemlje sa Pb-nom zaštitom.

i jedan radioaktivni izotop K^{40} zastupljen sa 0,0117%. K^{40} samo u 10,5% slučajeva emituje gama-kvant energije $E_\gamma = 1460,8$ keV. Ova linija je jedna od najčešće detektovanih linija u gama spektrima.

Neutronska komponenta kosmičkih zraka prouzrokuje nuklearne reakcije u višim slojevima atmosfere, pri čemu nastaju kosmogeni radionukleotidi. Kada oni dospeju u niže slojeve mogu da utiču na fon niskofonskih sistema. Neki kosmogeni radionukleotidi dati su u tabeli 5.1.1.

Radionukleotid	Period poluraspada	Brzina nastajanja [atom/(s × cm ²)]
H^3	12,26 god	0,25
Be^7	53 dana	0,08
Be^{10}	$2,7 \times 10^6$ god	0,05
C^{14}	5760 god	2,5
S^{35}	87,9 god	0,0014
Cl^{36}	38×10^4 god	0,0011
Ar^{39}	270 god	0,0056

Tabela 5.1.1.

U okolini detektora imamo još i fon koji potiče od veštački stvorenih radioizotopa. Ovi radioizotopi su uglavnom produkti fisije i aktivacije, veliki deo potiče od testova nuklearnog oružja u atmosferi a dodatno iznad Evrope od posledica Černobilske katastrofe. Radioizotopi ovog porekla koji se najčešće mogu detektovati su Cs^{137} i Cs^{134} (karakteristike prikazane u tabeli 5.1.2.), pored ovih doprinos fonu daju i Sr^{90} i Y^{90} .

Radionukleotid	Period poluraspada[god]	Tip raspada	Potomak
Cs^{137}	30,17	β^-	Ba^{137}
Cs^{134}	2,06	β^-	Ba^{134}

Tabela 5.1.2.

Na fon utiče sadržaj radionukleotida u zemljištu i građevinskom materijalu koji se ugrađuje u podlogu, zidove i plafon laboratorije.

5.2. Radioaktivnost u konstrukcionim materijalima detektora

Pažljiv izbor konstrukcionih materijala za izgradnju detektora i štita sa niskom radioaktivnom kontaminacijom je preduslov za nizak fonski odbroj. Da bi se odredila koncentracija najverovatnijih kontaminanata u materijalu koristi se gama spektroskopija (nedestruktivan metod), masena spektrometrija ili neutronska aktivaciona analiza. Za većinu materijala najverovatniji kontaminanti su K, Th i U. Prilikom obrade materijala može doći do narušenja radioaktivne ravnoteže za Th i U. Stepenn narušenja ravnoteže nije uvek moguće odrediti na zadovoljavajući način putem gama-spektroskopije, jer samo mali broj potomaka emituje gama zrake značajne energije (intenziteta). Ovo međutim nije veliki problem zato što do uspostavljanja ravnoteže dolazi nakon jako dugog perioda, tako da izmerene vrednosti mogu da posluže pri konstrukciji uređaja. Najbrže uspostavljanje ravnoteže karakteriše Th.

Pažnja se mora posvetiti i β emiterima zbog zakročnog zračenja emitovanog kao posledica interakcije elektrona sa materijom u kome se nalaze β emiteri.

Efekat samoapsorpcije je vrlo izražen kod ispitivanih materijala, naročito kod materijala velike gustine, usled čega se ovaj faktor mora uzeti u obzir kod određivanja koncentracije radionukleotida putem gama-spektrometrije.

Velika pokretljivost Rn^{222} , tj. velika verovatnoća da će Rn^{222} napustiti materijal može uzrokovati netačno određivanje koncentracije Ra^{226} u materijalu.

Posmatračemo sad jedan primer niskofonskog Ge detektora, i pokazati koliko pojedini delovi ovog detektora utiču na fon.

Delovi koji mogu biti najviše kontaminirani su kriosorpcioni materijal i delovi pretpojačavača.

Kao kriosorpcioni materijal se obično koristi aktivni ugalj, koji ima nisku koncentraciju Ra^{226} i K^{40} ukoliko je načinjen od ljuske kokosovog oraha, međutim on je jako skup, tako da se ne koristi u proizvodnji Ge detektora. Uticaj kriosorpcione supstance na fon detektora smanjuje se ugradnjom Pb štita koji zaklanja sam Ge kristal. Najpogodnija je situacija kad osa kristala nema pravac ka kriosorpcionom materijalu.

Delovi pretpojačavača koji utiču na fon su:

- Štampana ploča pretpojačavača koja je izgrađena uglavnom od poliestera pojačanog staklenom vunom koja ukupno sadrži do 20 Bq/kg Ra^{226} , K^{40} i Tl^{208}
- Tranzistori, otpornici i kondenzatori koji sadrže staklene ili keramičke komponente
- FET (field effect transistor) sklop

Delovi detektora izrađeni od bakra nalaze se blizu kristala usled čega bakar mora biti visoke čistoće. Elektrolitički bakar sadrži manje od 100 μ Bq/kg Ra^{226} , K^{40} i Tl^{208} .

Izolacioni materijali (npr. teflon) su takođe locirani blizu kristala, i mogu da sadrže do 1 ppm K^{40} .

Spoljnja kapa detektora proizvodi se od visoko čistog Mg (< 10 mBq/kg Ra^{226} , K^{40} i Tl^{208}), ili od 99,999% čistog Al (gde je sadržaj U i Th < 1 ppb).

Ulazni prozor može biti sagrađen od berilijuma čistoće 99,8% (može sadržati značajan nivo primordijalnih radionukleotida - nekoliko ppm), ili od ugljeno-vlaknastog kompozita, koji je lak, čvrst, i skoro da uopšte nije kontaminiran.²

Mora se obratiti posebna pažnja na površinsku kontaminaciju. Čišćenje pojedinih delova detektora moguće je izvršiti kiselinom ili bazom (bez sadržaja kalijuma), pre sastavljanja. Naravno čišćenje i sastavljanje se obavlja u „clean room“-u.

5.3. Radionečistoće u materijalu štita

Materijali koji su pogodni za izradu zaštite su materijali sa visokim atomskim brojem i niskom sopstvenom radioaktivnošću. Osim retkih metala kao što su volfram i tantal, ima malo elemenata sa ovim karakteristikama:

- Živa (Hg); karakteriše je visoka radiočistoća koja može biti poboljšana ponovljenim destilacijama. Živa se na sobnoj temperaturi nalazi u tečnom stanju što zahteva specijalan kontejner. Relativno je skupa.
- Gvožđe (Fe); relativno jeftino, veliki presek za zahvat neutrona i proizvodnju radioaktivnih jezgara pod dejstvom kosmičkih zraka. Kontaminirano je sa Co^{60} u procesu proizvodnje. Kontaminacija se može izbeći nalaženjem starog gvožđa, gde sadržaj Ra^{226} , Tl^{208} i K^{40} može biti manji od 1 mBq/kg.
- Bakar (Cu); najmanje kontaminiran, ali ima veliki presek za zahvat termalnih neutrona i proizvodnju radioaktivnih jezgara pod dejstvom kosmičkih zraka. Interaguje sa mionima i utiče na povećanje fona, što nije čest slučaj kod materijala višeg rednog broja.
- Olovo (Pb); najčešće upotrebljavan materijal, jeftino, dobre mehaničke karakteristike, veliki redni broj, mali presek za zahvat neutrona, velika sopstvena radioaktivnost. Radioaktivnost je posledica postojanja izotopa Pb^{210} u olovu, kao posledica prisustva U u Pb. U^{238} i Ra^{226} se efikasno separatišu u procesu rafinacije, međutim izotop Pb^{210} se ne može izvući iz olova, tj. odnos $\text{Pb}^{210}/\text{Pb}$ isti je u rudi i u ingotima. Kontaminaciji olova olovom 210 (Pb^{210}) doprinosi i ugalj koji se koristi prilikom proizvodnje olova, jer on sadrži visok procenat urana u sebi. Procesi u kojima se ne koristi ugalj znatno smanjuju kontaminaciju. Danas je dostupno olovo sa koncentracijom aktivnošću manjom od 50 Bq/kg, ali i po ceni 2-3 puta većoj od običnog olova. Postoji proizvodnja olova sa koncentracijom aktivnošću od 5 Bq/kg ili čak od 0,4 Bq/kg, međutim ovo olovo je jako skupo, proizvodi se u malim količinama za elektronsku industriju. Ako izuzmemo Pb^{210} i njegove potomke, prisustvo uranijuma i torijuma u olovu nije utvrđeno, dok su gornje granice za Ra^{226} 0,25-0,29 mBq/kg, Tl^{208} 0,33-0,67 mBq/kg. Pb^{210} raspada se na Bi^{210} i Po^{210} . Gama zraci energije 46,5 keV koji nastaju raspadom Pb^{210} (raspada se β^- raspadom) u većem delu bivaju samoapsorbovani, što u manjoj meri važi i za Po^{210} koji je α emiter, energija njegovih gama zraka je 803 keV. Međutim Bi^{210} emituje elektrone koji

² Korišćen kod detektora na kome je vršen eksperiment

dovode do generisanja zakočnog zračenja, usled čega se emituju X-zraci (redukcija ovih zraka postiže se dodavanjem dodatnog unutrašnjeg zaštitnog sloja od Cu, Cd ili Sn). Prosečna koncentracija Pb^{210} u Pb je 300 Bq/kg (od koncentracije koja je na granici detekcije do 2500 Bq/kg). Postoje metode za redukciju, ali to znatno poskupljuje materijal, drugi način je naći staro olovo (brodovi i vodovodne cevi stari 200 god).³

5.4. Kosmičko zračenje

Fluksevi protona, elektrona, neutrona i miona na nivou mora odnose se kao 1:26:37:111 (fluks protona je $1,7 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Odavde možemo zaključiti da su elementi kosmičkog zračenja koji najviše utiču na fon mioni i neutroni. Što se elektrona, protona i fotona tiče, njihov uticaj na fon je gotovo zanemarljiv. Elektroni i fotoni (meka komponenta) se u velikoj meri apsorbuju u materijalu štita. Intenzitet protona je gotovo zanemarljiv, ali u interakciji sa materijalom oni prouzrokuju stvaranje neutrona. Interakcija kosmičkog zračenja sa materijom uzrokuje pojavu elektronsko-fotonskih pljuskova, proizvodnju novih neutrona, itd. Sve ovo utiče na izmenu odnosa flukseva, a isti efekat izaziva i kontinualno međudejstvo apsorpcije i kreiranja čestica. Uticaj imaju takođe i promene nadmorske visine, geografske širine, ugla u odnosu na pravac ka zenitu, faza Sunčevog ciklusa, itd.

Neutronima indukovani fon posledica je zahvata termalnih neutrona ili neutronske neelastične raseljevanja brzih neutrona (pojava određenih linija zavisi od sastava detektora i štita).

Mioni se usporavaju skoro isključivo putem elektromagnetne interakcije sa materijom kroz koju se kreću. Usled toga dolazi do proizvodnje elektronsko-fotonskih pljuskova duž putanje. Elektroni proizvode nove fotone zakočnim zračenjem. Najznačajniji su fotoni iz elektronsko-fotonskih pljuskova nastalih u štitu, jer oni imaju dovoljnu energiju da stignu do detektora.

5.5. Radon i njegovi potomci

Radon (Rn) ima svoje izotope u sva tri prirodna radioaktivna niza (Th^{232} , U^{238} i U^{235}), usled čega moramo posebnu pažnju posvetiti njemu. Prenosi se vazдушnim i vodenim putem (pre svega Rn^{222} , jer jedini živi dovoljno dugo). Spada u grupu plemenitih gasova. Izotopi Rn dati su u tabeli 5.3.

Niz	Izotop	Period poluraspada
Th^{232}	Rn^{220}	54,5 s
U^{238}	Rn^{222}	3,82 dana
U^{235}	Rn^{219}	3,92 s

Tabela 5.5.1.

³ Zaštita u eksperimentu je olovna.

Rn^{222} ima značajan uticaj na Ge detektor putem produkata sopstvenog raspada Pb^{214} i Bi^{214} , koji su izraziti γ emiteri.

Koncentracija Rn u prostoriji zavisi od:

- vrste građevinskog materijala
- sastava tla na kome se nalazi građevina
- koncentracije Rn u vodovodnoj vodi
- meteoroloških uslova
- ventilacije prostorije

Prosečna koncentracija koja se može očekivati u laboratoriji je oko 50-100 Bq/m³, prostorije sa slabom ventilacijom imaju značajniju koncentraciju. Smanjenje koncentracije postiže se oblaganjem zidova Al-limom, i čestom ventilacijom. Ukoliko dospe u detektor doprinos fonu biće proporcionalan koncentraciji Rn u prostoriji.

6. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

6.1. Opis detektora i detektorskih zaštita korišćenih u eksperimentu

6.1.1. Detektor relativne efikasnosti 32%

Detektor se nalazi u površinskoj laboratoriji departmana za fiziku. Smešten je unutar olovne zaštite debljine zida 12 cm (slika 6.2.). Ovaj štiti je izrađen od starih vodovodnih cevi koje su pretopljene u segmente odgovarajućeg oblika. Unutrašnjost štita obložena je slojem kalaja i potom bakra radi apsorbovanja X fluorescentnog zračenja olova. Radi se dakle o nekomercijalnom štiti izrađenom za potrebe grupe za nuklearnu fiziku. Ukupna masa olovnog štita iznosi 750 kg.

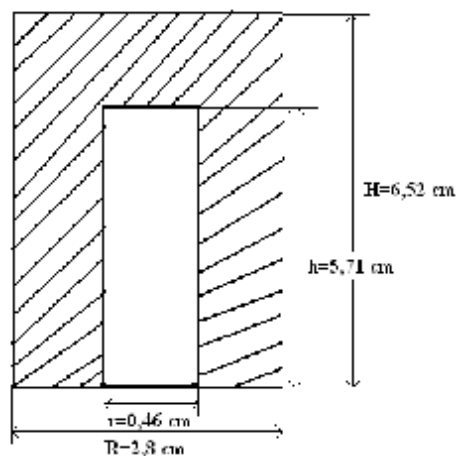
Dimenzije Ge kristala posmatranog detektora

su: $H = 6,52 \text{ cm}$
 $R = 2,8 \text{ cm}$
 $h = 5,71 \text{ cm}$
 $r = 0,46 \text{ cm}$, (slika 6.1.)

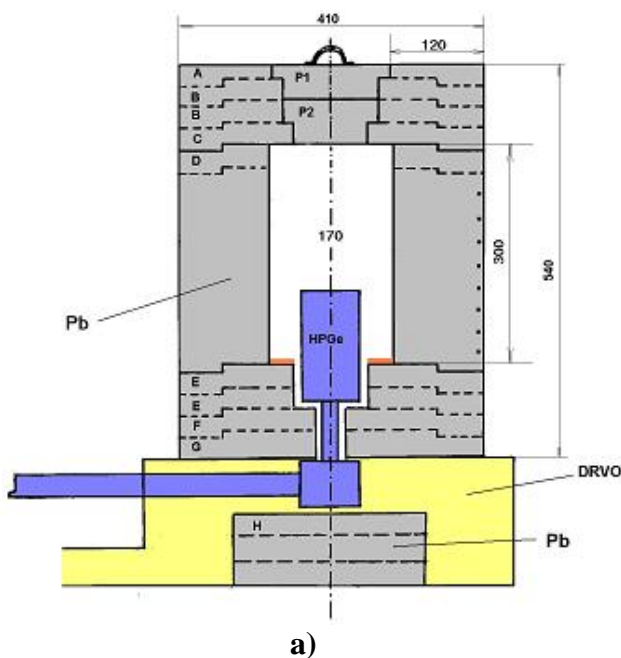
Što znači da aktivna zapremina detektora iznosi

$V_m = 157 \text{ cm}^3$, dok je masa kristala detektora

$m_m = 0,835 \text{ kg}$.



Slika 6.1.1. : Izgled Ge kristala detektora



Slika 6.1.2. : a) Poprečni presek Ge detektora relativne efikasnosti 32%, sa odgovarajućom olovnom zaštitom

b) Spoljašnji izgled olovne zaštite detektora

6.1.2. Detektor relativne efikasnosti 100%

Detektor se nalazi u površinskoj laboratoriji departmana za fiziku. Detektor je smešten unutar komercijalnog olovnog štita proizvođača CANBERRA, USA, (slika 6.4.) sa unutrašnjim slojevima kalaja i bakra debljine 1 mm i 1,5 mm respektivno. Štit detektora sastoji se iz dva sloja olova; spoljašnji sloj debljine 125 mm je standardno olovo, dok je unutrašnji sloj, debljine 25 mm, sačinjen od niskofonskog olova sa koncentracijom aktivnosti Pb^{210} od 20 Bq/kg. Unutrašnjost štita „ispira“ se gasovitim azotom iz Dewar-ove posude čime se smanjuje koncentracija radona unutar štita. Masa zaštite iznosi $m_{M\check{S}} = 1633$ kg.

Dimenzije Ge kristala detektora

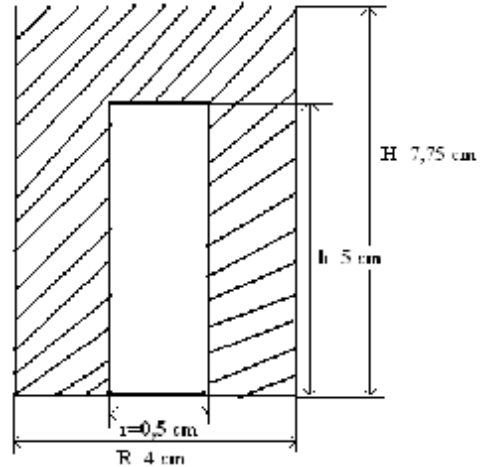
su: $H = 7,75$ cm

$R = 4$ cm

$h = 5$ cm

$r = 0,5$ cm , (slika 6.3.)

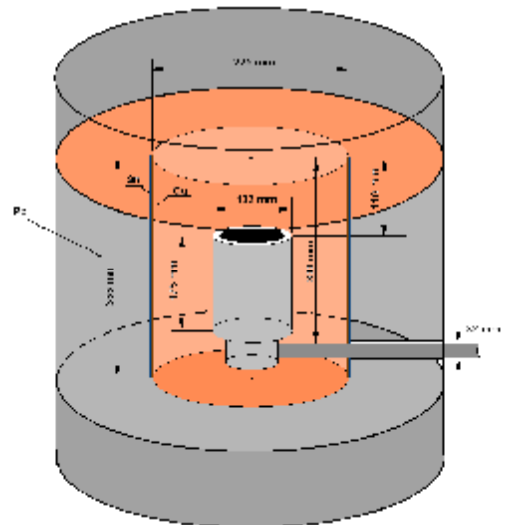
Zapremina detektora iznosi $V_M = 3,86 \times 10^{-4} m^3$, masa iznosi $m_M = 2,053$ kg. Prednji prozor detektora je napravljen od vrlo snažnog ugljeno-vlaknastog kompozita debljine 0,89 mm. Ovo vlakno obezbeđuje prolaznost veću od 85% za fotone energije $E > 15$ keV, dok je prolaznost fotona energije veće od 20 keV približno 100%.



Slika 6.1.3. : Izgled Ge kristala detektora



a)



b)

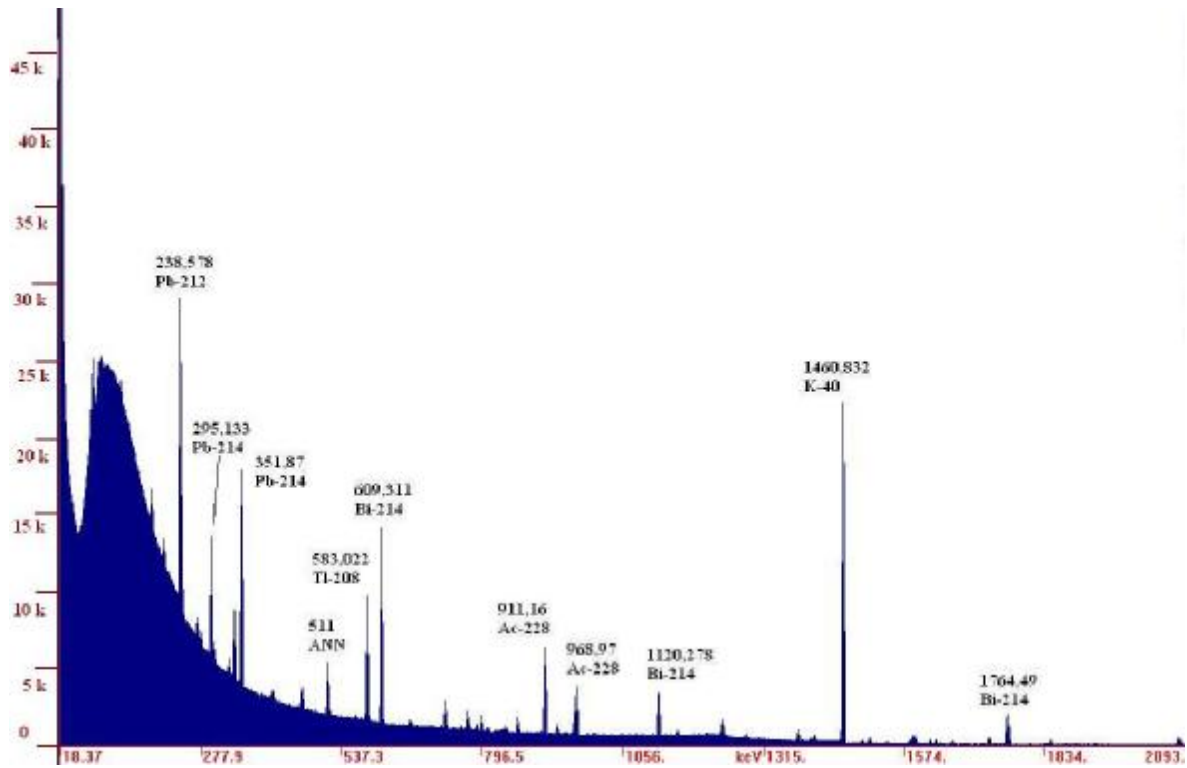
Slika 6.1.4. : a) Izgled detektora relativne efikasnosti 100%, b) poprečni presek detektora u olovnoj zaštiti

6.2. Snimljeni spektri

6.2.1. Detektor relativne efikasnosti 32%

Merenja bez zaštite

U ovom delu smo prikazali snimljeni spektar nezaštićenog detektora relativne efikasnosti 32%, identifikovane gama linije i njihove intenzitete kao i intenzitete određenih kontinualnih delova spektra. Slika 6.2.1. prikazuje spektar snimljen nezaštićenim detektorom relativne efikasnosti 32%, i na njoj su označene neke karakteristične gama-linije. Tabela 6.2.1. prikazuje identifikovane gama linije, njihove energije i radioaktivne izotope koji su odgovorni za njihov nastanak uključujući i verovatnoće emisije (p_γ) u poslednjoj koloni navedene su površine identifikovanih pikova. Tabela 6.2.2. prikazuje intenzitete nekih izdvojenih kontinualnih delova snimljenog spektra (slika 6.2.1.), počev od niskoenergetskog do visokoenergetskog dela fonskog spektra.



Slika 6.2.1. : Spektar snimljen nezaštićenim detektorom relativne efikasnosti 32%

Vreme snimanja spektra $t = 65601$ s

Identifikovane gama linije

Energija [keV]	p_{γ} [10^{-3}]	R_1 [c/s]
74,814 Pb ²¹⁴ /Bi K _{α_2} /U ²³⁸	600 (12)	0,1(13)
76,858 Bi ²¹⁴ /PoK _{α_2} /U ²³⁸	5,8 (3)	0,12(11)
87,190 Pb ²¹⁴ /Bi K _{β_1} /U ²³⁸	38,8(13)	0,06(24)
87,190 Pb ²¹² /Bi K _{β_1} /Th ²³²	62,7(22)	
89,955 Ac ²²⁸ /ThK _{α_2} /Th ²³²	34 (8)	0,03(53)
89,955 ThK _{α_2} /U ²³⁵	33,6 (21)	
92,78 Th ²³⁴ /U ²³⁸	26,9 (5)	0,04(41)
129,03 Ac ²²⁸ /Th ²³²	29 (9)	0,05(26)
185,739 U ²³⁵	0,53 (7) 10 ³	0,09(14)
186,11 Ra ²²⁶ /U ²³⁸	32,8 (7)	
209,39 Ac ²²⁸ /Th ²³²	41 (8)	0,06(16)
238,578 Pb ²¹² /Th ²³²	436 (11)	0,678(16)
241,92 Pb ²¹⁴ /U ²³⁸	74,6 (15)	0,161(64)
240,76 Ra ²²⁴ /Th ²³²	39 (11)	
269,39 Ra ²²³ /U ²³⁵	136 (3)	0,07(14)
277,28 Tl ²⁰⁸ /Th ²³²	24,4 (11)	0,02(36)
295,091 Pb ²¹⁴ /U ²³⁸	192 (4)	0,267(31)
300,070 Pa ²³¹ /U ²³⁵	23,8 (12)	0,05(17)
300,034 Pb ²¹² /Th ²³²	33,4 (10)	
328,07 Ac ²²⁸ /Th ²³²	35 (12)	0,04(16)
338,42 Ac ²²⁸ /Th ²³²	124 (23)	0,155(48)
351,87 Pb ²¹⁴ /U ²³⁸	371 (7)	0,513(17)
463,10 Ac ²²⁸ /Th ²³²	46 (3)	0,055(98)
510,606 Tl ²⁰⁸ /Th ²³²	77,6 (3)	0,227(31)
511 ANN	-	
583,022 Tl ²⁰⁸ /Th ²³²	309 (11)	0,374(17)
609,311 Bi ²¹⁴ /U ²³⁸	461 (5)	0,556(12)
727,25 Bi ²¹² /Th ²³²	66,5 (14)	0,084(49)
768,350 Bi ²¹⁴ /U ²³⁸	48,8 (10)	0,062(62)
795,867 Cs ¹³⁷	854 (4)	0,048(76)

860,30 $\text{Pb}^{208}/\text{Th}^{232}$	43,1 (14)	0,051(77)
911,16 $\text{Ac}^{228}/\text{Th}^{232}$	290 (30)	0,299(16)
964,64 $\text{Ac}^{228}/\text{Th}^{232}$	58 (5)	0,065(53)
968,97 $\text{Ac}^{228}/\text{Th}^{232}$	174 (17)	0,181(22)
1120,273 $\text{Bi}^{214}/\text{U}^{238}$	150 (3)	0,162(25)
1238,317 Co^{56}	670 (13)	0,066(53)
1460,832 K^{40}	106,7 (5)	1,479(7)
1764,490 $\text{Bi}^{214}/\text{U}^{238}$	159 (3)	0,153(18)

Tabela 6.2.1.

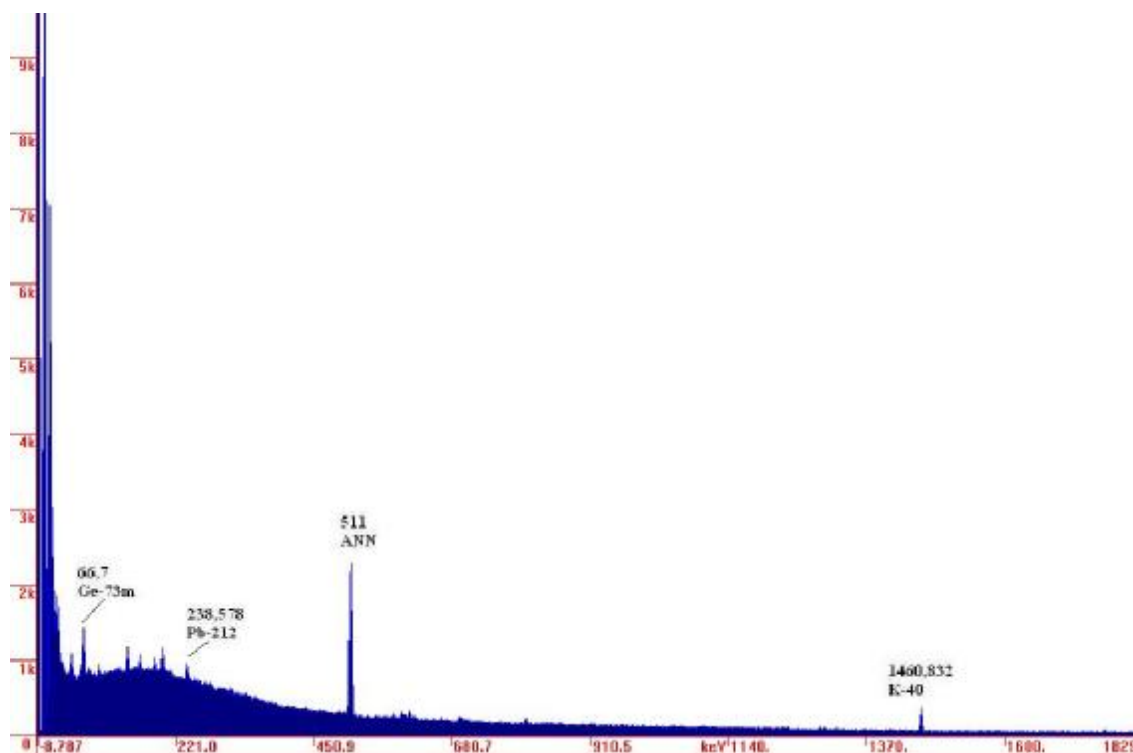
Kontinuumi

Energija [keV]	R_1 [c/s]
25-1800	176,965 Integralna brzina
50-1800	164,792 brojanja
100-120	15,160
200-220	7,156
360-380	2,176
540-560	1,076
730-750	0,664
880-900	0,503
1160-1180	0,392
1350-1370	0,182
1700-1720	0,063

Tabela 6.2.2.

Merenja sa zaštitom

Ovde je prikazan spektar snimljen zaštićenim detektorom relativne efikasnosti 32%, zajedno sa identifikovanim gama linijama i izdvojenim neutronima proizvedenim linijama, kao i intenzitetima nekih kontinualnih delova spektra. Slika 6.2.2. prikazuje spektar snimljen zaštićenim detektorom, sa nekim karakterističnim gama i neutronima indukovanim linijama. Tabela 6.2.3. prikazuje identifikovane gama linije, energije i poreklo tih linija, kao i verovatnoću za emisiju gama kvanta i intenzitete tih linija (površinu identifikovanog pika). Tabela 6.2.4. prikazuje intenzitete nekih kontinualnih delova spektra, dok tabela 6.2.5. prikazuje identifikovane linije usled neutronske interakcije. U ovoj tabeli prikazane su neutronske interakcije koje uzrokuju pojavu detektovanih linija kao i intenziteti datih linija (površina detektovanog pika).



Slika 6.2.2. : Spektar snimljen zaštićenim detektorom relativne efikasnosti 32%

Vreme snimanja spektra $t = 1080726$ s

Identifikovane gama linije

Energija [keV]	p_γ [10^{-3}]	R_1 [10^{-3} c/s]
46,52 $\text{Pb}^{210}/\text{U}^{238}$	40,5	0,78(17)
92,35 $\text{Th}^{234}/\text{U}^{238}$	27,2 (5)	0,20(18)
92,78 $\text{Th}^{234}/\text{U}^{238}$	26,9 (5)	
238,578 $\text{Pb}^{212}/\text{Th}^{232}$	436(11)	0,36(17)
351,87 $\text{Pb}^{214}/\text{U}^{238}$	371 (7)	< 0,26 MDA
511 ANN	-	12,376(33)
1460,832 K^{40}	106,7(5)	1,369(90)

Tabela 6.2.3.

Kontinuumi

Energija [keV]	R_1 [10^{-2} c/s]
25-1800	92,15 Integralna brzina 87,71 brojanja
50-1800	
100-120	3,37
200-220	3,31
360-380	1,83
540-560	0,99
730-750	0,69
880-900	0,55
1160-1180	0,40
1350-1370	0,28
1700-1720	0,19

Tabela 6.2.4.

Neutronima indukovane gama linije

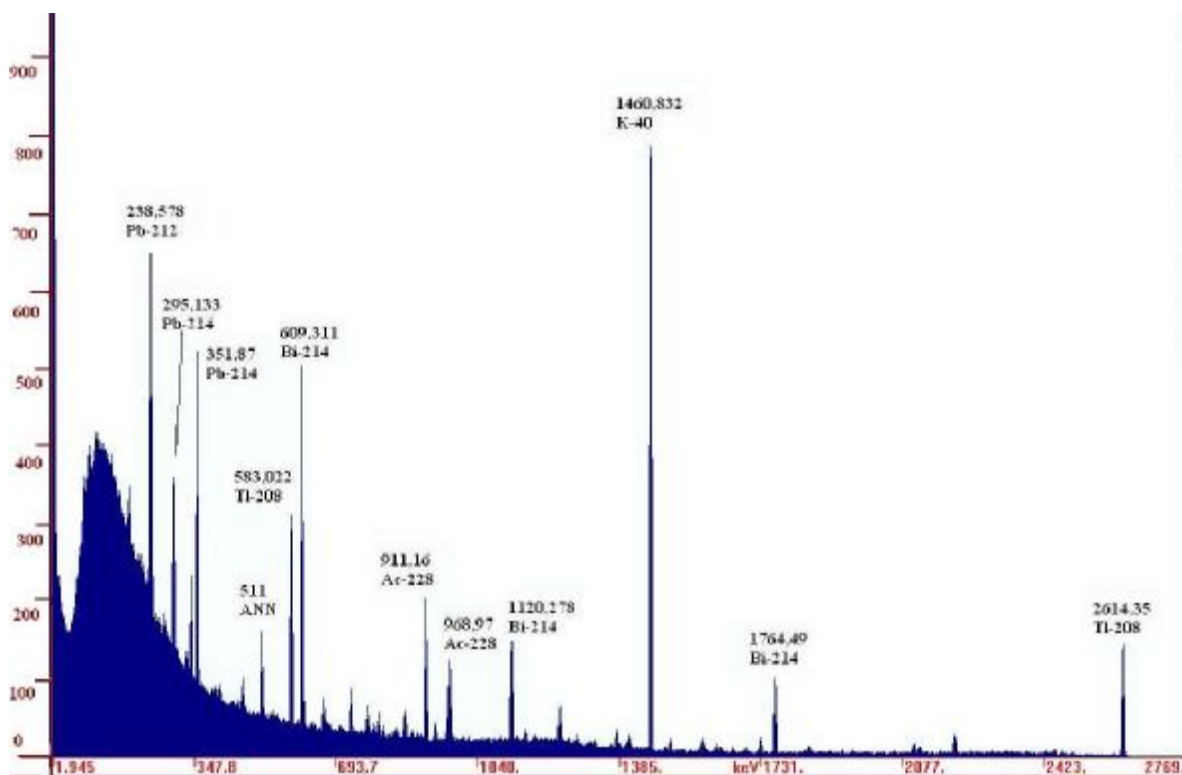
Energija [keV]	Izotop	Reakcija	$R_1 [10^{-3} \text{ c/s}]$
23,5	$\text{Ge}^{71\text{m}}$	$\text{Ge}^{70}(\text{n},\gamma)$, $\text{Ge}^{72}(\text{n},2\text{n})$	1,16(20)
66,7	$\text{Ge}^{73\text{m}}$	$\text{Ge}^{72}(\text{n},\gamma)$, $\text{Ge}^{74}(\text{n},2\text{n})$	1,55(21)
139,5	$\text{Ge}^{75\text{m}}$	$\text{Ge}^{74}(\text{n},\gamma)$, $\text{Ge}^{76}(\text{n},2\text{n})$	0,42(19)
159,5	$\text{Ge}^{77\text{m}}$	$\text{Ge}^{76}(\text{n},\gamma)$	0,45(18)
186	Cu^{66}	$\text{Cu}^{65}(\text{n},\gamma)$	0,44(18)
198,3	$\text{Ge}^{71\text{m}}$	$\text{Ge}^{70}(\text{n},\gamma)$, $\text{Ge}^{72}(\text{n},2\text{n})$	0,54(24)
595,8	Ge^{74*}	$\text{Ge}^{74}(\text{n},\text{n}')$	1,03(16)
691	Ge^{72*}	$\text{Ge}^{72}(\text{n},\text{n}')$	0,41(15)
803,3	Pb^{206*}	$\text{Pb}^{206}(\text{n},\text{n}')$	0,29(10)

Tabela 6.2.5.

6.2.2. Detektor relativne efikasnosti 100%

Merenja bez zaštite

Ovo podpoglavlje obuhvata spektar snimljen nezaštićenim detektorom relativne efikasnosti 100%, kao i detektovane gama linije, i intenzitete određenih kontinualnih delova snimljenog spektra. Slika 6.2.3. prikazuje snimljeni spektar, sa istaknutim karakterističnim gama linijama. Tabela 6.2.6. prikazuje identifikovane gama linije, njihove energije, poreklo, intenzitete linija, i verovatnoće za emitovanje gama kvanta. Tabela 6.2.7. prikazuje intenzitete nekih kontinualnih delova spektra.



Slika 6.2.3. : Spektar snimljen nezaštićenim detektorom relativne efikasnosti 100%

Vreme snimanja spektra $t = 1800$ s

Identifikovane gama linije

Energija [keV]	p_{γ} [10^{-3}]	R_1 [c/s]
185,739 U ²³⁵	0,53 (7) 10^3	0,18(36)
215,75 Th ²²⁸ /Th ²³²	2,77 (7)	0,018 (2,41)
216,24 Ac ²²⁸ /Th ²³²	8 (4)	
238,578 Pb ²¹² /Th ²³²	436 (11)	1,736 (51)
241,92 Pb ²¹⁴ /U ²³⁸	74,6 (15)	0,49(15)
240,76 Ra ²²⁴ /Th ²³²	39 (11)	
295,091 Pb ²¹⁴ /U ²³⁸	192 (4)	0,937(78)
300,070 Pa ²³¹ /U ²³⁵	23,8 (12)	0,14(32)
300,034 Pb ²¹² /Th ²³²	33,4 (10)	
338,42 Ac ²²⁸ /Th ²³²	124 (23)	0,56(11)
351,87 Pb ²¹⁴ /U ²³⁸	371 (7)	1,977(4)
463,10 Ac ²²⁸ /Th ²³²	46 (3)	0,23(19)
463,367 Sb ¹²⁵	104,5(21)	
510,606 Tl ²⁰⁸ /Th ²³²	77,6 (3)	0,576(9)
511 ANN	-	
583,022 Tl ²⁰⁸ /Th ²³²	309 (11)	1,327(41)
609,311 Bi ²¹⁴ /U ²³⁸	461 (5)	2,259(31)
661,660 Ba ¹³⁷ /Cs ¹³⁷	852,1 (5)	0,17(19)
727,25 Bi ²¹² /Th ²³²	66,5 (14)	0,33(11)
768,350 Bi ²¹⁴ /U ²³⁸	48,8 (10)	0,18(18)
795,867 Cs ¹³⁷	854 (4)	0,17(18)
860,30 Tl ²⁰⁸ /Th ²³²	43,1 (14)	0,19(17)
911,16 Ac ²²⁸ /Th ²³²	290 (30)	1,063(51)
934,039 Bi ²¹⁴ /U ²³⁸	31,6 (6)	0,10(23)
966,155 Tb ¹⁶⁰	250 (5)	0,16(19)
968,97 Ac ²²⁸ /Th ²³²	174 (17)	0,643(65)
1120,273 Bi ²¹⁴ /U ²³⁸	150 (3)	0,696(60)
1238,317 Co ⁵⁶	670 (13)	0,24(13)
1377,659 Bi ²¹⁴ /U ²³⁸	40,2 (9)	0,15(16)
1460,832 K ⁴⁰	106,7 (5)	5,689(16)

1764,490 Bi ²¹⁴ /U ²³⁸	159 (3)	0,618(55)
2204,09 Bi ²¹⁴ /U ²³⁸	49,9 (10)	0,216(95)
2614,35 Tl ²⁰⁸ /Th ²³²	997,9 (5)	1,296(34)

Tabela 6.2.6.

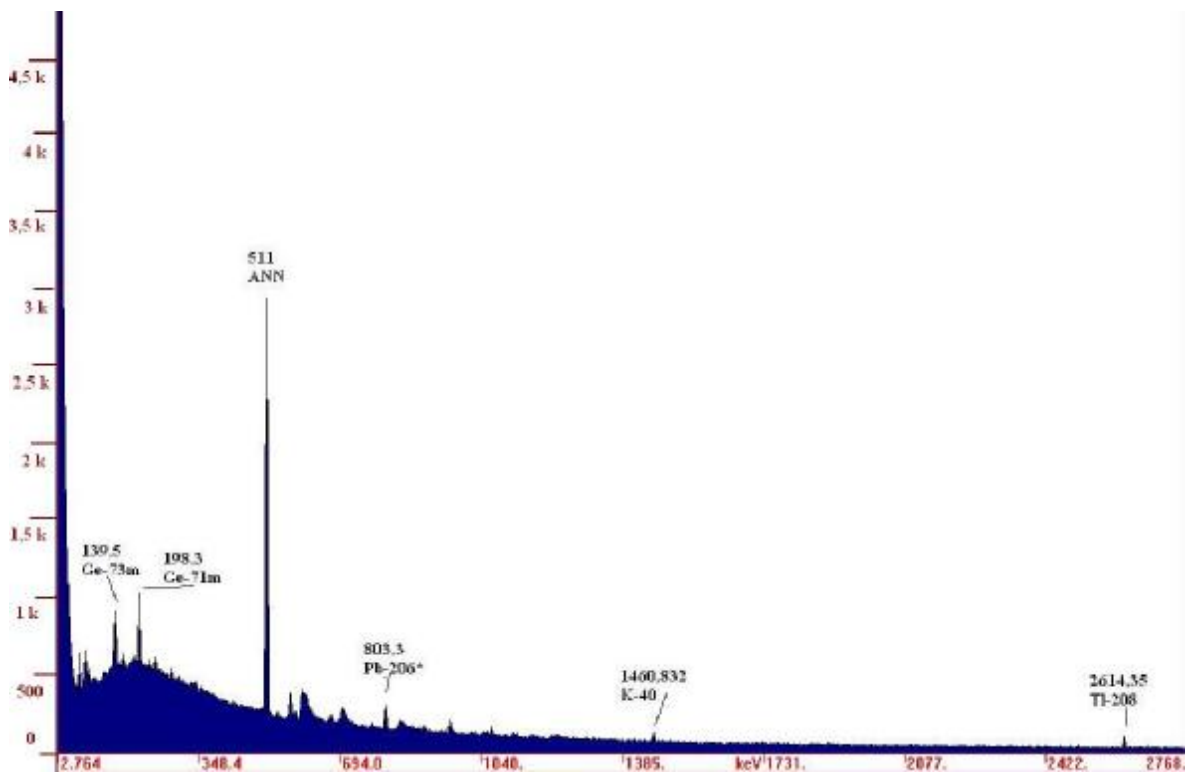
Kontinuumi

Energija [keV]	R ₁ [c/s]
25-2700	348,084
50-2700	336,008 Integralna
25-1800	341,987 brzina
50-1800	329,911 brojanja
100-120	24,138
200-220	14,763
360-380	4,803
540-560	2,472
730-750	1,504
880-900	1,109
1160-1180	0,922
1350-1370	0,447
1700-1720	0,148

Tabela 6.2.7.

Merenja sa zaštitom

Na slici 6.2.4. prikazan je spektar snimljen na zaštićenom detektoru 100% relativne efikasnosti, sa istaknutim karakterističnim gama linijama. Dalje su u tabelama 6.2.8, 6.2.9. i 6.2.10. prikazane identifikovane gama linije i posebno istaknute neutronima generisane linije, kao i intenziteti nekih kontinualnih delova spektra. Tabela 6.2.8. prikazuje identifikovane gama linije sa njihovim intenzitetima, verovatnoćama pojavljivanja i poreklom. Tabela 6.2.9. prikazuje intenzitete određenih kontinualnih delova spektra, dok tabela 6.2.10. prikazuje identifikovane neutronske linije, sa reakcijama u kojima nastaju, i intenzitetima.



Slika 6.2.4. : Spektar snimljen zaštićenim detektorom relativne efikasnosti 100%

Vreme snimanja spektra $t = 1504364$ s

Identifikovane gama linije

Energija [keV]	p_γ [10^{-3}]	R_1 [10^{-3} c/s]
238,578 Pb ²¹² /Th ²³²	436(11)	0,59(17)
351,87 Pb ²¹⁴ /U ²³⁸	371(7)	0,44(14)
511 ANN	-	31,51(31)
569,321 Cs ¹³⁴	154(3)	0,83(11)
1460,832 K ⁴⁰	106,7(5)	0,442(68)
2614,35 Tl ²⁰⁸ /Th ²³²	997,9(5)	0,381(48)

Tabela 6.2.8.

Kontinuumi

Energija [keV]	R_1 [10^{-2} c/s]
25-2700	147,96
50-2700	142,85 Integralna
25-1800	137,16 brzina
50-1800	132,04 brojanja
100-120	3,54
200-220	4,18
360-380	2,76
540-560	1,62
730-750	1,21
880-900	1,04
1160-1180	0,67
1350-1370	0,53
1700-1720	0,37

Tabela 6.2.9.

Neutronima indukovane gama linije

Energija [keV]	Izotop	Reakcija	$R_1 [10^{-3} \text{ c/s}]$
53,4	$\text{Ge}^{73\text{m}}$	$\text{Ge}^{72} (n,\gamma),$ $\text{Ge}^{74} (n,2n)$	1,17(13)
66,7	$\text{Ge}^{73\text{m}}$	$\text{Ge}^{72} (n,\gamma),$ $\text{Ge}^{74} (n,2n)$	1,10(17)
139,5	$\text{Ge}^{75\text{m}}$	$\text{Ge}^{74} (n,\gamma),$ $\text{Ge}^{76} (n,2n)$	1,72(17)
159,5	$\text{Ge}^{77\text{m}}$	$\text{Ge}^{76} (n,\gamma)$	0,47(15)
198,3	$\text{Ge}^{71\text{m}}$	$\text{Ge}^{70} (n,\gamma),$ $\text{Ge}^{72} (n,2n)$	2,51(19)
278,3	Cu^{64*}	$\text{Cu}^{63} (n,\gamma),$ $\text{Cu}^{65} (n,2n)$	0,36(13)
595,8	Ge^{74*}	$\text{Ge}^{74} (n,n')$	10,92(35)
669,6	Cu^{63*}	$\text{Cu}^{63} (n,n')$	0,62(12)
691	Ge^{72*}	$\text{Ge}^{72} (n,n')$	1,97(21)
803,3	Pb^{206*}	$\text{Pb}^{206} (n,n')$	1,17(10)
962,1	Cu^{63*}	$\text{Cu}^{63} (n,n')$	0,501(82)
1063,6	Pb^{207*}	$\text{Pb}^{207} (n,n')$	0,386(81)

Tabela 6.2.10.

6.3. Ispitivanje svojstava olovnih zaštita detektora

6.3.1. Olovna zaštita detektora relativne efikasnosti 32%

Da bismo mogli da odredimo efikasnost detektorske zaštite moramo uporediti intenzitete gama linija snimljenih detektorom bez zaštite i sa zaštitom. Poređenje se može vršiti samo ako su izabrane one gama linije koje se mogu zapaziti u spektru dobijenom merenjem bez zaštite, i u spektru dobijenom merenjem sa zaštitom.

Faktori redukcije nekih gama linija kod detektora relativne efikasnosti 32%

Energija [keV]	Intenzitet [c/s] (detektor bez zaštite)	Intenzitet [10^{-3} c/s] (detektor sa zaštitom)	Faktor redukcije
92,78 Th ²³⁴ /U ²³⁸	0,04(41)	0,20(18)	180
238,578 Pb ²¹² /Th ²³²	0,678(16)	0,36(17)	1910
511 ANN	0,227(31)	12,38(33)	18
1460,832 K ⁴⁰	1,479(70)	1,369(90)	1080

Tabela 6.3.1.

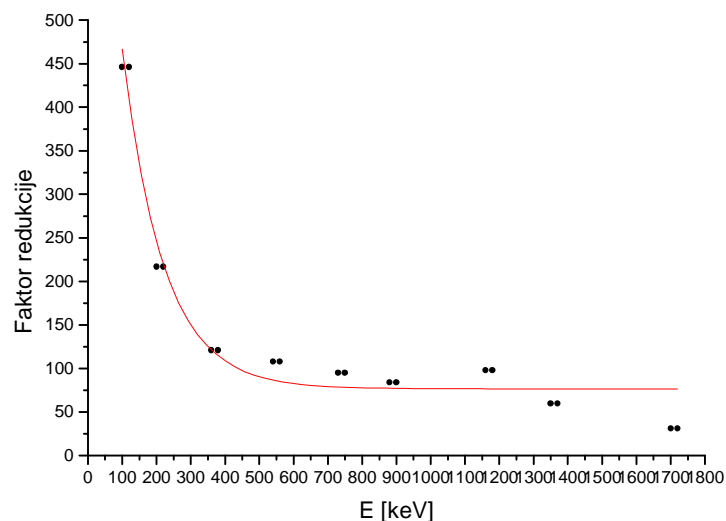
Zapažamo relativno mali faktor redukcije za anihilacionu liniju, odakle možemo zaključiti da je ova linija uzrokovana interakcijom kosmičkog zračenja i materijala zaštite.

Faktori redukcije kontinuuma

Energija [keV]	Intenzitet [c/s] (detektor bez štita)	Intenzitet [10^{-2} c/s] (zaštićen detektor)	Faktor redukcije
25-1800	176,965	92,15	192
50-1800	164,792	87,71	188
100-120	15,160	3,37	446
200-220	7,156	3,31	217
360-380	2,176	1,83	121
540-560	1,076	0,99	108
730-750	0,664	0,69	95
880-900	0,503	0,55	84
1160-1180	0,392	0,40	98
1350-1370	0,182	0,28	60
1700-1720	0,063	0,19	31

Tabela 6.3.2.

Primećujemo relativno visoke, približno iste faktore redukcije za integralne intenzitete spektra, sa počecima na 25 keV i 50 keV. Pritom uočavamo opadanje faktora redukcije sa porastom energije za kontinualne delove spektra (energetski intervali imaju širinu 20keV)

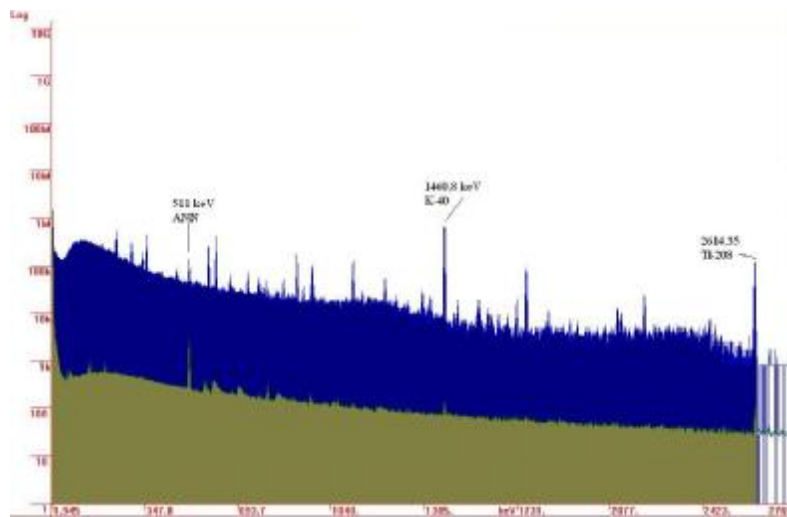


Grafik 6.3.1. : Grafički prikaz faktora redukcije kontinuuma u zavisnosti od energije za detektor relativne efikasnosti 32%

6.3.2. Olovna zaštita detektora relativne efikasnosti 100%

Da bismo mogli da odredimo efikasnost detektorske zaštite moramo uporediti intenzitete gama linija snimljenih detektorom bez zaštite i sa zaštitom. Poređenje se može vršiti samo ako su izabrane one gama linije koje se mogu zapaziti u spektru dobijenom merenjem bez zaštite, i u spektru dobijenom merenjem sa zaštitom.

Spektar koji je sniman ovim detektorom obuhvata spektralnu oblast do oko 2800 keV za razliku od detektora relativne efikasnosti 32%, što je posledica različitog izbora pojačanja za ova dva detektorska sistema.



Slika 6.3.1. : Spektari snimljeni zaštićenim i nezaštićenim detektorom relativne efikasnosti 100%, dati u logaritamskoj skali

Faktori redukcije nekih gama linija kod detektora relativne efikasnosti 100%

Energija [keV]	Intenzitet [c/s] (detektor bez štita)	Intenzitet [10^{-3} c/s] (zaštićen detektor)	Faktor redukcije
238,578 $\text{Pb}^{212}/\text{Th}^{232}$	1,736(51)	0,59(17)	2942
351,87 $\text{Pb}^{214}/\text{U}^{238}$	1,977(4)	0,44(14)	4514
511 ANN	0,576(9)	31,51(31)	18
1460,832 K^{40}	5,689(16)	0,442(68)	12871
2614,35 $\text{TI}^{208}/\text{Th}^{232}$	1,296(34)	0,381(48)	3402

Tabela 6.3.3.

Isto kao i kod prethodnog detektora zapažamo relativno mali faktor redukcije za anihilacionu liniju, odakle možemo zaključiti da je njen osnovni uzrok kosmičko zračenje. Iz tabela 6.3.1. i 6.3.3. se vidi da je faktor redukcije anihilacione linije praktično isti za obe detektorske zaštite. Moramo primetiti da je faktor redukcije za Kalijumovu liniju visok, i znatno veći nego kod detektora relativne efikasnosti 32%.

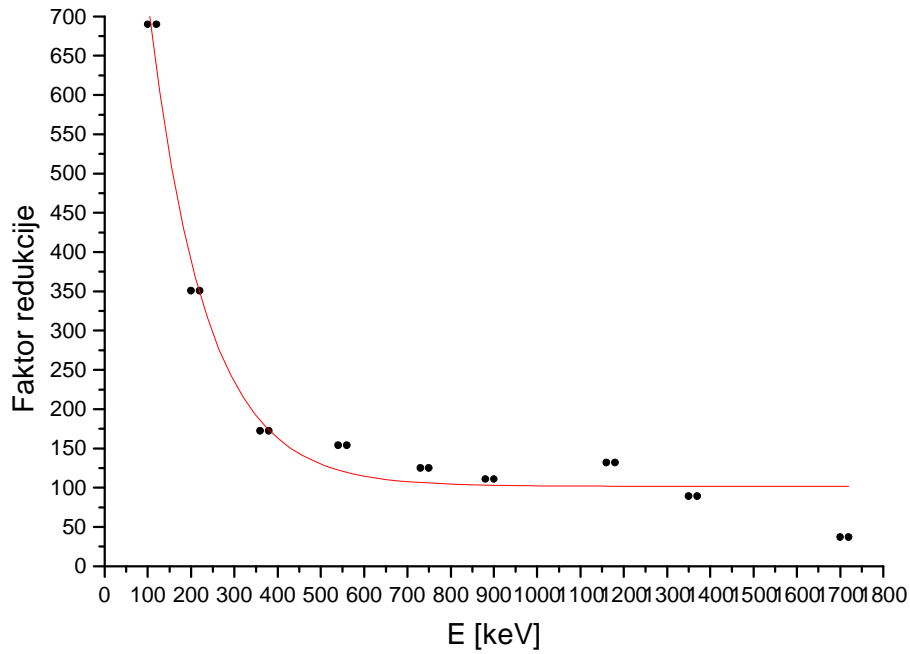
Faktori redukcije kontinuuma

Energija [keV]	Intenzitet [c/s] (detektor bez štita)	Intenzitet [10^{-2} c/s] (zaštićen detektor)	Faktor redukcije
25-2700	348,084	147,96	235
50-2700	336,008	142,85	235
25-1800	341,987	137,16	249
50-1800	329,911	132,04	250
100-120	24,138	3,54	690
200-220	14,763	4,18	351
360-380	4,803	2,76	172
540-560	2,472	1,62	154
730-750	1,504	1,21	125
880-900	1,109	1,04	111
1160-1180	0,922	0,67	132
1350-1370	0,447	0,53	89
1700-1720	0,148	0,37	37

Tabela 6.3.4.

Primećujemo da su faktori redukcije za integralni deo spektra veći u odnosu na faktore redukcije kod detektora relativne efikasnosti 32%.

I ovde se primećuje trend opadanja faktora redukcije sa porastom energije, za kontinualne delove spektra, i takođe su njihove vrednosti veće u odnosu na detektor relativne efikasnosti 32%.



Grafik 6.3.2. : Grafički prikaz faktora redukcije kontinuum u zavisnosti od energije za detektor relativne efikasnosti 100%

6.3.3. Upoređivanje kvaliteta zaštite detektora relativne efikasnosti 32% i 100%

Iz tabele 6.3.5. možemo na prvi pogled zaključiti da je zaštita detektora relativne efikasnosti 32% bolja. Međutim moramo primetiti da prilikom ovog upoređivanja nismo uzeli u obzir mase detektorskih kristala. Naime masa kristala detektora relativne efikasnosti 100% je veća usled čega očekujemo i veće intenzitete detektovanih linija.

Odnosi intenziteta nekih tipičnih gama linija u fonskim spektrima detektora različite efikasnosti

Energija [keV]	Intenzitet [10^{-3} c/s] (zaštićeni detektor 100% efikasnosti)	Intenzitet [10^{-3} c/s] (zaštićeni detektor 32% efikasnosti)	Odnos intenziteta $I_{100\%} / I_{32\%}$
238,578 Pb ²¹²	0,588(174)	0,355(170)	1,66
511 ANN	31,511(306)	12,376(33)	2,55
1460,832 K ⁴⁰	0,442(68)	1,369(90)	0,32

Tabela 6.3.5.

Možemo primetiti da su intenziteti detektovanih kontinuuma u fonskim spektrima približno jednaki (tabela 6.3.6.), što se može i videti iz njihovog odnosa, odakle zaključujemo da je redukcija kontinualnog dela spektra oba detektora približno jednaka, iako u ovoj fazi obrade eksperimentalnih podataka nisu uzimane u obzir mase kristala detektora.

Odnosi intenziteta kontinuuma kod zaštićenih detektora različite efikasnosti

Energija [keV]	Intenzitet [c/s] (zaštićeni detektor 100% efikasnosti)	Intenzitet [c/s] (zaštićeni detektor 32% efikasnosti)	Odnos intenziteta $I_{100\%} / I_{32\%}$
25-1800	1,372	0,921	1,49
50-1800	1,320	0,877	1,51
100-120	0,035	0,034	≈ 1
200-220	0,042	0,033	1,27
360-380	0,028	0,018	1,56
540-560	0,016	0,010	1,6
730-750	0,012	0,007	1,71
880-900	0,010	0,006	1,67
1160-1180	0,007	0,004	1,75
1350-1370	0,005	0,003	1,67
1700-1720	0,004	0,002	2

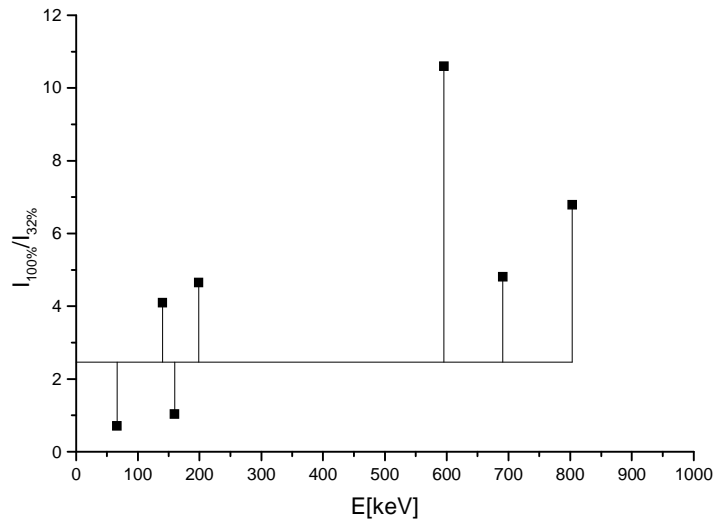
Tabela 6.3.6.

U tabeli 6.3.7. imamo potpuno isti slučaj kao i kod tabele 6.3.5. Veća masa olovne zaštite i veća masa germanijumskog kristala kod detektora relativne efikasnosti 100% uzrokuju i veće intenzitete detektovanih neutronima indukovanih linija u kristalu, što prividno prikazuje zaštitu detektora relativne efikasnosti 32% kao bolju.

Odnosi intenziteta neutronima indukovanih linija kod zaštićenih detektora različite efikasnosti

Energija [keV]	Reakcije	Intenzitet [10^{-3} c/s] (100% efik.)	Intenzitet [10^{-3} c/s] (32% efik.)	$I_{100\%}/I_{32\%}$
66,557	$Ge^{72}(n,\gamma), Ge^{73m}$ $Ge^{74}(n,2n), Ge^{73m}$	1,10	1,55	0,71
139,970	$Ge^{74}(n,\gamma), Ge^{75m}$ $Ge^{76}(n,2n), Ge^{75m}$	1,72	0,42	4,1
159,716	$Ge^{76}(n,\gamma), Ge^{77m}$	0,47	0,45	1,04
198,589	$Ge^{70}(n,\gamma), Ge^{71m}$ $Ge^{72}(n,2n), Ge^{71m}$	2,51	0,54	4,65
595,8	$Ge^{74}(n,n'), Ge^{74*}$	10,92	1,03	10,6
691	$Ge^{72}(n,n'), Ge^{72*}$	1,97	0,41	4,81
803,387	$Pb^{206}(n,n'), Pb^{206*}$	1,97	0,29	6,79

Tabela 6.3.7.



Grafik 6.3.3. : Odnosi intenziteta neutronima indukovanih linija u Ge detektoru relativne efikasnosti 100% i Ge detektora relativne efikasnosti 32%, vrednost 2,46 je odnos zapremina ovih detektora (grafički prikaz tabele 6.3.7.)

Ranije smo videli da masa Ge-kristala detektora relativne efikasnosti 100% iznosi 2,053kg, dok masa Ge-kristala detektora relativne efikasnosti 32% iznosi 0,835 kg. Sada ćemo intenzitete linija snimljenih detektorima relativne efikasnosti 32% i 100% podeliti sa odgovarajućim masama Ge-kristala.

Uzimajući u obzir mase germanijumskih kristala, možemo direktno da vidimo koliki je uticaj olovne zaštite na spektar. Iz tabele vidimo da je detektorska zaštita za detektor relativne efikasnosti 100% bolja osim u slučaju ANN linije, gde su intenziteti gotovo isti. Zaključujemo da je ANN linija prevashodno posledica prisustva kosmičkog zračenja i njegove interakcije sa štitom detektora. Možemo zaključiti da olovna zaštita detektora relativne efikasnosti 100% pokazuje bolje karakteristike sa aspekta redukcije fonskih linija poreklom iz radioaktivnog raspada.

Odnosi intenziteta (obračunatih po jedinici mase germanijumskih kristala) gama linija kod detektora različite efikasnosti

Energija [keV]	Intenzitet [10^{-3} c/s kg] (zaštićeni detektor 100% efikasnosti)	Intenzitet [10^{-3} c/s kg] (zaštićeni detektor 32% efikasnosti)	Odnos intenziteta $I_{m100\%}/I_{m32\%}$
238,578 Pb²¹²	0,286	0,425	0,673
511 ANN	15,349	14,822	1,036
1460,832 K⁴⁰	0,215	1,64	0,131

Tabela 6.3.8.

Odnosi intenziteta (obračunatih po jedinici mase germanijumskih kristala) kontinuuma kod detektora različite efikasnosti

Energija (keV)	Intenzitet [c/s kg] (zaštićeni detektor 100% efikasnosti)	Intenzitet [c/s kg] (zaštićeni detektor 32% efikasnosti)	Odnos intenziteta $I_{m100\%}/I_{m32\%}$
25-1800	0,668	1,104	0,61
50-1800	0,643	1,050	0,61
100-120	0,017	0,040	0,43
200-220	0,020	0,040	0,5
360-380	0,013	0,022	0,59
540-560	0,008	0,012	0,67
730-750	0,006	0,008	0,75
880-900	0,005	0,007	0,71
1169-1180	0,003	0,005	0,6
1350-1370	0,003	0,003	≈ 1
1700-1720	0,002	0,002	≈ 1

Tabela 6.3.9.

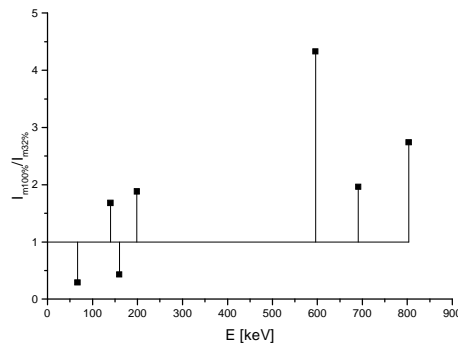
Uzeli smo u obzir masu germanijumskih kristala, odakle možemo da vidimo direktan uticaj štita na posmatrani spektar. Iz tabele 6.3.9. možemo primetiti da je detektorska zaštita detektora relativne efikasnosti 100% kvalitetnija. Dobijeni rezultati bi mogli da ukazuju na veću radiočistoću komercijalnog štita u pogledu sadržaja Pb^{210} , odgovornog za produkciju zakočnog zračenja.

Odnosi intenziteta (obračunatih po jedinici mase germanijumskih kristala) neutronima indukovanih linija kod detektora različite efikasnosti

Energija [keV]	Reakcije	Intenzitet [10^{-3} c/s kg] (100% efik.)	Intenzitet [10^{-3} c/s kg] (32% efik.)	$I_{m100\%}/I_{m32\%}$
66,557	$Ge^{72}(n,\gamma), Ge^{73m}$ $Ge^{74}(n,2n), Ge^{73m}$	0,54	1,86	0,29
139,970	$Ge^{74}(n,\gamma), Ge^{75m}$ $Ge^{76}(n,2n), Ge^{75m}$	0,84	0,50	1,68
159,716	$Ge^{76}(n,\gamma), Ge^{77m}$	0,23	0,54	0,43
198,589	$Ge^{70}(n,\gamma), Ge^{71m}$ $Ge^{72}(n,2n), Ge^{71m}$	1,22	0,65	1,88
595,8	$Ge^{74}(n,n'), Ge^{74*}$	5,32	1,23	4,33
691	$Ge^{72}(n,n'), Ge^{72*}$	0,96	0,49	1,96
803,387	$Pb^{206}(n,n'), Pb^{206*}$	0,96	0,35	2,74

Tabela 6.3.10.

Ovde je takođe uzeta u obzir masa germanijumskih kristala, pa direktno vidimo uticaj olovne zaštite na neutronima indukovane linije. Ono što zapažamo jeste da veća količina olova u okolini detektora uzrokuje veći broj generisanih neutrona u samoj zaštiti, a samim tim i veće intenzitete odgovarajućih gama linija.



Grafik 6.3.4. : Odnosi intenziteta (obračunati po jedinici mase germanijumskih kristala) neutronima indukovanih linija u Ge detektoru relativne efikasnosti 100% i Ge detektoru relativne efikasnosti 32% (grafički prikaz. tabele 6.3.10.)

Kao što smo videli ranije masa štita detektora relativne efikasnosti 100% je 1633 kg, dok masa štita detektora relativne efikasnosti 32% iznosi 750 kg. Odakle možemo izračunati

odnos ovih masa, $\frac{m_{\text{Pb}}^{100\%}}{m_{\text{Pb}}^{32\%}} = 2,18 = K$, pri čemu ćemo ovim faktorom izvršiti korekciju

vrednosti $I_{m32\%}$.

Odnosi intenziteta (po jedinici mase germanijumskih kristala) neutronima indukovanih linija kod detektora različite efikasnosti, gde je intenzitet linija $I_{m32\%}$ za detektor relativne efikasnosti 32% pomnožen faktorom K

Energija [keV]	Reakcije	Intenzitet $I_{m100\%}$ [10^{-3} c/s kg]	Intenzitet $I_{m32\%}$ pomnožen sa faktorom K [10^{-3} c/s kg]	$I_{m100\%}/(I_{m32\%} \times K)$
66,557	$\text{Ge}^{72} (n,\gamma), \text{Ge}^{73m}$ $\text{Ge}^{74} (n,2n), \text{Ge}^{73m}$	0,54	4,05	0,13
139,970	$\text{Ge}^{74} (n,\gamma), \text{Ge}^{75m}$ $\text{Ge}^{76} (n,2n), \text{Ge}^{75m}$	0,84	1,09	0,77
159,716	$\text{Ge}^{76} (n,\gamma), \text{Ge}^{77m}$	0,23	1,18	0,2
198,589	$\text{Ge}^{70} (n,\gamma), \text{Ge}^{71m}$ $\text{Ge}^{72} (n,2n), \text{Ge}^{71m}$	1,22	1,42	0,86
595,8	$\text{Ge}^{74} (n,n'), \text{Ge}^{74*}$	5,32	2,68	1,99
691	$\text{Ge}^{72} (n,n'), \text{Ge}^{72*}$	0,96	1,07	0,9
803,387	$\text{Pb}^{206} (n,n'), \text{Pb}^{206*}$	0,96	0,76	1,26

Tabela 6.3.11.

Dobijeni rezultati bi mogli da ukazuju na izvestan uticaj materijala izvan Pb-zaštite na generisanje neutrona.

ZAKLJUČAK

Posmatrajući eksperimentalne rezultate izvesno je da prilikom upoređivanja kvaliteta detektorskih olovnih zaštita moramo uzeti u obzir i karakteristike samih detektora, odnosno mase Ge-kristala.

Ispitana su svojstva olovnih zaštita za detektore relativne efikasnosti 32% i 100%. Snimanje spektra vršeno je sa detektorskom olovnom zaštitom i bez nje za oba detektora. U podpoglavljima 6.3.1. i 6.3.2. posmatrali smo fonske redukcije nezavisno za obe zaštite. Iz ovih eksperimentalnih rezultata možemo zaključiti da obe detektorske zaštite ispoljavaju iste karakteristike kada je u pitanju intenzitet anihilacione linije. Takođe moramo primetiti da detektorski štiti detektora relativne efikasnosti 100% pokazuje nešto bolje performanse, tj. ima veće faktore redukcije fona od detektorske zaštite detektora relativne efikasnosti 32%.

U podpoglavlju 6.3.3. uporedili smo intenzitete gama linija u fonskim spektrima oba detektora unutar štitovala. Zaključeno je da kad ne uzmemo u obzir karakteristike samih detektora, nismo u mogućnosti da korektno protumačimo dobijene rezultate. Međutim kad uzmemo u obzir činjenicu da je masa germanijumskog kristala detektora relativne efikasnosti 100% znatno veća od odgovarajuće mase Ge-kristala drugog detektora, zaključujemo da detektorski štiti detektora relativne efikasnosti 100% ima bolje performanse. Dalje analize pokazuju da prilikom razmatranja intenziteta neutronima indukovanih linija moramo uzeti u obzir i masu Pb štita detektora, a ne samo masu Ge-kristala. Utvrđeno je da na porast intenziteta ovih linija značajno utiče povećanje mase zaštite. Nakon svega iznetog možemo zaključiti da detektor relativne efikasnosti 100% ima bolje performanse, tj. bolje redukuje fonske događaje, pri čemu ipak treba naglasiti da prisustvo intenzivnih linija indukovanih neutronima u spektru ovog detektora može da predstavlja smetnju prilikom određenih niskofonskih merenja. Iako je zaštita za detektor relativne efikasnosti 32% izrađena od materijala koji nisu bili specijalno namenjeni za dizajniranje niskofonskog gama-spektrometrijskog sistema, ona predstavlja izuzetno dobru osnovu za buduća istraživanja malo verovatnih procesa.

Literatura

1. *Osnove nuklearne fizike* – Lazar Marinkov, Skriptarnica PMF-a, Novi Sad
2. *Gama spektrometrija- specijalne metode i primene* – J. Slivka, I. Bikit, M. Vesković, Lj. Čonkić, Novi Sad 2000.
3. *Introduction to Nuclear and Particle Physics* - Das & Ferbel, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2003.
4. *Principles of Modern Physics* - N. Ashby, S. Miller, Holden-Day Inc. 1970.
5. *An Introduction to nuclear physics* - Greenwood, Cottingham, Cambridge University Press 2001.
6. *Nuclear and Particle Physics – An Introduction* - Brian R. Martin, John Wiley & Sons Ltd. 2006.
7. *First tests of the big volume ultra low background gamma spectrometer* - D. Mrđa, M. Vesković, S. Forkapić, N. Todorović, S. Harissopulus
8. Website - *Wikipedia, the free encyclopedia*

Kratka biografija



Rođena sam 08.03.1986. god. u Pančevu. Završila sam Osnovnu školu „4. Oktobar“ u Glogonju, 2001. godine. Iste god upisala sam Gimnaziju „Uroš Predić“ u Pančevu, koju sam završila 2005. godine. Nakon čega sam (2005. god.) upisala prirodno-matematički fakultet u Novom Sadu, departman za fiziku, smer diplomirani fizičar.

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>Vrsta rada:</i>	Diplomski rad
VR	
<i>Autor:</i>	Marija Voštinar, br. dos. 210/05
AU	
<i>Mentor:</i>	Dr Dušan Mrđa, docent, PMF, Novi Sad
MN	
<i>Naslov rada:</i>	Komparativna analiza svojstava olovnih zaštita za gama spektrometriju
NR	
<i>Jezik publikacije:</i>	srpski (latinica)
JP	
<i>Jezik izvoda:</i>	srpski/engleski
JI	
<i>Zemlja publikovanja:</i>	Srbija
ZP	
<i>Uže geografsko područje:</i>	Vojvodina
UGP	
<i>Godina:</i>	2010
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>	(6/41/8/24/9/9)
FO	
<i>Naučna oblast:</i>	Fizika
NO	
<i>Naučna disciplina:</i>	Nuklearna fizika
ND	
<i>Predmetna odrednica/ključne reči:</i>	Gama spektrometrija, Niskofonsko zračenje, Olovna zaštita Ge-detektora
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>	U eksperimentu su korišćeni Ge-detektori relativne efikasnosti 32% i 100%, sa olovnim zaštitama. Upoređeni su intenziteti niskofonskih gama linija detektora relativne efikasnosti 100% sa odgovarajućim gama linijama snimljenim detektorom relativne efikasnosti 32%. Analizirani su efekti zaštite detektora i veličine Ge-kristala na snimljene gama linije.
IZ	
<i>Datum prihvatanja od NN veća:</i>	31.08.2010.
DP	

Datum odbrane:

23.09.2010.

DO

Članovi komisije:

KO

predsednik:

Dr Ištvan Bikit, redovni profesor, PMF, Novi Sad

član:

Dr Dušan Mrđa, docent, PMF, Novi Sad

član:

Dr Božidar Vujičić, redovni profesor, PMF, Novi Sad

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

Monograph publication

DT

Type of record:

Textual printed material

TR

Content code:

Final paper

CC

Author:

Marija Voštinar, 210/05

AU

Mentor/comentor:

PhD Dušan Mrđa, docent, FCM, Novi Sad

MN

Title:

Comparative analyses of Pb shields characteristics for gamma spectrometry

TI

Language of text:

Serbian (Latinic)

LT

Language of abstract:

English

LA

Country of publication:

Serbia

CP

Locality of publication:

Vojvodina

LP

Publication year:

2010

PY

Publisher:

Author's reprint

PU

Publication place:

Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

PP

Physical description:

(6/41/8/24/9/9)

PD

Scientific field:

Physic

SF

Scientific discipline:

Nuclear physic

SD

Subject/ Key words:

Gamma spectrometry, Background radioactivity, Pb shields of Ge detectors

SKW

UC

Holding data:

Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

HD

Note:

none

N

Abstract:

AB

In the experiment are used: a large volume, 100% relative efficiency, closed-end coaxial, extended range germanium detector, whit Pb shield and 32% relative efficiency germanium detector whit Pb shield. The intensities of neutron and gama induced background lines of the 100% relative efficiency Ge detector are compared whit corresponding intensities in the background spectrum of the 32% relative efficiency Ge detector. Also, there are analyzed effects of the volume of the shields, and the Ge cristals on the intensity of the background spectrum of both detectors.

*Accepted by the Scientific
Board:*

31.08.2010.

ASB

Defended on:

23.09.2010.

DE

Thesis defend board:

DB

President:

PhD Ištvan Bikit, full professor, FCM, Novi Sad

Member:

PhD Dušan Mrđa, docent, FCM, Novi Sad

Member:

PhD Božidar Vujičić, full professor, FCM, Novi Sad