



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Uticaj samoapsorpcije na efikasnost detekcije gama zračenja voluminoznih uzoraka

- Master rad -

Mentor:
prof. dr Miodrag Krmar

Kandidat:
Ivica Patarčić

Novi Sad, 2021

Sadržaj

Uvod	2
1. Radioaktivnost.....	3
1.1 Nukleosinteza	3
1.2 Stabilnost elemenata i njihovih izotopa	4
1.3 Radioaktivni raspad	7
1.4 Vrste zračenja	9
1.5 Interakcija zračenja sa materijom	9
2. Detekcija zračenja	13
2.1 Pojednostavljen model detektora.....	13
2.2 Režimi rada detektora	14
2.3 Energetska rezolucija	14
2.4 Efikasnost	15
2.5 Mrtvo vreme	16
3. Detektori	17
3.1 Scintilacioni detektori.....	17
3.1.1 Tipovi scintilacionih detektora	19
3.2 Gasni (jonizacioni) detektori	21
3.2.1 Tipovi gasnih (jonizacionih) detektora	23
4. Poluprovodnički detektori.....	25
4.1 PN Spoj	26
4.2 Silicijumski detektori	27
4.3 Germanijumski detektori	30
4.3.1 Konfiguracije HPGe detektora.....	32
4.3.2. Atenuacija zračenja i efikasnost detekcije	34
5. Analiza merenja HPGe detektor.....	38
5.1 Rezultati merenja za HPGe detektor.....	42
6. Zaključak.....	51
Literatura	52

Uvod

Najbitniji parametar u gama spektrometriji jeste efikasnost detekcije radioaktivnog zračenja. Ovaj parametar zavisi od broja faktora kao što su tip detektora, geometrija detektora, spektar energije koji se posmatra, itd. Jedan od faktora, koji utiču na efikasnost detekcije uzorka, jeste gustina uzorka koji se meri. Efekat samoapsorpcije, koji se dešava u samom uzorku, ima značajan uticaj na efikasnost detekcije.

U teorijskom delu rada govori se o radioaktivnosti i interakciji zračenja sa materijom, kao i opštim pojmovima vezanim za detektore i detekciju zračenja. Dalje, dat je pregled tipova detektora sa detaljnim opisom HPGe detektora.

U eksperimentalnom delu rada vršeno je merenje voluminoznih izvora zračenja različite gustine na HPGe detektoru, proizvođača CANBERRA. Posmatrana je promena efikasnosti detekcije zračenja u zavisnosti od gustine samog izvora, odnosno uticaj efekta samoapsorpcije na efikasnost detekcije.

1. Radioaktivnost

1.1 Nukleosinteza

Nukleosinteza je proces kojim se stvaraju nova atomska jezgra od već postojećih nukleona (protona i neutrona). Prva jezgra nastala su nekoliko minuta posle Velikog praska, kroz proces koji zovemo nukleosinteza Velikog praska. Približno dvadeset minuta nakon Velikog praska, svemir se toliko ohladio da je ovaj proces zaustavljen, tako da su se odvile samo najjednostavnije i najbrže reakcije nukleosinteze. U datom trenutku svemir se sastojao od 75% vodonika, 24% helijuma i oko 1% drugih elemenata kao što su litijum i izotopi deuterijuma. Svemir i sada ima približno ovaj sastav.

Stelarna nukleosinteza – fuzija je proces gde zvezde u svojim jezgrima spajaju lakše elemente u teže, pri čemu se oslobađa velika količina energije. Što je veća masa zvezde, procesom fuzije nastaju sve teži elementi. U najmasovnijim zvezdama fuzijom nastaju gvožđe i nikl i uglavnom ostaju zarobljeni u jezgrima ovih zvezda. U procesu fuzije lakših elemenata u teže oslobađa se ogromna energija, međutim što su elementi teži oslobođena energija je manja. Fuzija elemenata težih od gvožđa i nikla zahteva apsorpciju energije, tako da ti elementi nastaju u drugim procesima kao što je s-proces.

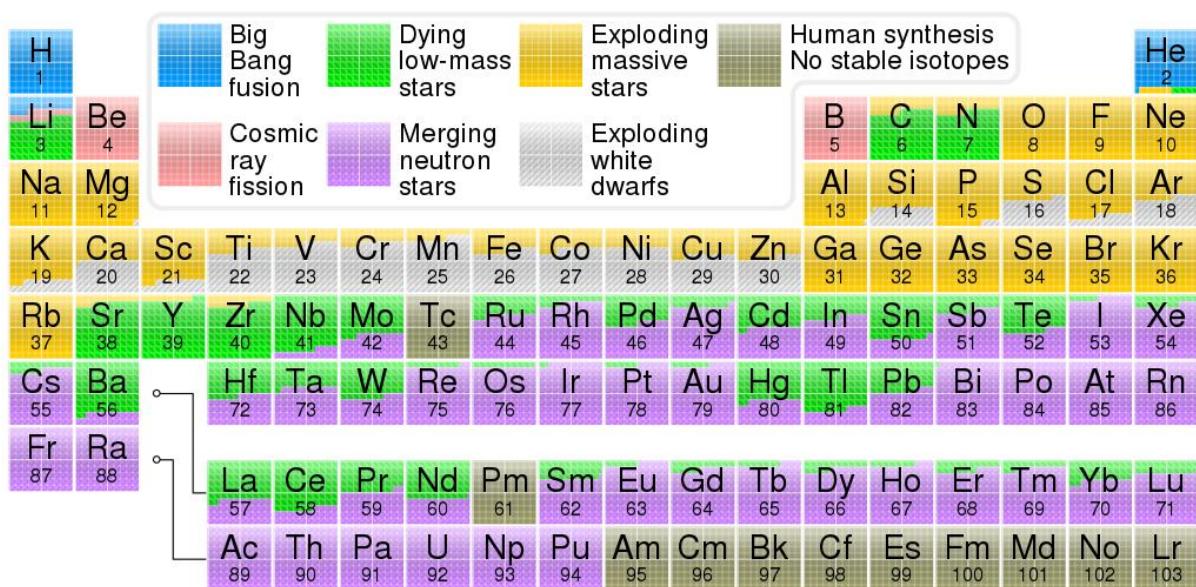
S-proces ili proces apsorpcije sporih neutrona je serija reakcija koje se dešavaju u zvezdama, uglavnom u AGB¹ zvezdama. Tokom s-procesa jezgro apsorbuje neutron i uvećava mu se atomska masa. Ako je novonastalo jezgro stabilno može doći do višestruke apsorpcije neutrona, a ako je nestabilno dolazi do beta raspada i nastanka novog elementa atomskog broja uvećanog za jedan. S-proces je spor jer je potrebno vreme da dođe do radioaktivnog raspada i dalje apsorpcije neutrona.

Nukleosintezom supernove nastaju elementi između kiseonika i rubidijuma, i to kroz izbacivanje elemenata, stvorenih tokom stelarne nukleosinteze, zatim kroz eksplozivnu nukleosintezu za vreme supernova eksplozije i kroz r-procese (višestruku apsorpciju neutrona) tokom eksplozije.

¹ AGB – asymptotic giant branch je deo Herzsprung-Russell ovog dijagrama u kome se nalaze zvezde 0.6-1 mase Sunca u kasnijim stadijumima evolucije. AGB zvezde uveliko vrše fuziju helijuma u ljudi oko jezgra koje čini ugljenik i kiseonik, spoljašnji slojevi su oteklia i dijametar zvezde narastao desetinama puta. Zveda je crveni džin. U AGB fazi zvezde gubi veliki deo svoje mase (50-70%) u formi stelarnog vetra.

Spajanje neutronskih zvezda zaslužno je za sintezu mnogih težih elemenata kroz r-proces². Kada se dve neutronske zvezde spoje, velike količine materije bogate neutronima bivaju izbačene na ekstremno visokim temperaturama. Tokom hlađenja ove izbačene materije formiraju se najteži elementi.

Spalacija kosmičkog zračenja je proces, kojim nastaju mnoga lakša jezgra, pre svega He-3, Be-9 i B-10, B-11, koji ne nastaju u stelarnoj nukleosintezi. U procesu dolazi do fragmentacije težih jezgara usled dejstva kosmičkog zračenja.



Slika 1.1³ Periodni sistem elemenata koji pokazuje poreklo svakog elementa.

1.2 Stabilnost elemenata i njihovih izotopa

Materija nastala u gore navedenim procesima sastoji se od stabilnih i nestabilnih elemenata i njihovih izotopa. Od 94 elementa koji se nalaze u prirodi, oni sa atomskim brojevima od 1 do 82 imaju bar jedan stabilan izotop⁴ (osim tehnecijuma i prometijuma, koji nemaju stabilnih izotopa). Elementi od 83 do 94 su podložni radioaktivnom raspadu. Neki

² Proces apsorpcije brzih neutrona – skup nuklearnih reakcija odgovornih za formiranje pribilžno polovine atomske jezharu težih od gvožđa.

³ <https://en.wikipedia.org/wiki/Nucleosynthesis>

⁴ Izotop smatramo stabilnim ako nije uočen njegov radioaktivni raspad.

od ovih teških elemenata poput uranijuma i bizmuta imaju jedan ili više izotopa, čije je vreme poluraspada toliko dugo, da su preživeli od njihovog nastanka u procesima stelarne nukleosinteze do danas.

Većina (66 od 94) elemenata u prirodi ima više od jednog stabilnog izotopa i svi osim vodonika (izotopi vodonika se drastično razlikuju u masi što dovodi do razlika u hemijskim osobinama) imaju iste hemijske osobine.

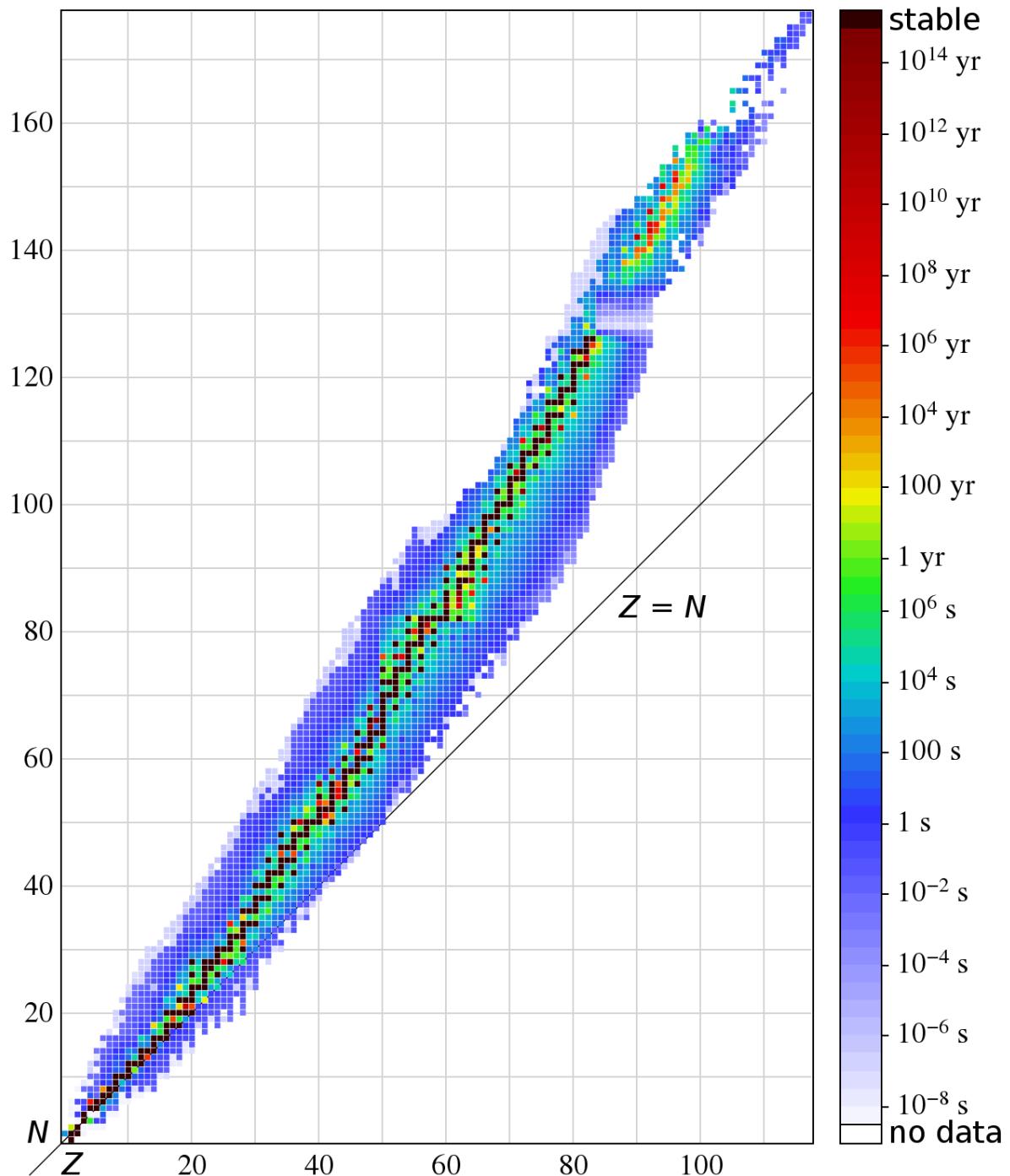
Svi elementi imaju neke izotope koji su nestabilni, odnosno radioaktivni. Oni se obično raspadaju u druge elemente uz emisiju alfa ili beta čestice.

Stabilnost izotopa uslovljena je odnosom broja protona i neutrona, kao i prisustvom određenih magičnih brojeva neutrona ili protona, koji predstavljaju popunjena kvantna stanja, odnosno energetske nivoje, slično energetskim nivoima elektrona u atomu.

Naime, protoni i neutroni nalaze se u nižim energetskim stanjima kada im je broj paran, nego kada je neparan (analogno uparenim elektronima u orbitali). Ovo za rezultat ima najveću stabilnost jezgra kada je broj i protona i neutrona paran (od 252 stabilna izotopa njih 146 ima ovu strukturu). Postoji 48 stabilnih izotopa sa neparnim brojem protona i parnim brojem neutrona (stabilnost potiče od uparenih neutrona). Najmanje ima stabilnih elemenata sa neparnim brojem i protona i neutrona, samo 5.

Magični brojevi u nuklearnoj fizici odnose se na broj protona ili neutrona u popunjenoj energetskoj ljestvici. Ti brojevi su 2, 8, 20, 28, 50, 82 i 126.

Na sledećoj slici prikazani su elemeti sa njihovim izotopima i vremenom poluraspada.



Slika 1.2⁵. Vreme polurasada izotopa. Crni region stabilnih izotopa odvaja se od linije $Z=N$ koja označava jednak broj protona i neutrona sa rastom Atomskog broja Z .

⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_elements_by_stability_of_isotopes

1.3 Radioaktivni raspad

Radioaktivni raspad je spontani proces u kome se nestabilno jezgro oslobađa viška energije emisijom zračenja. Jezgro koje se raspada nazivamo predak, a ono koje nastaje potomak. Ovim procesom se postepeno smanjuje broj atoma radioaktivnog elementa. Razlikujemo:

- Raspadi sa emisijom nukleona:
 - Alfa raspad – emisija alfa čestica (jezgra helijuma)
 - Emisija protona
 - Dvostruka emisija protona
 - Emisija neutrona
 - Dvostruka emisija neutrona
 - Spontana fisija – jezgro se raspada na dva ili više manjih jezgara i drugih čestica
 - Klasterski raspad – jezgro emituje grozd (klaster) nukleona, dakle atomsko jezgro veće od helijuma
- Beta raspadi:
 - Beta negativni raspad – jezgro emituje elektron i antineutrino
 - Beta pozitivni raspad – jezgro emituje pozitron i neutrino
 - Elektronski zahvat – proces u kome jezgro zahvata elektron iz elektronskog omotača, što dovodi do transformacije jednog od protona u neutron i emisije neutrina.
 - Dvostruki beta raspad
 - Dvostruki elektronski zahvat
 - Elektronski zahvat sa emisijom pozitrona – zahvat elektrona uz emisiju pozitrona i dva neutrina
 - Dvostruka emisija pozitrona
- Prelazi među stanjima u istom jezgru
 - Gama raspad prati alfa ili beta raspad. Jezgro nastalo alfa ili beta raspadom obično posle raspada ostaje u pobuđenom stanju i prelazi u niže energetsko stanje emisijom gama fotona.
 - Unutrašnja konverzija – pobuđeno jezgro prenosi energiju orbitalnom elektronu koji biva izbačen iz atoma

Broj raspadnutih jezgara srazmeran je ukupnom broju jezgara (N), vremenu (t) i konstanti raspada, koja karakteriše dati nestabilni element (λ):

$$dN = -\lambda N dt$$

Rešenje ove diferencijalne jednačine je:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Umesto konstante raspada često se koristi vreme poluraspada (T):

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

I predstavlja vreme koje je potrebno da se polovina od početnog broja jezgara raspadne.

Fizička veličina kojom opisujemo brzinu radioaktivnog raspada je aktivnost i predstavlja broj raspada u jednoj sekundi.

$$A = \lambda N$$

Merna jedinica za aktivnost je Bekerel (Bq) - 1Bq je jedan raspad u sekundi. Ranije korišćena jedinica je Kiri $1Ci = 3.7 \times 10^{10} Bq$.

Veličina koja se često koristi je i specifična aktivnost i predstavlja aktivnost po jedinici mase

$$a = \frac{A}{m} \quad \left[\frac{Bq}{kg} \right]$$

Iz zakona radioaktivnog raspada sledi da aktivnost izvora eksponencijalno opada zajedno sa brojem radioaktivnih jezgara.

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

1.4 Vrste zračenja

Zračenje predstavlja emisiju ili transmisiju energije u vidu talasa ili čestica kroz prostor ili materijalnu sredinu, a potiče od atomskih ili nuklearnih procesa. Imamo nekoliko načina kategorizacije, pa razlikujemo:

- Zračenje nanelektrisanih čestica
 - Brzi elektroni – podrazumevamo i beta čestice (elektrone i pozitrone) emitovane prilikom raspada, kao i elektrone nastale bilo kojim drugim procesom.
 - Teške nanelektrisane čestice – sve nanelektrisane čestice sa masom većom od atomske jedinice mase poput protona, alfa čestica, fisionih produkata ili produkata drugih nuklearnih reakcija.
- Zračenje nenanelektrisanih čestica
 - Elektromagnetno zračenje – odnosi se pre svega na X-zračenje, nastalo prilikom preraspodele elektrona i gama zračenje, nastalo energetskim prelazima u jezgru.
 - Neutroni – nastaju u raznim nuklearnim procesima i delimo ih još na brze i spore neutrone.
- Gravitaciono zračenje – javlja se u vidu gravitacionih talasa.

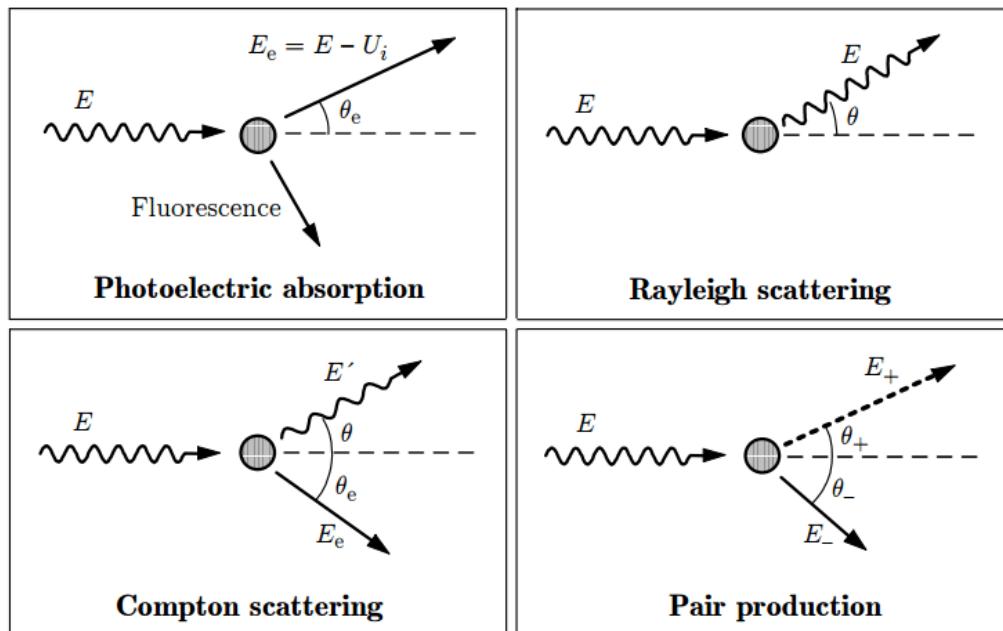
Zračenje delimo još i na ionizujuće i nejonizujuće zračenje u zavisnosti od energije zračenja. Ionizujuće zračenje ima energiju veću od 10eV, što je dovoljno da ionizuje atome i molekule i pokida hemijske veze. Ova podela je jako bitna jer pravi razliku između zračenja koje je štetno za žive organizme i zračenja koje nije štetno.

1.5 Interakcija zračenja sa materijom

Rad bilo kog detektora zračenja u osnovi zavisi od načina na koji zračenje koje detektujemo interaguje sa materijalom samog detektora. Osnovni princip rada svih detektora je da zračenje gubi energiju prolaskom kroz materijal detektora. Ta energija se potom konvertuje u oblik pogodan za merenje. Prema tome da bi se razumeo rad detektora, prvo se mora razumeti priroda interakcije između nekog zračenja i materije.

Teške naelektrisane čestice, poput alfa čestice, interaguju sa materijom putem kulonove sile između njihovog naelektrisanja i naelektrisanja orbitalnih elektrona. Iako dolazi do interakcija sa jezgrom atoma, te interakcije se retko dešavaju. Prilikom interakcije sa elektronima u materiji, teške čestice gube - prenose energiju na elektrone, što se manifestuje u njihovoj ekscitaciji na više energetske nivoje ili njihovom potpunom uklanjanju iz atoma – ionizaciji. Maksimalna energija, koju teška čestica može predati elektronu u jednom sudaru iznosi $4E \frac{m_0}{m}$. Pošto je ovo mali deo ukupne energije teške čestice, dolazi do velikog broja sudara – interakcija. Domet teške čestice zavisi od njene energije i vrste materijala apsorbera.

Brzi elektroni gube energiju sporije od teških čestica, pa su i njihova prodornost i domet u materiji veći. Takođe dolazi do backscattering-a, elektron može da se odbije i vратi nazad i da ne preda energiju u apsorber. Ovi elektroni uopšte ne budu detektovani. Pozitroni se prilikom prolaska kroz materiju ponašaju identično kao elektroni, do njihovog zaustavljanja, kada dolazi do anihilacije.



Slika 1.4⁶. Procesi interakcije zračenja sa materijom

⁶ https://www.researchgate.net/figure/Four-electromagnetic-radiation-interaction-processes-with-matter-Obtained-from-20_fig1_325298919

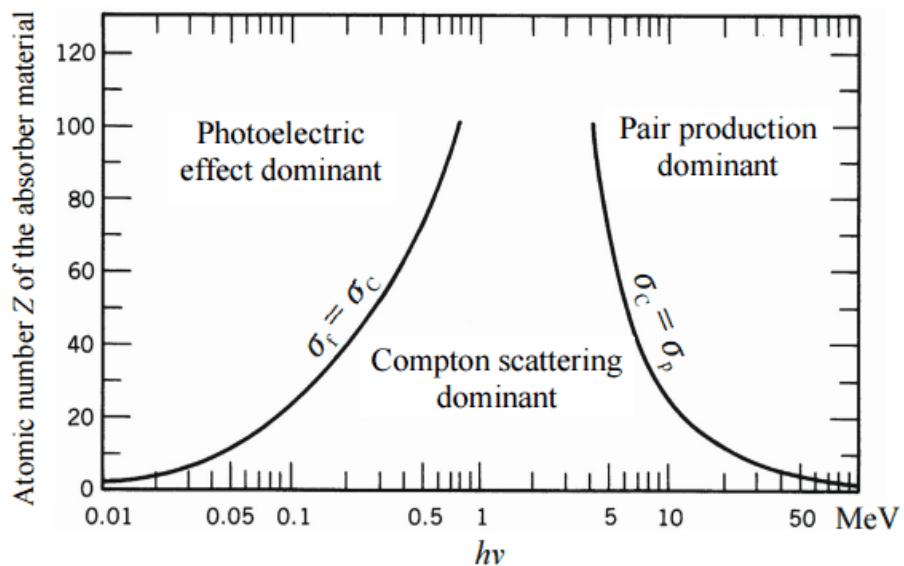
Interakcija gama zračenja sa materijom se svodi na tri dominantna procesa (iako postoji veliki broj mogućih mehanizama interakcije), koja imaju glavnu ulogu u merenjima zračenja. To su fotoelektrična apsorpcija, komptonovo rasejanje i produkcija parova. Svi ovi procesi vode ka delimičnom ili potpunom transferu energije gama zračenja na elektrone.

Prilikom *fotoelektrične apsorpcije* foton interaguje sa atomom i u potpunosti nestaje. Pri tome energija apsorbovanog fotona se prenosi na neki od elektrona, koji biva izbačen iz atoma. Do ove interakcije dolazi samo sa atomom, što isključuje slobodne elektrone. Pored emisije fotoelektrona ova interakcija dovodi i do stvaranja pozitivnog jona. Ovaj proces dominira kada su u pitanju gama fotoni nižih energija ili X-zraci. Takođe ovaj proces je više zastupljen kod elemenata sa većim atomskim brojem.

Komptonovo rasejanje je dominantni mehanizam interakcije za gama fotone, koje emituju tipični radionuklidi. Pri ovome procesu upadni gama foton biva rasejan pod nekim uglom u odnosu na prvobitni pravac prostiranja. Foton prenosi deo svoje energije na elektron. Zbog proizvoljnosti ugla rasejanja i spektar energije elektrona varira od nule do velikog dela energije gama fotona. Verovatnoća procesa zavisi od broja dostupnih elektrona, pa se prema tome linearno povećava sa atomskim brojem.

Do *stvaranja parova* može da dođe samo ako je energija gama fotona dva puta veća od energije mirovanja elektrona – 1.02 MeV. U praktičnom smislu verovatnoća interakcije je jako niska, sve dok se energija gama fotona ne približi nekoliko MeV. Do ove interakcije dolazi u kulanovom polju jezgra i pri tome gama foton nestaje i biva zamenjen parom elektron - pozitron.

Verovatnoća stvaranja parova raste približno sa kvadratom atomskog broja apsorbera i veoma brzo raste sa porastom energije upadnih gama fotona.



Slika 1.5.⁷ Zastupljenost tri dominantna procesa interakcije zračenja sa materijom.

Neutronsko zračenje poput gama zračenja nema nanelektrisanje i zbog toga ne stupa u kulonovu interakciju. Usled toga neutroni mogu da prođu kroz centimetre materije bez bilo kakve interakcije, zbog čega su praktično nevidljivi za detektore normalne veličine. Ako dođe do interakcije, onda je to sa nekim jezgrom atoma apsorbera. U slučaju interakcije, neutron može u potpunosti nestati – biti zamenjen sa jednim ili više sekundarnih zračenja ili energija i pravac kretanja neutrona bivaju znatno promenjeni. Sekundarno zračenje su skoro uvek teške nanelektrisane čestice. Ove čestice nastaju kao rezultat nuklearnih reakcija iniciranih neutronima ili mogu biti jezgra apsorberi neutrona, koja su u sudarima sa neutronima dobila energiju. Većina neutronskih detektora oslanja se na neki vid konverzije upadnog neutrona u sekundarne nanelektrisane čestice, koje se mogu direktno detektovati. Verovatnoća detekcije putem različitih interakcija neutrona sa materijom drastično se menja sa energijom neutrona, te ih stoga delimo na brze (zbog velike energije neutrona detekcija se svodi na uzmakla jezgra u sudaru sa neutronima) i spore neutrone (detekcija se oslanja na rasejanje neutrona i nuklearne reakcije, indukovane upadnim neutronima).

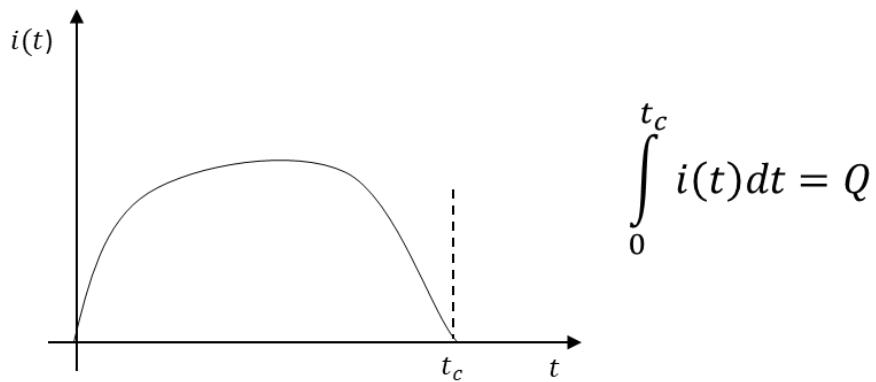
⁷ Glenn F. Knoll, Radiation Detection and Measurement

2. Detekcija zračenja

2.1 Pojednostavljen model detektora

Da bi došlo do detekcije nekog vida zračenja mora prvo doći do interakcije tog zračenja sa materijom detektora. Vreme interakcije je vrlo kratko, tako da deponovanje energije zračenja u materijalu možemo smatrati trenutnim. Rezultat interakcije u širokom spektru detektora, je neko slobodno nanelektrisanje u aktivnoj zapremini detektora. Prepostavimo da se kao rezultat interakcije kvanta zračenja i aktivne zapremine detektora pojavilo slobodno nanelektrisanje Q . Ovo nanelektrisanje potrebno je pokupiti. Prikupljanje nanelektrisanja postiže se generisanjem električnog polja unutar detektora, koje dovodi do pomeranja slobodnih nanelektrisanja prema elektrodama. Vreme potrebno da se prikupi neko nanelektrisanje jako varira od mobilnosti nosilaca nanelektrisanja i konstrukcije i tipa detektora. Prikupljanjem slobodnih nanelektrisanja na elektrodama dobijamo signal, koji se kasnije na određeni način obrađuje.

Ako posmatramo reakciju detektora na jedan kvant zračenja, vidimo da je ta reakcija struja, koja teče sve vreme dok se prikuplja nanelektrisanje, koje je taj kvant zračenja stvorio.



Slika 2.1 Integral vremenskog perioda proticanja struje.

Integral vremenskog perioda proticanja struje mora biti jednak Q , ukupnoj količini nanelektrisanja, koju je konkretna interakcija sa zračenjem stvorila.

U praktičnom smislu radi se o mnogo kvanta zračenja, koji će reagovati sa aktivnom zapreminom detektora u nekom vremenskom periodu. Ako je fluks zračenja veliki, može se desiti da se u nekom vremenskom intervalu pojavi struja nastala interakcijom višestrukih kvanta zračenja.

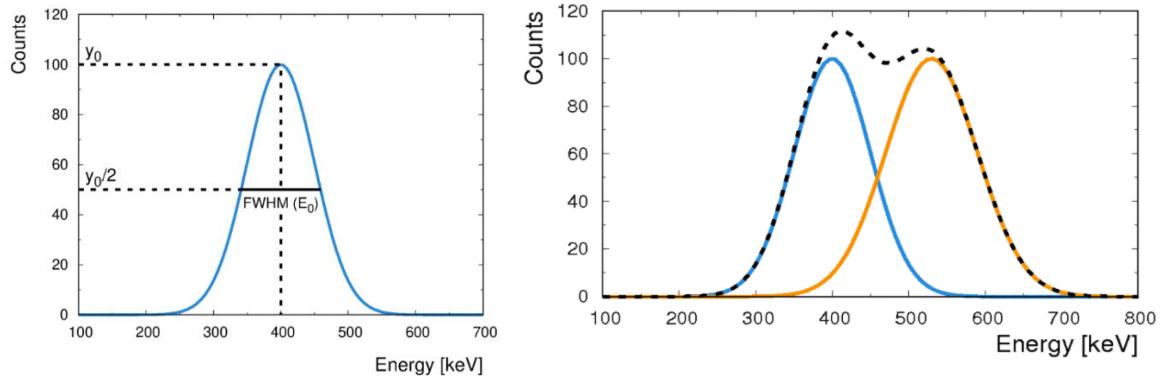
2.2 Režimi rada detektora

Postoje tri glavna režima rada detektora. Primena ovih modova zavisi od učestalosti strujnih pulseva nastalih u detektoru. Razlikujemo:

- Pulsni režim – najčešće primenjivan. Instrumentacija detektora je podešena tako da beleži svaki individualni kvant zračenja koji stupa u interakciju sa radnom zapreminom detektora. To se postiže tako što se beleži svaki strujni puls, odnosno ukupna količina nanelektrisanja Q , prikupljena u tom strujnom pulsu. Primena ovog režima rada je kategorisana kao spektroskopija zračenja. Ako je učestalost dogadaja velika, ovaj režim rada postaje nepraktičan ili čak i nemoguć. U tom slučaju primenjujemo neki od drugih režima rada.
- Strujni režim – detektor beleži prosečnu struju individualnih pulseva u nekom vremenskom intervalu. Dobijeni signal prati statistička nesigurnost zbog fluktuacije učestalosti događaja. Ove fluktuacije se smanjuju povećavanjem vremenskog intervala merenja ali se i usporava odziv detektora na brze promene u jačini ili vrsti zračenja.
- MSV režim – *mean square voltage mode* je režim rada, gde se blokira prosečna struja i beleže samo fluktuacije struje. Signal koji se dobija je u proporciji sa kvadratom prikupljenog nanelektrisanja pri svakom događaju i sa učestalošću događaja. Ovaj režim rada je koristan kada se merenja vrše u sredinama gde imamo različite vrste zračenja, odnosno kada su velike razlike u količini nanelektrisanja generisanog različitim vrstama zračenja.

2.3 Energetska rezolucija

Energetska rezolucija je sposobnost detektora da odredi energiju upadnog zračenja, odnosno sposobnost da razlikuje dve bliske energije zračenja. Nijedan detektor nije savršen, pa ni sposoban da tačno odredi energiju upadnog zračenja. Detektorski sistem može da odredi energiju zračenja samo u nekom intervalu energija. Najčešća veličina u kojoj izražavamo rezoluciju detektora je FWHM – punе širine na polovini visine (full width at half maximum).



Slika 2.2⁸. Energetska rezolucija detektora.

Dva pika se smatraju razdvojenim ukoliko je njihovo rastojanje veće od FWHM.

Relativnu rezoluciju detektora na nekoj energiji E definišemo kao:

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

Rezultat izražavamo u procentima.

Energetska rezolucija je i funkcija deponovane energije u detektoru. Sa povećanjem energije zračenja, raste i broj ionizacija, što opet smanjuje fluktuacije.

2.4 Efikasnost

Kada govorimo o zračenju nanelektrisanih čestica, do interakcije u vidu ionizacije ili eksitacije dolazi odmah po ulasku čestice u radnu zapreminu detektoru. I pri vrlo kratkom putu ove čestice generišu dovoljno jonskih parova da budu detektovane. U tom slučaju kažemo da detektor ima 100% efikasnost.

Sa druge strane, nenelektrisano zračenje poput gama fotona ili neutrona mora prvo da izazove značajnije reakcije u detektoru da bi detekcija bila moguća. Iz razloga što ova zračenja mogu preći velika rastojanja bez interakcija detektori često imaju efikasnost manju od 100%.

⁸ <https://www.fe.infn.it/radioactivity/educational/detection.html>

Razlikujemo absolutnu i intrinzičnu efikasnost. Apsolutna efikasnost predstavlja odnos između broja detektovanih događaja i broja emitovanih događaja od strane izvora.

$$\varepsilon_{abs} = \frac{N_{det}}{N_{emit}}$$

Ova efikasnost tako zavisi od geometrije samog detektora, odnosno koji deo emitovanih čestica upada u detektor.

Intrinzična efikasnost detektora je odnos između broja detektovanih događaja i broja čestica koje ulaze u detektor.

$$\varepsilon_{int} = \frac{N_{det}}{N_{ud}}$$

2.5 Mrtvo vreme

U slučaju detektora koji beleže diskretne događaje, mrtvo vreme je period posle detekcije nekog događaja u kome sistem nije u stanju da detektuje novi događaj. Ukupno mrtvo vreme detektora zavisi od više faktora, poput vremena drifta jona ili analogno-digitalne konverzije. Svaki deo detektorskog sistema ima svoje mrtvo vreme.

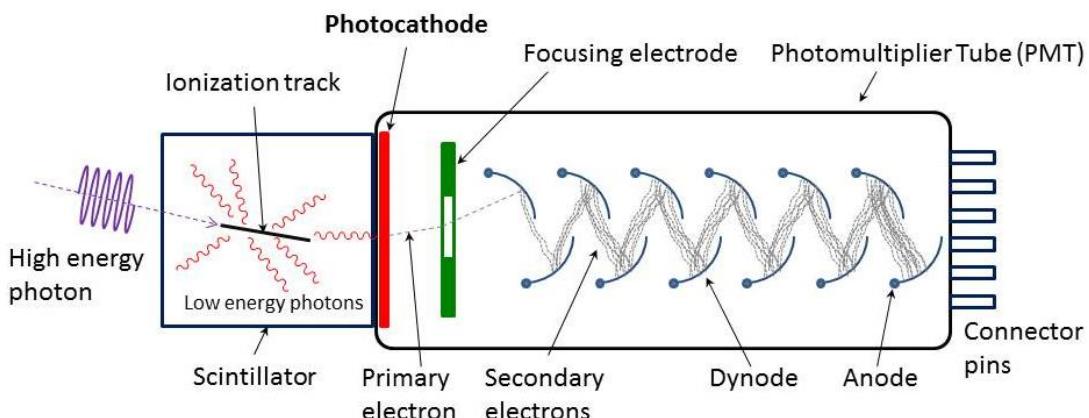
Detektor može biti okarakterisan sa paralyzable ili non-paralyzable ponašanjem. U non-paralyzable slučaju, događaj koji se dešava za vreme mrtvog vremena je izgubljen, tako da u slučaju velike frekvencije događaja dolazi do saturacije detektora⁹. U paralyzable detektoru, događaj za vreme mrtvog vremena neće samo biti propušten, već će restartovati mrtvo vreme, tako da sa povećanjem frekvencije događaja dolazi do tačke saturacije, gde detektor nije sposoban da zabeleži bilo kakav događaj. Semi-paralyzable detektor ispoljava ponašanje između prethodna dva tipa. Događaj koji se desi za vreme mrtvog vremena ga produžava ali ne u potpunosti, tako da se efikasnost smanjuje kako se frekvencija događaja približava saturaciji.

⁹ Saturacija je jednaka recipročnoj vrednosti mrtvog vremena.

3. Detektori

3.1 Scintilacioni detektori

Scintilacioni detektor sastoji se od scintilacionog materijala koji je optički uparen sa fotomultiplikatorom, bilo direktno ili indirektno. Kako zračenje prolazi kroz scintilator ono eksituje atome i molekule, koji opet kroz proces deeksitacije emituju svetlost. Ova svetlost se prenosi do fotomultiplikatora, gde se prevodi u slabu struju fotoelektrona, koji dalje bivaju pojačani kroz sistem za multiplikaciju elektrona. Rezultujući signal je dalje analiziran u elektronici samog uređaja.



Slika 3.1.¹⁰ Šema scintilacionog detektora

Osnovne osobine scintilatora su:

- **Osetljivost.** Iznad određene minimalne energije, većina scintilatora se ponaša na približno linearan način u odnosu na upadnu energiju, odnosno emitovana svetlost je direktno proporcionalna energiji eksitacije. Pošto je i fotomultiplikator linearni uređaj, amplituda izlaznog električnog signala je takođe proporcionalna upadnoj energiji. Ovo čini scintilator pogodnim za analizu spektra energije iako nije idealan za ovu svrhu.
- **Brzo vreme odziva.** Scintilacioni detektori su brzi uređaji u tom smislu da je njihovo vreme odziva i oporavka kratko u odnosu na druge tipove detektora. Ovo malo vreme odziva daje informacije o trenutku određenih događaja, odnosno intervalu između

¹⁰ https://en.wikipedia.org/wiki/Scintillation_counter

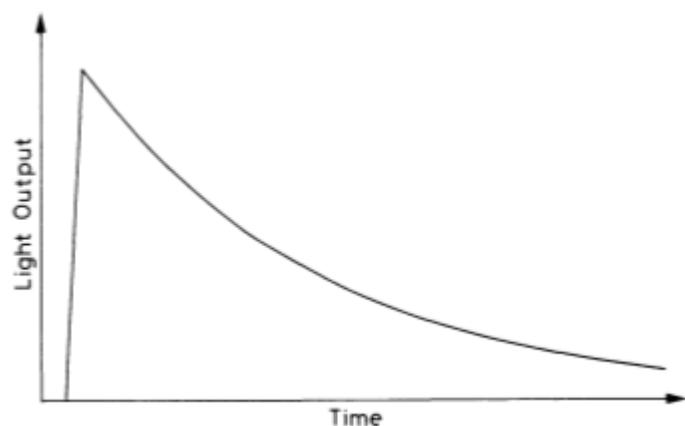
dva događaja sa velikom preciznošću. Kratko vreme odziva i kratko vreme oporavka (mrtvo vreme) omogućava ovim detektorima višu ratu brojanja događaja.

- **Diskriminacija prema obliku impulsa.** Kod nekih scintilatora moguće je razlikovati čestice analizom oblika krive emitovanih svetlosnih pulseva. Ovo je moguće zbog različitih fluorescentnih mehanizama za čestice različite ionizacione energije.

Scintilacioni materijali ispoljavaju svojstvo poznato kao luminiscencija. Kada bivaju izloženi određenim oblicima energije kao što su svetlost, toplota, zračenje..., oni apsorbuju i reemituju energiju u obliku vidljive svetlosti. Ako se remisija dešava odmah nakon apsorpcije, odnosno u intervalu vremena reda veličine $10^{-8}s^{11}$, proces nosi naziv fluorescencija. Ako je reemisija odložena zbog toga što je ekscitovano stanje atoma metastabilno, proces se naziva fosforoscencija. U ovom slučaju vreme između apsorpcije i reemisije može biti u intervalu između nekoliko mikrosekundi do nekoliko sati u zavisnosti od materijala.

U prvoj aproksimaciji, evolucija vremena procesa reemisije može biti opisana kao jednostavan eksponencijalni raspad:

$$N = \frac{N_0}{\tau_d} e^{\frac{-t}{\tau_d}}$$



Slika 3.2.¹² Grafik emitovanih fotona iz scintilatora u funkciji vremena.

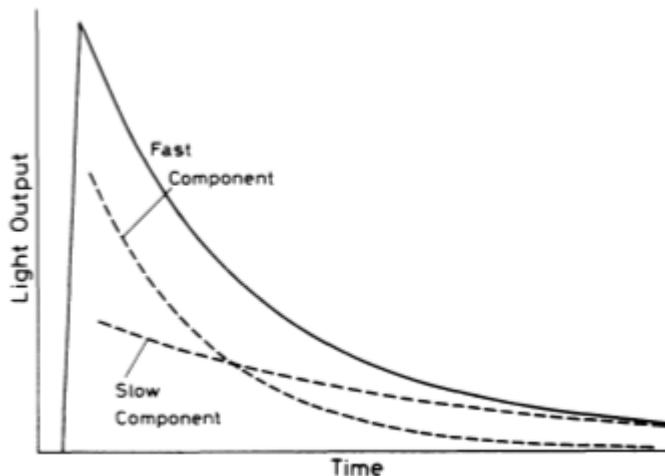
Gde je N broj fotona, emitovan do trenutka t , N_0 ukupan broj emitovanih fotona, a τ_d konstanta raspada. Konačno vreme rasta od nule do maksimuma u većini materijala je

¹¹ $10^{-8}s$ je približno vreme potrebno tranziciju između elektronskih nivoa.

¹² Glenn F. Knoll, Radiation Detection and Measurement

obično mnogo kraće nego vreme raspada. Međutim, dok ovaj jednostavan opis odgovara za većinu slučajeva, tačniji opis možemo dati u vidu dvokomponentnog eksponencijala:

$$N = Ae^{\frac{-t}{\tau_f}} + Be^{\frac{-t}{\tau_s}}$$



Slika 3.3.¹³ Brza i spora komponenta raspada

Gde su τ_f i τ_s konstante raspada za brzu i sporu komponentu raspada. Brza komponenta obično dominira. Prisustvo ove dve komponente formira osnovu za tehniku pulse shape discrimination.

Iako postoje mnogi scintilacioni materijali, oni nisu svi pogodni za detektore. Opšte gledano, dobar scintilacioni materijal mora da zadovolji sledeće uslove:

- Visoku efikasnost konverzije upadnog zračenja u fluorescentno zračenje,
- Transparentnost za nastalo fluorescentno zračenje,
- Emisiju u spektralnom intervalu, koji postojeći fotomultiplikatori mogu pojačati,
- Malu konstantu raspada τ .

3.1.1 Tipovi scintilacionih detektora

Organski scintilatori su aromatična jedinjenja, koja sadrže povezane ili kondenzovane strukture sa benzenovim prstenovima. Njihova osnovna osobina je jako kratko vreme deekscitacije reda veličine nekoliko nanosekundi ili manje.

Najčešće korišćeni *organski kristali* su anthracene ($C_{14}H_{10}$) i naphthalene ($C_{10}H_8$). Sa izuzetkom anthracene-a, koji ima vreme deekcitacije reda veličine 30 ns. Ovi kristali

¹³ Glenn F. Knoll, Radiation Detection and Measurement

imaju brzo vreme odziva reda veličine nekoliko nanosekundi. Ipak, zbog efekta kanala njihova rezultujuća amplituda je anizotropna, odnosno za konstantni izvor zračenja odgovor zavisi od orientacije kristala.

Organske tečnosti su tečna jedinjenja, sastavljena od jedne ili više organskih scintilatora, rastvorenih u rastvaraču. Iako je proces scintilacije isti kao što je opisan gore, mehanizam apsorpcije energije je drugačiji. U rastvorima, energija jonizacije biva apsorbovana uglavnom u rastvaraču i onda se prenosi na rastvorenu scintilacionu supstancu. Ovaj prenos se obično dešava brzo i efikasno, iako precizni detalji o mehanizmu još nisu jasni.

Plastični scintilatori u nuklearnoj i čestičnoj fizici su verovatno najšire korišćeni organski detektori danas. Kao i organske tečnosti, plastični scintilatori su rastvori organskih scintilatora ali u čvrstom plastičnom rastvaraču. Najčešće i najšire korišćene plastike su polyvinyltoluene, polyphenylbenzene i polystyrene. Primarne rastvorene supstance su obično PBD, p-terphenyl i PBO, koji su rastvoreni u koncentracijama reda veličine 10g/l. Vrlo česta sekundarna rastvorena supstanca je POPOP, zbog svojstva pomeranja talasnih dužina, ali u mnogo manjoj proporciji.

Neorganski scintilatori su uglavnom **kristali** alkalnih halida, koji sadrže male nečistoće koje imaju funkciju aktivatora. Daleko najviše korišćeni materijal je NaI(Tl), gde je Talijum (Tl) aktivator. Nešto manje zastupljeni su CsI(Tl), CsI(Na), KI(Tl) i LiI(Eu). Među ne-alkalnim materijalima su $Bi_4Ge_3O_{12}$, BaF_2 , $ZnS(Ag)$, $ZnS(Ga)$, $CaWO_4$, $PbWO_4$ i $CdWO_4$. Dok je scintilacioni mehanizam kod organskih materijala molekularne prirode, u neorganskim scintilatorima je očigledno karakteristika strukture elektronskih nivoa u kristalima. . Kada se kristal izloži zračenju, mogu se desiti dva procesa. Može ionizovati kristal ekscitacijom elektrona iz valentne u provodnu zonu, stvarajući slobodan elektron i šupljinu ili može stvoriti ekscitaciju elektrona odmah ispod provodne zone. U ovome stanju elektron i šupljina ostaju vezani kao par i mogu se kretati slobodno kroz kristal. Ako kristal sadrži nečistoće, elektronski nivoi u zabranjenoj zoni mogu biti lokalno stvoreni. Pokretna slobodna šupljina ili šupljina uparena sa elektronom kada se sretne sa centrom nečistoće može ionizovati atom nečistoće. Kada sledeći elektron stigne, upada u otvor, koji je ostavila šupljina i prelazi iz ekscitovanog u osnovno stanje uz emisiju zračenja. Ako se prelaz izvrši bez emisije zračenja centar nečistoće postaje zamka i energija se gubi u drugim procesima.

Gasni scintilatori se uglavnom sastoje od plemenitih gasova: ksenon, kripton, argon i helijum zajedno sa azotom. U ovim scintilatorima atomi su pojedinačno pobuđeni i vraćaju se u osnovno stanje u intervalu vremena oko 1 ns, tako da im je brzina odziva jako mala. Međutim, emitovana svetlost je obično u ultraljubičastoj oblasti, gde je većina fotomultiplikatora neefikasna. Jedan od metoda prevazilaženja ove teškoće je oblaganje zidova suda sa materijalom koji pomera talasnu dužinu u plavo-zelenu oblast, gde su fotomultiplikatori efikasniji.

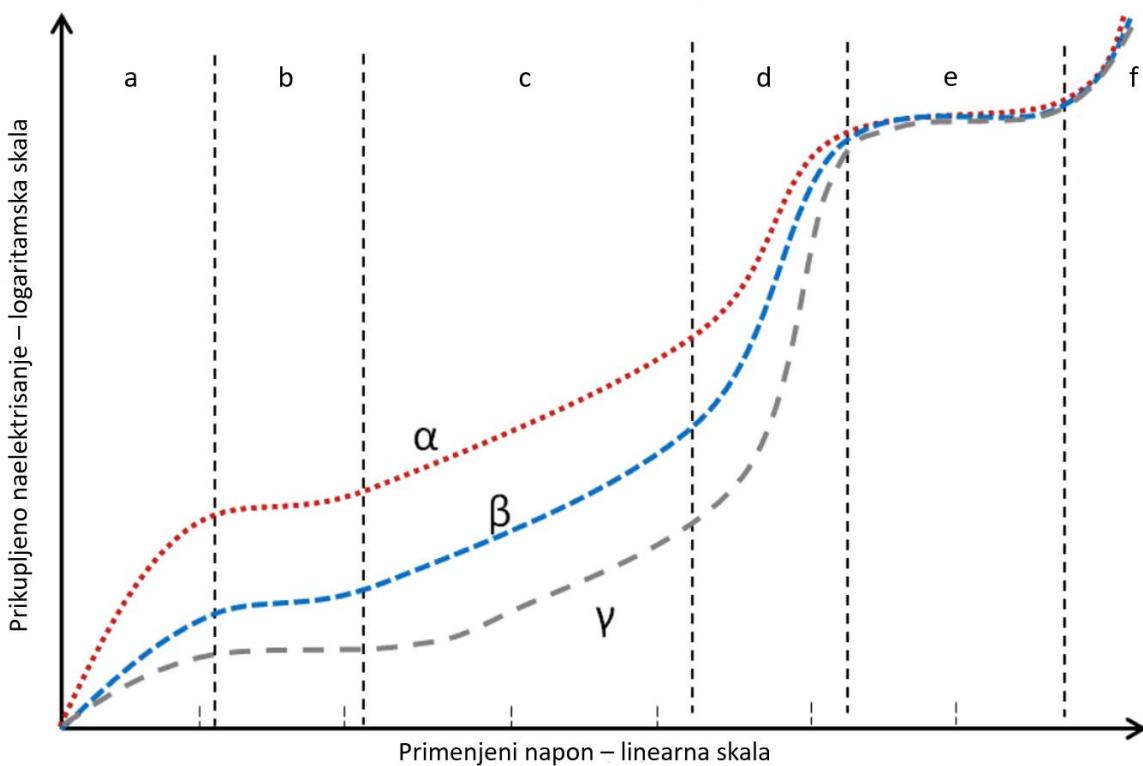
Stakleni scintilatori su uglavnom aktivirani cerijumom, sačinjeni od litijumskih ili borovih silikata. Ipak, stakla od bora imaju deset puta slabiju emisiju svetlosti nego litijumska, tako da se ne koriste često. Stakleni detektori se obično koriste za detekciju neutrona iako su osetljivi i na beta i gama zračenje. Poznati su po otpornosti na sve organske i neorganske reagense, osim fluorovodonične kiseline. Pored toga imaju jako visoku tačku topljenja. Njihove fizičke i hemijske osobine čine ih vrlo pogodnim za rad u ekstremnim uslovima.

3.2 Gasni (jonizacioni) detektori

Nekoliko najstarijih i našire korišćenih detektora zasnovani su po principu gasne ionizacije. Glavne odlike jonizacionih detektora su: velika osjetljivost, mogućnost detekcije svih tipova ionizujućeg zračenja, raznovrsnost oblika i dimenzija i relativna jednostavnost uređaja za registraciju izlaznog signala.

Rad i karakteristike gasnih (jonizacionih) detektora određeni su ponašanjem jona u gasovima i sekundarnim efektima, do kojih dolazi u prisustvu električnog polja. U prostoru ispunjenom određenim gasom (detektoru), ako nema napona na elektrodama, joni stvorenii duž putanja nuklearnog zračenja normalno se rekombinuju. Kad se uspostavi napon, pozitivni i negativni joni se kreću ka suprotnim elektrodama, gde se skupljaju. Broj kolektovanih (skupljenih) jona je funkcija napona i zavisi od procesa koji se javljaju u gasnom detektoru.

Kolektovani joni na elektrodama daju izlazne signale (naponske i strujne impulse), koji se pomoću elektronskih uređaja pojačavaju, analizuju po amplitudi ili vremenu i odbrojavaju.



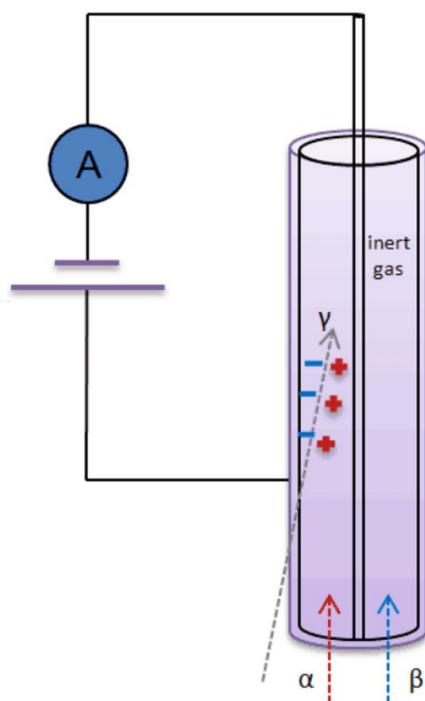
Slika 3.4.¹⁴ Grafik zavisnosti prikupljenih jona u zavisnosti od napona između elektroda za različite tipove zračenja.

U zavisnosti od primjenjenog napona na elektrodama izvršena je i podjela tipova ionizacionih detektora (slika 3.4.):

- Oblast delimične rekombinacije primarnih jona; broj kolektovanih jona proporcionalan je naponu.
- Oblast rada jonizacionih komora (oblast stanja zasićenja). Broj prikupljenih jona je konstantan, svi primarni joni stvoreni duž puta nuklearnog zračenja su kolektovani, postignuto je zasićenje.
- Oblast rada proporcionalnih brojača. počinje gasna multiplikacija primarne ionizacije: ubrzani joni (elektroni) sriču dovoljno energije u električnom polju da izazivaju sekundarnu ionizaciju gasa, broj kolektovanih jona je proporcionalan primarnoj ionizaciji; faktor multiplikacije postiže vrednost do 10^6 .

¹⁴ <https://www.reactor-physics.com/what-is-boron-trifluoride-proportional-counter-bf3-definition/>

- d. oblast ograničene proporcionalnosti: faktor amplifikacije se povećava do 10^8 , ali broj kolektovanih jona nije proporcionalan primarnoj ionizaciji;
- e. Oblast rada Geiger-Mueller brojača. Lančana multiplikacija sekundarne ionizacije se širi i obuhvata određeni prostor zapremine gasa duž cele anode; faktor multiplikacije je reda veličine 10^{10} , broj kolektovanih jona nezavisan je od primarne ionizacije.
- f. Oblast permanentnog električnog pražnjenja.



Slika 3.5. Osnovna šema gasnog detektora ionizujućeg zračenja. Slabo prodorno alfa i beta zračenje ulazi na zadnji prozor, dok visoko prodorno gama zračenje ulazi kroz spoljašnji zid.

3.2.1 Tipovi gasnih (ionizacionih) detektoru

Ionizacione komore rade u uslovima struje zasićenja (oblast b, slika 3.4) sa malim izlaznim signalima, čija je veličina proporcionalna energiji detektovanog zračenja (primarnoj ionizaciji). Standardne ionizacione komore imaju oblik cilindra, čiji zidovi predstavljaju katodu, a anoda je aksijalno postavljena šipka ili žica, izolatorom razdvojena od katode. Postoje ionizacione komore sa trećom elektrodom, mrežicom, slične elektronskim cevima; one se upotrebljavaju za preciznija merenja.

U **Geiger-Müllerovom brojaču** koristi se lančana gasna multiplikacija u oblasti e (slika 3.4). Kako u toj oblasti veličina izlaznih impulsa ne zavisi od primarne ionizacije,

GM-brojači su relativno osetljivi detektori: detektuju i zračenja koja u njima izazovu samo jedan jonski par. Registruju praktično svaku ionizujuću česticu koja prodre u osetljivi prostor brojača, a gama zračenje registruju prosečno sa 1% do 2% efikasnosti.

Proporcionalni brojači rade pod uslovima gasne multiplikacije 10^6 do 10^6 , oblast c, (slika 3.4), pri čemu amplituda impulsa ostaje proporcionalna primarnoj ionizaciji. Prostorno nanelektrisanje pozitivnih jona je lokalizovano i znatno manje nego kod GM-brojača. Prednost je proporcionalnih brojača prema ionizacionim komorama što im izlazni impulsi imaju veću amplitudu, a prema GM-brojačima što se pomoću njih mogu određivati vrsta i energija zračenja. Proporcionalni brojači su posebno pogodni za rad u impulsnom režimu (mada se upotrebljavaju i u integralnom), naročito za merenja zračenja male energije.

4. Poluprovodnički detektori

Poluprovodnički detektor je detektor zračenja, zasnovan na poluprovodniku, poput silicijuma ili germanijuma. Vrši detekciju upadnih nanelektrisanih čestica ili fotona. U opštem slučaju poluprovodnici su materijali, organski ili neorganski, čija provodljivost zavisi od hemijske strukture, temperature, iluminacije i prisustva primesa. Sam naziv poluprovodnici potiče od činjenice da ovi materijali imaju električnu provodljivost između metala i izolatora. Širina zabranjene zone, između valentne i provodne zone, je manja od 4eV (oko 1ev) i u ovim zonama elektroni ne mogu egzistirati. Nasuprot provodnicima, elektroni moraju dobiti energiju, na primer od zračenja, da bi prešli iz valentne u provodnu zonu.

Poluprovodnički detektori su veoma slični solarnim panelima (photovoltaic panels), koji generišu električnu struju. Na sličan način struja može biti indukovana putem jonizujućeg zračenja. Kako jonizujuće zračenje ulazi u poluprovodnik, ono interaguje sa materijalom poluprovodnika i može da pobudi elektron iz valentne u provodnu zonu i ostavi šupljinu. Ovaj proces je poznat kao generisanje para elektron-šupljina. Kod poluprovodničkih detektora glavni nosioci informacija o zračenju su ovi parovi elektron-šupljina, a generisani su duž puta kretanja nanelektrisane čestice (primarne ili sekundarne) kroz detektor. Kolekcijom ovih parova elektron-šupljina formira se i snima signal.

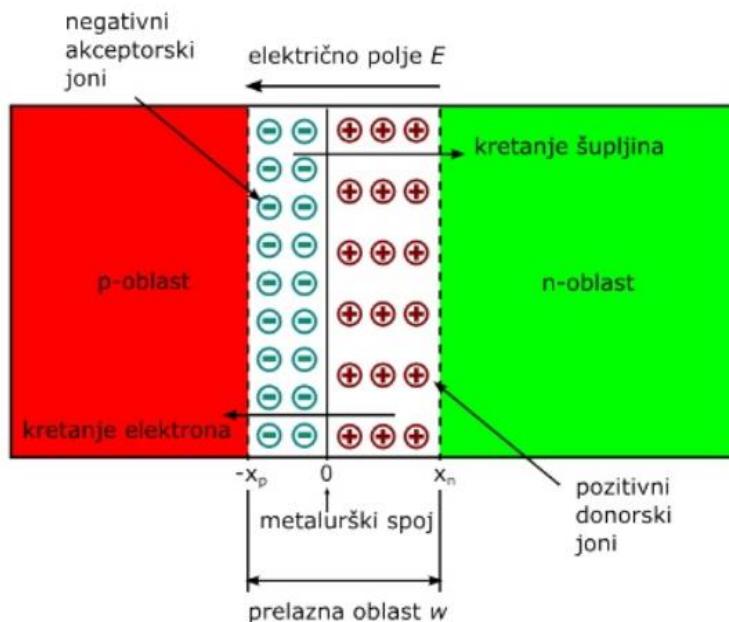
Energija potrebna za kreaciju para elektron-šupljina je mnogo manja u poređenju sa energijom potrebnom za kreaciju jona u gasnim detektorima. Takođe statistička varijacija pulsa je manja a energetska rezolucija veća. Kako elektroni putuju brzo, vremenska rezolucija je takođe vrlo visoka, a nanelektrisane čestice visoke energije mogu predati energiju u poluprovodniku relativno malih dimenzija. Sa druge strane poluprovodnički detektori imaju nisku efikasnost i visoku cenu.

Prema tome, poluprovodnički detektori nalaze široku upotrebu zbog dobre efikasnosti i sposobnosti da mere i intenzitet i energiju zračenja. Zbog toga nalaze upotrebu i u identifikaciji čestica i merenju energije zračenja.

4.1 PN Spoj

P-N spoj je granica između dva tipa poluprovodničkog materijala, p-tipa i n-tipa, unutar jednog kristala poluprovodnika. P-tip poluprovodnika je pozitivan i sadrži višak šupljina, dok je n-tip negativan i sadrži višak elektrona. P-tip poluprovodnika dobijamo dopiranjem-dodavanjem primesa koje će dovesti do viška šupljina, i to su obično trovalentni elementi (B, In, Al), dok n-tip dobijamo dodavanjem primesa, koje će dovesti do viška elektrona i to su obično petovalentni elementi (P, Sb, As). P-N spoj predstavlja glavni deo svih poluprovodničkih uređaja poput dioda, tranzistora, solarnih ćelija, LED dioda i integrisanih kola, detektora itd.

Ono što se dešava na granici između p i n dela jeste preraspodela elektrona i šupljina, usled njihovih različitih koncentracija. Elektroni prelaze u p deo a šupljine u n deo. Ovaj proces dovodi do formiranja električnog polja, koje zaustavlja dalju preraspodelu nanelektrisanja, a na granici p-n spoja nastaje oblast prostornog nanelektrisanja. Oblast prostornog nanelektrisanja onemogućava provođenje nanelektrisanja kroz spoj, sve dok na neki način ne poništimo nastalo električno polje. U suštini manipulacijom ovog neprovodljivog sloja prostornog nanelektrisanja, pomoću spoljašnjeg električnog polja, p-n spoj možemo koristiti kao diodu.



Slika 4.1.¹⁵ Šema p-n spja u ravnotežnom stanju

¹⁵ <https://www.slideshare.net/lm1318/poluprovodnicke-komponente-predavanja1>

Ako spoljašnje električno polje primenjeno na p-n spoj ima isti smer kao i polje u oblasti prostornog naelektrisanja onda je p-n spoj inverzno polarizovan. Sloj prostornog naelektrisanja se proširuje i protok naelektrisanja kroz spoj je sprečen. U drugom slučaju kada spoljašnje električno polje ima suprotan smer od električnog polja prostornog naelektrisanja, dolazi do poništavanja istog i p-n spoj je provodan.

Ono što je bitno kada je detekcija zračenja u pitanju je da inverzno polarizovan p-n spoj u stvari predstavlja detektor. Upadno zračenje prilikom prolaska kroz oblast prostornog naelektrisanja stvara parove elektron-šupljina, koji pod uticajem električnog polja putuju do elektroda i daju signal. Što je širi sloj prostornog naelektrisanja, odnosno inverzni napon, šira je i aktivna zapremina detekcije. U principu treba primeniti maksimalni napon, koji ne dovodi do proboga p-n spoja.

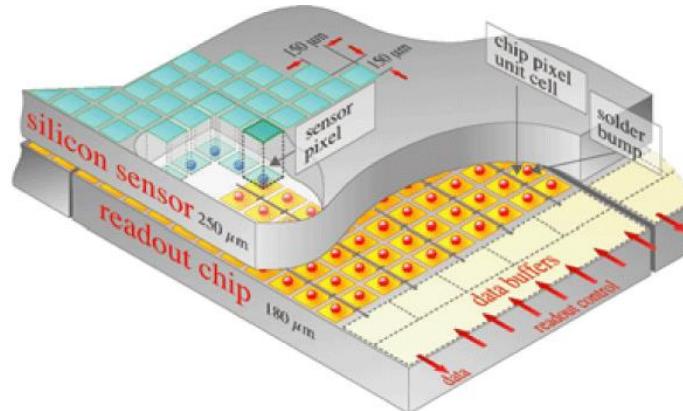
4.2 Silicijumski detektori

Silicijum se uglavnom koristi za detektore naelektrisanih čestica i detekciju mekog X-zračenja. Relativno velika razlika u energijama susednih nivoa ($E = 1.12\text{eV}$) omogućava rad na sobnim temperaturama ali je hlađenje preporučljivo kako bi se smanjio šum. Ovi detektori su veoma bitni u fizici visokih energija zbog sposobnosti da prate kretanje naelektrisanih čestica i zbog toga zauzimaju značajan deo detektorskog sistema u CERNu. Od značajnih negativnih osobina ističe se degradacija kristalne rešetke tokom vremena usled zračenja, što dovodi do slabljenja signala ali se ovaj efekat može smanjiti zavaljujući Lazarus efektu.

Većina silicijumskih detektora proizvodi se tako što se dopiraju uske trake silicijuma, kako bi se od njih napravile diode, koje su inverzno polarisane. Kako naelektrisane čestice prolaze kroz ove trake, generišu male jonizacione struje, koje mogu biti detektovane i merene. Grupisanjem stotina ovih detektora oko tačke sudara u akceleratoru, može se dobiti tačna slika putanja čestica. Na primer, unutrašnji sistem za praćenje (ITS) od Large Ion Collider Experiment (ALICE) sadrži tri sloja silicijumskih detektora:

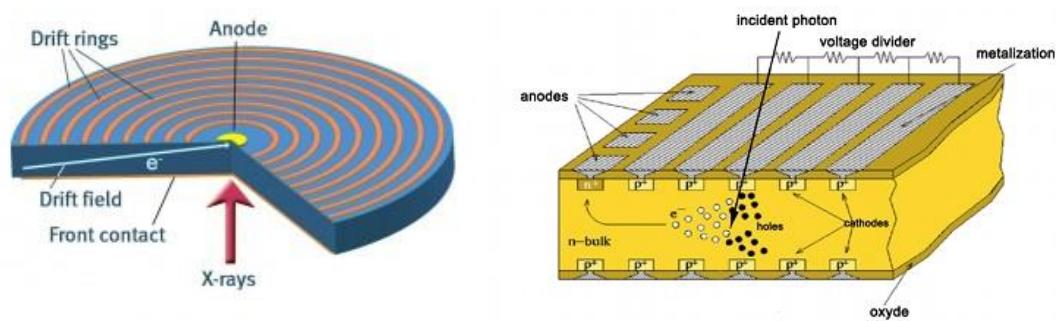
- Silicon Pixel Detector (SPD)
- Silicon Drift Detector (SDD)
- Silicon Strip Detecotr (SSD)

Silicijumski pixel detektor SPD, veličine kutije za cipele, sadrži 65 miliona piksela, koji mu omogućavaju da prati putanju čestica sa velikom preciznošću. Svaki sloj detektora podeljen je u male segmente, od kojih svaki predstavlja mali silicijumski senzor. Prilikom prolaska nanelektrisanih čestica kroz male silicijumske senzore oslobođaju se elektron-šupljina parovi, koji i daju rezultujući signal. Znajući koji pikseli su pobuđeni, odnosno daju signal, može se rekonstruisati putanja čestica kroz detektor. Pošto se detektor sastoji od više slojeva ovakvih manjih detektora na kraju se rekonstruiše 3D slika kretanja čestica.



Slika 4.2.¹⁶ Silicijumski piksel detektor SPD

Silicijumski drift detektori SDD, mere energiju upadnih fotona (uglavnom X-zraci) na osnovu ionizacije koju izazivaju u detektorskem materijalu. Ova promenjiva ionizacija generiše promenjivo nanelektrisanje koje detektorska elektronika meri za svaki foton. U ovom slučaju materijal se sastoji od silicijuma velike čistoće sa jako malom strujom curenja. Glavna odluka ovih detektorova je transverzalno polje koje generiše niz prstenastih elektroda, što dovodi do drifta nanelektrisanja do male kolektorske elektrode. Drift koncept SSDa omogućava veliku učestalost brojanja uparenu sa jako niskom kapacitivnošću detektora.

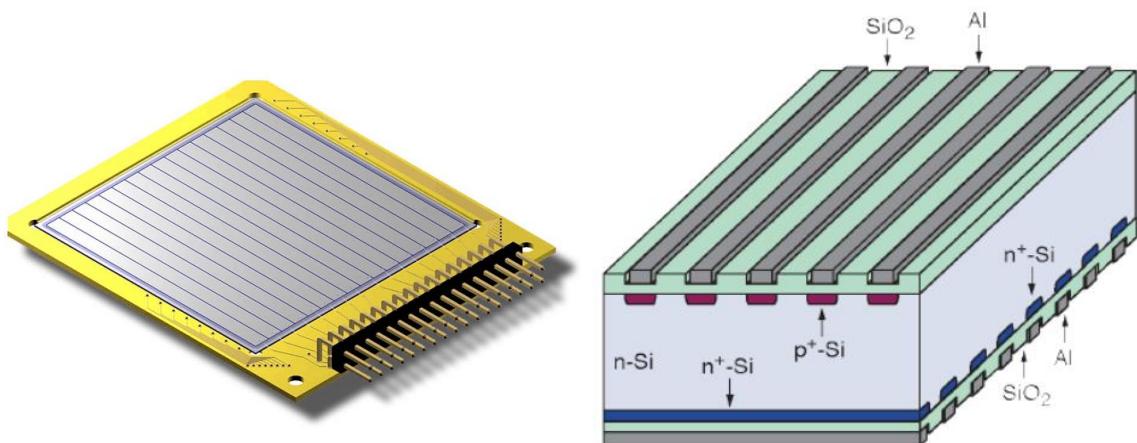


Slika 4.3¹⁷. Silicijumski drift detektor SDD

¹⁶ <https://cms.cern/detector/identifying-tracks/silicon-pixels>

¹⁷ <https://sci.esa.int/web/loft/-/49345-silicon-drift-detector-electrical-structure>

Silicijumski strip detektori SSD rade na istom principu kao i silicijumski piksel detektori. Naelektrisane čestice prolaze kroz aktivnu zapreminu i stvaraju parove elektron-šupljina, koji se pod uticajem primjenjenog električnog polja kreću ka kolektorskim elektrodama i na kraju generišu signal. Razlika je u konstrukciji jer ovde imamo trake postavljene duž jedne ose u vidu dvodimenzione strukture. U drugoj izvedbi imamo i dvostrane SSD detektore, gde su trake postavljene na obe strane detektora. I u ovom slučaju grupisanje SSD omogućava praćenje putanje čestica, prilikom prolaska kroz nanizane SSD strukture.



Slika 4.4.¹⁸ Silicijumski strip detektori SSD

¹⁸ https://www.researchgate.net/figure/Schematics-showing-a-double-sided-silicon-strip-detector-After-42_fig6_296683651

4.3 Germanijumski detektori

Još od 1970-ih detektori fotona (gama i X) prave se od ultra čistog germanijuma. Ima više razloga za tako široku i dugu upotrebu ovo tipa detektora. Između ostalog, sadrži jako male koncentracije električno aktivnih defekata ($10^9 cm^{-3}$). Ovako male vrednosti nečistoća teško je postići u ostalim tipovima detektora.

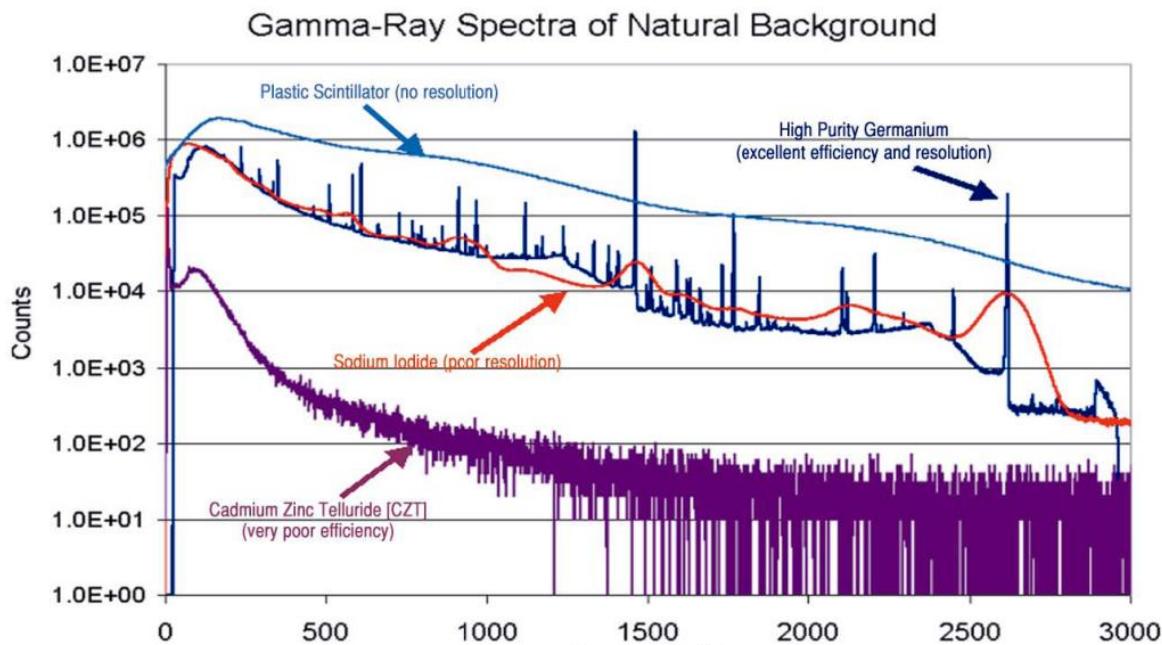
Tabela 4.1.¹⁹ Poluprovodnički materijali koji mogu biti upotrebљeni u direktnoj detekciji gama zračenja.

Material	Si	Ge	CdTe	GaAs	SiC β	(diamond) C
Density in $g cm^{-3}$	2.33	5.33	5.85	5.32	3.21	3.5
Bandgap	1.1 eV	0.67 eV	1.44 eV (dir)	1.4 eV (dir)	2.3 eV	5.47 eV
Breakdown field (MV/cm)	0.3	0.1	0.4	0.4	2	20
ϵ or E_{th}	3.6 eV	2.98 eV	~4.5 eV	~4.5 eV	8.8 eV	12 eV
LET(MeV/cm)	3.6	7.5	7.3	7.5	5.5	6.3
LET(MeVg ⁻¹ cm ²)	1.6	1.4	1.25	1.4	1.7	1.8
Number of electron-hole pairs generated	<~105 e-h / μm	<~ 250 e-h / μm	<~ 162 e-h / μm	<~167 e-h / μm	<~63 e-h / μm	<~52 e-h / μm

Germanijum, za razliku od silicijuma, primarnu upotrebu nalazi u gama spektroskopiji, zbog većeg atomskog broja od silicijuma i posledično veće verovatnoće interakcije sa zračenjem. Takođe, prosečna energija potrebna za kreaciju para elektron-šupljina za germanijum iznosi 2.9 eV, dok za silicijum iznosi 3.6 eV, što za rezultat ima veću energetsku rezoluciju kod germanijuma. Sa druge strane razlika u energijama između susednih energetskih nivoa elektrona germanijuma iznosi samo 0.67 eV, pa je za funkcionisanje ovih detektora neophodno hlađenje. Kako bi se postigla maksimalna efikasnost ovih detektora isti se moraju ohladiti na vrlo niske temperature tečnog azota (-196 C), što je istovremeno i najveći nedostatak.

¹⁹ <https://www.intechopen.com/books/use-of-gamma-radiation-techniques-in-peaceful-applications/high-purity-germanium-from-gamma-ray-detection-to-dark-matter-subterranean-detectors>

Silicijumski detektori ne mogu biti deblji od nekoliko milimetara, dok germanijumski mogu imati sloj prostornog nanelektrisanja debljine nekoliko centimetara, što im omogućava da detektuju gama zračenje od nekoliko MeV.

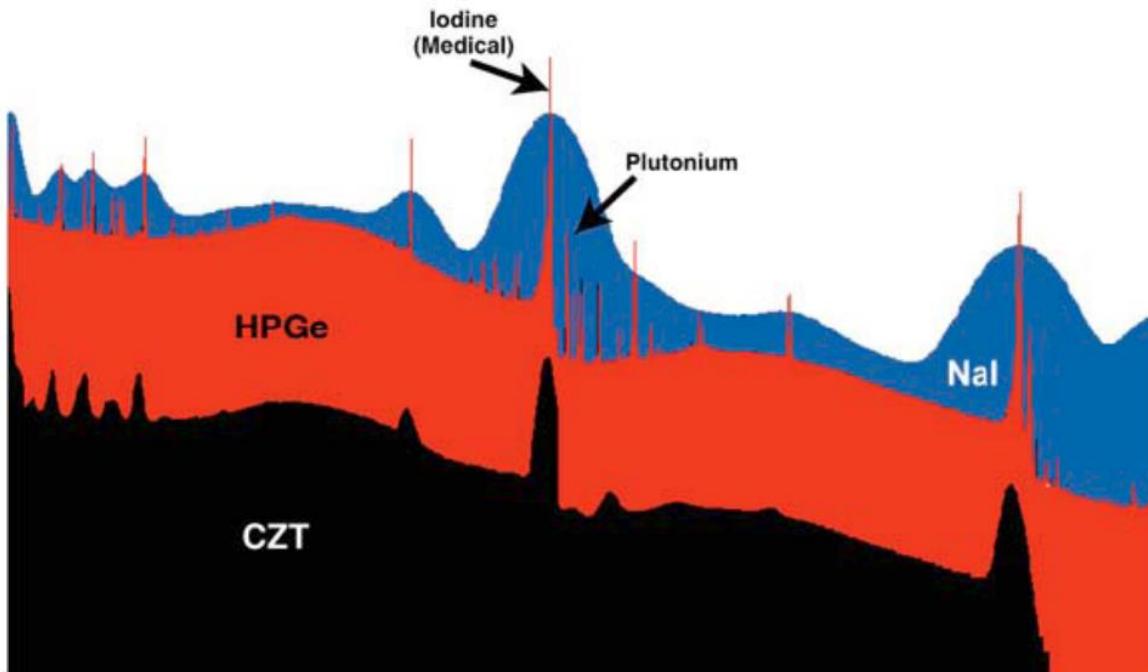


Slika 4.5²⁰. Poređenje u detekciji pozadinskog zračenja između scintilacionih, HPGe i CZT detektora.

Na slici 4.5 vidimo poređenje u detekciji pozadinskog zračenja između scintilacionih HPGe i CZT (Cadmium Zinc Teluride) detektora. Plastični scintilacioni detektori i CZT detektori nemaju sposobnost da razdvoje gama linije.

Na slici 4.6. uporedjeni su otisci dva tipa radioaktivnih materijala (plutonijuma i joda) na HPGe, CZT i NaI detektorima. Karakteristične gama linije za plutonijum i jod su prilično blizu jedna drugoj pa ih CZT i NaI detektori vide kao jednu gama liniju, dok su na HPGe detektoru jasno razdvojene gama linije.

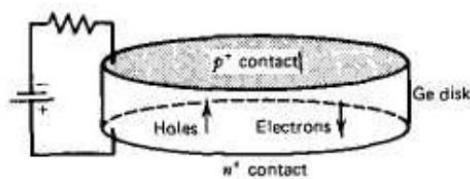
²⁰ <https://www.ortec-online.com/-/media/ametekORTEC/technical%20papers/homeland%20security%20applications%20and%20chemical%20weapons%20assay%20pins/whyhighpuritygermaniumhpgeradiationdetectiontechnologysuperiorotherdetectorORTEChnologiesisotopeidentification.pdf?la=en>



Slika 4.6²¹. Poređenje otisaka dva tipa radioaktivnog materijala (plutonijum i jod) na HPGe, CZT i NaI detektorima.

4.3.1 Konfiguracije HPGe detektora

U *planarnoj konfiguraciji* detektor je načinjen od p-tipa germanijuma velike čistoće sa električnim kontaktima na ravnim površinama germanijumskog diska.



Slika 4.7.²² Konfiguracija planarnog HPGe detektora

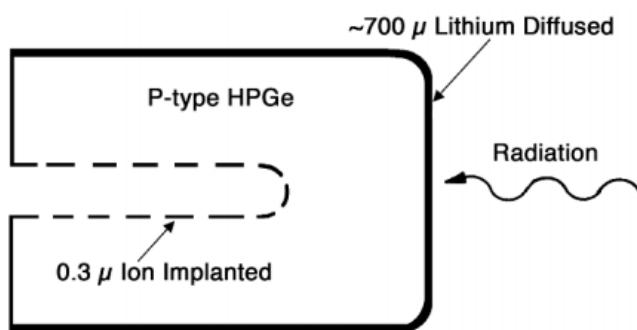
n-kontakti se dobijaju nanošenjem sloja Li na jednu površinu vafera (difuzija litijuma), dok se p-kontakti dobijaju implatiranjem bora. Ovi detektori funkcionišu u stanju

²¹ <https://www.ortec-online.com/-/media/ametekORTEC/technical%20papers/homeland%20security%20applications%20and%20chemical%20weapons%20assay%20pins/whyhighpuritygermaniumhpgeradiationdetectiontechnologysuperiorotherdetectORTechologiesisotopeidentification.pdf?la=en>

²² Glenn F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*

maksimalne širine sloja prostornog nelektrisanja, odnosno maksimalnoj inverznoj polarizaciji. Pri ovakvim uslovima vreme prikupljanja elektrona nastalih usled zračenja je minimalno, pa su i procesi rekombinacije i zaustavljanja elektrona svedeni na minimum. Takođe, primjeno električno polje je skoro u potpunosti uniformno, što za rezultat ima konstantan drift elektrona i šupljina. U planarnoj konfiguraciji HPGe detektori pogodni su za detekciju zračenja energije od 3 do 300 keV. Razlog za ovako male energije leži u maloj aktivnoj zapremini detektora. Zračenje veće energije zahteva veću radnu zapreminu.

Detektori *koaksijalne konfiguracije* napravljeni su sa ciljem stvaranja dovoljno velike radne zapremine za detekciju zračenja većih energija. U ovom slučaju jedna elektroda je načinjena na spoljnoj površini dugačkog cilindra od germanijuma, dok je druga dobijena uključivanjem jezgra kristala i postavljanjem kontakta na površinu jezgra kristala. Najčešće korišćena koaksijalna konfiguracija je sa jednim zatvorenim krajem cilindra.



Slika 4.8.²³ Koaksijalna konfiguracija HPGe detektora sa jednim zatvorenim krajem.

Koaksijalna konfiguracija gde je jedan kraj zatvoren je pogodnija zbog komplikacija sa curenjem struje na prednjoj površini, a takođe iz razloga što je prednja planarna površina u stvari ulazni prozor za zračenje manje energije.

²³ <https://www.ortec-online.com/-/media/ametekortec/brochures/gem.pdf>

4.3.2. Atenuacija zračenja i efikasnost detekcije

Atenuacija zračenja je pojava apsorpcije i rasejanja zračenja u materijalima, prvo u materijalu samog uzorka kada govorimo o samoapsorpciji zračenja, zatim u raznim materijalima od kojih je sačinjen detektor. Izraz koji opisuje atenuaciju zračenja je dobro poznat:

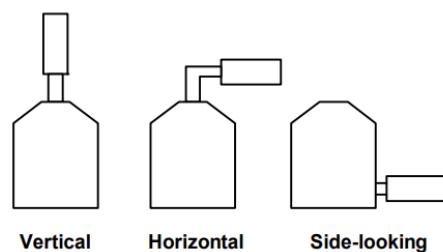
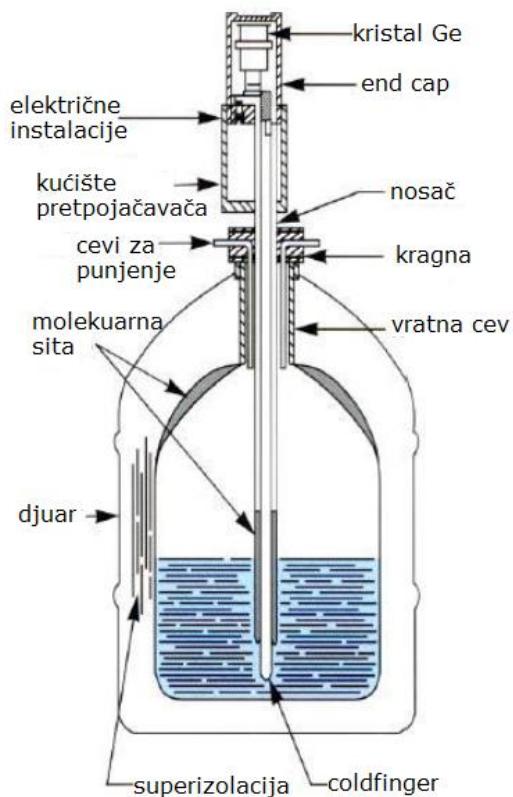
$$N = N_0 e^{-\mu x}$$

Gde je N broj preostalih fotona od početnog broja fotona N_0 , nakon prolaska kroz materijal debljine x i koeficijenta apsorpcije μ .

Detektori se prave delom od materijala sa malim atomskim brojem (aluminijum), odnosno malim koeficijentom apsorpcije, kako bi najveći deo zračenja došao do aktivne zapremine detektora, koja se opet pravi od materijala sa velikim atomskim brojem (germanijum), kako bi što više fotona interagovalo.

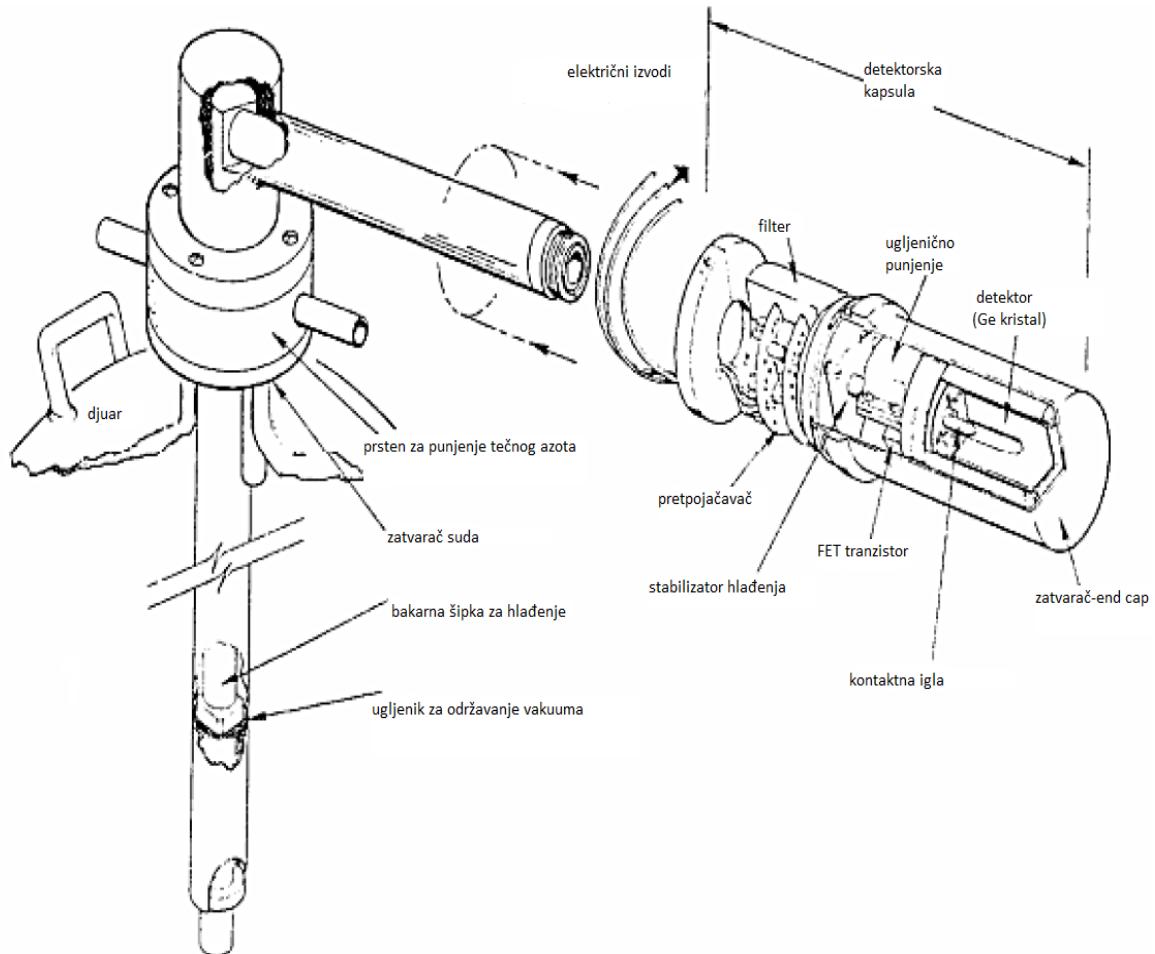
Detekcija gama fotona na sobnoj temperaturi je i dalje izazov. Najbolji kandidati su kadmijum telurid i galium arsenid. Međutim kod ovih materijala teško je postići visoku čistoću – malu zastupljenost defekata kao kod germanijuma.

Osnovni delovi HPGe detekotra: **Kriostat** čini najveći deo sistema i služi za hlađenje detektora. Sastoje se od coldfingera, koji je uronjen u tečni azot na temperaturi od 77K, vakuumskog metalnog kontejnera, kako bi se smanjila razmena topline sa vazduhom i djuara za tečni azot. **Držač detektora** sadrži germanijumske kristale i njegov položaj u odnosu na djuar može biti vertikalni, horizontalni i sa strane. Prepojačivač je obično uključen u kriostat paket.



Slika 4.5.²⁴ Šematski prikaz HPGe detektora sa djuarom.

²⁴ Andrej Vraničar, Master rad: Radijum u vodi : Detekcija u voluminoznim uzorcima poluprovodničkim i NaI detektorom oblika jame



Slika 4.6.²⁵ Konfiguracija HPGe detektora

Držač detektora i zatvarač su tanki kako bi se izbegla autenacija fotona niske energije. Držač se obično pravi od aluminijuma. Kristal germanijuma je u termalnom kontaktu sa tečnim azotom preko coldfingera, koji ga održava na niskoj temperaturi. Hlađenje tečnim azotom je nepraktično jer su potrebni sati da bi se kristal ohladio do operativne temperature i ne sme doći do zagrevanja tokom upotrebe.

Princip rada HPGe detektora je sledeći:

- Jonizujuće zračenje ulazi u aktivnu zapreminu (germanijumski kristal) i interaguje sa materijalom detektora.
- Fotoni visoke energije prilikom prolaska kroz aktivnu zapreminu ionizuju atome poluprovodnika i stvaraju parove elektron-šupljina. Broj parova elektron-šupljina je direktno proporcionalan energiji zračenja.

²⁵ Andrej Vraničar, Master rad: Radijum u vodi : Detekcija u voluminoznim uzorcima poluprovodničkim i NaI detektorom oblika jame

- Pošto germanijum može imati oblast prostornog nanelektrisanja širine nekoliko centimetara, sposoban je da apsorbuje fotone visoke energije u potpunosti – do nekoliko MeV-a.
- Pod uticajem električnog polja elektroni i šupljine kreću se do elektroda da proizvode puls koji meri elektronika
- Ovaj puls nosi informaciju o energiji prvobitnog upadnog zračenja. Broj ovakvih pulseva govori o intezitetu zračenja.

U svim slučajevima foton deponuje deo svoje energije duž putanje i može biti u potpunosti apsorbovan. Potpuna apsorpcija fotona energije 1 MeV generiše 3×10^5 parova elektron-šupljina. Na sobnoj temperaturi 1cm^3 kristala germanijuma sadrži 4×10^{22} atoma i oko 2.5×10^{13} slobodnih parova elektron-šupljina, što je jako mnogo u poređenju sa brojem parova koje generiše jedan foton od 1 MeV. Ovo za rezulati ima jako veliki šum na višim temperaturama, pa je očigledno zašto je hlađenje do niskih temperatura neophodno.

5. Analiza merenja HPGe detektor

U cilju određivanja efikasnosti detekcije vršeno je merenje radioaktivnosti cirkona pomešanog sa olivinskim peskom u različitim zapreminskim odnosima.

Cirkon je mineral koji pripada grupi nezosilikata²⁶. Hemijsko ime je cirkonijum silikat i ima hemijsku formulu ZrSiO₄. Prirodna boja cirkona varira od bezbojne, žutozelene, crvene, smeđe i zelene. Bezbojni primerci imaju kvalitet dragog kamena i predstavljaju surogat za dijamant. Cirkon je mineral koji je svuda prisutan u Zemljinoj kori. Veliki kristali su retki, prosečna veličina je oko 100-300 μm ali mogu narasti do nekoliko centimetara. Vrlo je čest slučaj da se u cirkonu mogu naći u veoma malim koncentracijama i neki drugi elementi, kao na primer uranijum i torijum. Koncentracije uranijuma bivaju veoma male ali sasvim dovoljne da se može detektovati radioaktivno zračenje. Ovo zračenje potiče kako od uranijuma, tako i od svih njegovih potomaka.

Cirkoni uvek sadrže od 0.001% do 1% radionuklida i imaju aktivnosti do $10000 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$.

Pošto se cirkon koristi u proizvodnji vatrostalnih materijala i glazura, dobijeni proizvodi će sadržati slične količine radioaktivnosti. Za potrebe izvođenja ovog eksperimenta upotrebljen je cirkonijumska prah, koji je u Katerdu za nuklearnu fiziku stigao kao jedan od uvoznih produkata za kojeg je bila neophodna analiza prisutnosti radionuklida, pre nego što se pusti u upotrebu. Uvezeni cirkon je bio namenjen upotrebi u nekoj od lisnica. Sastav i čistoća samog cirkona nam nije bila značajna za merenja opisana u ovom radu. Dovoljno je bilo da cirkon poseduje merljivu količinu radionuklida u svom sastavu.

Aktivnost uranijumovih potomaka u uzorku cirkona je bila određena pre izvođenja ovog eksperimenta. U tabeli 5.1 vidimo kolika je bila aktivnost pojedinih radionuklida u merenom uzorku cirkona. Može se videti da je u uzorku postignuta radioaktivna ravnoteža i da su aktivnosti Ra-226 i njegovih potomaka Pb-214 i Bi-214 jednake u okvirima eksperimentalne neodređenosti.

²⁶ Nezosilikati (od grčkog νῆσος nēsos, ostrvo), ili ortosilikati, sadrže ortosilikatni ion, koji se sastoji od zasebnih [SiO₄]⁴⁻ tetraedara povezanih jedino putem međuprostornih katjona.

Tabela 5.1 Aktivnost cirkona po radionuklidima

Radionuklid	[Bq/kg]
Cs-137	< 3
K-40	< 30
Ra-226	3000±30
Th-232	346±15
U-238	560±25
U-235	160±5
Pb-214	2830±50
Bi-214	3194±21

Kako nas je zanimalo uticaj samoapsorpcije unutar merenog uzorka, cirkon je mešan sa olivinskim peskom u određenim zapreminskim odnosima, kao što je prikazano u tabeli 5.2. Poznavanje ukupne mase uzorka, kao i zapremine plastičnih kutijica u koje su uzorci bili pakovani, omogućilo nam je da jednostavno dobijemo gustinu svakog od njih. Vrednosti dobijenih gustočina su prikazane u Tabeli 5.2.

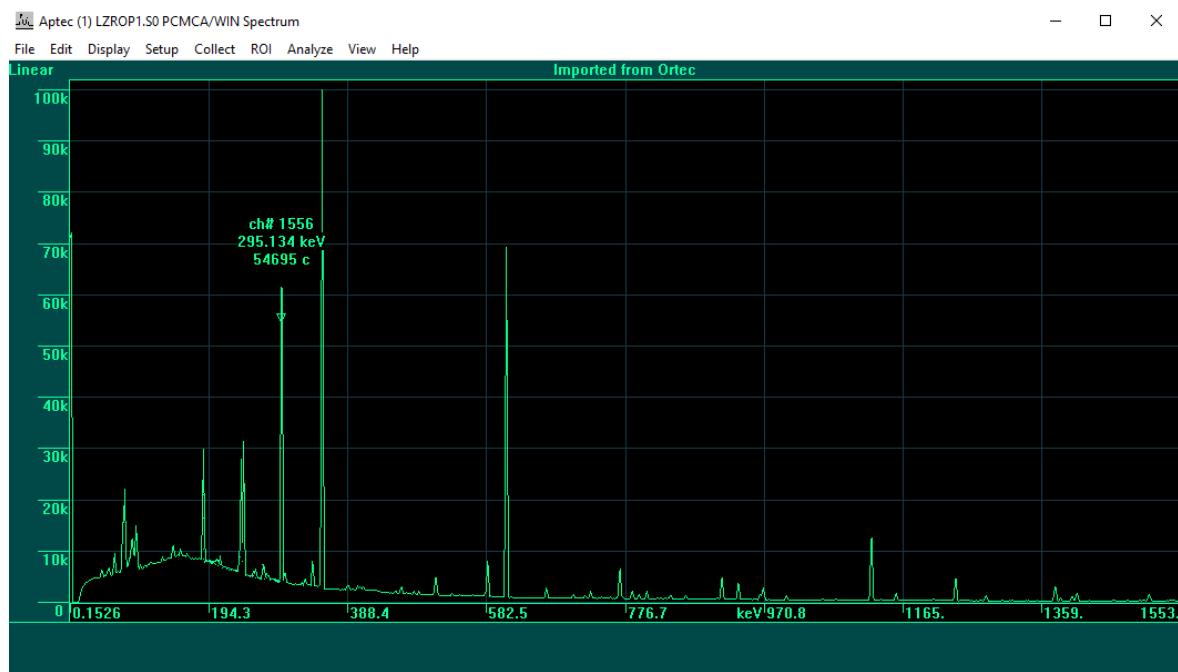
Tabela 5.2. Zapreminski odnos cirkon – olivinski pesak

Uzorak	Odnos cirkon-olivinski pesak [%]	Maseni odnos cirkon-olivinski pesak [g]	Ukupna masa [g]
1	100:0	637,1:0	637,1
2	75:25	480:95	575
3	50:50	318,8:184,8	504,6
4	25:75	160:274,8	434,8
5	0:100	0:364	364

Osnovna ideja eksperimenta leži u činjenici da cirkon ima značajno veću gustočinu od olivinskog peska, pa dolazi do izraženijeg efekta atenuacije (samoapsorpcije) sa povećanjem udela cirkona. Ovaj efekat umanjuje broj detektovanih događaja, odnosno dolazi do smanjenja efikasnosti detekcije sa povećanjem gustočine uzorka. Drugi faktor koji utiče na efikasnost detekcije je energija gama zračenja. U slučaju HPGe detektora efikasnost opada sa porastom energije detektovanih γ -fotona. No sa poprastom energijom raste i prodorna moć

fotona, tako da opada i efekat samoapsorpcije unutar samog uzorka. Ova dva efekta imaju suprotno dejstvo. Sa povećanjem energije sve veći broj fotona dolazi do detektora ali njegova efikasnost detekcije biva manja.

Uzorci su snimani na HPGe detektoru proizvođača CANBERRA u vremenskim intervalima od oko 70 ks. Pakovani su u po dve kutijice prečnika 69 mm i visine 31mm, koje su odležale određeni period vremena, kako bi se u uzorku uspostavila radioaktivna ravnoteža za slučaj da je do njenog narušenja došlo tokom prepakivanja uzorka.



Slika 5.1 Spektar gama zračenja 100% cirkona u programu Aptec.

Snimljeni spektri obrađeni su u programu Aptec. Iz dobijenih spektara izdvojene su linije Pb-214 (241.997 keV, 295.224 keV, 351.932 keV) i Bi-214 (609.312 keV, 768.356 keV, 1120.287 keV, 1238.11 keV, 1377.669 keV, 1764.494 keV, 1847.420 keV, 2204.21 keV), pošto su najjače i lako se mogu odrediti.

Efikasnost detekcije računa se po formuli:

$$\varepsilon = \frac{N_d}{Atp_\gamma}$$

Gde je: A - aktivnost radioaktivnog izvora, t - vreme merenja, p_γ - kvantni prinos, N_d – intezitet gama linije (integral gama linije koji se očitava iz Apteca).

Aktivnost izotopa Pb-214 i Bi-214 je poznata i iznosi oko $3000 \frac{Bq}{kg}$. Vrednosti N_d i t očitavaju se pomoću programa Aptec. Kvantni prinosi za radionuklide na dатој energiji p_γ su poznate vrednosti koje se uzimaju iz tabele²⁷. Kako je aktivnost po jedinici mase cirkona bila poznata, veoma jednostavno smo iz poznate mase cirkona mogli izračunati kolika je aktivnost ovog minerala bila pakovana u kutijicu sa olivinskim peskom. U tabeli 5.3 prikazane su vrednosti aktivnosti cirkona u pojedinim uzorcima, vremena merenja kao i dobijene vrednosti odbroja pod pikom totalne absorpcije za odabrane tri gama linje od 241.997 keV, 609.312 keV i 2204.21 keV.

Tabela 5.3. Aktivnost cirkona u uzorcima, vreme merenja i odbroj totalne apsorpcije za tri odabране gama linije.

Uzorak	Aktivnost cirkona [Bq]	Vreme merenja [s]	$N_d(241.997)$	$N_d(609.3)$	$N_d(2204.2)$
1	1911	71973	170191	579437	26407
2	1440	73998	144921	461097	20043
3	956.4	85975	122439	380559	15790
4	480	75572	56419	173916	7477
5	0	67083	0	0	0

²⁷ <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/nuclide.asp?iZA=820214>
<http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/nuclide.asp?iZA=830214>

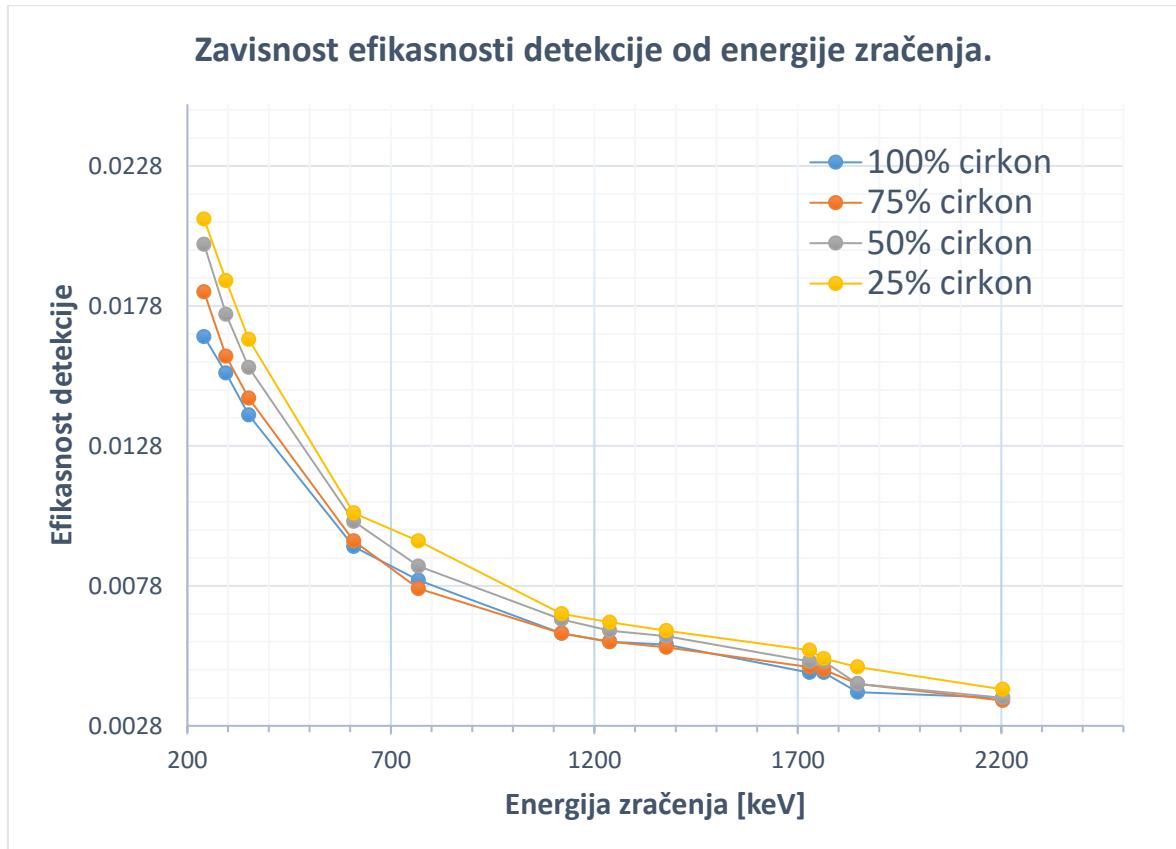
5.1 Rezultati merenja, HPGe detektor

Analizom dobijenih podataka izračunate su efikasnosti detekcije za svih jedanaest odabranih gama linija.

Tabela 5.4. Zavisnost efikasnosti detekcije od energije zračenja za različite udele cirkona u smesi.

Energija [keV]	$\varepsilon(100\% \text{ cirkon})$	$\varepsilon(75\% \text{ cirkon})$	$\varepsilon(50\% \text{ cirkon})$	$\varepsilon(25\% \text{ cirkon})$
241.997	0.0167	0.0183	0.02	0.0209
295.224	0.0154	0.016	0.0175	0.0187
351.932	0.0139	0.0145	0.0156	0.0166
609.312	0.0092	0.0094	0.0101	0.0104
768.356	0.008	0.0077	0.0085	0.0094
1120.287	0.0061	0.0061	0.0066	0.0068
1238,11	0.0058	0.0058	0.0062	0.0065
1377.669	0.0057	0.0056	0.006	0.0062
1764.494	0.0047	0.0048	0.0051	0.0052
1847.420	0.004	0.0043	0.0043	0.0049
2204.21	0.0038	0.0037	0.0038	0.0041

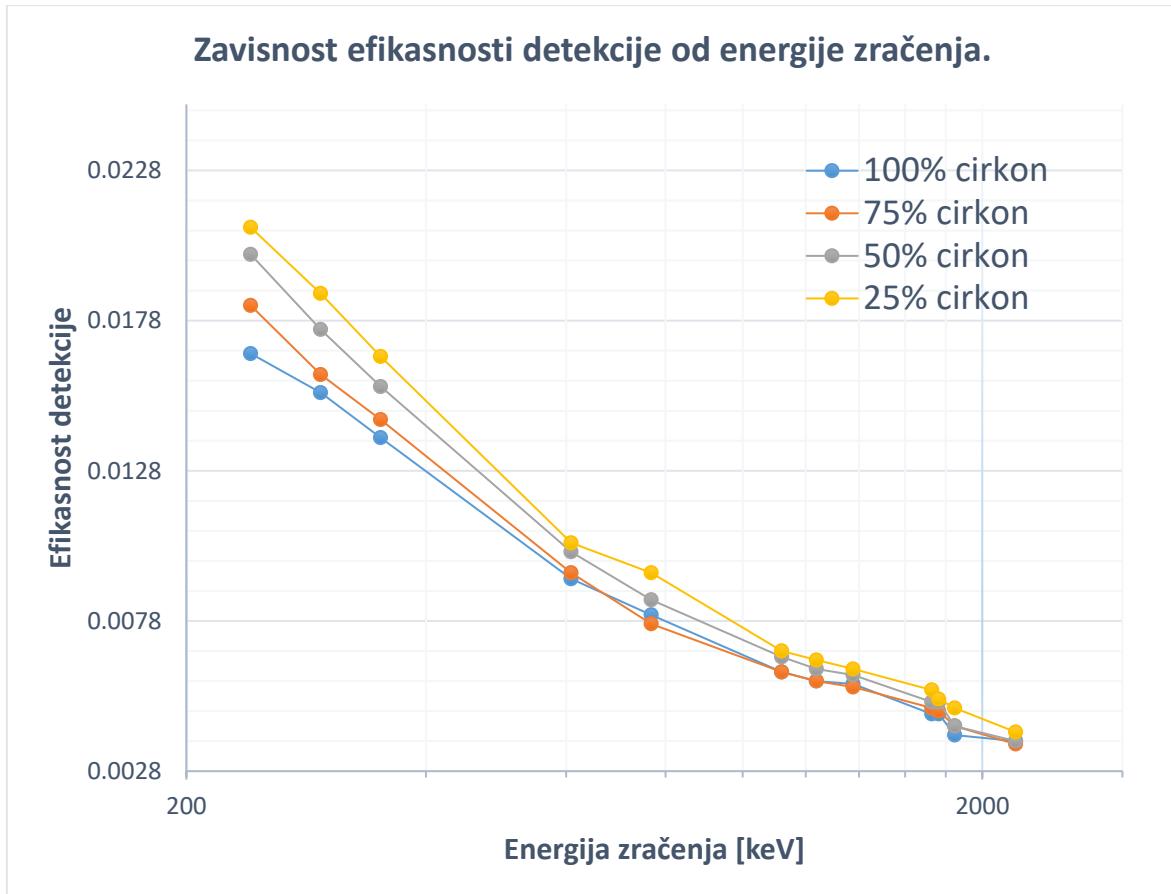
U tabeli 5.4 prikazana je zavisnost efikasnosti detekcije od energije zračenja za udele cirkona od 100%, 75%, 50% i 25%. Primećujemo veliku razliku u efikasnosti detekcije od približno 0.004 do 0.021 za spektar merenih gama linija. Zavisnost efikasnosti detekcije od energije se može videti na graficima prikazanim na slikama 5.2 i 5.3.



Slika 5.2. Zavisnost efikasnosti detekcije od energije zračenja – linearna skala

Na slici 5.2 imamo četiri linije od kojih svaka predstavlja različitu gustinu, odnosno deo cirkona u smesi. Za sve njih primetan je nagli pad efikasnosti detekcije sa porastom energije, u intervalu nižih energija na svim linijama od 240 keV do 600 keV. Na energijama većim od 600 keV trend opadanja efikasnosti detekcije sa porastom energije je primetan ali znatno manje izražen.

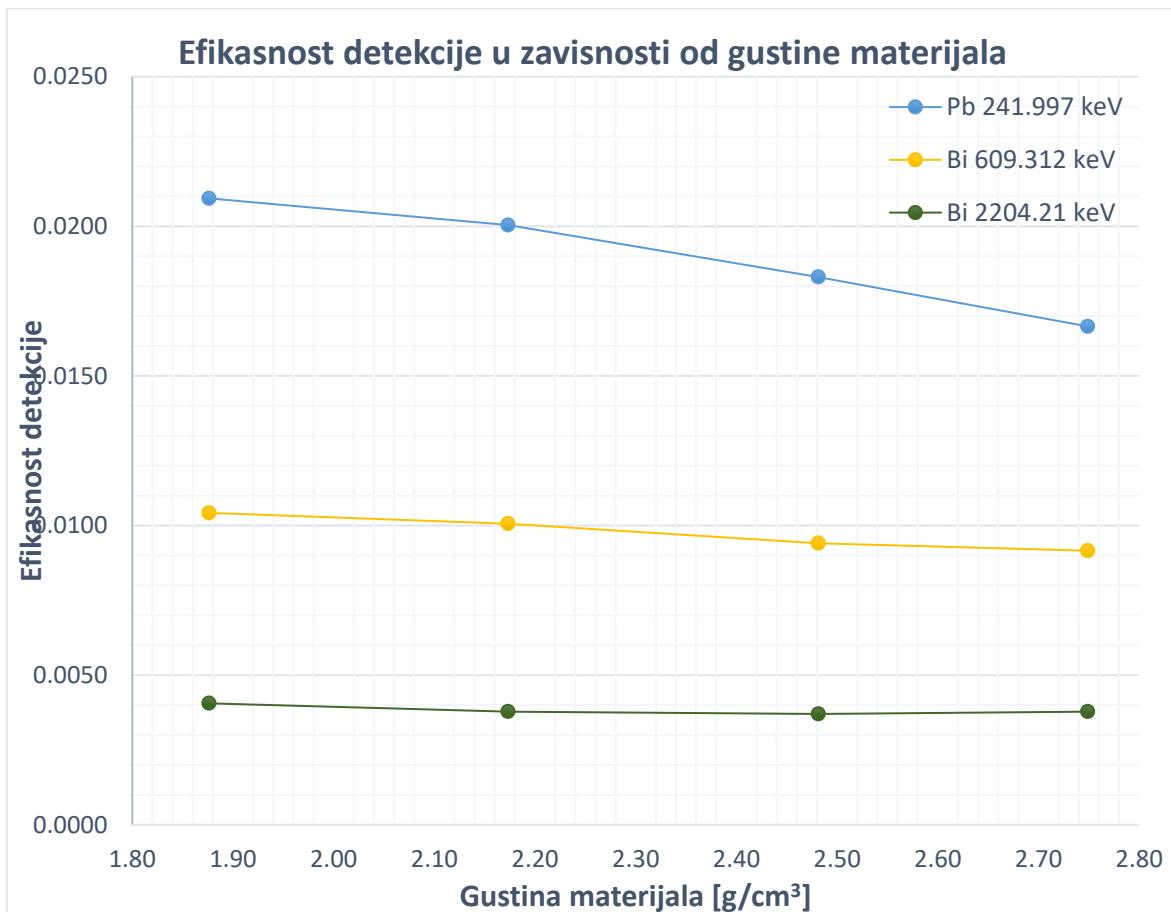
Sa slike 5.2 se može videti da se krive efikasnosti dobijene za različite gustine uzoraka razlikuju. Vidimo da su sve četiri krive blizu jedna drugoj, što nam pokazuje malu razliku u efikasnosti detekcije za različite gustine materijala ali je ona i dalje vrlo očigledna. Kao što se i moglo očekivati, najveća efikasnost se uočava kada je u uzorku bila najmanja koncentracija cirkona. Evidentno je da veća prisutnost olivinskog peska male gustine smanjuje samoapsorpciju u samom uzorku. Ono što je na prvi pogled uočljivo na slici 5.2 je da su varijacije u efikasnosti koje potiču od različitih gustina znatno manje od promena efikasnosti koje potiču od različitih energija emitovanih fotona. Razlike između krivih biće lakše uočiti ako koristimo logaritamsku skalu za energiju zračenja.



Slika 5.3. Zavisnost efikasnosti detekcije od energije zračenja – logaritamska skala

Vidimo da žuta linija prikazuje slučaj kada imamo najveću efikasnost detekcije i najmanju gustinu (25% cirkona). Ispod žute linije slede linije koje predstavljaju redom 50%, 75% i 100% udela cirkona. Primetno je da sa porastom energije gama zračenja, linije gustine uzorka sve više konvergiraju jedna ka drugoj, pa se i prepliću na energijama bliskim 2000 keV. Drugačije rečeno, na većim energijama efikasnost detekcije malo se razlikuje za različite gustine uzorka.

Na slici 5.4 prikazana je zavisnost efikasnosti detekcije od gustine materijala za gde su odabrane tri gama linje: 241.997 keV, 609.312 keV i 2204.21 keV. Može se videti da su izabrane po jedna gama linija iz niskoenergetskog dela spektra, jedna srednja energija, kao i jedna energija iz visokoenergetskog dela. Prilikom izračunavanja korišćene su vrednosti za aktivnost Pb-214 i Bi-214 iz tabele 5.1.



Slika 5.4. Efikasnost detekcije u zavisnosti od gustine materijala za tri gama linije

Slika 5.4 jasno prikazuje da je efikasnost detekcije najveća za najnižu od posmatranih energija, dok najmanju efikasnost imamo na energiji od 2204.2 keV. Takođe se može uočiti kako efikasnost opada sa povećanjem gustine uzorka, tj. sa smanjenjem prisutnosti olivinskog peska. Razlika u efikasnosti je najočiglednija za gama liniju od 241.997 keV. Uočavamo da gama linija 241.997 keV ima jasno izražen nagib, odnosno koeficijent pravca ($k = 0.005$), što nam govori da na ovoj energiji efikasnost detekcije značajno opada sa porastom gustine.

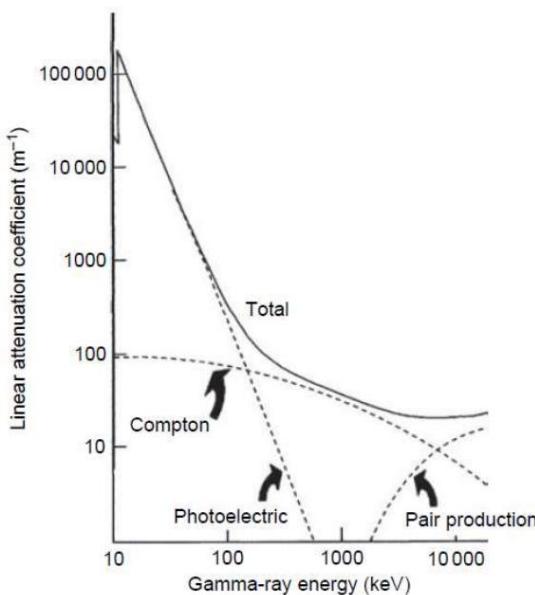
Na osnovu podataka u Tabeli 5.3 se može videti da se efikasnosti detekcije fotona energije od 241.997 keV razlikuju za 25% u opsegu gustina uzorka kojeg posmatramo. Gama linija 609.312 keV ima manji nagib ($k = 0.0015$), i efikasnosti detekcije uzoraka sa maksimalnom i minimalnom posmatranom gustinom je 13 %. Gama linija 2204.21 keV praktično nema nagib ($k = 0.00035$). Izmereno je da uzorci sa 100 %, 75 % i 50% cirkona imaju jednake efikasnosti. Mala razlika se uočava tek kod uzorka najmanje gustine, koji ima 25% cirkona u svom sastavu. Evidentno promena gustina merenog uzorka ima veoma mali

efekat u oblasti visokih energija zbog velike prodone moći visokoenergetskog gama zračenja.

Na osnovu trenda opadanja efikasnosti detekcije gama zračenja sa porastom gustine uzorka, prikazanog na slikama 5.1, 5.2 i 5.3 dolazimo do sledećih zaključaka:

- Efikasnost detekcije brzo opada sa porastom energije gama zračenja, posebno u intervalu energija gama fotona od 240 keV do 600 keV.
- Efikasnost detekcije opada i sa porastom gustine materijala, što je više izraženo u intervalu energija gama fotona od 240 keV do 600 keV.

Do pada efikasnosti detekcije sa porastom energije gama zračenja dolazi usled povećanja prodornosti gama zračenja veće energije. Ovaj efekat direktno zavisi od materijala koji koristimo za detekciju. U opštem slučaju, što je veći atomski broj materijala, to je veći presek za interakciju sa gama zračenjem. Takođe, sa promenom energije gama fotona dolazi i do promene mehanizma interakcije gama fotona sa materijom. U ovoj analizi merenja su vršena u intervalu energija od 240 keV do 2204 keV, gde je dominantan proces interakcije gama zračenja sa materijom komptonovo rasejanje. Fotoelektrični efekat karakterističan je za niže energije, a produkcija parova za više energije od navedenog intervala.



Slika 5.5.²⁸ Atenuacioni koeficijent germanijuma u funkciji energije i tipa interakcije.

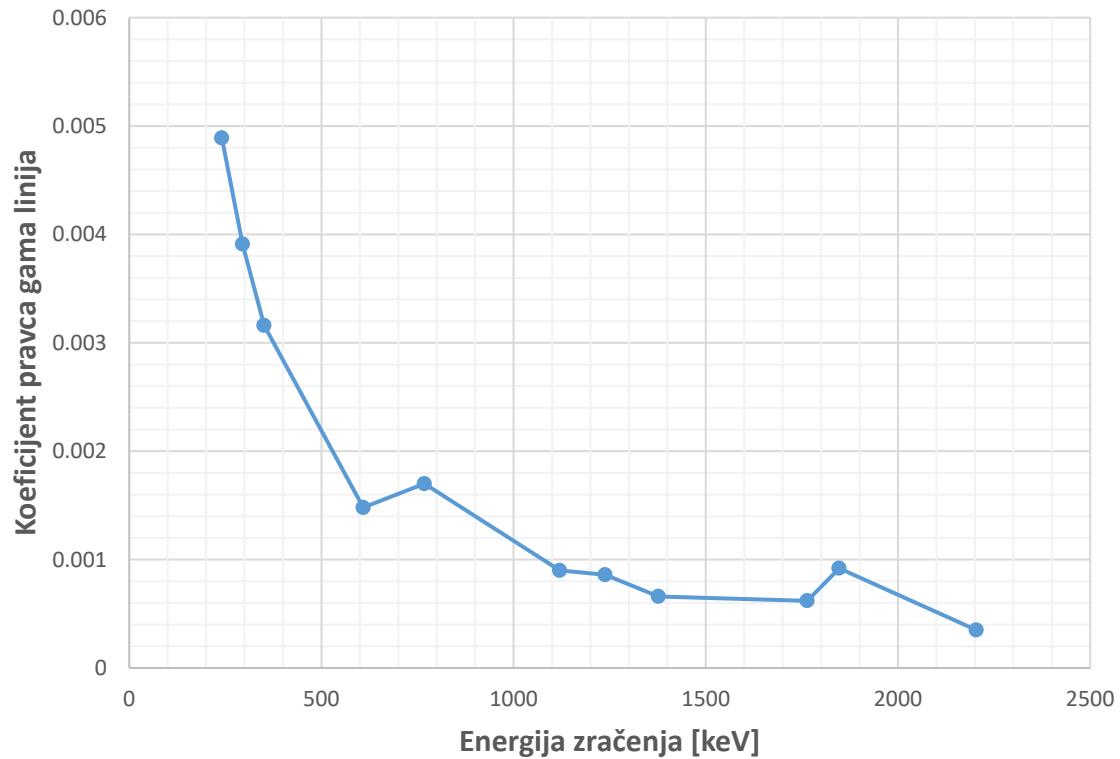
²⁸ https://www.researchgate.net/figure/Attenuation-coefficient-of-germanium-per-energy-and-per-type-of-interaction-4-p-26_fig2_328090841

Na slici 5.5 možemo da vidimo promenu atenuacionog koeficijenta germanijuma u funkciji energije gama zračenja. Lako se uočava naglo opadanje atenuacionog koeficijenta u intervalu energija od 10 keV do 600 keV. Rastom energije od 600 keV trend opadanja atenuacionog koeficijenta usporava i na kraju prestaje na energijama od nekoliko MeV. Korelacija između koeficijenta atenuacije germanijuma prikazana na slici 5.4 i efikasnosti detekcije HPGe detektora prikazana na slici 5.2 je očigledna. Koeficijent atenuacije nam govori o stepenu apsorpcije (interakcije) zračenja u materijalu, što je opet u direktnoj vezi sa mehanizmom detekcije samog zračenja, gde je neophodna interakcija zračenja sa materijom da bi isto bilo detektovano. Sa opadanjem atenuacionog koeficijenta germanijuma, opada i efikasnost detekcije HPGe detektora, a dinamika promene ova dva parametra sa energijom je vrlo slična u posmatranom intervalu energija gama zračenja.

Efikasnost detekcije zavisi i od gustine materijala uzorka. To je utvrđeno u analizi grafika na slikama 5.1, 5.2 i 5.3. Na slici 5.1 o tome svedoče koeficijenti pravca gama linija, a na slikama 5.2 i 5.3 razmak između linija koje predstavljaju različite gustine materijala uzorka. Vrednost koeficijenta pravca gama linije govori nam o vezi između efikasnosti detekcije i gustine uzorka. Što je veći koeficijent pravca gama linije, to je i veći pad efikasnosti detekcije usled povećanja gustine uzorka. Promena koeficijenta pravca gama linija može se i grafički prikazati, kao na slici 5.5.

Primetimo da je dinamika promene koeficijenta pravca gama linija sa energijom slična kao i promena efikasnosti detekcije sa grafika 5.2. Sa rastom energije detektovano zračenja koeficijent pravca gama linije opada, odnosno uticaj gustine uzorka na efikasnost detekcije opada.

Koeficijenti pravca gama linija u funkciji energije gama zračenja



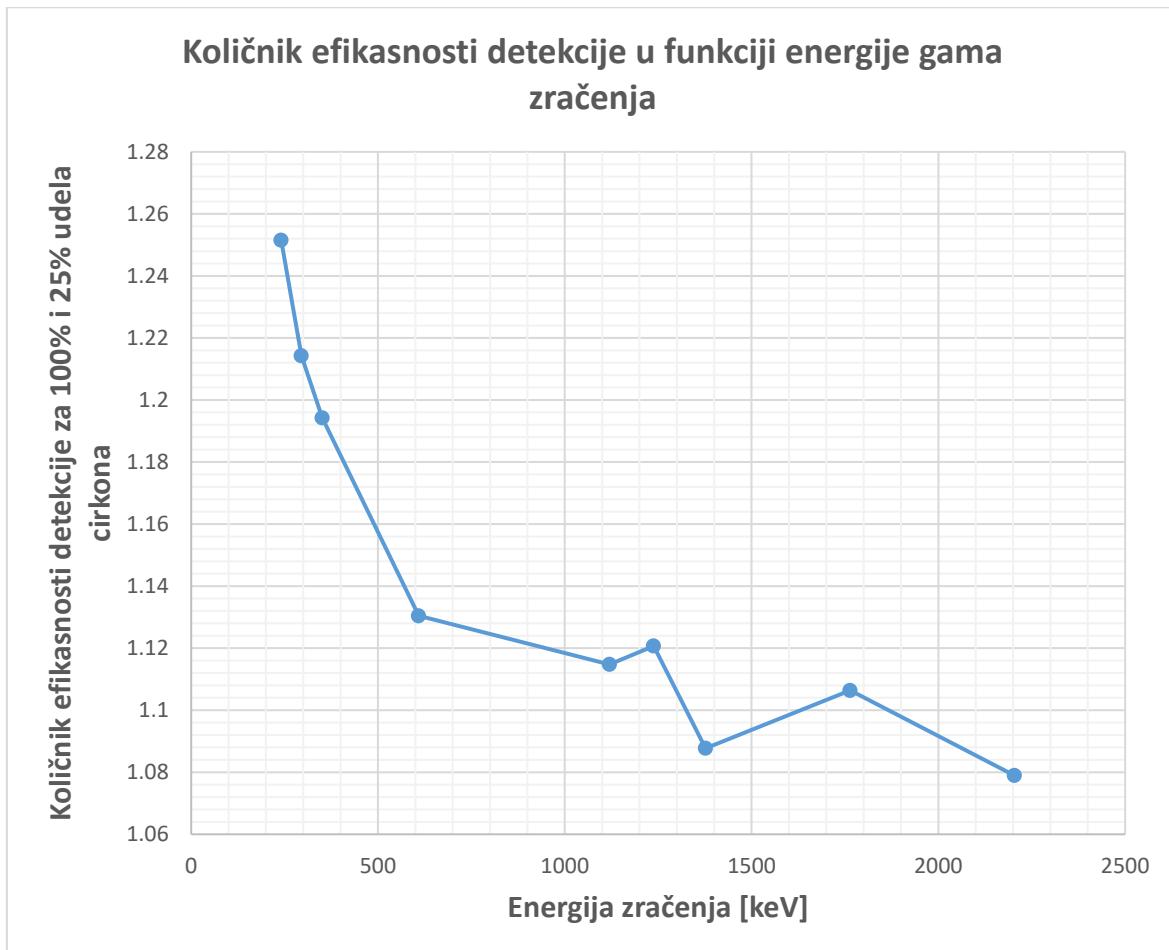
Slika 5.6. Koeficijent pravca gama linija (efekat samoapsorpcije) u funkciji energije gama fotona.

Do pada efikasnosti detekcije sa povećanjem gustine uzorka dolazi usled efekta samoapsorpcije. Deo zračenja koje emituje uzorak biva apsorbovan u samom uzorku. Što je veća gustina uzorka, to je efekat samoapsorpcije izraženiji. Sa druge strane, što je veća energija zračenja, to je efekat samoapsorpcije manje izražen jer zračenje veće energije lakše napušta uzorak. O tome svedoči mali koeficijent pravca gama linija na većim energijama, odnosno preplitanje linija gustine na grafiku 5.2.

Uticaj efekta samoapsorpcije na efikasnost detekcije može se i grafički prikazati, kao količnik efikasnosti za 25% i 100% udela cirkona u funkciji energije zračenja. U ovom slučaju na grafiku prikazujemo zastupljenost efekta samoapsorpcije. Što je veća razlika u efikasnosti detekcije za 25% i 100% udela cirkona, to je efekat samoapsorpcije više zastupljen.

Tabela 5.4. Količnik efikasnosti detekcije za 100% i 25% udela cirkona u uzorku u funkciji energije zračenja.

Energija [keV]	$\varepsilon(100\% \text{ cirkon})$	$\varepsilon(25\% \text{ cirkon})$	$\frac{\varepsilon(100\% \text{ cirkon})}{\varepsilon(25\% \text{ cirkon})}$
241.997	0.0167	0.0209	1.2515
295.224	0.0154	0.0187	1.2143
351.932	0.0139	0.0166	1.1942
609.312	0.0092	0.0104	1.1304
1120.287	0.0061	0.0068	1.1148
1238,11	0.0058	0.0065	1.1207
1377.669	0.0057	0.0062	1.0877
1764.494	0.0047	0.0052	1.1064
2204.21	0.0038	0.0041	1.0789

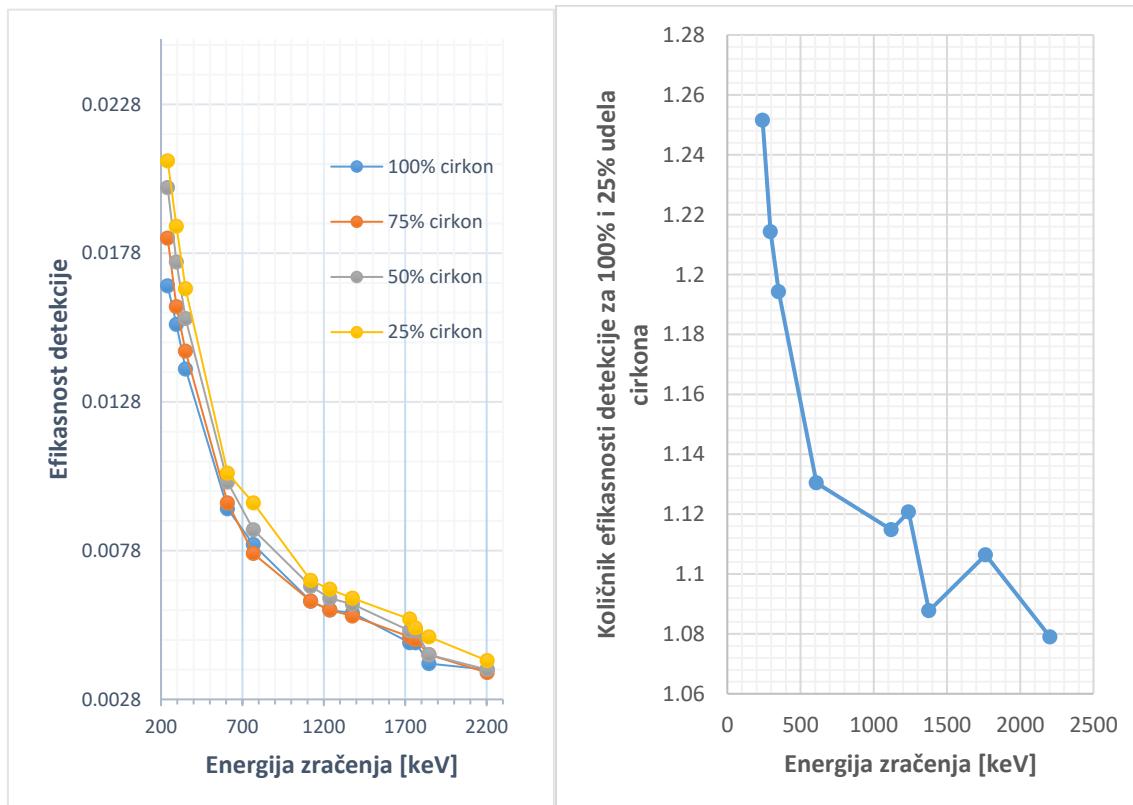


Grafik 5.6. Količnik efikasnosti detekcije za 100% i 25% udela cirkona u uzorku u funkciji energije zračenja (zastupljenost efekta samoapsorpcije)

Primetimo da je trend promene efikasnosti detekcije, kao što je prikazano na grafiku 5.6, usled povećanja gustine uzorka sa energijom sličan kao i promena efikasnosti detekcije samog detektora sa povećanjem energije, kao što je prikazano na grafiku 5.2.

U opsegu energije 240 keV do 600 keV efekat samoapsorpcije naglo opada sa porastom energije, dok za energije preko 600 keV efekat samoapsorpcije sporije opada sa porastom energije.

Objašnjenje za ovu vezu između efikasnosti detekcije i samoapsorpcije leži u samom mehanizmu rada detektora i mehanizmu samoapsorpcije. Efekat samoapsorpcije predstavlja pojavu atenuacije gama zračenja emitovanog iz materijala u samom materijalu, pa taj emitovani gama foton ni ne stiže do detektora, već biva apsorbovan u samom uzorku. Što je veća energija gama fotona, to je veća verovatnoća da neće doći do ovog efekta. Po istom mehanizmu, što je veća energija gama fotona koji prolaze kroz detektor, to je veća verovatnoća da neće doći do interakcije za radnom zapreminom detektora, odnosno neće doći do detekcije i efikasnost detekcije opada. Što je veća energija zračenja, to efikasnost detekcije i samoapsorpcija zračenja opadaju po istoj dinamici, usled povećanja prodorne moći zračenja.



6. Zaključak

U ovome radu, upoređivane su efikasnosti detekcije radioaktivnog zračenja na HPGe detektoru za različite udele cirkona (100%, 75%, 50% i 25%) u smesi sa olivinskim peskom. Cilj ovog rada bio je da se utvrdi uticaj gustine uzorka na efikasnost detekcije.

Analizom dobijenih eksperimentalnih podataka došlo se do dva zaključka: efikasnost detekcije brzo opada sa porastom energije gama fotona, usled povećane prodornosti zračenja veće energije i efikasnost detekcije opada i sa povećanjem gustine uzorka. Promene efikasnosti detekcije uzrokovane promenom gustine uzorka izražene su na nižim energijama (do 700 keV), gde zračenje biva apsorbovano u samom uzorku ili drugim rečima izražen je efekat samoapsorpcije. Ovaj efekat jasno se uočava po nagibu krive 241.997 keV na grafiku 5.1 i razmaku između linija gustine sa grafika 5.3.

Sa povećanjem energije zračenja, promena efikasnosti detekcije uzrokovana promenom gustine uzorka je sve manja. Ovaj efekat lako se uočava po praktično ravnoj liniji 2204.21 keV, koja nam pokazuje da nema promene efikasnosti detekcije sa gustom i preplitanju linija gustine na energijama oko 2000 keV.

Trend promene efikasnosti detekcije sa energijom poklapa se sa trendom uticaja gustine uzorka na efikasnost detekcije sa energijom. Razlog za ovu vezu leži u mehanizmu detekcije radioaktivnog zračenje, gde je neophodna interakcija zračenja sa radnom zapreminom detektora. Efekat samoapsorpcije je upravo posledica interakcije radioaktivnog zračenja ali ne sa detektorm već samim uzorkom. Na većim energijama efikasnost detekcije detektora opada usled smanjene interakcije sa fotonima visoke energije, a efekat samoapsorpcije opada jer ti isti fotoni nisu stupili u interakciju sa materijalom uzorka.

Literatura

- Glenn F. Knoll, Radiation Detection and Measurement
- M. Krmar, Uvod u nuklearnu fiziku, PMF Novi Sad, 2013
- Nikolaj Thomas Zinner, Nuclear Reactions for Nuclear Astrophysics, Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy, 2007
- Joseph Magill, Jean Galy, Radioactivity Radionuclides Radiation
- J.L. Basdevant, J. Rich, M. Spiro, Fundamentals in Nuclear Physics, 2004
- <https://sr.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%BC>
- https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/detekcija_nuklearnog_zracenja.pdf
- https://en.wikipedia.org/wiki/Gaseous_ionization_detector
- <https://www.ortec-online.com/-/media/ametekortec/other/overview-of-semiconductor-photon-detectors.pdf?dmc=1&la=en&revision=3492e868-3e7e-41fe-aa74-5d26a310df76>

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

TD

Monografska dokumentacija

TZ

Tekstualni štampani materijal

Vrsta rada:

VR

Master rad

Autor:

AU

Ivica Patarčić

Mentor:

MN

prof. dr Miodrag Krmar

Naslov rada:

NR

Uticaj samoapsorpcije na efikasnost detekcije gama zračenja voluminoznih uzoraka

Jezik publikacije:

JP

srpski (latinica)

Jezik izvoda:

JI

srpski/engleski

Zemlja publikovanja:

ZP

Srbija

Uže geografsko područje:

UGP

Vojvodina

Godina:

GO

2021

Izdavač:

IZ

Autorski reprint

Mesto i adresa:

MA

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

Fizički opis rada:

FO

Broj poglavlja/strana/tabela/slika/referenci

6/52/6/29/28

Naučna oblast:

NO

fizika

Naučna disciplina:

ND

Nuklearna fizika

Predmetna odrednica/ ključne reči:

PO

Zračenje, samoapsorpcija, efikasnost detekcije

UDK

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

Čuva se:

ČU

Važna napomena:

VN

nema

Izvod:

IZ

Analizom dobijenih eksperimentalnih podataka došlo se do dva zaključka: efikasnost detekcije brzo opada sa porastom energije gama fotona, usled povećane prodornosti zračenja veće energije i efikasnost detekcije opada i sa povećanjem gustine uzorka.

Datum prihvatanja teme od NN veća:

DP

16.11.2020.

Datum odbrane:

DO

28.05.2021.

Članovi komisije:

KO

Predsednik: dr Srđan Rakić, redovni profesor
član: dr Miodrag Krmar, redovni profesor
član: dr Nikola Jovančević, docent

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>	Ivica Patarčić
AU	
<i>Mentor/comentor:</i>	dr Miodrag Krmar
MN	
<i>Title:</i>	Selfabsorption Influence on the Detection Efficiency of Gama Radiation in Bulk Samples
TI	
<i>Language of text:</i>	Serbian (Latin)
LT	
<i>Language of abstract:</i>	English
LA	
<i>Country of publication:</i>	Serbia
CP	
<i>Locality of publication:</i>	Vojvodina
LP	
<i>Publication year:</i>	2021
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>	6/52/6/29/28
PD	
<i>Scientific field:</i>	Physics
SF	
<i>Scientific discipline:</i>	Nuclear Physics
SD	
<i>Subject/ Key words:</i>	Radioactivity, Selfabsorption, Detection efficiency
SKW	
<i>Holding data:</i>	Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4
HD	
<i>Note:</i>	none
N	
<i>Abstract:</i>	
AB	
<i>Accepted by the Scientific Board:</i>	16.11.2020.
ASB	
<i>Defended on:</i>	28.05.2021.
DE	
<i>Thesis defend board:</i>	
DB	
<i>President:</i>	Srđan Rakić PhD, Full professor

Member:

Miodrag Krmar PhD, Full professor

Member:

Nikola Jovančević PhD, docent