



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Monte-Karlo simulacije uticaja matrice uzorka na efikasnost detekcije HPGe detektora

- master rad -

Mentor:
Prof. dr Dušan Mrđa

Kandidat:
Ivana Stanković

Novi Sad, 2014.

SADRŽAJ

1 UVOD.....	3
2 GAMA SPEKTROSKOPIJA.....	4
2.1 Spektroskopski sistem	4
2.1.1 HPGe detektori	5
2.2 Formiranje i komponente spektra	7
2.3 Karakteristike spektrometra	11
2.3.1 Efikasnost detektora.....	11
2.3.2 Rezolucija detektora.....	14
3 MONTE-KARLO SIMULACIJE	15
3.1 Geant4	16
3.1.1 Struktura Geant4 programskog paketa	17
3.1.2 Geant4 fizički modeli i procesi	18
3.1.3 Izgradnja simulacije	20
4 EKSPERIMENTALNI RAD.....	22
4.1 Detektor i postavka eksperimenta	22
4.2 Standarni referentni materijal.....	23
4.3 Računanje referentnih aktivnosti radionuklida standarda.....	24
4.4 Eksperimentalno određivanje efikasnosti za standardni referentni materijal.....	25
5 ODREĐIVANJE EFIKASNOSTI DETEKTORA POMOĆU MONTE-KARLO SIMULACIJA....	28
5.1 Opis simulacije HPGe detektora i izračunavanja efikasnosti.....	28
5.2 Simulirane vrednosti efikasnosti za različite vrste matrica.....	32
6 POREĐENJE EKSPERIMENTALNIH I SIMULIRANIH VREDNOSTI EFIKASNOSTI ZA STANDARDNI UZORAK.....	37
7 POREĐENJE SIMULIRANIH VREDNOSTI EFIKASNOSTI I DISKUSIJA REZULTATA	40
8 ZAKLJUČAK.....	45
9 LITERATURA	47
BIOGRAFIJA	48

1 UVOD

Precizno određivanje krive efikasnosti vrha pune energije za datu matricu uzorka predstavlja glavni izazov u spektroskopiji gama zračenja. Kriva efikasnosti detektora ne zavisi samo od detektorskog sistema, već i od matrice i oblika uzorka. Uticaj na efikasnost imaju i energija upadnog gama zračenja, geometrija merenja, sistem elektronike, ali i drugi efekti kao što su koincidentno sumiranje ili samoapsorpcija.

U modernom monitoringu radioaktivnosti u životnoj sredini, rutinska gama spektrometrija se primenjuje za ispitivanja velikog broja uzoraka koji sadrže male količine radionuklida. Gama spektrometrijska merenja se obično vrše u blizini detektora, u standardnim geometrijskim zapreminama (Marineli zapremina, cilindrične geometrije). Kalibracija efikasnosti se može izvršiti teorijski korišćenjem Monte-Karlo proračunskih tehniki, ili poluempijski korišćenjem analitičkog metoda. Eksperimentalno, kriva efikasnosti detektora se može odrediti pomoću standardnih uzoraka koji sadrže radionuklide poznatih aktivnosti koji pokrivaju oblast energija gama zraka od interesa. Standardni ili referentni uzorci bi trebali da imaju specifikacije najbliže uzorcima koji se analiziraju, u smislu geometrije i matrica (gustine i sastava).

Idealno, kalibracija svake geometrije merenja bi trebala biti izvršena pomoću više kalibracionih izvora radi reprodukcije specifičnih atenuacionih efekata fotona u svakom merenom uzorku iz životne sredine (u ove uzorce spadaju zemljiste, voda, sediment, različite vrste pepela i drugo). Pošto je obično jedan, ili mali broj kalibracionih izvora dostupan u svakoj geometriji merenja, trebalo bi ispitati zavisnost efikasnosti vrha pune energije od gustine i sastava uzorka, odnosno efekat matrice.

U ovom radu, najpre smo opisali osnove gama spektroskopije, sa posebnim naglaskom na fizici HPGe detektora, formiranju spektra i efikasnosti detekcije. Zatim smo opisali strukturu i funkcionalnost Geant4 programske pakete, baziranog na Monte-Karlo metodu, koji smo koristili u ovom radu. Za fotone koje emituje standardni radioaktivni materijal u opsegu energija od 60-1800 keV, eksperimentalno i korišćenjem Monte-Karlo simulacija smo odredili efikasnosti vrha pune energije za koaksijalni HPGe detektor p-tipa koji smo takođe opisali. Uporedili smo eksperimentalnu i simuliranu krivu efikasnosti za standardni referentni materijal cilindrične geometrije. Zatim smo pomoću Monte-Karlo simulacija izračunali efikasnost detekcije za šest različitih matrica voluminoznih uzoraka, takođe cilindričnog oblika. Poredili smo dobijene rezultate simulacija i na taj način analizirali uticaj osobina matrica (sastava, gustine) na efikasnost detekcije HPGe detektora, što je i bio osnovni cilj ovog rada.

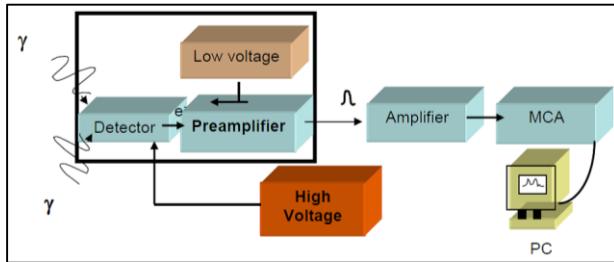
2 GAMA SPEKTROSKOPIJA

Gama spektrometrija je analitički metod čiji je cilj određivanje energije i broja fotona koje emituje izvor gama zračenja. U mnogim primenama ova informacija se koristi da se identifikuju radionuklidi prisutni u izvoru i da se odrede aktivnosti pojedinih komponenata [4]. Ova procedura, uz pomoć germanijumskih detektora visoke rezolucije, omogućava precizno kvantitativno određivanje radioaktivnog sadržaja u bilo kom tipu uzorka, a najčešće se koristi za određivanje koncentracija i aktivnosti prirodnih i veštačkih radionuklida u uzorcima iz prirodne sredine.

U ovom odeljku opisacemo spektroskopski sistem, kako spektar nastaje i koje su njegove komponente, kao i osnovne karakteristike spektrometra.

2.1 Spektroskopski sistem

Tipični analogni spektroskopski sistem sastoji se od: detektora, izvora visokog napona, prepojačivača, pojačivača, pretvarača analognog u digitalni signal (ADC) i višekanalnog analizatora (MCA).



Slika 1: Blok dijagram osnovnog gama-spektrometrijskog sistema

Funkcija elektronskog sistema je sakupljanje elektrona koji proizvode pulseve signala, obrada ovih pulseva i njihovo sortiranje prema visini ili energiji. Ovaj proces se može opisati sledećim koracima:

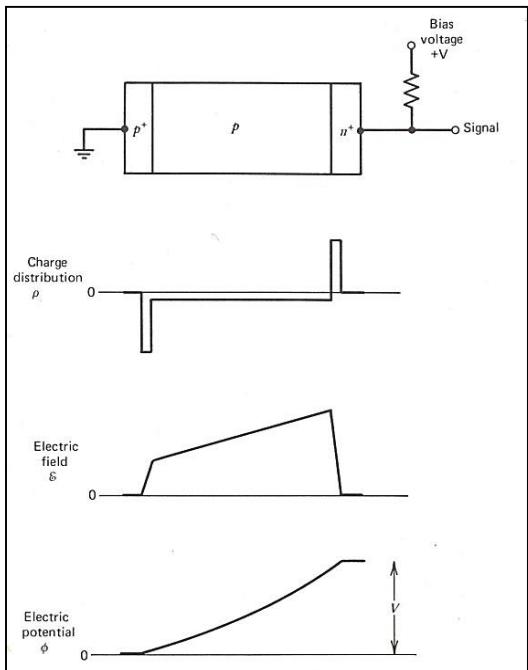
- Foton interaguje sa kristalom detektora, proizvodeći lavinu elektrona
- Primenjeni napon izbacuje elektrone iz kristala
- Struja koju proizvode elektroni formira puls signala
- Veličina pulsa se povećava pomoću prepojačivača
- Puls se dalje pojačava i oblikuje pomoću pojačivača
- Intenzitet pulsa se pretvara u numeričku vrednosti pomoću ADC
- Numeričke vrednosti se šalju do MCA

Danas se uglavnom koriste noviji, digitalni spektrometri, u kojima sistem za digitalnu obradu signala (DSP) zamjenjuje pojačivač i ADC.

Detektori predstavljaju značajni deo elemenata iz kojih je sastavljen spektrometar. Značajnu ulogu imaju HPGe detektori, a mi smo u ovom radu koristili HPGe detektor p-tipa.

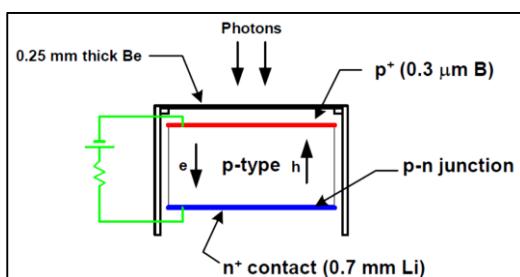
2.1.1 HPGe detektori

Osnovna konfiguracija HPGe detektora p-tipa, u kome kristal Ge sadrži male koncentracije akceptorskih nečistoća (akceptor - elementi III grupe PSE) prikazana je na slici 2. Ova konfiguracija predstavlja $n^+ - p - p^+$ diodnu strukturu (znak + označava visoko dopiran materijal). n^+ kontakt se dobija difuzijom donorskog elementa, koji pripada V grupi PSE (npr. Li) sa jedne strane, dok se p^+ kontakt dobija implantacijom akceptorskog elementa (npr. B).



Slika 2: Osnovna konfiguracija HPGe detektora [2]

Ovde prikazani HPGe detektor je planarni detektor p-i-n strukture, u kome je i sloj (koji ima osobine kristala bezprimesne čistoće: intrinsic - bezprimesan) osetljiv na gama i X zračenje.



Slika 3: Planarni HPGe detektor p-tipa

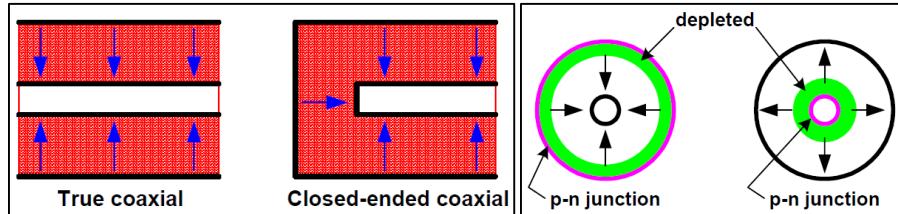
Prednost poluprovodnika u odnosu na druge vrste detektora je to što je potrebna mala količina energije za proizvodnju para elektron-šupljina: za Ge na radnoj temperaturi 77 K (temperatura tečnog azota) ova vrednost iznosi 2.96 eV [3]. Količina stvorenih parova elektron-

PN spoj je inverzno polarizovan te se na taj način formira jako električno polje unutar bezprimesnog sloja. Da bi se ostvarila inverzna polarizacija, pozitivan napon je na n^+ kontaktu (odnosno taj kontakt je na većem potencijalu). Zona prostornog nanelektrisanja se formira kod n^+ ivice centralnog regiona i polako se širi kroz p deo sa povećanjem napona. Ako je napon dovoljno veliki, cela p oblast postaje zona prostornog nanelektrisanja. Pod ovim uslovima, električno polje ima maksimum kod n^+ ivice i opada do nule kod p^+ ivice. Uglavnom se nakon dostizanja ovog napona vrednost napona još povećava radi povećavanja električnog polja do konstantog iznosa duž celog detektora. Tako se povećavaju i pokretljivosti šupljina i elektrona, što je značajno za formiranje signala kod HPGe detektora.

Kada foton dospe u bezprimesni sloj, dolazi do interakcije sa elektronima koje se tu nalaze, pri čemu se formira veliki broj parova elektron-šupljina, a pod uticajem jakog električnog polja vrši se preraspodela nanelektrisanja.

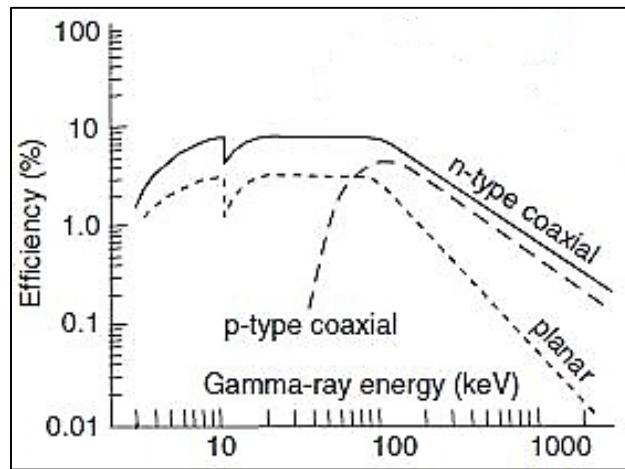
šupljina proporcionalna je energiji upadnog fotona. Dobijeni strujni impuls se dalje vodi na prepojačivač, koji je obično smešten u samo kućište detektora.

Kod planarnih HPGe detektorova, debljina sloja prostornog nanelektrisanja, koja predstavlja aktivnu zapreminu detektora, iznosi 1-2 cm, što je nedovoljno za detekciju visokoenergetskih gama zraka, energije reda MeV. U cilju povećanja aktivne zapremine detektora, proizvedeni su koaksijalni detektori, otvorenog i zatvorenog kraja (slika 4).



Slika 4: Tipovi koaksijalnih HPGe detektora velike osetljive zapremine. Prikazane su dve mogućnosti za formiranje PN spoja (za detektor p-tipa, ljubičastom bojom je označen n^+ kontakt)

Kod koaksijalnih detektora, PN spoj može biti formiran sa spoljašnje ili unutrašnje strane kristala detektora, kao što je prikazano na slici. U slučaju p-n spoja koji se nalazi sa spoljašnje strane kristala, oblast prostornog nanelektrisanja se širi ka unutrašnjosti sa povećanjem primjenjenog visokog napona, sve dok cela oblast kristala ne postane oblast prostornog nanelektrisanja, odnosno aktivna zapremina detektora osetljiva na zračenje. Ova konfiguracija zahteva manji napon nego konfiguracija sa PN spojem unutar kristala (kod koga se sloj prostornog nanelektrisanja širi prema spolja sa povećanjem napona), što je svakako prednost. Koaksijalni detektori mogu imati kućište od Al (debljine oko 1.5 mm) ili prozor od Be (debljine oko 0.5 mm).



Slika 5: Ilustracija opsega energija u kojima se primenjuju različite vrste HPGe detektora

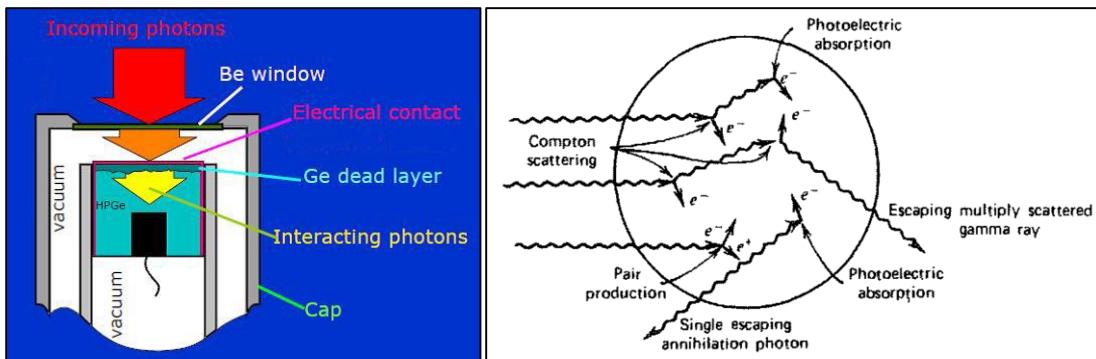
U ovom radu koristili smo koaksijalni HPGe detektor p-tipa zatvorenog kraja smešten u aluminijumskom kućištu, što je konfiguracija koja se i najviše komercijalno proizvodi.

Kod koaksijalnih detektora p-tipa, značajni deo snopa upadnih fotona energija manjih od 100 keV je oslabljen usled relativno debelog površinskog mrtvog sloja koji čini spoljašnji n^+ kontakt (700 μm). Stoga se ovi detektori, najčešće sa prozorom od Al, koriste za detekciju fotona energija većih od oko 50 keV. Nasuprot njima, koaksijalni detektori n-tipa sadrže tanji mrtvi sloj (p^+ kontakt debljine 0.3 μm), pa uz prozor od Be mogu da detektuju fotone najnižih energija, do nekoliko keV [1].

2.2 Formiranje i komponente spektra

U gama spektroskopiji, detektori proizvode izlazne pulseve čije visine su proporcionalne energiji koju upadni fotoni deponuju unutar osetljive zapremine detektora. Sistem merenja pomoću višekanalnog analizatora (MCA) uključuje sortiranje (klasifikovanje) svih generisanih pulseva na osnovu njihove visine, kao i prikazivanje brojeva pulseva u svakoj kategoriji. Krajnji rezultat višekanalne analize je histogram (spektar) detektovanih izlaznih pulseva, poređanih po visinama. Spektar visina pulseva (pulse height spectrum) je direktna reprezentacija energijskog spektra interakcija gama zraka u detekcionom medijumu i sadrži spektroskopske informacije neophodne za određivanje energije i broja fotona emitovanih od strane izvora, odnosno za analizu ispitivanog materijala.

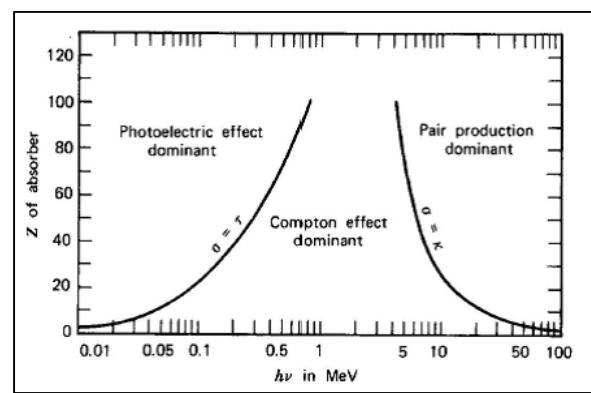
Dobijeni spektar ima složenu strukturu. U idealnom slučaju bi trebalo da se dobije oštra linija za određenu energiju fotona. Međutim, na oblik spektra utiču različiti faktori, kao što su osobine detektora (veličina, oblik, geometrija, sastav), kao i interakcije gama zračenja i detektora, koje su za detektore uobičajenih dimenzija u gama spektroskopiji prikazane na slici 6.



Slika 6: Konfiguracija detektora i interakcije unutar detektora srednje veličine koje utiču na formiranje spektra

Interakcije između gama zraka i aktivne zapremine detektora su: fotoelektrična apsorpcija, Komptonovo rasejanje, proizvodnja parova. Verovatnoće za ove interakcije zavise od energije gama zraka i atomskog broja materijala na sledeći način:

- Za fotoefekat: $\tau \sim \frac{Z^5}{E^{3.5}}$ – dominantna interakcija za fotone niskih energija i materijale velikog rednog broja Z
- Za Komptonovo rasejanje: $\sigma \sim \frac{Z}{E}$ – najviše zastupljen proces za fotone srednjih energija
- Za proizvodnju parova: $\kappa \sim Z^2 \ln E$ – dominantan proces za fotone visokih energija i materijale velikog Z



Slika 7: Oblasti u kojima su različite interakcije gama zraka sa materijom najviše zastupljene [2]

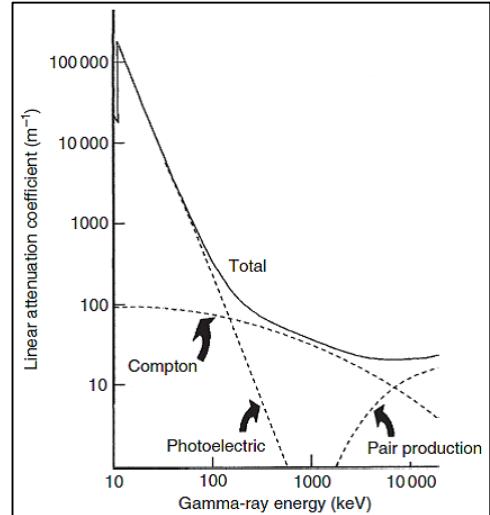
Sumarni efekat ovih interakcija možemo opisati atenuacijom gama zračenja. Zakon atenuacije možemo napisati u sledećem obliku:

$$N = N_0 e^{-\mu_L x},$$

gde je N broj transmitovanih fotona, N_0 broj upadnih fotona, x debljina materijala, a μ_L linearni koeficijent atenuacije koji je jednak sumi linearnih atenuacionih koeficijenata za sva tri efekta:

$$\mu_L = \mu_\tau + \mu_\sigma + \mu_K,$$

i direktno je srazmeran rednom broju materijala. Zavisi i od energije upadnog gama zračenja na način koji je za germanijum prikazan na slici 8.



Slika 8: Linearni koeficijent atenuacije za Ge [1]

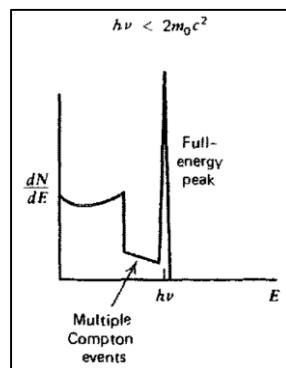
Za niske energije fotona, većina primarnih fotona se u potpunosti apsorbuje u detektoru usled fotoefekta, što doprinosi stvaranju **vrha pune energije**, najizraženijeg pika u spektru gama zračenja (full-energy peak na slici 9).

Za srednje energije fotona kada je Komptonov efekat najizraženiji (za Ge rednog broja 32, ove energije su u opsegu 150 keV–9 MeV) slučajevi jednog ili više Komptonovih rasejanja koji su praćeni fotoelektričnom apsorpcijom rasejanih fotona takođe doprinose vrhu pune energije. Usled jednostrukog Komptonovog rasejanja, u spektru se javlja **Komptonov kontinuum** koji potiče od energija elektrona koji se apsorbuju u detektoru. Ova kontinualna raspodela energije prostire se od nule do tzv. **Komptonove ivice** koja predstavlja maksimalnu energiju koju ulazni foton može da izgubi tokom Komptonovog rasejanja, a koja se može izračunati pomoću formule:

$$E_c = \frac{E}{1 + \frac{m_0 c^2}{2E}}$$

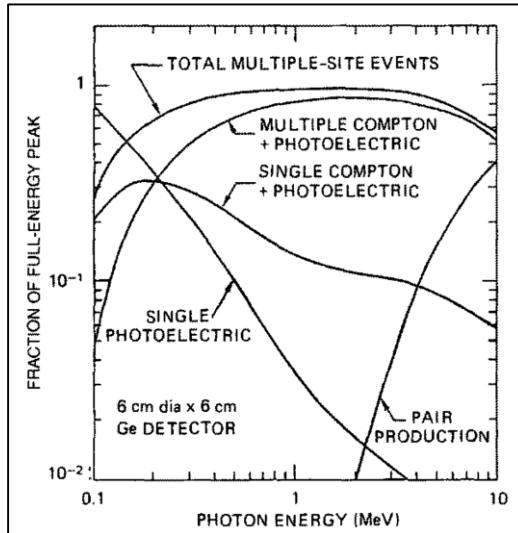
gde je E energija primarnog fotona, a $m_0 c^2$ energija mirovanja elektrona.

Na spektar utiču i događaji **višestrukih Komptonovih rasejanja** u kojima foton napušta detektor (slika 9).



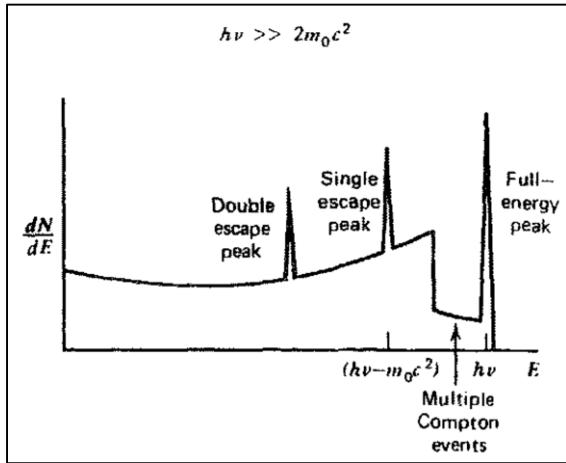
Slika 9: Spektar fotona energija manjih od 1.022 MeV

Na višim energijama, količina energije deponovana u detekcionom materijalu je jednaka energiji fotona usled proizvodnje para prćene fotoelektričnom apsorpcijom oba anihilaciona fotona, što takođe doprinosi vrhu pune energije (slika 10).



Slika 10: Delovi vrha pune energije kojima doprinose različiti mehanizmi gubitaka energije u koaksijalnom HpGe detektoru dimenzija 6 cm x 6 cm, kao što to predviđa Monte Karlo simulacija. Apsorpcija fotona gama zračenja u pojedinačnoj fotoelektričnoj interakciji preovlađuje samo za energije niže od oko 140 keV [2]

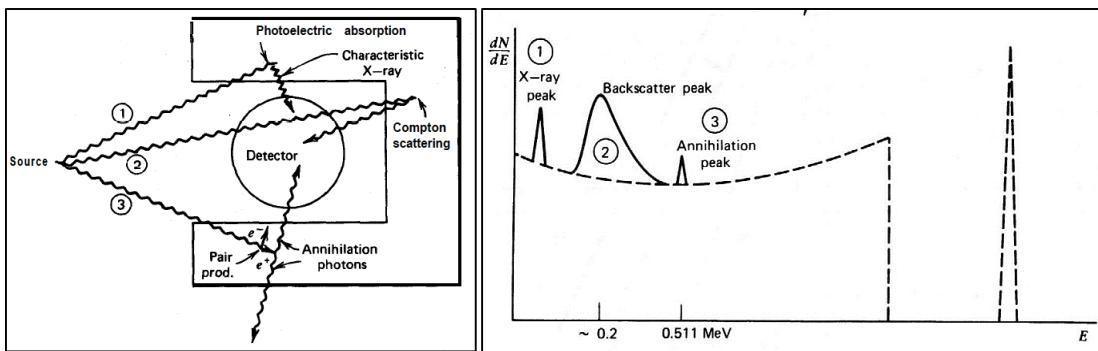
Proizvodnja para je teorijski moguća za energije veće od $2m_0c^2 = 1.022 \text{ MeV}$, ali kod Ge detektora ima značajniju ulogu za energije veće od 1.5 MeV.



Slika 11: Spektar visokoenergetskih fotona

U slučaju proizvodnje parova, anihilacioni fotoni mogu biti u potpunosti apsorbovani unutar detektora i tako činiti deo vrha ukupne energije $h\nu$, jedan od njih može biti apsorbovan dok drugi može napustiti detektor, čime se dobija **vrh jednostrukog izbegavanja** (single escape peak) na energiji $h\nu - m_0c^2$, ili oba fotona mogu napustiti detektor, što u sastavu spektra daje **vrh dvostrukog izbegavanja** na energiji $h\nu - 2m_0c^2$ (double escape peak).

Na spektar gama zračenja, osim interakcija unutar detektora, uticaj imaju i interakcije sa materijalom koji okružuje detektor (npr. interakcije sa okolnom zaštitom, kriostatom, kapom detektora). Rezultujući sekundarni fotoni, tj. X-zraci, Komptonski rasejani i anihilacioni fotoni mogu dopreti do kristala i tako doprineti merenom spektru [4] (slika 12).

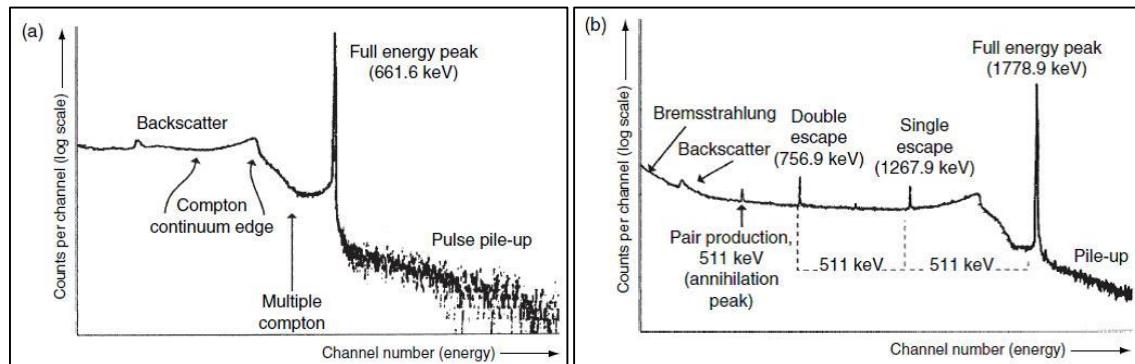


Slika 12: Interakcije gama zračenja i materijala koji okružuje detektor i njihov uticaj na spektrar

Na slici 12, 1) označava karakteristične X-zrake koje emituje okolni materijal, a koji se apsorbuju u detektoru, što dovodi do formiranja **vrha X-zračenja**. Uočavamo nešto širi vrh koji potiče od apsorpcije unazad rasejanih fotona prilikom Komptonovog rasejanja (**backscatter**), na slici označen sa 2). Ovaj pik je širi zbog različitih energija koje unazad rasejni fotoni mogu imati, a javlja se na energijama od 0.25 MeV ili manjim. Sa 3) smo označili anihilacione fotone koji potiču od okolnog materijala, apsorbuju se u detektoru i stvaraju **anihilacioni pik** u spektru na energiji 0.511 MeV. Ova pojava se naročito javlja u sistemima okruženim materijalima velikog Z zbog veće verovatnoće za proizvodnju para.

Dodatne komponente u spektru gama zračenja (slika 13) javljaju se usled:

- Zakočnog zračenja (**Bremsstrahlung**). Ovaj efekat doprinosi kontinuumu na niskim energijama, a potiče od beta čestica i konverzionih elektrona koji dospevaju do detektora u slučaju da detektor ima vrlo tanak ulazni prozor.
- **Pravog koincidentnog sumiranja**. Ako se radionuklid raspada preko kaskade fotona, dva ili više fotona mogu biti detektovani istovremeno, prouzrokujući raspodelu sa vrhom koji odgovara zbiru energija ovih fotona [4]. Ovaj efekat zavisi od šeme nuklearnog raspada i geometrije izvor-detektor.
- Nasumičnog sumiranja (**pile-up**). Kontinuum koji potiče iz sabiranja energija više gama zraka koji simultano stižu do detektora, što čini odbroje na energijama većim od upadne energije fotona pod vrhom ukupne energije. Određen je statističkom verovatnoćom da se dva gama zraka detektuju u isto vreme i javlja se pri velikim brzinama brojanja.



Slika 13: Primeri spektara sa različitim spektralnim komponentama: (a) Cs-137; (b) Al-28 [1]

2.3 Karakteristike spektrometra

Osnovne karakteristike spektrometra su efikasnost i rezolucija (moć razlaganja).

2.3.1 Efikasnost detektora

Efikasnost detektora predstavlja verovatnoću da se gama zraci emitovani od strane izvora registruju u detektoru. Definisane su različite vrste efikasnosti: relativna efikasnost, apsolutna efikasnost vrha ukupne energije, apsolutna totalna efikasnost, geometrijska i sopstvena efikasnost. Atribut „apsolutna“ se najčešće izostavlja. Ovde ćemo prikazati kako se računaju efikasnosti za tačkaste izvore (za izvore konačnih dimenzija računanje je komplikovanije).

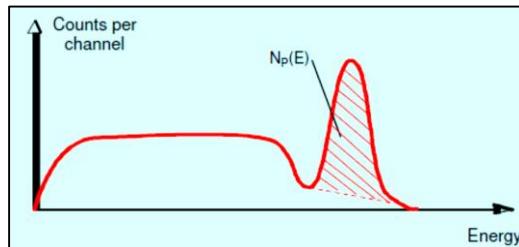
➤ Relativna efikasnost

Mera opšteg učinka detektora koja predstavlja odnos efikasnosti detekcije gama zraka energije 1332 keV emitovanog od strane Co-60 za tačkasti izvor postavljen 25 cm iznad detektora, prema efikasnosti standardnog NaI(Tl) scintilacionog detektora veličine 3" x 3".

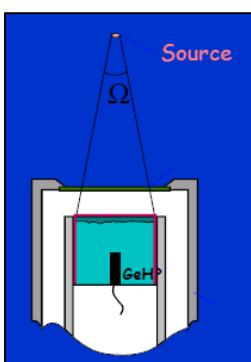
➤ Efikasnost vrha pune energije

Odnos broja odbroja u vrhu pune energije koji odgovara energiji E ($N_p(E)$) (odnosno površine vrha pune energije u merenom spektru, kada se celokupna energija E deponuje u detektoru) i broja fotona energije E emitovanih od strane izvora (F(E)):

$$\varepsilon_p(E) = \frac{N_p(E)}{F(E)}.$$



Slika 14: Označen broj odbroja pod vrhom pune energije



Foton, da bi dao odbroj pod vrhom pune energije, mora:

- Biti emitovan unutar prostornog ugla Ω
- Proći ekrane (kao što su vazduh, n^+ kontakt-mrtav sloj) bez apsorbovanja
- Biti potpuno apsorbovan u aktivnoj zapremini detektora

Slika 15: Prikaz prostornog ugla unutar kog fotoni stižu do detektora

Kao što je već rečeno, za niske energije, potpuna apsorpcija fotona se javlja usled fotoefekta, dok je za više energije moguće da se energija fotona u potpunosti deponuje unutar detektora nakon jednostrukih i višestrukih Komptonovih rasejanja i proizvodnje parova. Stoga je na niskim energijama moguće proceniti ovu vrstu efikasnosti kao proizvod verovatnoće da foton stigne do detektora i verovatnoće da bude apsorbovan [4], a na energijama višim od 100 keV, usled složene zavisnosti od energije, nalaženje formule za izračunavanje ove vrste efikasnosti je nemoguće. Međutim može se odrediti pomoću Monte-Karlo simulacija ili eksperimentalno. Prilikom računanja, mogu se javiti poteškoće usled nedovoljnog poznavanja parametara detektora (atenuacioni koeficijenti, sastav, deblijina materijala), i geometrije (položaj detektora).

Pošto efikasnost vrha pune energije zavisi od geometrije izvor-detektor (geometrijskih uslova, tj. uslova merenja), od energije i atenuacionih svojstava detektora (osobina detektora), može se prikazati kao proizvod geometrijske i sopstvene efikasnosti:

$$\varepsilon_P(E) = \varepsilon_G * \varepsilon_I(E) .$$

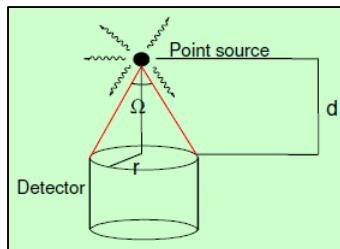
– Geometrijska efikasnost

Geometrijska efikasnost predstavlja odnos broja fotona emitovanih prema detektoru i broja fotona koje emituje izvor, a ukoliko se zračenje emituje izotropno, može se izračunati kao:

$$\varepsilon_G = \frac{\Omega}{4\pi},$$

gde je Ω prostorni ugao između izvora i detektora, koji za tačkasti izvor iznosi:

$$\Omega = 2\pi \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + r^2}} \right).$$



Slika 16: Geometrija izvor-detektor za tačkasti izvor

Ova vrsta efikasnosti zavisi samo od geometrije izvor-detektor.

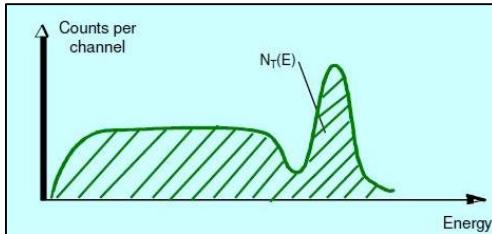
– Sopstvena efikasnost

Sopstvena efikasnost ($\varepsilon_I(E)$) predstavlja odnos broja fotona registrovanih u vrhu pune energije i broja fotona koji su pali na detektor. Ovo je osnovni parametar detektora i nezavisna je od geometrije izvor-detektor. Zavisi od atenuacionih svojstava detektora i energije upadnih fotona, odnosno interakcija kao što su transmisija, apsorpcija, deponovanje ukupne energije, a poteškoće za njeno određivanje nastaju kada ne poznajemo tačno sastav ispitivanog uzorka.

➤ Totalna efikasnost

Odnos ukupnog broja odbroja u spektru ($N_T(E)$) i broja fotona energije E emitovanih od strane izvora ($F(E)$):

$$\varepsilon_T = \frac{N_T(E)}{F(E)}.$$



Slika 17: Prikaz ukupnog broja odbroja u spektru. Uzimaju se u obzir vrh pune energije i sve nepotpune apsorpcije predstavljene Komptonovim kontinuumom

Totalna efikasnost zavisi od geometrije izvor-detektor i od energije, odnosno od:

- Prostornog ugla Ω
- Atenuacije u apsorbujućim slojevima (vazduh, prozor, mrtvi sloj itd)
- Interakcije u aktivnoj zapremini detektora (bilo koji efekat)
- I od materijala koji okružuje detektor (rasejanje).

Uopšteno, efikasnost detektora zavisi od energije upadnog gama zraka, kristala detektora, materijala koji okružuje kristal, geometrije izvor/uzorak-detektor, atenuacije unutar matrice uzorka. Može se odrediti eksperimentalno pomoću standardnih uzoraka koji sadrže radionuklide poznatih aktivnosti koji pokrivaju oblast energija gama zraka od interesa. Monte-Karlo simulacije se takođe mogu koristiti za računanje krive efikasnosti i optimizaciju geometrija merenja.

Kalibracija efikasnosti

U primenama gama spektroskopije, precizno određivanje aktivnosti radionuklida koji se nalaze u sastavu ispitivanog materijala zahteva prethodno poznavanje efikasnosti vrha pune energije na svakoj energiji fotona za datu geometriju merenja, što mora biti određeno kalibracijom efikasnosti uz pomoć poznatih izvora standarda veoma sličnih geometrijskih dimenzija, gustine i hemijskog sastava kao ispitivani uzorak.

Potpuna kalibracija detektorskog sistema zahteva određivanje efikasnosti u funkciji energije. Pri tome je često potrebno izvršiti korekcije na:

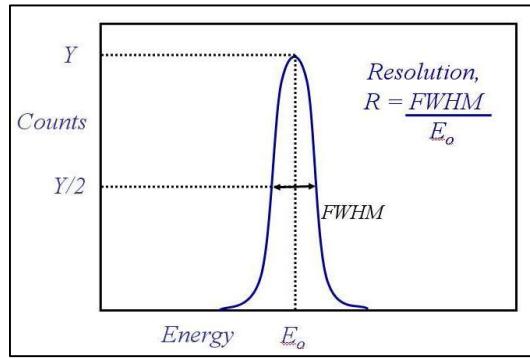
- Geometriju: kada se geometrije merenja standarda i ispitivanog uzorka razlikuju;
- Samo-atenuaciju: važno za niskoenergetske gama zrake kada uzorak i standard imaju različit sastav (uticaj matrice) ili gustinu (različito spakovani atomi);
- Koincidentno sumiranje: važno za radionuklide sa kaskadnim linijama u geometrijama bliskih odbroja.

Kalibraciju efikasnosti je moguće izvršiti eksperimentalno, poluempijski, ili pomoću Monte-Karlo simulacija. Korekcije se mogu izračunati na osnovu analitičkih modela.

2.3.2 Rezolucija detektora

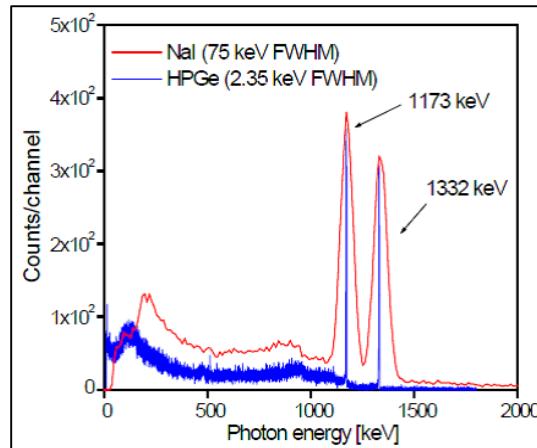
Rezolucija detektora je mera sposobnosti detektora da razlikuje dva veoma bliska vrha energije. U idealnom slučaju svaka energija bi bila predstavljena jednim vrhom u spektru, ali u realnom slučaju svaki vrh ima oblik Gausove raspodele sa konačnom širinom. Detektori visoke rezolucije omogućuju stvaranje oštih vrhova u spektru gama zračenja.

Parametar koji se koristi za definisanje rezolucije detektora je širina vrha pune energije na polovini njegovog maksimuma (Full Width of the full-energy photopeak at Half its Maximum height – FWHM). Dve energije koje upadaju u ovaj interval smatraju se nerazloživim. Rezolucija detektora predstavlja odnos FWHM i energije fotona (slika 18).



Slika 18: Mera rezolucije detektora

Rezolucija je bolja ukoliko je vrednost FWHM manja. Složeni spektri gama zračenja zahtevaju da rezolucija bude što je moguće bolja. Značajna je prednost germanijumskih detektora u odnosu na standardne NaI(Tl) detektore u pogledu rezolucije (slika 19).



Slika 19: Poređenje spektara za Co-60 dobijenih pomoću HPGe i NaI(Tl) detektora

3 MONTE-KARLO SIMULACIJE

Monte-Karlo metodi su široka klasa kompjuterskih algoritama koji koriste slučajno birane događaje za rešavanje složenih problema u fizici, matematici, statistici i drugim oblastima. S obzirom da su ruleti generatori slučajnih događaja, ovi metodi su dobili ime prema prestonici države Monako, poznatoj po kazinima i igrama na ruletu.

Monte-Karlo algoritmi:

- definišu domene mogućih ulaznih događaja;
- generišu slučajno birane ulazne događaje iz domena i izvršavaju sa njima određeni račun;
- sakupljaju rezultate pojedinačnih računa u konačan rezultat.

Osnovna ideja metoda Monte-Karlo je konstruisanje stohastičkog modela koji preslikava stvarni problem, ili direktna simulacija problema. Metod Monte-Karlo je opšti naziv koji se koristi za sve tehnike koje koriste stohastičke procese za analizu sistema. Pogodni su za analizu sistema sa velikim brojem stepeni slobode (npr. fluidi, statistička fizika). S obzirom da procesi u nuklearnoj fizici (npr. raspad, transport čestica kroz materiju, interakcije) podležu zakonima verovatnoće i statistike, Monte-Karlo metodi se primenjuju i u ovoj oblasti. U slučaju transporta zračenja, jedna čestica se prati tokom njenog životnog ciklusa. Izlaz svakog događaja (npr. stvaranja, rasejanja, apsorpcije) je određen preko relativne distribucije verovatnoće. Ako se simulira dovoljno veliki broj čestica, dobijamo sliku koja nam opisuje kako se sistem ponaša.

Monte-Karlo metodi su veoma pogodni za opisivanje složenih geometrija, kao što su geometrije modernih detektorskih sistema u fizici visokih energija (npr. ATLAS, CMS). Zbog visoke cene izvođenja eksperimenata, simulacije imaju značajnu ulugu kao efektivna zamena za eksperimentalna postrojenja. U fizici visokih energija, metod za simulaciju eksperimentalnih podataka se odvija u dve faze: generisanje događaja i simulacija detektora. Generatori događaja opisuju reakcije čestica i proizvode vektore impulsa stvorenih čestica. Output generatora događaja se koristi kao input za program simulacije detektora. Odgovor detektora na prolaz rasejanih čestica sadrži nasumične procese kao što su jonizacija, višestruko Kulonovo rasejanje, itd. Stoga se transport čestica kroz eksperimentalnu postavku može efikasno izvršiti pomoću Monte Karlo tehnike.

Danas postoji mnoštvo različitih Monte-Karlo kodova: MCNPX, GEANT, FLUKA, MARS, PHITS. Programske pakete, kao što je Geant, mogu se koristiti da opišu složene detektorske konfiguracije. Mnogi simulacioni paketi bazirani na Geant-u su razvijeni kao centralne figure za Monte-Karlo studije za različite eksperimente. U ovom radu korišćen je Geant4 programski paket za simulaciju HPGe detektora i izračunavanje efikasnosti detekcije za različite matrice voluminoznih uzoraka. Detalji simulacija i rezultati računanja efikasnosti su prikazani u poglavljju 5, a u ovom poglavljju ćemo dati pregled teorijskih osnova programskog paketa Geant4.

3.1 Geant4

Geant4 je programski paket baziran na Monte-Karlo metodu, prvobitno opisan u dve nezavisne studije u CERN-u i KEK-u 1993. godine. Obe grupe su istraživale kako se moderne kompjuterske tehnike mogu upotrebiti za poboljšanje postojećeg Geant3 simulacionog programa baziranog na FORTRAN-u, i razvile Geant4 1994. godine. Osnovni razlog razvoja Geant4 programskog paketa je potreba za simulacionim programom koji je fleksibilan i funkcionalan za ispunjenje potreba eksperimenata subatomske fizike. Razvoj Geant4 programa je postao velika internacionalna kolaboracija sa mnogo naučnika, fizičara programera i softverskih inžinjera iz više institucija i univerziteta uključenih u istraživačke eksperimente širokog opsega u Evropi, Japanu, Kanadi i SAD.

Geant4 je moderni programski paket implementiran u C++ programu. Koristi napredne softversko-inžinjerske tehnike i objektno-orientisaniu tehnologiju. Svaki deo Geant4 programskog paketa je individualno razvijen od strane grupe stručnjaka, odnosno internacionalne Geant4 kolaboracije. Postoji i radna grupa za testiranje, kontrolu kvaliteta, softversko upravljanje i dokumentaciju softvera. Ovaj programski paket je besplatan, zajedno sa instalacionim vodičem i obimnom dokumentacijom.

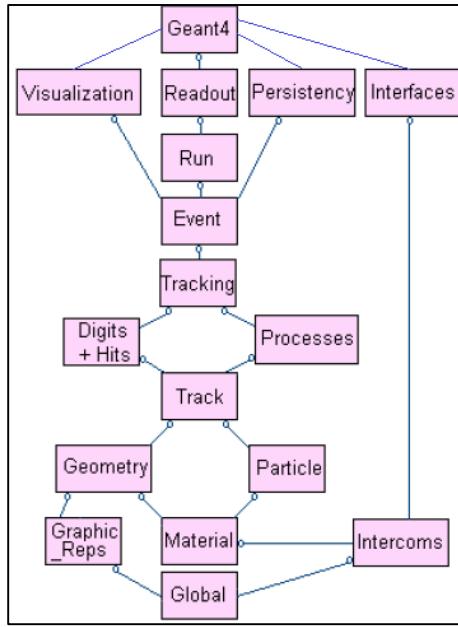
Geant4 softverski programski paket, baziran na Monte-Karlo simulaciji transporta čestica i interakcije sa materijom, sastavljen je od alata koji se mogu koristiti za precizne simulacije prolaska čestica kroz materiju (ime GEANT je zapravo akronim za GEometry ANd Tracking). Simulacioni procesi uključeni u paket su [15]:

- geometrija sistema koji se modeluje,
- materijali,
- čestice od interesa,
- generisanje primarnih događaja,
- praćenje čestica kroz materiju i elektromagnetna polja,
- fizički procesi koji opisuju interakcije čestica,
- odgovor na osetljive komponente detektora,
- stvaranje podataka o događajima,
- skladištenje događaja i tragova,
- vizualizacija detektora i trajektorija čestica,
- analiza simulacionih podataka.

Geant4 uključuje seriju paketa za simulaciju interakcija čestica sa materijom, specijalizovanih za različite tipove čestica, energijski opseg ili pristup u fizičkom modelovanju. Mnoštvo fizičkih pristupa koji su obezbeđeni doprinosi prilagodljivosti Geant4 za primenu u mnogim različitim eksperimentalnim domenima: u nuklearnoj fizici, fizici elementarnih čestica, hadronskoj terapiji, medicinskoj tomografiji, astrofizici i drugim.

3.1.1 Struktura Geant4 programskog paketa

Geant4 je sastavljen od komponenata koje korisnik može da upotrebi da izgradi (build) simulaciju, što ovaj programski paket čini veoma fleksibilnim. Svaka osnovna komponeneta Geant4 programskog paketa je C++ klasa koja često poziva objekte koji su formirani u drugim klasama programskog paketa. Na slici 20 prikazana je hijerarhijska struktura kategorija klasa u Geant4. Kategorije na dnu dijagrama obezbeđuju osnovu programskog paketa i njih koriste praktično sve više kategorije [15].



Slika 20: Dijagram kategorija klasa u Geant4 programskom paketu

Opšta kategorija (Global) pokriva sistem jedinica, konstante, brojeve i rukovanje slučajnim brojevima. Kategorije Materijali i Čestice (Materials, Particles) koriste neophodna oruđa za opisivanje fizičkih osobina čestica i materijala za simulaciju interakcija čestica-materija. Kategorija Geometrija (Geometry) omogućava opisivanje geometrijske strukture i efikasno prolaženje čestica kroz nju. Iznad ovih kategorija su kategorije za praćenje čestica i opisivanje fizičkih procesa kojima one podležu. Kategorija za Tragove (Track) sadrži klase za tragove i korake koje koristi kategorija Procesi (Processes), koja sadrži izvršenja modela fizičkih interakcija: elektromagnetne interakcije leptona, fotona, hadrona, jona, hadronske interakcije. Sve procese poziva kategorija za Praćenje (Tracking), koja upravlja njihovim doprinosom u evoluciji stanja traga i daje informaciju u osetljivim zapreminama za udare (hits) i digitalizaciju (digitization). Iznad ovih, kategorija Događaj (Event) upravlja događajima u smislu njihovih putanja. Kategorija Pokretanje (Run) sakuplja događaje koji imaju sličan snop i implementaciju detektora. Kategorija Iščitavanje (Readout) omogućava rukovanje nagomilavanjem (pile-up). Postoji mogućnost korištenja svih ovih kategorija povezivanjem sa postrojenjima izvan programskog paketa preko apstraktnih interfejsova, putem kategorija Vizualizacija (Visualization), Istrajnost (Persistency), korisnički Interfejs (Interface).

3.1.2 Geant4 fizički modeli i procesi

Geant4 se sastoji od velikog broja različitih fizičkih modela koji omogućuju simulacije interakcija čestica sa materijom u širokom energijskom opsegu (od 250 eV do nekoliko PeV), kao i da na svakom nivou simulacije korisnik ima pristup interfejsu i komandama. Treba napraviti razliku između procesa (interakcija, raspad) – koji imaju dobro definisani poprečni presek i srednji život, i modela – koji proizvodi sekundarne čestice. Moguće je istom procesu dodeliti više modela.

Ograničenja starijih verzija Geant4 je poteškoća u dodavanju novih fizičkih modela, usled njihove složenosti i međusobne zavisnosti. Moderni objektno-orientisani pristup prevazilazi ove poteškoće tako što definiše organizacione principe zajedničke za sve fizičke modele. Tako je funkcionalnost fizičkih modela Geant4 programskog paketa prepoznatljiva i razumljiva, što omogućuje da formiranje i dodavanje novih fizičkih modela bude olakšano i dobro definisano. Na taj način korisnik može već postojeći kod nadograditi i prilagoditi svojim potrebama.

Fizičkim modelima je opisana fizika fotona, elektrona, hadrona, miona i jona [13]. Hiperarhidska struktura Geant4 kategorije za procese podeljena je u sledeće podkategorije:

- **Transport čestica** – transport čestica je određen dužinom slobodne putanje čestice, a uzorkovanje dužina slobodne putanje čestice proizvodi korake na granicama materijala. Fizički procesi ograničavaju veličinu koraka prema dužini slobodne putanje uzorka (npr. cik-cak putanje u Kulonovom rasejanju, gubitak energije i moguća kreacija drugih čestica). Računa se dužina koraka kojim putanja čestice prelazi u drugu zapreminu.
- **Elektromagnetne interakcije** – Fizički procesi (Komptonovo rasejanje, gama konverzija, fotoefekat, proizvodnja para miona), elektron/pozitron procesi (jonizacija, zakočno zračenje, anihilacija), mionski procesi (jonizacija, zakočno zračenje i proizvodnja para elektron-pozitron), hadron/jon procesi (jonizacija), višestruko rasejanje, niskoenergetski elektromagnetni procesi (Rejljevo rasejanje).
- **Hadronske interakcije** – jezgro-jezgro reakcije, lepton-hadron interakcije, elastično rasejanje, interakcije zaustavnih čestica, nuklearne kaskade, fisija, evaporacija, modeli raspada, niskoenergetske neutronske interakcije, radioaktivni raspad, fotonuklearne i elektronuklearne reakcije.
- **Foto-lepton – hadron interakcije**
- **Raspad čestica** – simuliran je od strane G4Decay klase koje je implementirana unutar Geant4 fizičkih procesa koji su bazirani na odnosima grananja. Svaki od modova raspada je implementiran kao klasa i generiše sekundarne čestice koje se proizvode u procesu raspada.
- **Optički efekti** uključuju procese kao što su Čerenkovljevo zračenje, scintilacija, pomeranje talasnih dužina i apsorpcija.
- **Parametrizacija.**

Fizički procesi opisuju kako čestice interaguju sa materijom. Prema kvantnoj teoriji, fizički proces je mikroskopski opis interakcije čestice sa drugom česticom materijala ili spoljašnjeg polja. Verovatnoća za interakciju unutar dužine L usled fizičkog procesa i je:

$$p_i(L) = 1 - e^{\left(-\frac{L}{\lambda_i}\right)},$$

gde je λ_i srednja slobodna putanja.

Monte-Karlo algoritam:

1. definiše osobine upadne čestice (kao što je impuls čestice);
2. uzima vrednosti λ_i za sve relevantne procese;
3. uzima dužinu slobodne putanje L iz raspodela svih učestvujućih procesa;
4. bira najmanju dužinu putanje;
5. pomera česticu za ovaj korak;
6. simulira interakciju;
7. ako čestica još postoji, vraća se na prvi korak.

Za datu simulaciju, određen broj fizičkih procesa je pripisan svakom tipu čestice. Svakom od ovih procesa pripisuje se nekoliko modela i podataka o poprečnim presecima, odnosno verovatnoćama. Svi procesi prolaze kroz dve faze:

- računanje totalnog preseka i njegova primena,
- generisanje krajnjeg stanja.

Za svaki proces, ukupni poprečni presek na datoj energiji E se dobija interpolacijom dostupnih podataka, prema jednačini:

$$\log(\sigma(E)) = \log(\sigma_1) \frac{\log(\frac{E_2}{E})}{\log(\frac{E_2}{E_1})} + \log(\sigma_2) \frac{\log(\frac{E}{E_1})}{\log(\frac{E_2}{E_1})},$$

gde su E_1 i E_2 najbliža donja i gornja energija za koju su poprečni preseci σ_1 i σ_2 dostupni u bibliotekama podataka [17].

Generisanje krajnjeg stanja učesnika određenog procesa se vrši tako što se iz distribucija izvedenih iz teorijskih modela računaju relevantne fizičke veličine, npr. energije produkata, ugaona distribucija deponovane energije. Pri tome se atom materijala na kom se vrši interakcija bira nasumično, a simulira se njegova deekscitacija.

Geant4 je sposoban za **opisivanje i propagaciju različitih elektromagnetskih polja**. Mogu se specifisati magnetna polja, električna polja i elektromagnetna uniformna i neuniformna polja. U cilju propagacije traga unutar polja, jednačina kretanja čestice u polju je uključena u Geant4 paket.

3.1.3 Izgradnja simulacije

Pošto se sadržaj programa menja na osnovu potreba date simulacije, Geant4 programski paket ne obezbeđuje osnovni program. Osnovni program mora napisati korisnik, međutim, primeri jednostavnih osnovnih programa su dati. Program koji korisnik prilagođava svojim primenama je implementiran u dva paketa klase: G4RunManager – sadrži tri obavezne klase koje korisnik mora izgraditi i G4UImanager – sadrži pet klase koje služe korisniku da izmeni definisane kodove u Geant4, koji su povezani sa pokretanjem simulacije, događajima, praćenjem čestica i svakog koraka. Na taj način korisnici mogu napraviti samostalne aplikacije, odnosno izgraditi aplikacije na objektno-orientisanoj osnovi.

Korisnik mora najpre da izgradi primer G4RunManager klase. Ova klasa je odgovorna za početne procedure, i mora biti snadbevena svim informacijama neophodnim za izgradnju (build) i pokretanje (run) simulacije. U ove informacije spadaju: konstrukcija detektora, lista fizičkih procesa, generisanje primarnih čestica.

➤ Konstrukcija detektora

Opis detektora mora da bude što je više moguće realističan za fiziku koja se proučava. Čestice koje se prate kroz detektor moraju videti i osetiti realistično okruženje kako bismo dobili realistične simulacione rezultate. Konstrukcija detektora zahteva mnogo iskustva i stručnosti.

Konstrukcija detektora određuje geometriju elemenata (oblik, veličinu, položaj), korištene materijale, osetljive oblasti i osobine elektronike.

- Geometrija

Geometrijska reprezentacija elemenata detektora se zasniva na definiciji modela Solid i njihovih položaja u prostoru.

Detektor u Geant4 programskom paketu ima logičku i fizičku zapreminu [13]. Logička zapremina (G4LogicalVolume) upravlja informacijama povezanim sa detektorskim elementom određenog oblika (koji je predstavljen datim Solid i Material), nezavisno od njegovog fizičkog položaja u detektoru. Fizička zapremina (G4PhysicalVolume) predstavlja prostorno pozicioniranje date logičke zapremine u odnosu na glavnu logičku zapreminu. Tako se dobija hijerarhijska struktura logičke zapremine u kojoj se svaka zapremina sastoji od manjih zapremina.

- Osetljive oblasti detektora

Svaka logička zapremina može postati osetljiv detektor koji je objekat iz klase G4SensitiveDetector. Osetljiv detektor predstavlja deo detektora koji će izvršiti stvarno merenje. Osnovni zadatak osetljivog detektora je konstrukcija objekata Udar (Hit) pomoću informacija iz koraka duž traga čestice. Udari su zapravo akumulirane fizičke interakcije tragova u osetljivoj oblasti detektora. Ovi objekti simuliraju fizički signal u elementu detektora proizveden u interakciji čestica-materija.

➤ Izbor fizičkih procesa

Potrebno je izabrati i čestice za koje se očekuje da će učestvovati u interakcijama, a koje su definisane u klasi G4ParticleDefinition. Ova klasa opisuje osnovne osobine čestica, kao što su masa i nanelektrisanje, i dodeljuje čestici više procesa kojima je ona podložna. Među fizičkim procesima koji su zadati u Geant4 programskom paketu, a čije kategorije smo opisali, potrebno je izabrati relevantne fizičke procese za konkretni eksperiment, odnosno one za koje se očekuje da će se desiti u datim uslovima. Svaki od ovih procesa je određen relacijama u Geant4, a pregled ovih relacija se može videti u referenci [16].

➤ Generisanje primarnih čestica

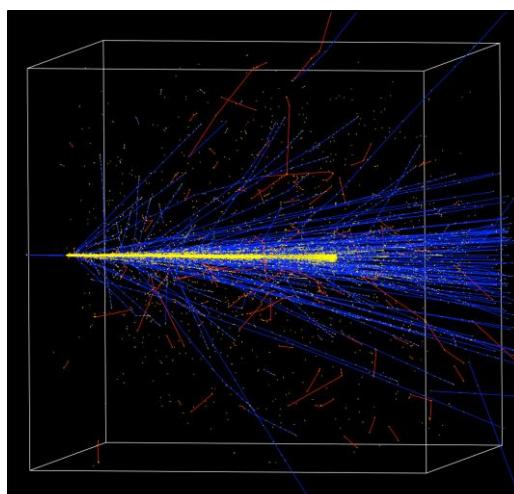
Primarne čestice i verteksi su klase koje korisnik mora sam da izgradi, koje su nezavisne od drugih klasa, i neophodne pre pokretanja simulacije. Neophodno je definisati jednačine na osnovu kojih će program uniformno generisati čestice unutar zapreminе izvora, da bi se dobilo što bolje poklapanje sa eksperimentom.

Praćenje svih čestica

Simulacija fizičkih procesa zavisi od metoda praćenja čestica koje korisnik izabere. Korisnik može odrediti i odsecanje energije čestice i njenu putanju. Stoga, preciznost većine simulacionih kodova zavisi od izabranih teorijskih i fizičkih modela, metoda parametrizacije, i parametara praćenja koji su određeni od strane korisnika.

Vizualizacija

Ova kategorija klasa u Geant4 programskom paketu omogućuje vizuelni prikaz geometrije detektora, trajektorija čestica i njihove interakcije sa osetljivom zapreminom detektora, kao i druge korake potrebne za simulaciju detektora. Primer vizuelnog prikaza trajektorija primarnih jona C-12 energije 330 MeV i sekundarnih čestica u vodi dat je na slici 21.



Slika 21: Primer vizuelnog prikaza u Geant4: trajektorije primarnih jona ugljenika C-12 i sekundarne čestice (elektroni, protoni, neutroni, alfa čestice, teži fragmenti) proizvedene u vodi

4 EKSPERIMENTALNI RAD

4.1 Detektor i postavka eksperimenta

HgGe detektor korišten u ovom radu, sastavni deo laboratorije Departmana za fiziku Univerziteta u Novom Sadu, poznat kao „detektor K”, je koaksijalni detektor p-tipa, model GC3518, serijski broj b 05110. Kristal germanijuma, spoljašnjeg dijametra 61 mm, visine 52 mm, je smešten u kućište od Al debljine 1.5 mm. Spoljašnji n^+ kontakt je debljine 0.65 mm, a unutrašnji p^+ kontakt je tanak sloj Au. Unutar kristala nalazi se šupljina dijametra 9 mm, visine 34 mm. Duž šupljine se prostire bakarna šipka (cold finger) uronjena u Dewar-ov sud sa tečnim azotom, temperature -196°C , čime se postiže hlađenje detektora, neophodno za njegovo funkcionisanje.

Relativna efikasnost detektora je 35.6 %, a FWHM iznosi 1.77 keV za foton energije 1332 keV koji nastaje raspadom Co-60. Odnos peak/Compton iznosi 63.2:1.

HgGe detektor je povezan za modul za digitalnu obradu signala (DSP) Inspector 2000, povezan sa računarcem u kom se snimanje, praćenje i analiza gama spektara vrši pomoću softvera Genie 2000, čiji je proizvođač Canberra. Model prepojačivača je 2002CSL, a kriostata 7935SL-7.

Oko detektora nalazi se olovna zaštita oblika šupljeg cilindra unutrašnjeg dijametra 17 cm, debljine zida 12 cm, visine 37 cm. Iznad i ispod detektora nalaze se takođe olovne zaštite, 12 cm visine. Ovi slojevi olova imaju funkciju da apsorbuju gama zrake iz okoline i smanje šum spektra.



Slika 22: Olovna zaštita koja okružuje detektor i poklopac olovne zaštite

Interakcije između gama zračenja i olovne zaštite proizvode karakteristične X-zrake, energija oko 80 keV. Ove X-zrake može detektovati detektor, i na taj način oni mogu uticati na spektar gama zračenja. Da bi se smanjio ovaj efekat dodate su obloge od kalaja i bakra, debljina 2 mm i 1 mm, respektivno. Na taj način je omogućeno da X-zrake koje emituje olovna zaštita apsorbuje kalaj, a X-zrake koje emituje kalaj (~ 25 keV) apsorbuje bakar. I bakar emituje X-zrake, ali malih energija: ~ 8 keV, tako da oni nemaju značajniji uticaj na spektar [1].

Prilikom eksperimenta, postavili smo standardni izvor zračenja direktno na kapu detektora (slika 23), a radi smanjenja uticaja zračenja iz okruženja detektora, poklopac olovne zaštite smo zatvorili (slika 24).

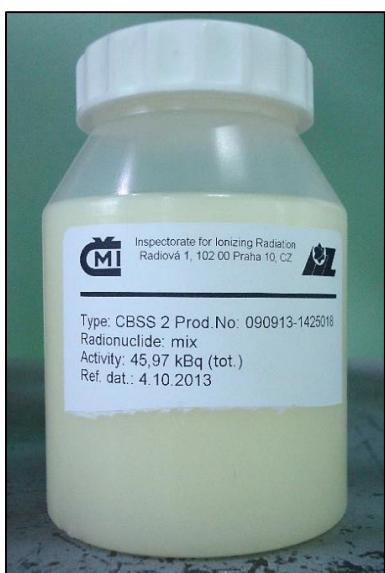


Slika 23: Kapa detektora: sa i bez standardnog izvora zračenja. Vidimo i dodatne obloge od kalaja i bakra sa unutrašnje strane olovne zaštite



Slika 24: Detektorski sistem korišten u snimanju spektra standardnog uzorka

4.2 Standarni referentni materijal



Referentni izvor gama zračenja koji smo koristili u ovom radu sastoji se od 11 radionuklida homogeno raspoređenih u silikonskoj smoli. Vrsta radionuklida i njihove osobine (vremena polurasпадa, aktivnosti) date su u sklopu sertifikata za standard (slika 26). Ove vrednosti su korištene za eksperimentalno određivanje krive efikasnosti, dok sastav matrice (C – 0.321; H – 0.080; O – 0.214; Si – 0.375; S – 0.01) i gustinu ($0.985 \frac{g}{cm^3}$) smo koristili prilikom simuliranja efikasnosti detektora.

Referentni uzorak potiče iz 4. 10. 2013. Nalazi se u plastičnoj posudi, napunjenoj do određenog nivoa tako da se dobije cilindrična geometrija. Njegova zapremina iznosi $250 cm^3$, a masa 246.25 g. Ovaj materijal nazvali smo SMOLA.

Slika 25: Standardni referentni materijal u polietilenskoj posudi



CZECH METROLOGY INSTITUTE
INSPECTORATE FOR IONIZING RADIATION



Radiová 1, 102 00 Praha 10

CERTIFICATE

Cert. No.: 9031 - OL - 540/13 Type: CBSS 2 Prod. No.: 090913-1425018

Radionuclide	Half life days	Activity kBq	Combined standard uncertainty, %
Am-241	157800	4,266	1,1
Cd-109	462,6	16,96	1,4
Ce-139	137,5	1,004	1,1
Co-57	271,26	0,939	1,1
Co-60	1925,4	2,601	1,1
Cs-137	11019	2,468	1,3
Sn-113	115,1	3,800	2,2
Sr-85	64,78	4,176	1,5
Y-88	106,6	4,871	1,2
Hg-203	46,72	2,034	2,5
Eu-152	4858	2,849	1,2

Mass: 246,25 g Density: $0,985 \pm 0,01$ g/cm³ Volume: $250,0 \pm 2,5$ cm³

Radioactive impurities: gamma < 0,1 % Homogeneity: better than: 1 %

Reference date: 4.10.2013

Description:

Radioactive material is homogeneously dispersed in silicone resin.
Composition of the matrix: C - 0,321 H - 0,080 O - 0,214 Si - 0,375 S - 0,01 (mass ratio)

Measuring method:

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

Note:

As the criterion of homogeneity standard deviation of the activity value of 1 cm³ element was chosen (n=10). The volume is calculated from the mass and the density.

Date of the certificate issue: 17.9.2013

Certificate validity: 3 years
(for Hg-203 6 months)

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



Jiří Šurař, MBA
director

Control: RNDr. R. Bludovský, CSc., RNDr. Pavel Dryák, CSc.

Phone: +420 266020497 Fax: +420 266020466

Slika 26: Sertifikat za standard

4.3 Računanje referentnih aktivnosti radionuklida standarda

Prema sertifikatu za standard, početne aktivnosti radionuklida (označene sa A_0 u tabeli 1) se odnose na datum 04. 10. 2013. Ovo se vidi i na etiketi ambalaže u kojoj se standardni referentni materijal nalazi (slika 25). Da bismo odredili krivu efikasnosti, odnosno zavisnost efikasnosti detektora od energije, moramo najpre da odredimo aktivnosti radionuklida koje se odnose na datum snimanja spektra.

Spektar standarda je sniman 07. 01. 2014. sa realnim vremenom 79824,820 s. Živo vreme, tokom koga je detektor bio osetljiv na zračenje, iznosilo je 77700,390 s (mrtvo vreme detektora je 2,66% realnog vremena).

Aktivnosti radionuklida u trenutku merenja, nakon vremena $t = 95$ dana od datuma na koji se odnose početne aktivnosti, izračunate su prema formuli:

$$A = A_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}},$$

gde su A_0 i $T_{1/2}$ odgovarajuće početne aktivnosti i periodi poluraspada, respektivno.

Merne nesigurnosti za aktivnosti su određene prema Gausovoj formuli za srednju kvadratnu grešku:

$$\sigma_A = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial A_0} \sigma_{A_0}\right)^2} = 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \sigma_{A_0}.$$

Rezultati su prikazani u tabeli 1.

Tabela 1: Aktivnosti radionuklida u trenutku merenja

Radionuklid	$T_{1/2}$ [dani]	A_0 [kBq]	A [kBq]
Am-241	157800	4.266(11)	4.264(11)
Cd-109	462.6	16.96(14)	14.710(121)
Ce-139	137.5	1.004(11)	0.622(6)
Co-57	271.26	0.939(11)	0.737(9)
Co-60	1925.4	2.601(11)	2.514(11)
Cs-137	11019	2.468(13)	2.453(13)
Sn-113	115.1	3.800(22)	2.144(12)
Sr-85	64.78	4.176(15)	1.511 (5)
Y-88	106.6	4.871(12)	2.626(6)
Hg-203	46.72	2.034(25)	0.497(6)
Eu-152	4858	2.849(12)	2.811(12)

4.4 Eksperimentalno određivanje efikasnosti za standardni referentni materijal

Nakon određivanja aktivnosti radionuklida A , obradili smo spektar standarda u programu APTEC. Energijsku kalibraciju spektra smo izvršili na osnovu pikova na energijama: 122 keV, 662 keV i 1332 keV, kojima odgovaraju kalibracioni kanali: 635, 3446 i 6941, respektivno. Zatim smoочitali vrednosti neto brzina brojanja R (pri čemu smo oduzeli odgovarajuće vrednosti iz fonskog spektra), koje odgovaraju određenim energijama fotona E_γ , za koje imamo poznat kvantni prinos

p_γ (broj fotona posmatrane energije koji se emituje prilikom jednog raspada radioaktivnog jezgra). Očitane vrednosti u prikazane u tabeli 2.

Efikasnosti detektora na posmatranim energijama, ε_{exp} u tabeli 2, izračunate su prema formuli:

$$\varepsilon = \frac{R}{A p_\gamma},$$

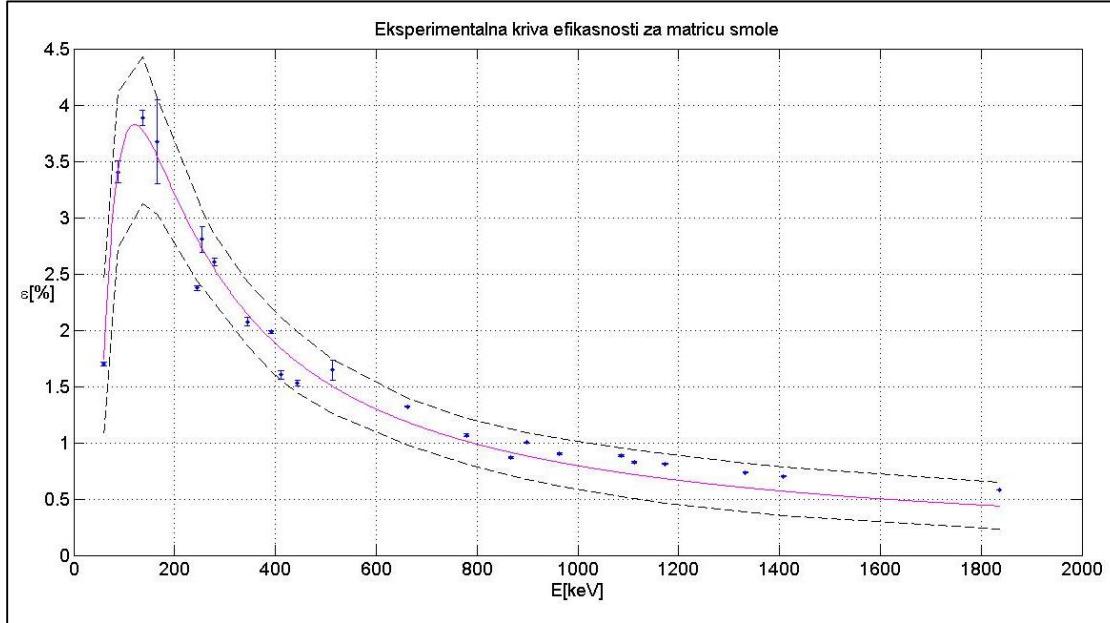
a merne nesigurnosti za efikasnosti su određene pomoću Gausove formule za srednju kvadratnu grešku:

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial R} \sigma_R\right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial A} \sigma_A\right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial p_\gamma} \sigma_{p_\gamma}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{A p_\gamma} \sigma_R\right)^2 + \left(-\frac{R}{A^2 p_\gamma} \sigma_A\right)^2 + \left(-\frac{R}{A p_\gamma^2} \sigma_{p_\gamma}\right)^2}.$$

Tabela 2: Efikasnost detektora određena pomoću spektra standarda

E_γ [keV]	nuklid/ potomak	p_γ	A [Bq]	R [c/s]	ε_{exp} [%]
59.54	Am241/Np237	0.359(4)	4264(11)	26.01(5)	1.699(20)
88.03	Cd109/Ag109	0.037(1)	14710(121)	18.53(4)	3.405(97)
136.47	Co57/Fe57	0.1068(8)	737(9)	3.06(3)	3.888(68)
165.86	Ce139/La139	0.80(8)	622(6)	18.28(4)	3.674(369)
244.70	Eu152/Sm152	0.0761(4)	2811(12)	5.08(3)	2.375(21)
255.13	Sn113/In113	0.0211(8)	2144(12)	1.27(2)	2.807(116)
279.19	Hg203/Tl203	0.8156(10)	497(6)	10.56(3)	2.605(33)
344.28	Eu152/Gd152	0.266(5)	2811(12)	15.51(3)	2.074(40)
391.70	Sn113/In113	0.6497(17)	2144(12)	27.63(4)	1.984(13)
411.12	Eu152/Gd152	0.02237(25)	2811(12)	1.01(2)	1.604(39)
443.96	Eu152/Sm152	0.03158(30)	2811(12)	1.36(2)	1.531(28)
514.01	Sr85/Rb85	0.96(5)	1511(5)	23.85(4)	1.644(86)
661.66	Cs137/Ba137	0.8521(5)	2453(13)	27.61(4)	1.321(7)
778.90	Eu152/Gd152	0.1296(14)	2811(12)	3.88(2)	1.065(14)
867.37	Eu152/Sm152	0.0426(3)	2811(12)	1.04(1)	0.869(11)
898.04	Y88/Sr88	0.937(3)	2626(6)	24.69(4)	1.003(4)
964.08	Eu152/Sm152	0.1479(7)	2811(12)	3.74(2)	0.891(8)
1085.87	Eu152/Sm152	0.1024(5)	2811(12)	2.55(2)	0.886(9)
1112.07	Eu152/Sm152	0.1369(7)	2811(12)	3.18(2)	0.826(8)
1173.24	Co60/Ni60	0.9985(3)	2514(11)	20.36(3)	0.811(4)
1332.50	Co60/Ni60	0.999826(6)	2514(11)	18.46(3)	0.734(3)
1408.01	Eu152/Sm152	0.2107(10)	2811(12)	4.15(2)	0.701(6)
1836.06	Y88/Sr88	0.992(3)	2626(6)	15.12(3)	0.580(3)

Primećujemo da je efikasnost detekcije najveća na energiji 136.47 keV, kao i da su nesigurnosti nešto veće kod nekoliko početnih vrednosti (prepostavljamo zbog niskih energija). Ovo vidimo i na grafiku zavisnosti efikasnosti od energije, prikazanom na slici 27.



Slika 27: Eksperimentalno određena kriva efikasnosti vrha ukupne energije za referentni izvor zračenja – smolu. Isprekidanim linijama su označeni intervali za fit na nivou poverenja od 95 %

Fitovanje je izvršeno u MATLAB-u, racionalnom funkcijom oblika:

$$f(x) = (p_1 * x^2 + p_2 * x + p_3) / (x^3 + q_1 * x^2 + q_2 * x + q_3).$$

Brojčane vrednosti koeficijenata za eksperimentalnu krivu efikasnosti, sa granicama poverenja od 95%, su:

$$p_1 = 859 \text{ (471.5, 1246)}; p_2 = -4.116\text{e+}04 \text{ (-1.05e+}09, 1.05\text{e+}09); p_3 = -919.7 \text{ (-5.034e+}10, 5.034\text{e+}10);$$

$$q_1 = -8.943 \text{ (-1.223e+}06, 1.223\text{e+}06); q_2 = 2871 \text{ (-1.115e+}07, 1.116\text{e+}07); q_3 = 1163 \text{ (-3.535e+}09, 3.535\text{e+}09).$$

Drugi brojčani podaci, koji govore o preciznosti izabranog fita (goodness of fit) su:

zbir kvadrata usled greške (sum of squares due to error): 0.4730

koeficijent determinacije (coefficient of determination): 0.9786

stepeni slobode (degrees of freedom): 17

prilagođen koeficijent determinacije (degree-of-freedom adjusted coefficient of determination): 0.9723

standardna devijacija (root mean squared error (standard error)): 0.1668.

Vidimo da je koeficijent determinacije blizak jedinici, što govori da je funkcija za fit dobro izabrana.

Sve simulirane krive efikasnosti u ovom radu, radi poređenja, su fitovane funkcijom istog oblika, a na grafike su ucrtani i intervali za fit, na nivou poverenja od 95%.

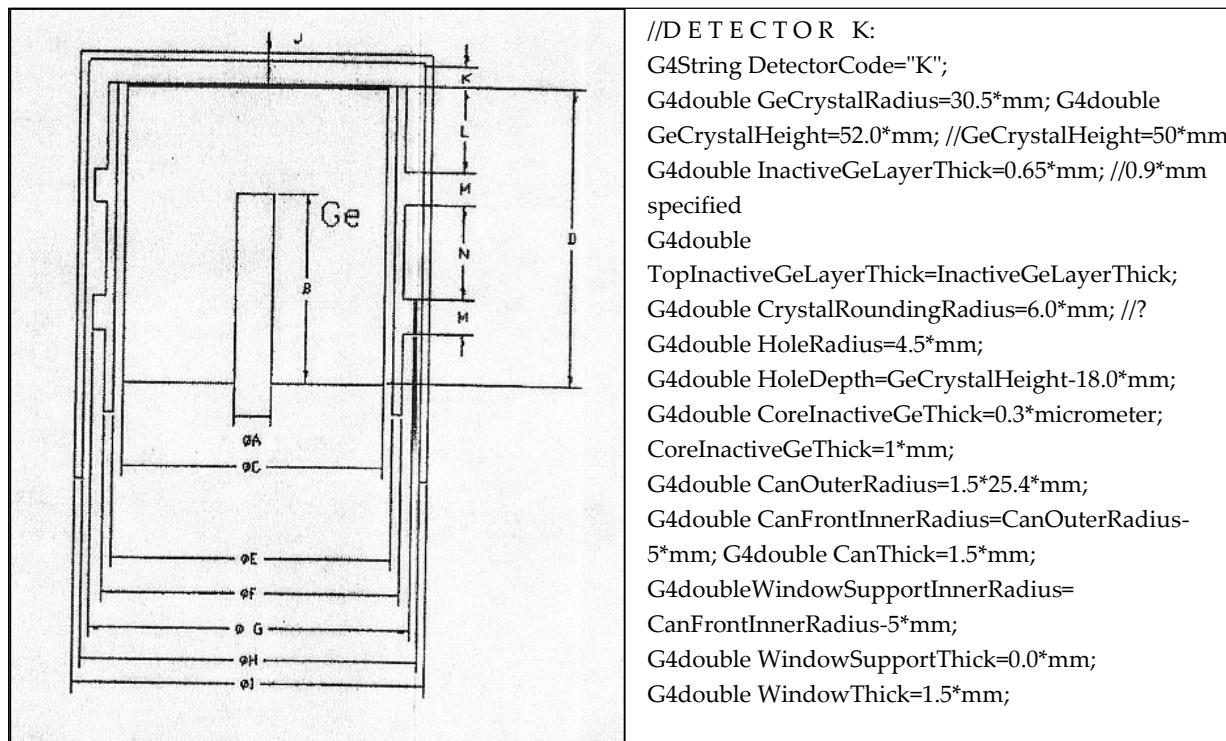
5 ODREĐIVANJE EFIKASNOSTI DETEKTORA POMOĆU MONTE-KARLO SIMULACIJA

Analitička formula za izračunavanje efikasnosti vrha pune energije za sve energije fotona se ne može odrediti, kao što smo rekli u odeljku 2.3.1, a eksperimentalno određivanje efikasnosti nije uvek pogodno. Monte-Karlo simulacije se koriste u gama spektroskopiji kao prilično efektivna dopuna eksperimentalnom metodu određivanja efikasnosti detekcije HPGe detektora.

5.1 Opis simulacije HPGe detektora i izračunavanja efikasnosti

U cilju izvođenja simulacija, detektor je modelovan na osnovu tehničkih podataka obezbeđenih od strane proizvođača, koji su dati u obliku šeme prilikom kupovine detektora. U podatke koje obezbeđuje proizvođač spadaju dimenzije i materijali delova detektorskog sistema. Ovi podaci su neophodni, ali ne i dovoljni za modelovanje detektora. Neke dimenzije nisu dobro poznate čak ni proizvođaču, a neke se mogu vremenom menjati, poput debljine mrtvog sloja. Stoga je potrebno izvršiti eksperimentalnu proveru i po potrebi korekciju dimenzija, nakon čega se može izvršiti konstrukcija detektora u Geant4 programskom paketu.

Kompletna šema sa podacima je poverljiva, pa smo na slici 28 prikazali deo ove šeme, kao i deo koda kojim smo opisali detektor u Geant4.



Slika 28: Deo šeme na osnovu koje je izvršena konstrukcija detektora u Geant4, i kod koji zadaje (korigovane) dimenzije: kristala Ge, spoljašnjeg n^+ kontakta, šupljine, kućišta

Zadali smo i podatke o olovnoj zaštiti detektora, na sledeći način:

//Pb POKLOPAC ZA K DETEKTOR:

```
G4Tubs * solidPoklopac = new  
G4Tubs("solidPoklopac",0*mm,203*mm,59*mm,0.0*deg,360.0*deg);  
G4LogicalVolume* logicalPoklopac = new  
G4LogicalVolume(solidPoklopac,lead,"logicalPoklopac", 0,0,0);  
logicalPoklopac->SetVisAttributes(G4VisAttributes(G4Colour(0,0.5,0.9)));  
G4VPhysicalVolume* physicalPoklopac = new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(300*mm,0,-204*mm),  
logicalPoklopac,"physicalPoklopac",logical_world, false, 0);
```

//Suplji Pb Cilindar - TELO ZASTITE ZA K DETEKTOR :

```
G4Tubs * solidSupljiCilindar = new G4Tubs("solidSupljiCilindar",83*mm,203*mm,183*mm,0.0*deg,360.0*deg);  
G4LogicalVolume*logicalSupljiCilindar = new  
G4LogicalVolume(solidSupljiCilindar,lead,"logicalSupljiCilindar", 0,0,0);  
logicalSupljiCilindar->SetVisAttributes(G4VisAttributes(G4Colour(0,0.5,0.9)));  
G4VPhysicalVolume* physicalSupljiCilindar = new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(0,0,38*mm),  
logicalSupljiCilindar,"physicalSupljiCilindar",logical_world, false, 0);
```

//DNO Pb ZASTITE ZA K DETEKTOR:

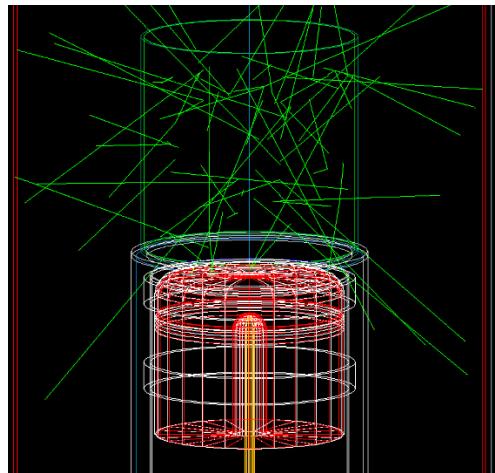
```
G4Tubs * solidDno = new G4Tubs("solidDno",0*mm,203*mm,65*mm,0.0*deg,360.0*deg);  
G4LogicalVolume* logicalDno = new G4LogicalVolume(solidDno,lead,"logicalDno", 0,0,0);  
logicalDno->SetVisAttributes(G4VisAttributes(G4Colour(0,0.5,0.9)));  
G4VPhysicalVolume* physicalDno = new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(0,0,708*mm),  
logicalDno,"physicalDno",logical_world, false, 0);
```

U prethodnom kodu smo, pored oblika i dimenzija, zadali i koordinate poklopca, tela i dna zaštite. Pri tome smo postavili koordinatni početak Dekartovog koordinatnog sistema na kapu detektora, a smer z-ose definisali prema dole. Poklopac olovne zaštite smo sklonili, zadavanjem koordinata: (x, y, z)=(300 mm, 0, - 204 mm), s obzirom da to znatno ne utiče na rezultate simulacija koje bismo dobili da je poklopac bio zatvoren kao u eksperimentu, a značajno smanjuje njihovo trajanje.

U Geant4 programskom paketu, sledećim kodom smo definisali materijal posude u kojoj su se standardni materijal i simulirani materijali nalazili (polietilen CH_2 , gustine $0.93 \frac{g}{cm^3}$ sa masenim udelom elemenata: $^{12}_6C$ – 85.7 %, 1H – 14.3 %):

```
// POLIETILEN ( KONTEJNER RADIOAKTIVNOG STANDARDA )  
G4Material* polietilen = new G4Material("polietilen", 0.93*g/cm3, 2);  
polietilen->AddElement(elementC,85.7*perCent);polietilen->AddElement(elementH,14.3*perCent);
```

Posudu smo predstavili u obliku šupljeg polietilenskog cilindra istih dimenziija kao u eksperimentu (unutrašnji dijametar 68 mm, visina 70 mm, debljina 0.5 mm). Tako smo odredili cilindričnu geometriju izvora poput eksperimentalne, jedino što su ivice posude u eksperimentu malo zaobljene, ali to ne moramo uzimati u obzir prilikom simulacija. Definisali smo i položaj posude (odnosno izvora gama zračenja) tako što smo je postavili, kao u eksperimentu (slika 23), na kapu detektora (slika 29).

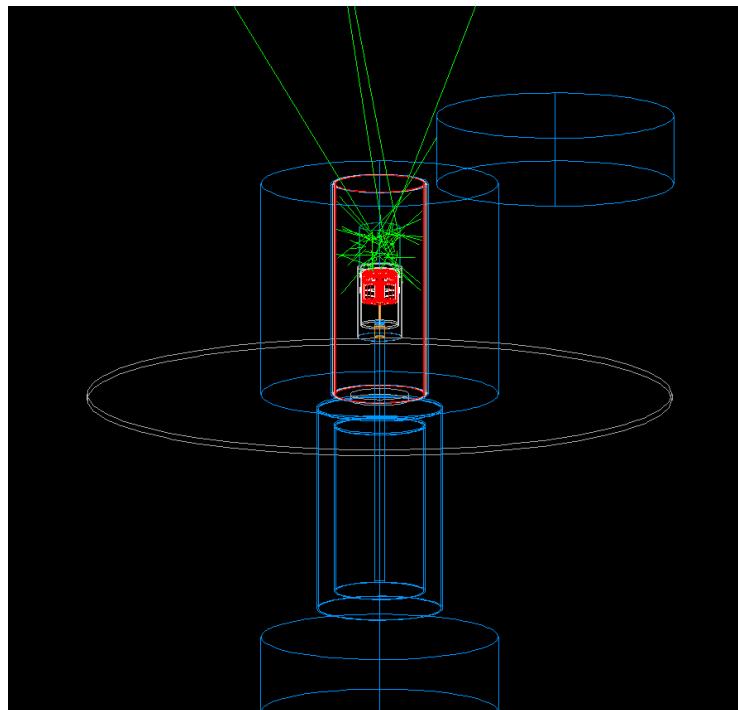


Slika 29: Vizuelni prikaz simulacije detektora, položaja polietilenskog cilindra na kapi detektora, i putanje simuliranih niskoenergetskih gama zraka emitovanih iz standardnog izvora

Slično kao za olovnu zaštitu, zadali smo podatke (oblik, dimenzije i koordinate) za:

- dodatne zaštitne slojeve od kalaja i bakra,
- gvozdeni sto na kom se Pb štit nalazi,
- cold finger,
- Dewarov sud (poklopac, unutrašnja posuda, dno unutrašnje posude).

Sve ove delove detektorskog sistema, zajedno sa gama zracima koji potiču od standarnog izvora, možemo videti na vizuelnom prikazu simulirane konstrukcije detektora na slici 30.



Slika 30: Simulacija detektorskog sistema i niskoenergetskog gama zračenja nasumično emitovanog iz standardnog izvora

Prilikom konstrukcije detektora, definisali smo i dimenzije i geometriju aktivne zapremine detektora u kojoj se vrši detekcija zračenja. Efikasnost detekcije fotona određenih energija koju emituju različiti uzorci je računata kao odnos deponovane energije unutar te aktivne zapremine i broja detektovanih događaja.

Fotoni koji se uzimaju u obzir u proceni efikasnosti vrha pune energije su oni čija se energija u potpunosti apsorbuje u detektoru. Drugim rečima, kada se energija fotona ne apsorbuje u potpunosti, taj foton se izuzima iz računanja efikasnosti vrha pune energije. U odeljku 2.2 objasnili smo da pored fotoelektrične apsorpcije, i Komptonovo rasejanje i proizvodnja parova mogu da doprinesu stvaranju vrha ukupne energije (slika 10).

Prilikom definisanja liste fizičkih procesa, pored fotona, definisali smo i elektrone i pozitrone koji nastaju kao rezultat interakcija fotona sa materijalom detektora. Fotonima smo pripisali pomenute procese relevantne za računanje efikasnosti, a za elektrone i pozitrone smo zadali procese višestrukog rasejanja, jonizacije, zakočno zračenje, anihilaciju para elektron-pozitron. Ove interakcije su definisane u Geant4 programskom paketu na način prikazan u referenci [16], tako što se za svaki od njih određenom relacijom definiše poprečni presek (verovatnoća) u svakoj tački interakcije, srednja slobodna putanja čestica i krajnje stanje.

Broj primarnih fotona koji se proizvode prilikom svake simulacije smo izabrali tako da statističke nesigurnosti povezane sa efikasnošću vrha pune energije ne budu veće od 1 % za sve energije fotona. U tu svrhu, generisali smo 10^6 primarnih fotona određenih energija prilikom svake simulacije.

Važno je napomenuti da u gama spektroskopiji Geant4 prati istoriju svakog fotona pre nego što se njegova energija deponuje u detektoru, uzimajući u obzir i sekundarne čestice (elektrone, pozitrone) koje nastaju kao rezultat fotoelektrične apsorpcije, Komptonovog rasejanja, ili interakcija u kojima dolazi do proizvodnje parova. Pored primarnih fotona i sekundarnih čestica, prate se i sekundarni fotoni (fluorescentno X-zračenje, zakočno zračenje i anihilacioni kvanti) koji nastaju u ovim interakcijama. Praćenje svih događaja do njihovog krajnjeg stadijuma omogućuje izračunavanje kompletne spektralne raspodele, tako što se u svakoj tački interakcije za izračunavanje koristi verovatnoća svakog mogućeg tipa interakcije i svaki mogući ugao rasejanja [4]. Merenje ukupne energije deponovane u osetljivoj zapremini detektora i ukupnog broja detektovanih događaja omogućava izračunavanje efikasnosti detekcije kao odnosa ovih vrednosti.

Računali smo efikasnosti vrha pune energije za različite energije fotona, iste kao u eksperimentu, u opsegu 59.54 – 1836.06 keV, za cilindrični kontejner aksijalno centriran u odnosu na detektor i u potpunosti ispunjen hipotetičkim materijalima koji su imali sastav uzoraka čiji uticaj na efikasnost detekcije smo želeli da ispitamo, a koje ćemo opisati u narednom odeljku.

5.2 Simulirane vrednosti efikasnosti za različite vrste matrica

Prilikom simuliranja koristili smo šest različitih matrica voluminoznih uzoraka (smola, voda, zemljište, Al, CaO-prah, CaO-kristal), materijala koji su simulirani u identičnom polietilenskom kontejneru kao u eksperimentu, iste cilindrične geometrije, veličine i zapremine. Uzorci pokrivaju širok opseg gustina od $0.590 - 3.340 \frac{g}{cm^3}$, te su veoma pogodni za ispitivanje efikasnosti detekcije HPGe detektora u zavisnosti od sastava matrica uzoraka i razlika u gustini.

Tabela 3: Matrice korištene u simulacijama

Matrica	Gustina [$\frac{g}{cm^3}$]	Hemijski sastav matrice – maseni udio elemenata [%]				
smola	0.985	$^{12}_6C - 32.1$	$^{16}_8O - 21.4$	$^1_1H - 8.0$	$^{28.1}_{14}Si - 3.75$	$^{32.1}_{16}S - 1.0$
aluminijum	2.70			$^{27}_{13}Al$		
voda	1.00		$^1_1H - 11.11$		$^{16}_8O - 88.89$	
CaO-kristal	3.34		$^{40.1}_{20}Ca - 71.47$		$^{16}_8O - 28.53$	
CaO-prah	0.59		$^{40.1}_{20}Ca - 71.47$		$^{16}_8O - 28.53$	
zemljište	1.16	$^{16}_8O - 47.0$	$^{28.1}_{14}Si - 35.0$	$^{27}_{13}Al - 8.0$	$^{56}_{26}Fe - 3.9$	$^{12}_6C - 2.1$
		$^{40.1}_{20}Ca - 1.4$	$^{39.1}_{19}K - 1.3;$	$^{23}_{11}Na - 0.6$	$^{24}_{12}Mg - 0.6$	$^{14}_7N - 0.1$

Kao primer zadavanja materijala matrice u Geant4 programskom paketu, navodimo deo koda kojim smo definisali materijal (gustinu i sastav) matrice standardnog uzorka SMOLA:

```
// SMOLA (MATRICA RADIOAKTIVNOG STANDARDA)
G4Material* smola = new G4Material("smola", 0.985*g/cm3, 5);
smola->AddElement(elementC,32.1*perCent);smola->AddElement(elementH,8.0*perCent);
smola->AddElement(elementO,21.4*perCent);smola->AddElement(elementSi,37.5*perCent);
smola->AddElement(elementS,1.0*perCent);
```

Analogno smo zadali i materijale ostalih matrica koje smo simulirali.

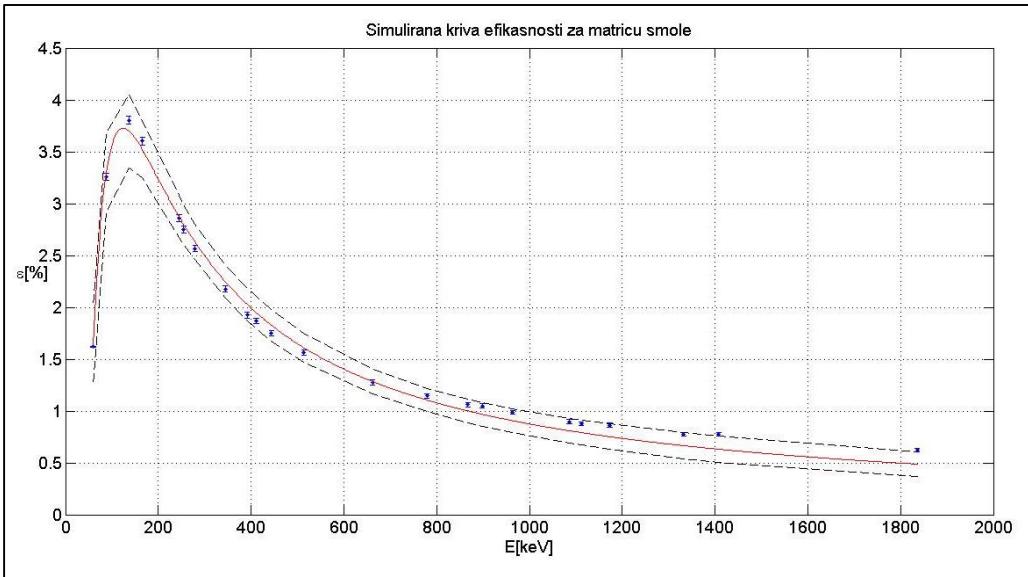
Rezultate simulacija prikazujemo tabelarno i grafički, a u poglavlju 7 ćemo ih porediti i analizirati uticaj osobina, pre svega sastava i gustine, matrica uzoraka na efikasnost detekcije HPGe detektora koji smo koristili. Prilikom crtanja grafika koristili smo isti oblik funkcije za fit kao u eksperimentu, a na svaki grafik smo ucrtali i intervale za fit, na nivou poverenja od 95 %.

– Rezultati za matricu SMOLA

Tabela 4: Simulirane vrednosti efikasnosti za matricu smola

E [keV]	59.54	88.03	136.47	165.86	244.70	255.13	279.19	344.28	391.70	411.12	443.96	514.01
ϵ_{sim} [%]	1.619 (8)	3.257 (36)	3.802 (39)	3.602 (38)	2.861 (34)	2.750 (33)	2.567 (32)	2.175 (29)	1.926 (28)	1.871 (27)	1.748 (26)	1.561 (25)

E [keV]	661.66	778.90	867.37	898.04	964.08	1085.87	1112.07	1173.24	1332.50	1408.01	1836.06
ϵ_{sim} [%]	1.275 (23)	1.145 (21)	1.063 (21)	1.048 (20)	0.987 (20)	0.898 (19)	0.876 (19)	0.864 (19)	0.776 (18)	0.774 (18)	0.625 (16)



Slika 31: Grafički prikaz simuliranih efikasnosti u zavisnosti od energije za matricu smole

Poređenje eksperimentalnih i simuliranih vrednosti efikasnosti za standardni uzorak će biti izvršeno u poglavlju 6. Ovom prilikom ćemo samo primetiti da se pik javlja na istom mestu kao u eksperimentu – na energiji 136.47 keV, a deo izlaznog fajla koji smo dobili kao rezultat simulacije interakcija gama zraka na ovoj energiji prikazali smo na slici 32. Slične izlazne fajlove smo dobili za ostale energije, i ostale zadate matrice nakon simuliranja.

```

SourceCode=C;
ContainerCode=NoContainer;
SourceMaterial={" Material: smola density: 985.000 mg/cm3 RadL: 31.014 cm Nucl.Int.Length: 82.511 cm Imean: 88.654 eV
--> Element: Carbon (C) z = 6.0 N = 12.0 A = 12.01 g/mole ElmMassFraction: 32.10 % ElmAbundance 20.07 %
--> Element: Hydrogen (H) z = 1.0 N = 1.0 A = 1.01 g/mole ElmMassFraction: 8.00 % ElmAbundance 59.62 %
--> Element: Oxygen (O) z = 8.0 N = 16.0 A = 16.00 g/mole ElmMassFraction: 21.40 % ElmAbundance 10.05 %
--> Element: Silicon (Si) z = 14.0 N = 28.1 A = 28.09 g/mole ElmMassFraction: 37.50 % ElmAbundance 10.03 %
--> Element: Sulfur (S) z = 16.0 N = 32.1 A = 32.06 g/mole ElmMassFraction: 1.00 % ElmAbundance 0.23 %";
SourceP={0,0,-1} mm;
CSoucer=34 mm;
Csourceh=69 mm;
SensitiveMass = 0.740276 kg;
DefaultCutValue = 0.1 um;
MinTheta = 0;
MaxTheta = 180;
RelativesolidAngle = 1;
tblG4= " 2014-6-2 14:28:33
Run Eg~[keV] 1000*eff Events OutputTime
1 136.47 38.019000+-0.389969 1e+006 2014-6-2 14:30:9

```

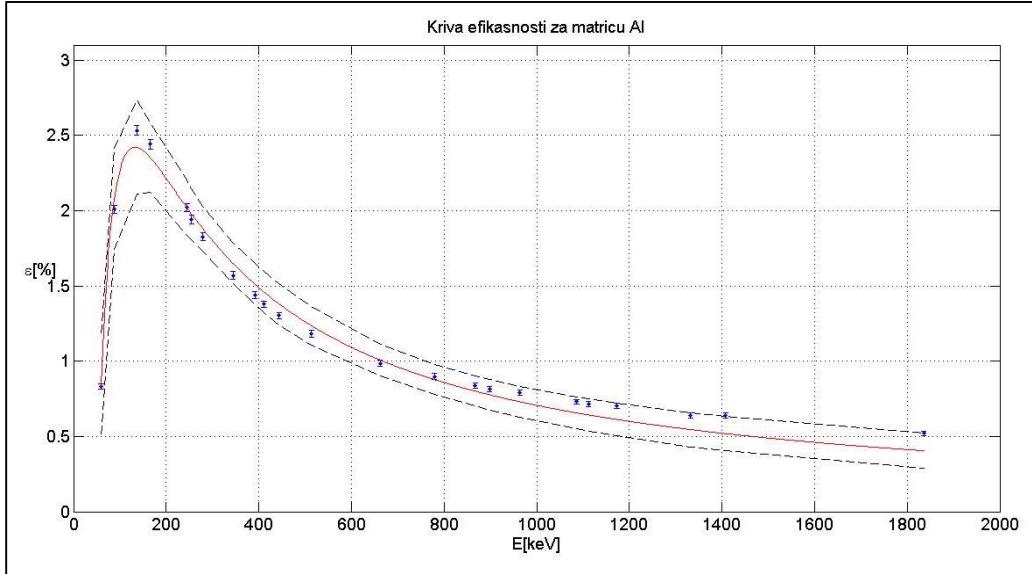
Slika 32: Deo izlaznog fajla nakon simulacije matrice smole i računanja efikasnosti detekcije fotona energije 136.47 keV

- Rezultati za matricu ALUMINIJUM

Tabela 5: Simulirane vrednosti efikasnosti za matricu Al

E [keV]	59.54	88.03	136.47	165.86	244.70	255.13	279.19	344.28	391.70	411.12	443.96	514.01
ϵ_{sim} [%]	0.831 (18)	2.009 (28)	2.533 (32)	2.441 (31)	2.020 (28)	1.942 (28)	1.827 (27)	1.570 (25)	1.437 (24)	1.378 (23)	1.302 (23)	1.181 (22)

E [keV]	661.66	778.90	867.37	898.04	964.08	1085.87	1112.07	1173.24	1332.50	1408.01	1836.06
ϵ_{sim} [%]	0.985 (20)	0.898 (19)	0.838 (18)	0.813 (18)	0.790 (18)	0.730 (17)	0.715 (17)	0.704 (17)	0.640 (16)	0.638 (16)	0.521 (14)



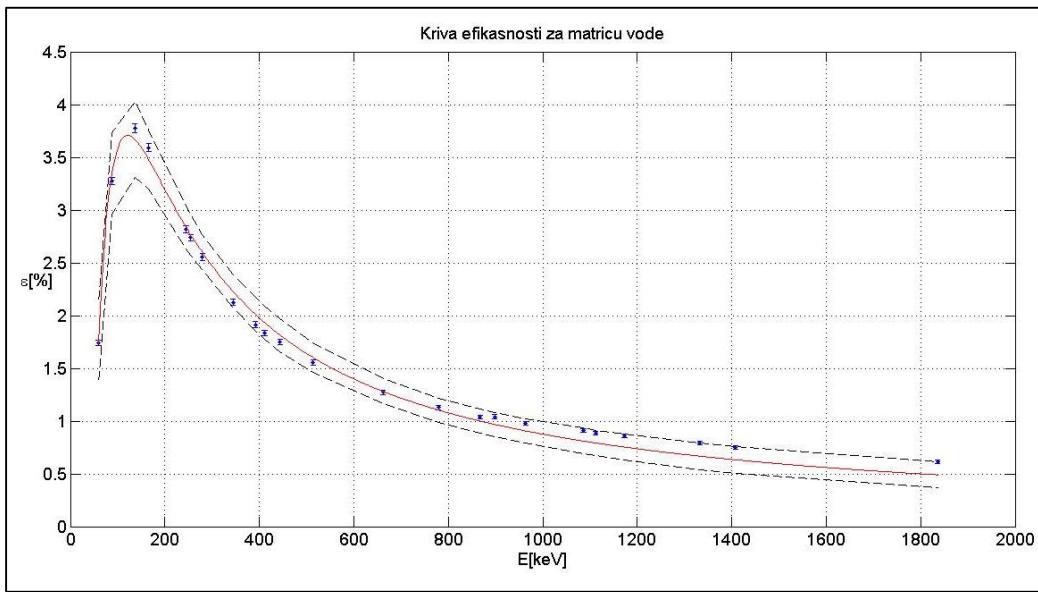
Slika 33: Grafički prikaz simuliranih efikasnosti u zavisnosti od energije za matricu Al

- Rezultati za matricu VODA

Tabela 6: Simulirane vrednosti efikasnosti za matricu vode

E [keV]	59.54	88.03	136.47	165.86	244.70	255.13	279.19	344.28	391.70	411.12	443.96	514.01
ϵ_{sim} [%]	1.741 (26)	3.277 (36)	3.776 (39)	3.591 (38)	2.814 (34)	2.738 (33)	2.555 (32)	2.125 (29)	1.913 (28)	1.834 (27)	1.752 (26)	1.552 (25)

E [keV]	661.66	778.90	867.37	898.04	964.08	1085.87	1112.07	1173.24	1332.50	1408.01	1836.06
ϵ_{sim} [%]	1.272 (23)	1.131 (21)	1.039 (20)	1.040 (20)	0.978 (20)	0.910 (19)	0.886 (19)	0.862 (19)	0.794 (18)	0.746 (17)	0.617 (16)



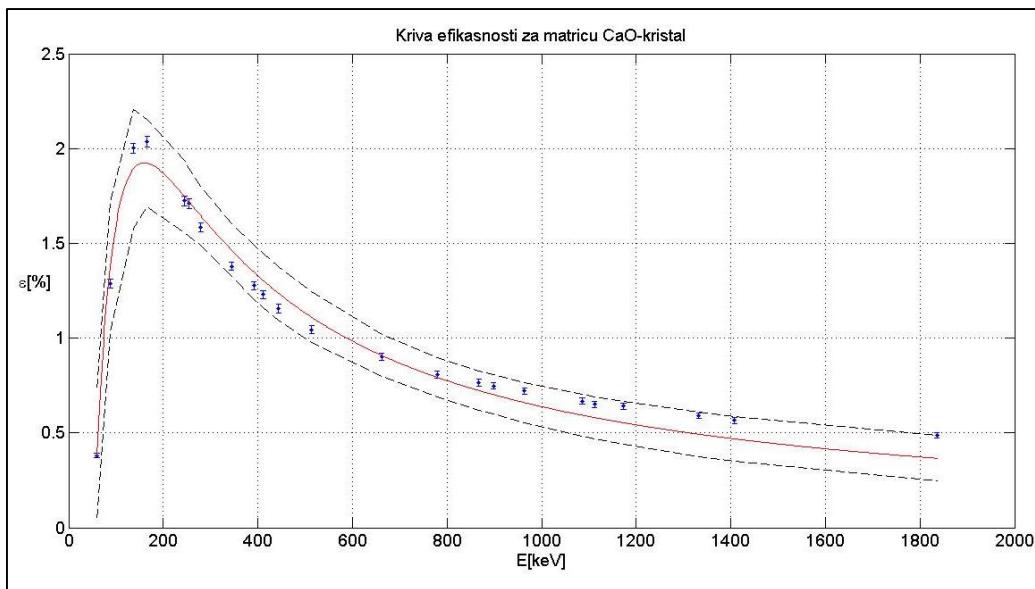
Slika 34: Grafički prikaz simuliranih efikasnosti u zavisnosti od energije za matricu voda

– Rezultati za matricu CaO – KRISTAL

Tabela 7: Simulirane vrednosti efikasnosti za matricu CaO – KRISTAL

E [keV]	59.54	88.03	136.47	165.86	244.70	255.13	279.19	344.28	391.70	411.12	443.96	514.01
ϵ_{sim} [%]	0.380 (12)	1.289 (23)	2.001 (28)	2.037 (29)	1.724 (26)	1.711 (26)	1.584 (25)	1.379 (23)	1.276 (23)	1.230 (22)	1.156 (22)	1.045 (20)

E [keV]	661.66	778.90	867.37	898.04	964.08	1085.87	1112.07	1173.24	1332.50	1408.01	1836.06
ϵ_{sim} [%]	0.901 (19)	0.807 (18)	0.765 (17)	0.747 (17)	0.722 (17)	0.668 (16)	0.651 (16)	0.641 (16)	0.590 (15)	0.565 (15)	0.488 (14)



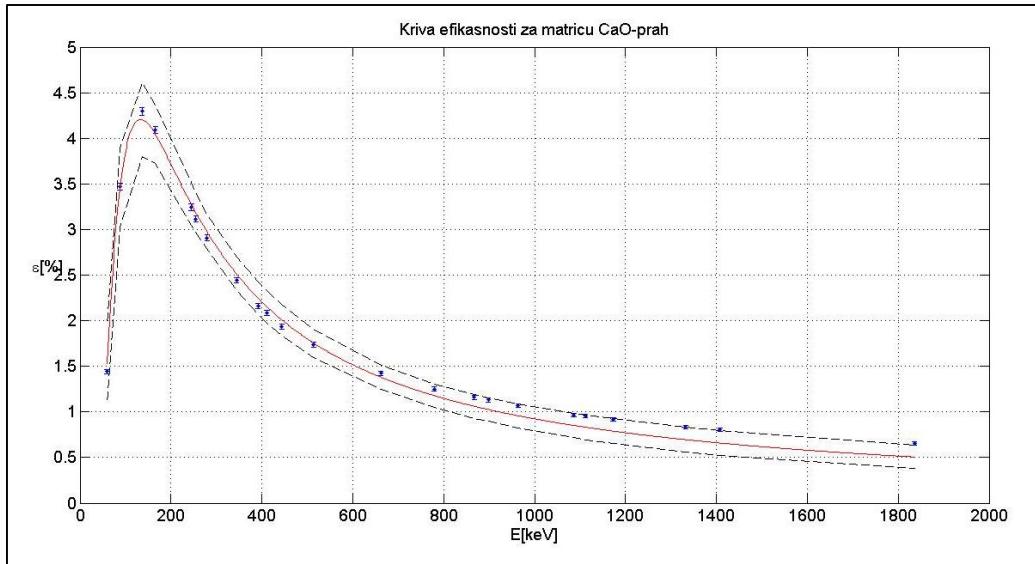
Slika 35: Grafički prikaz simuliranih efikasnosti u zavisnosti od energije za matricu CaO-kristal

– Rezultati za matricu CaO – PRAH

Tabela 8: Simulirane vrednosti efikasnosti za matricu CaO – PRAH

E [keV]	59.54	88.03	136.47	165.86	244.70	255.13	279.19	344.28	391.70	411.12	443.96	514.01
ϵ_{sim} [%]	1.444 (24)	3.471 (37)	4.295 (41)	4.090 (40)	3.241 (36)	3.116 (35)	2.908 (34)	2.443 (31)	2.161 (29)	2.088 (29)	1.931 (28)	1.737 (26)

E [keV]	661.66	778.90	867.37	898.04	964.08	1085.87	1112.07	1173.24	1332.50	1408.01	1836.06
ϵ_{sim} [%]	1.423 (24)	1.251 (22)	1.159 (22)	1.131 (21)	1.068 (21)	0.964 (20)	0.955 (20)	0.920 (19)	0.832 (18)	0.805 (18)	0.653 (16)



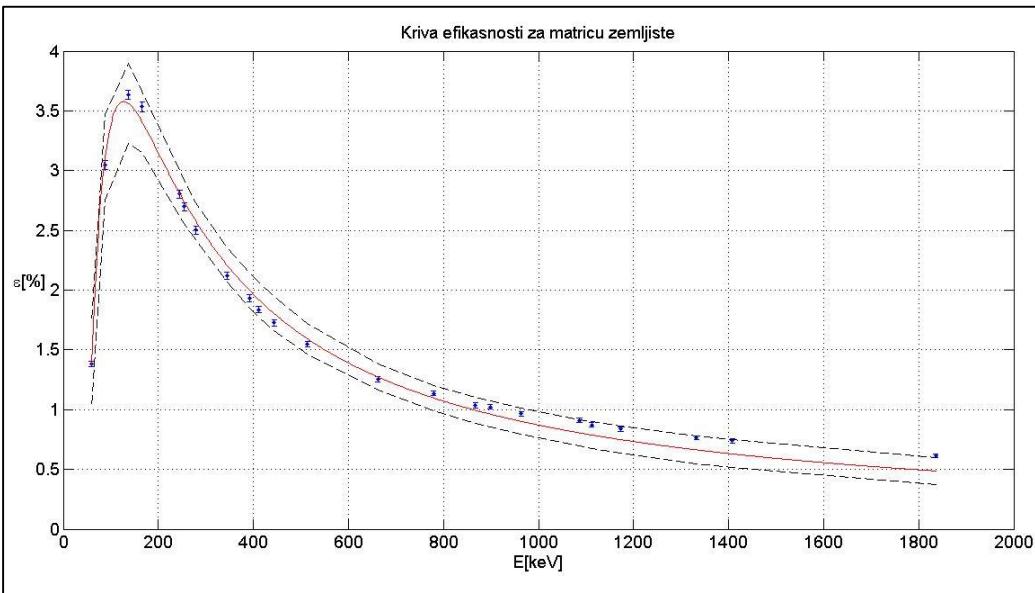
Slika 36: Grafički prikaz simuliranih efikasnosti u zavisnosti od energije za matricu CaO-prah

– Rezultati za matricu ZEMLJIŠTE

Tabela 9: Simulirane vrednosti efikasnosti za matricu ZEMLJIŠTE

E [keV]	59.54	88.03	136.47	165.86	244.70	255.13	279.19	344.28	391.70	411.12	443.96	514.01
ϵ_{sim} [%]	1.380 (23)	3.047 (35)	3.637 (38)	3.533 (38)	2.805 (33)	2.699 (33)	2.502 (32)	2.120 (29)	1.931 (28)	1.837 (27)	1.728 (26)	1.547 (25)

E [keV]	661.66	778.90	867.37	898.04	964.08	1085.87	1112.07	1173.24	1332.50	1408.01	1836.06
ϵ_{sim} [%]	1.253 (22)	1.136 (21)	1.036 (20)	1.023 (20)	0.966 (20)	0.909 (19)	0.871 (19)	0.838 (18)	0.765 (17)	0.739 (17)	0.613 (16)



Slika 37: Grafički prikaz simuliranih efikasnosti u zavisnosti od energije za matricu zemljiste

6 POREĐENJE EKSPERIMENTALNIH I SIMULIRANIH VREDNOSTI EFIKASNOSTI ZA STANDARDNI UZORAK

U tabeli 10 dat je pregled eksperimentalnih i simuliranih vrednosti efikasnosti za određene energije gama zraka koje emituje standardni uzorak, zajedno sa prelazima pri kojima ti gama zraci nastaju. Radi poređenja, dati su odnosi eksperimentalnih i simuliranih vrednosti, kao i relativna odstupanja simuliranih od eksperimentalnih vrednosti. Merne nesigurnosti odnosa ovih vrednosti za određene energije gama zraka računate su prema formuli:

$$\sigma_{(\varepsilon_{exp}/\varepsilon_{sim})} = \sqrt{\left(\frac{\partial(\varepsilon_{exp}/\varepsilon_{sim})}{\partial\varepsilon_{exp}}\sigma_{\varepsilon_{exp}}\right)^2 + \left(\frac{\partial(\varepsilon_{exp}/\varepsilon_{sim})}{\partial\varepsilon_{sim}}\sigma_{\varepsilon_{sim}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\varepsilon_{exp}}}{\varepsilon_{sim}}\right)^2 + \left(-\frac{\varepsilon_{exp}}{(\varepsilon_{sim})^2}\sigma_{\varepsilon_{sim}}\right)^2}.$$

Tabela 10: Poređenje eksperimentalnih i simuliranih vrednosti efikasnosti za standardni uzorak

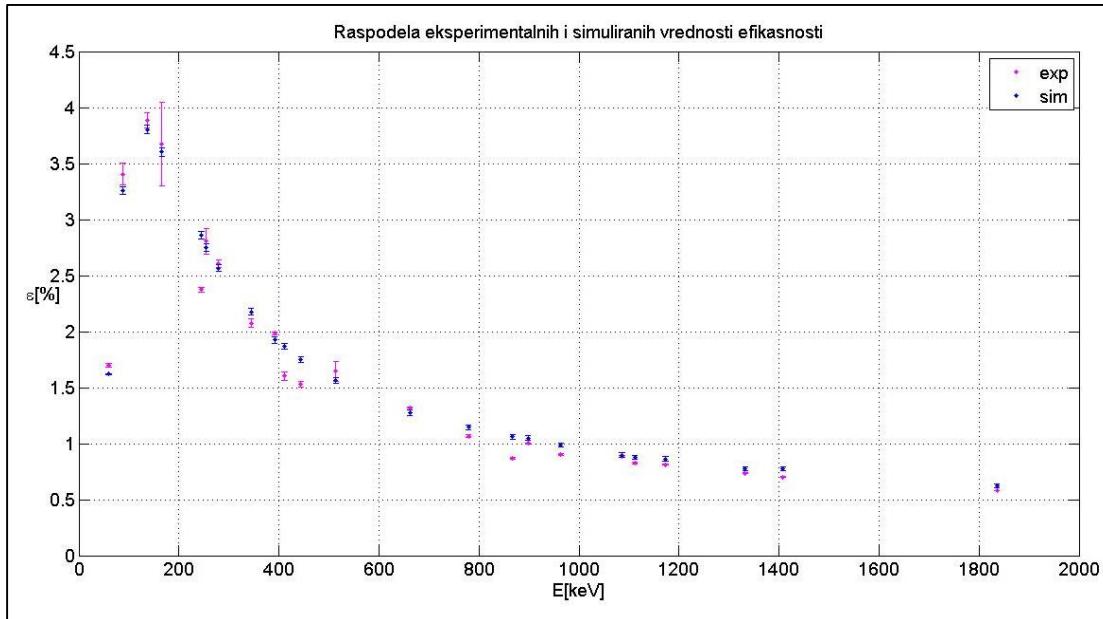
E_γ [keV]	nuklid/ potomak	ε_{exp} [%]	ε_{sim} [%]	$\varepsilon_{exp}/\varepsilon_{sim}$	$\rho_{rel} = \frac{\varepsilon_{exp}-\varepsilon_{sim}}{\varepsilon_{exp}} * 100$ [%]
59.54	Am241/Np237	1.699(20)	1.619(8)	1.050(18)	4.71
88.03	Cd109/Ag109	3.405(97)	3.257(36)	1.045(43)	4.35
136.47	Co57/Fe57	3.888(68)	3.802(39)	1.023(25)	2.21
165.86	Ce139/La139	3.674(369)	3.602(38)	1.020(146)	1.96
244.70	Eu152/Sm152	2.375(21)	2.861(34)	0.830(10)	-20.46
255.13	Sn113/In113	2.807(116)	2.750(33)	1.021(60)	2.03
279.19	Hg203/Tl203	2.605(33)	2.567(32)	1.015(18)	1.46
344.28	Eu152/Gd152	2.074(40)	2.175(29)	0.954(26)	-4.87
391.70	Sn113/In113	1.984(13)	1.926(28)	1.030(9)	2.92
411.12	Eu152/Gd152	1.604(39)	1.871(27)	0.857(28)	-16.65
443.96	Eu152/Sm152	1.531(28)	1.748(26)	0.876(21)	-14.17
514.01	Sr85/Rb85	1.644(86)	1.561(25)	1.053(80)	5.05
661.66	Cs137/Ba137	1.321(7)	1.275(23)	1.036(8)	3.48
778.90	Eu152/Gd152	1.065(14)	1.145(21)	0.930(16)	-7.51
867.37	Eu152/Sm152	0.869(11)	1.063(21)	0.817(13)	-22.32
898.04	Y88/Sr88	1.003(4)	1.048(20)	0.958(6)	-4.49
964.08	Eu152/Sm152	0.891(8)	0.987(20)	0.911(10)	-10.77
1085.87	Eu152/Sm152	0.886(9)	0.898(19)	0.987(14)	-1.35
1112.07	Eu152/Sm152	0.826(8)	0.876(19)	0.943(12)	-6.05
1173.24	Co60/Ni60	0.811(4)	0.864(19)	0.939(6)	-6.54
1332.50	Co60/Ni60	0.734(3)	0.776(18)	0.946(6)	-5.71
1408.01	Eu152/Sm152	0.701(6)	0.774(18)	0.905(10)	-10.41
1836.06	Y88/Sr88	0.580(3)	0.625(16)	0.929(5)	-7.76

Uočavamo prilično dobro slaganje eksperimentalnih i simuliranih vrednosti efikasnosti – relativno odstupanje simulirane od eksperimentalne vrednosti u većini slučajeva ne prelazi 10%. Najveća odstupanja, veća od 20%, javljaju se na energijama 244.70 keV i 867.37 keV, koje odgovaraju fotonima koji nastaju prilikom raspada Eu152 i nastanka Sm152. Relativno odstupanje je veće od 15% za energiju fotona 411.12 keV koji nastaje raspadom Eu152 i nastankom potomka Gd152, a blizu 15% za energiju 443.96 keV koja odgovara prelazu Eu152-Sm152. Takođe pri raspadu Eu152 i nastanku Sm152, kada nastaju fotoni energija 964.08 keV i 1408.01 keV, relativno odstupanje je nešto iznad 10%.

Na pomenutim energijama fotona koji nastaju raspadom Eu152, simulirane vrednosti efikasnosti su preko 10% veće od eksperimentalnih, što objašnjavamo efektom koincidentnog sumiranja koji nismo uzeli u obzir prilikom izvođenja simulacija. Sumiranje pravih koincidencija se javlja kod spektara u kojima učestvuju radionuklidi koji emituju kaskadne fotone (poput Eu152) ako se dva ili više fotona emituju jedan za drugim unutar vremena razlaganja spektrometra. Ovaj efekat možemo objasniti ako prepostavimo, na primer, da prvi foton deponuje svu svoju energiju u kristalu detektora. Ako se detektuje i koincidentni foton, registruje se sumarni impuls koji odgovara zbiru energija oba fotona, što dovodi do gubitka događaja iz vrha pune energije prvog fotona, i samim tim smanjenja efikasnosti koja odgovara njegovoj energiji.

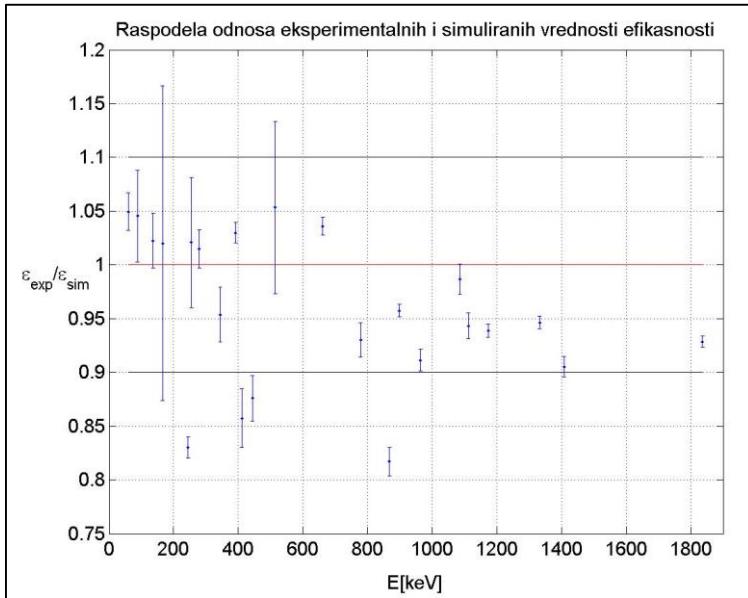
U ostalim slučajevima, relativna odstupanja su od 2-8%, a za pojedine energije gama zraka čak manja od 2%: za 165.86 keV (prelaz Ce139-La139), 279.19 keV (prelaz Hg203-Tl203), 1085.87 keV (prelaz Eu152-Sm152).

Radi vizuelnog poređenja, crtamo grafik raspodele eksperimentalnih i simuliranih vrednosti efikasnosti (slika 38), kao i grafik raspodele odnosa tih vrednosti (slika 39).



Slika 38: Grafički prikaz eksperimentalnih i simuliranih vrednosti efikasnosti u zavisnosti od energije

Primećujemo da je nakon dostizanja pika na 137.47 keV, većina simuliranih vrednosti efikasnosti veća od eksperimentalnih. Ova pojava se može ispitati radiografskim metodama, kojima je moguće odrediti da li se debljina mrtvog sloja i fizičke dimenzije kristala slažu sa dimenzijskim dostavljenim od strane proizvođača, a koje smo mi koristili u simulacijama. Niže eksperimentalne vrednosti se mogu javiti usled razlike u debljini mrtvog sloja realnog i simuliranog detektora [10]. Takođe, debljina mrtvog sloja ne mora biti uniforma, s obzirom da je podložna promenama tokom vremena [12]. Odstupanja se mogu javiti i usled efekta prikupljanja nanelektrisanja iz aktivne zapremine detektora, koji nismo uzeli u obzir u simulacijama. Ipak, većina odstupanja se nalazi unutar 10 % (slika 39).



Slika 39: Grafički prikaz raspodele odnosa eksperimentalnih i simuliranih vrednosti efikasnosti

Na grafiku prikazanom na slici 39 ucrtana je i oblast od $\pm 10\%$ oko idealnog odnosa jednakog jedinici. Uočavamo da se većina tačaka nalazi u ovoj oblasti, a da se odstupanja javljaju na pomenutim energijama, 244.70 keV, 411.12 keV, 443.96 keV i 867.37 keV, koje odgovaraju raspadu Eu152. Ova odstupanja smo objasnili efektom koincidentnog sumiranja.

Srednja vrednost odnosa eksperimentalnih i simuliranih vrednosti efikasnosti iznosi:

$$\overline{\left(\frac{\varepsilon_{\text{exp}}}{\varepsilon_{\text{sim}}}\right)} = 0.96(7),$$

što se za manje od 5% razlikuje od idealnog odnosa jednakog jedinici.

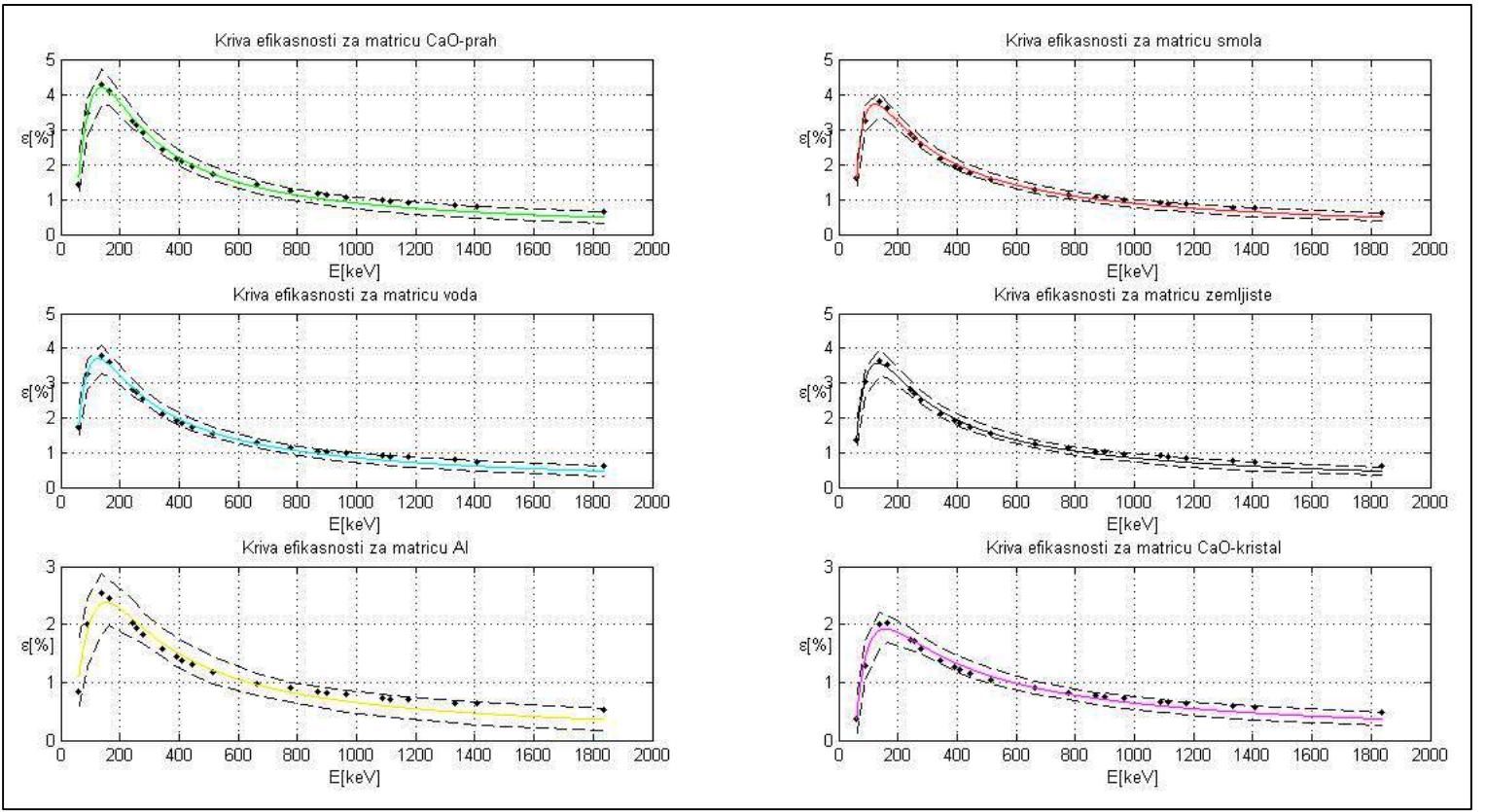
Nakon poređenja eksperimentalnih i simuliranih vrednosti efikasnosti za referentni izvor gama zračenja, zaključujemo da su slaganja dovoljno dobra da u daljem radu bude opravdano korišćenje simuliranih vrednosti efikasnosti za matricu smola kao referentnih vrednosti – u odnosu na njih ćemo porebiti simulirane vrednosti efikasnosti za ostale vrste matrica uzoraka, i na taj način analizirati uticaj osobina matrica na efikasnost detekcije HPGe detektora.

7 POREĐENJE SIMULIRANIH VREDNOSTI EFIKASNOSTI I DISKUSIJA REZULTATA

Diskusiju rezultata započinjemo pregledom simuliranih vrednosti efikasnosti za različite vrste matrica koje smo koristiti (tabela 11), i pregledom simuliranih kriva efikasnosti (slika 40).

Tabela 11: Pregled simuliranih vrednosti efikasnosti za posmatrane matrice, poređane prema rastućoj gustini s leva na desno. Crvenom bojom su označene maksimalne simulirane vrednosti efikasnosti, koje za sve osim matrice kristala odgovaraju energiji fotona od 136.47 keV

E_γ [keV]	ε_{sim} [%] (CaO-PRAH)	ε_{sim} [%] (SMOLA)	ε_{sim} [%] (VODA)	ε_{sim} [%] (ZEMLJIŠTE)	ε_{sim} [%] (Al)	ε_{sim} [%] (CaO-KRISTAL)
	$\rho = 0.590 \frac{g}{cm^3}$	$\rho = 0.985 \frac{g}{cm^3}$	$\rho = 1.000 \frac{g}{cm^3}$	$\rho = 1.160 \frac{g}{cm^3}$	$\rho = 2.700 \frac{g}{cm^3}$	$\rho = 3.340 \frac{g}{cm^3}$
59.54	1.444(24)	1.619(8)	1.741(26)	1.380(23)	0.831(18)	0.380(12)
88.03	3.471(37)	3.257(36)	3.277(36)	3.047(35)	2.009(28)	1.289(23)
136.47	4.295(41)	3.802(39)	3.776(39)	3.637(38)	2.533(32)	2.001(28)
165.86	4.090(40)	3.602(38)	3.591(38)	3.533(38)	2.441(31)	2.037(29)
244.70	3.241(36)	2.861(34)	2.814(34)	2.805(33)	2.020(28)	1.724(26)
255.13	3.116(35)	2.750(33)	2.738(33)	2.699(33)	1.942(28)	1.711(26)
279.19	2.908(34)	2.567(32)	2.555(32)	2.502(32)	1.827(27)	1.584(25)
344.28	2.443(31)	2.175(29)	2.125(29)	2.120(29)	1.570(25)	1.379(23)
391.70	2.161(29)	1.926(28)	1.913(28)	1.931(28)	1.437(24)	1.276(23)
411.12	2.088(29)	1.871(27)	1.834(27)	1.837(27)	1.378(23)	1.230(22)
443.96	1.931(28)	1.748(26)	1.752(26)	1.728(26)	1.302(23)	1.156(22)
514.01	1.737(26)	1.561(25)	1.552(25)	1.547(25)	1.181(22)	1.045(20)
661.66	1.423(24)	1.275(23)	1.272(23)	1.253(22)	0.985(20)	0.901(19)
778.90	1.251(22)	1.145(21)	1.131(21)	1.136(21)	0.898(19)	0.807(18)
867.37	1.159(22)	1.063(21)	1.039(20)	1.036(20)	0.838(18)	0.765(17)
898.04	1.131(21)	1.048(20)	1.040(20)	1.023(20)	0.813(18)	0.747(17)
964.08	1.068(21)	0.987(20)	0.978(20)	0.966(20)	0.790(18)	0.722(17)
1085.87	0.964(20)	0.898(19)	0.910(19)	0.909(19)	0.730(17)	0.668(16)
1112.07	0.955(20)	0.876(19)	0.886(19)	0.871(19)	0.715(17)	0.651(16)
1173.24	0.920(19)	0.864(19)	0.862(19)	0.838(18)	0.704(17)	0.641(16)
1332.50	0.832(18)	0.776(18)	0.794(18)	0.765(17)	0.640(16)	0.590(15)
1408.01	0.805(18)	0.774(18)	0.746(17)	0.739(17)	0.638(16)	0.565(15)
1836.06	0.653(16)	0.625(16)	0.617(16)	0.613(16)	0.521(14)	0.488(14)

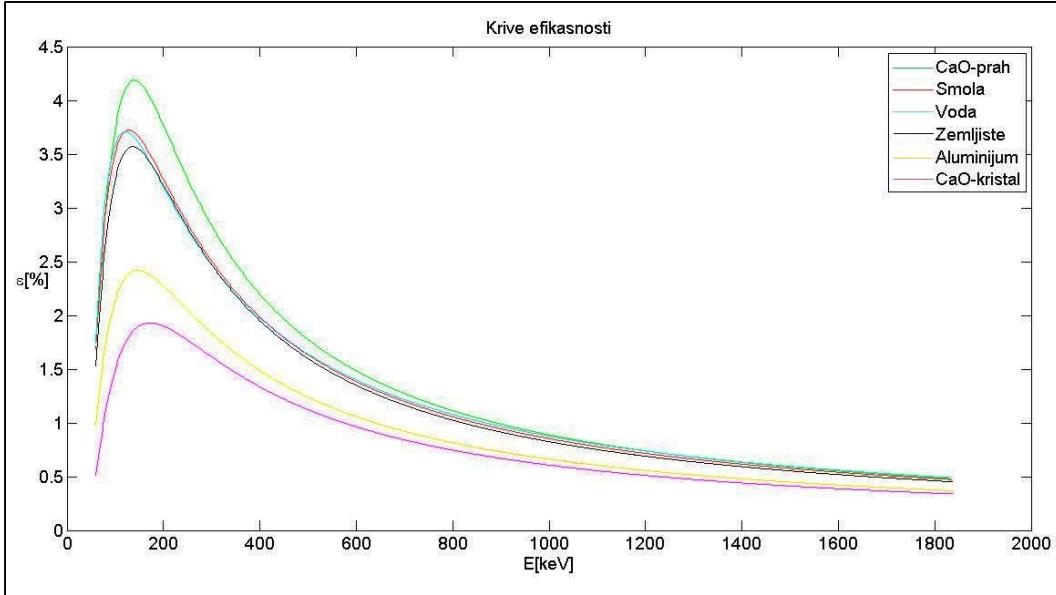


Slika 40: Pregled simuliranih kriva efikasnosti

Primećujemo da simulirane vrednosti efikasnosti detekcije HPGe detektora u najvećoj meri zavise od gustine matrice. To je naročito uočljivo kada koristimo matrice znatno različitih gustina a istog sastava: CaO-prah i CaO-kristal. U simulacijama smo dobili najviše i najmanje vrednosti efikasnosti za ove vrste matrica, koje imaju najmanju i najveću gустину, respektivno.

Vidimo da su veličine simulirane efikasnosti i gustine matrice obrnuto proporcionalne: što je veća gустина matrice, manja je efikasnost detekcije. Ovo se objašnjava efektom samoapsorpcije, odnosno atenuacijom intenziteta snopa fotona unutar samog materijala izvora. Naime, kod materijala izvora veće gустине, atomi kao centri za interakciju sa fotonima su gušće raspoređeni. Stoga je veća verovatnoća da foton koji emituje izvor, usled povećanog broja interakcija, predaju deo energije ili celokupnu energiju materijalu izvora. Usled ovog efekta, do detektora stiže foton manje energije ili smanjen broj fotona, a pod vrhom ukupne energije se javlja smanjen broj odbroja koji određuje traženu efikasnost detekcije.

Efikasnosti detekcije fotona određene energije, u istim geometrijskim uslovima merenja, za različite matrice jednake zapremine i približne gустине neznatno se razlikuju. U ovom radu koristili smo tri matrice relativno slične gустине: referentnu smolu, vodu i zemljište. Koliko se simulirane vrednosti efikasnosti koje njima odgovaraju slažu, vidimo i na grafiku koji prikazuje sve dobijene krive efikasnosti (slika 41).



Slika 41: Simulirane krive efikasnosti za različite vrste matrica korištene u ovom radu

Zapravo, uticaj matrice uzorka na efikasnost detekcije HPGe detektora se ne može objasniti jednim efektom. U pitanju je čitav skup različitih efekata koji svi zajedno utiču da dobijemo sliku kakvu smo dobili. Pored gustine matrice važan je i sastav matrice. Za niskoenergetske fotone elementi sa velikim atomskim brojem imaju veliki uticaj na efekat samoapsorpcije [5], s obzirom da je u tom slučaju veća verovatnoća za fotoelektričnu apsorpciju fotona unutar samog materijala izvora.

Takođe, uočavamo da na efikasnost detektora značajan uticaj ima energija gama zračenja. Za energije fotona manje od 130 keV efikasnost opada zbog apsorpcije u kapi detektora i mrtvim slojevima [4]. Za fotone energija manjih od oko 100 keV efekat samoapsorpcije je izraženiji jer je prodornost niskoenergetskih fotona smanjena, a atenuacija unutar materijala izvora povećana. Za fotone energija većih od 80 keV i materijale u čijem sastavu su elementi koji imaju redni broj manji od 20, u koje spada većina uzoraka iz životne sredine, na efikasnost detekcije sastav materijala znatno ne utiče, dok značajan uticaj ima gustina materijala [5]. Svi korišteni materijali u našem radu sadrže elemente rednog broja koji je manji od 20, osim CaO ($Z_{Ca} = 20$). Matrica zemljište takođe sadrži Ca, ali i Fe rednog broja 26, koji je najteži element korišten u ovom radu (tabela 3).

Sa povećanjem energije, gama zračenje postaje prodornije, efekat samoapsorpcije postaje manje izražen, i fotoni u većoj meri predaju celokupnu energiju atomima aktivne zapremine detektora. Tako dobijamo pik efikasnosti na energiji od 136.47 keV, za sve matrice osim najgušće matrice kristala, za koju se pik javlja na 165.86 keV (kao što smo objasnili, samoapsorpcija zavisi i od gustine materijala izvora). Nakon dostizanja maksimuma, vrednost efikasnosti počinje postepeno da opada. Kod visokoenergetskih gama zraka (energija većih od 1000 keV) dobijamo veoma slične, relativno male vrednosti efikasnosti za sve vrsta matrica. Prosto, većina gama zraka visokih energija, usled velike prodornosti, napušta materijal izvora kao i sam detektor, odnosno manji broj visokoenergetskih fotona celokupnu energiju ostavi u detektoru.

Kod detektora p-tipa, na efikasnost mogu uticati geometrijski parametri mrtvog sloja. Veća debljina mrtvog sloja utiče na efikasnost detekcije fotona nezavisno od njihove energije. Za fotone nižih energija, efikasnost zavisi od debljine bilo kog atenuacionog sloja. Za fotone viših energija, atenuacija u mrtvom sloju se može zanemariti, ali povećanje debljine mrtvog sloja uzrokuje odgovarajuće smanjenje aktivne zapremine detektora što utiče na efikasnost. Poređenjem eksperimentalnih i simuliranih vrednosti efikasnosti za standardni uzorak objasnili smo da se veća odstupanja javljaju zbog razlika u parametrima detektora u eksperimentu i simulacijama, ali da se simulirane vrednosti efikasnosti za standardni uzorak mogu smatrati referentnim. Stoga ćemo porebiti vrednosti efikasnosti za ostale vrste matrica sa ovim vrednostima (tabela 12).

Tabela 12: Pregled relativnih odstupanja simuliranih vrednosti efikasnosti za matrice koje smo koristili, u odnosu na referentne simulirane vrednosti efikasnosti za matricu SMOLA

E_γ [keV]	ϵ_{sim} [%] (SMOLA)	Rel. odstupanje [%] (VODA)	Rel. odstupanje [%] (ZEMLJIŠTE)	Rel. odstupanje [%] (CaO-PRAH)	Rel. odstupanje [%] (Al)	Rel. odstupanje [%] (CaO-KRISTAL)
59.54	1.619(8)	-7.54	14.76	10.81	48.67	76.53
88.03	3.257(36)	-0.61	6.45	-6.57	38.32	60.42
136.47	3.802(39)	0.68	4.34	-12.97	33.38	47.37
165.86	3.602(38)	0.31	1.92	-13.55	32.23	43.45
244.70	2.861(34)	1.64	1.96	-13.28	29.40	39.74
255.13	2.750(33)	0.44	1.85	-13.31	29.38	37.78
279.19	2.567(32)	0.47	2.53	-13.28	28.82	38.29
344.28	2.175(29)	2.30	2.53	-12.32	27.82	36.60
391.70	1.926(28)	0.68	-0.26	-12.20	25.39	33.75
411.12	1.871(27)	1.98	1.82	-11.60	26.35	34.26
443.96	1.748(26)	-0.23	1.14	-10.47	25.51	33.87
514.01	1.561(25)	0.58	0.90	-11.27	24.34	33.06
661.66	1.275(23)	0.24	1.73	-11.61	22.75	29.33
778.90	1.145(21)	1.22	0.79	-9.26	21.57	29.52
867.37	1.063(21)	2.26	2.54	-9.03	21.17	28.03
898.04	1.048(20)	0.76	2.39	-7.92	22.42	28.72
964.08	0.987(20)	0.91	2.13	-8.21	19.96	26.85
1085.87	0.898(19)	-1.34	-1.22	-7.35	18.71	25.61
1112.07	0.876(19)	-1.14	0.57	-9.02	18.38	25.68
1173.24	0.864(19)	0.23	3.01	-6.48	18.52	25.81
1332.50	0.776(18)	-2.32	1.42	-7.22	17.53	23.97
1408.01	0.774(18)	3.62	4.52	-4.01	17.57	27.00
1836.06	0.625(16)	1.28	1.92	-4.48	16.64	21.92

U tabeli 12 jasno je uočljivo da su relativna odstupanja od referentnih vrednosti veća ukoliko su veće razlike između gustine smole i gustine posmatrane matrice. Relativna odstupanja efikasnosti za matrice koje imaju gustinu približnu smoli, a to su voda i zemljište, su za većinu energija manja od 3 %. Najveća relativna odstupanja se javljaju za matricu CaO-kristal, koja ima najveću razliku gustine u odnosu na smolu, kao što se vidi i na grafiku koji prikazuje krive efikasnosti (slika 41). Ovo smo objasnili efektom samoapsorpcije (sa povećanjem gustine matrice, gama zraci gube više energije u interakcijama sa materijalom matrice, pa se smanjuje broj fotona koji stižu do detektoru i svu svoju energiju ostave u njemu, što rezultuje smanjenjem efikasnosti vrha pune energije).

Za energije manje od 100 keV, relativna odstupanja simuliranih vrednosti efikasnosti za određene matrice su veća nego za energije iznad 100 keV. Sa povećanjem energije relativna odstupanja se smanjuju, dok su u visokoenergijskom području (za energije fotona veće od 1000 keV) ova odstupanja značajno manja nego za ostale energije fotona. Ovo smo objasnili velikom prodornošću visokenergetskih fotona koji se ne absorbuju u potpunosti unutar aktivne zapremine detektora, što dovodi do smanjenja odbroja pod vrhom ukupne energije nezavisno od sastava matrice.

Na osnovu dobijenih rezultata simulacija i njihovog poređenja, zapažamo da je efekat matrice izraženiji za niskoenergetsко gama zračenje, a da sastav matrica približno iste gustine ima neznatan uticaj na simulirane vrednosti efikasnosti.

8 ZAKLJUČAK

U ovom radu je ispitivan uticaj različitih matrica voluminoznih uzoraka na efikasnost detekcije koaksijalnog HPGe detektora p-tipa. Pri tome je korišten eksperimentalni metod određivanja efikasnosti za standardni referentni materijal u matrici smole, kao i Geant4 programski paket kojim su određene simulirane vrednosti efikasnosti za referentni materijal i za odabrane sastave uzoraka iz životne sredine: voda, aluminijum, zemljište, CaO-kristal, CaO-prah.

Dobijeni rezultati su pokazali da se simulirane vrednosti efikasnosti za referentni uzorak dobro slažu sa eksperimentalnim u oblasti energija gama zračenja od 60 keV do 1800 keV (simulirane i eksperimentalne vrednosti se poklapaju unutar 10%), pri čemu se pojedina odstupanja veća od 10% mogu objasniti sledećim efektima:

- efektom koincidentnog sumiranja koji nije bio uzet u obzir u simulacijama
- mogućom razlikom specificiranih i stvarnih parametara detektorskog kristala (kao što je debljina mrtvog sloja, zaobljenost ivica kristala itd.)
- efektima prikupljanja nanelektrisanja iz aktivne zapremine detektora, koji nisu bili uzeti u obzir u simulacijama.

Korisno bi bilo varirati pojedine parametre kristala detektora i uporediti tako dobijene simulirane vrednosti sa eksperimentalnim.

Vrednosti efikasnosti detekcije HPGe detektora zavise od energije gama zračenja, ali i od gustine i sastava matrice uzorka. Efekti matrice su važni za gama-spektrometrijsku analizu uzoraka iz životne sredine, ali i gama spektrometriju uopšte. Zanemarivanje ovih efekata može prouzrokovati velike greške u određivanju aktivnosti pojedinih radionuklida, naročito na niskim energijama gama zračenja. Razvijeni su različiti poluempirijski metodi za korekciju efekta samoapsorpcije koji je izražen pri analizi uzoraka različitih sastava, gustina i dimenzija, kao što su oni bazirani na koncepciji efektivnog prostornog ugla (npr. softveri "Angle" [18] i "Efftran" [19]). Ipak, u takvim slučajevima je neophodna kalibracija detektora bar jednim referentnim izvorom, pri čemu izračunavanje efikasnosti za željenu geometriju i matricu na bazi "transformacije" referentne (eksperimentalne) geometrije i matrice može uneti značajna odstupanja dobijenih rezultata od stvarnih vrednosti efikasnosti detekcije.

Sa druge strane, u ovom radu je pokazano da se primenom simulacionog Geant4 softvera dobijaju pouzdani rezultati efikasnosti detekcije, primenjivi na širokoj lepezi geometrija, gustina i sastava uzoraka koji se potencijalno mogu analizirati gama-spektrometrijskom metodom. Ovo direktno smanjuje potrebu za velikim brojem različitih, skupih referentnih izvora, koje je praktično i nemoguće nabaviti za sve realne situacije sa kojima se u praksi susrećemo.

Takođe je utvrđeno da za matrice približno iste gustine u istim geometrijskim uslovima merenja, i sastavom uzoraka u kojima dominiraju elementi relativno niskog rednog broja, simulirane vrednosti efikasnosti se neznatno razlikuju, što može značajno pojednostaviti primenu

u gama-spektrometriji. Ipak, zadavanje preciznog sadržaja elemenata u pojedinim kompleksnim matricama (kao što su zemljišta, sedimenti, organski materijali) nije jednostavan zadatak i zahteva oslanjanje na odgovarajuće tipične sastave, dok je gustina svakog konkretnog uzorka merljiv (poznat) parametar koji se unosi u simulacioni softver.

9 LITERATURA

- [1] Gilmore, G.R., 2008. Practical Gamma-ray Spectrometry, 2nd Edition. John Wiley & Sons
- [2] Knoll, G.F., 1979. Radiation Detection and Measurement. John Wiley & Sons
- [3] Leo, W.R., 1994. Tehniques for Nuclear and Particle Physics Experiments. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York
- [4] Slivka, J., Bikit, I., Vesović M., Čonkić, Lj., 2000. Gama spektrometrija: specijalne metode i primene. Univerzitet u Novom Sadu
- [5] Saegusa, J., Kawasaki, K., Mihara, A., Ito, M., Yoshida, M., 2004. Determination of detection efficiency curves of HPGe detectors on radioactivity measurement of volume samples. Appl. Radiat. Isotopes 61, 1383-1390.
- [6] Sima, O., Dovlete, C., 1997. Matrix effects in the activity measurement of environmental samples – implementation of specific corrections in Gamma-ray spectrometry analysis program. Appl. Radiat. Isotopes 48 (1), 59-69.
- [7] Harb, S., Salahel D.K., Abbady A., 2008. Study of efficiency calibrations of HPGe detectors for radioactivity measurements of environmental samples. Physics Conference, Egypt
- [8] Gultekin, A., Kaynak, G., Gurler, O., 2006. Determination of full energy peak efficiency of HpGe detector from 59.5 to 1332.5 keV. Indian Journal of Pure & Applied Physics. Vol. 44, 281-286
- [9] Ewa, I.O.B., Bodizs, D., Czifrus, Sz., Molnar, Zs., 2001. Monte Carlo determination of full energy peak efficiency for a HPGe detector. Appl. Radiat. Isotopes 55, 103–108
- [10] Boson, J., Agren, G., Johansson, L., 2008. A detailed investigation of HPGe detector response for improved Monte Carlo efficiency caculations. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 304-314
- [11] Hong Loan T.T., Phuong D.N., Phong D.P.H., Khanh T.A., 2009. Investigating the effect of matrices and densities on the efficiency of HpGe gamma spectroscopy using MCNP. Communications in Physics, 45-52
- [12] Ashra S., Likar A., Vidmar T., 1999. Precise modeling of a coaxial HPGe detector. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 438, 421-428
- [13] Apostolakis, J., 2009. Geometry and physics of the Geant4 toolkit for high and medium energy applications. Rad. Phys. Chem. 78, 859.
- [14] Geant4 Collaboration, 2003. Geant4 - a simulation toolkit. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 506, 250–3038
- [15] <https://geant4.web.cern.ch/geant4/support/introductionToGeant4.shtml>
- [16] <https://geant4.web.cern.ch/geant4/G4UsersDocuments/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/html/node1.html>
- [17] <http://geant4.cern.ch/G4UsersDocuments/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/html/node54.html>
- [18] <http://dlabac.com/angle/home.html>
- [19] <http://efftran.com/>

BIOGRAFIJA



Ivana Stanković je rođena u Tuzli u Bosni i Hercegovini 30. jula 1986. godine. Osnovnu školu "Nikola Vukićević" i Gimnaziju "Veljko Petrović", prirodno-matematički smer, završila je u Somboru. Godine 2005. se upisala na osnovne studije fizike na Departmanu za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta u Novom Sadu, smer medicinska fizika, koje je 2012. godine završila. Iste godine se upisala na master studije fizike na istom Univerzitetu, modul istraživački, smer nuklearna fizika.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije: Monografska dokumentacija

TD

Tip zapisa: Tekstualni štampani materijal

TZ

Vrsta rada: Master rad

VR

Autor: Ivana Stanković, 366m/12

AU

Mentor: Prof. dr Dušan Mrđa, vanredni profesor

MN

Naslov rada: Monte-Karlo simulacije uticaja matrice uzorka na efikasnost detekcije HPGe detektora

NR

Jezik publikacije: srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda: srpski/engleski

JI

Zemlja publikovanja: Srbija

ZP

Uže geografsko područje: Vojvodina

UGP

Godina: 2014.

GO

Izdavač: Autorski reprint

IZ

Mesto i adresa: Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4,

MA Novi Sad

Fizički opis rada: 8 poglavља/46 strana/19 referenci/12 tabela/41 slika

FO

Naučna oblast: Fizika

NO

Naučna disciplina: Nuklearna fizika

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči: Efikasnost HPGe detektora, Monte-Karlo simulacije, Geant4, efekat matrice

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 ovom radu je ispitan uticaj osobina matrice na efikasnost detekcije HPGe detektora, korišćenjem Monte-Karlo simulacija pomoću Geant4 programskega paketa.
IZ	
<i>Datum prihvatanja teme od NN veća:</i>	26. 06. 2014.
DP	
<i>Datum odbrane:</i>	14. 07. 2014.
DO	
<i>Članovi komisije:</i>	
KO	
<i>Predsednik:</i>	dr Ištvan Bikit, redovni profesor
<i>član:</i>	dr Dušan Mrđa, vanredni profesor
<i>član:</i>	dr Radomir Kobilarov, redovni profesor

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:

Ivana Stankovic, 366m/12

AU

Mentor/comentor:

Prof. dr Dusan Mrdja, associate professor

MN

Title:

Monte Carlo simulations of sample matrix influence on
detection efficiency of HPGe detectors

TI

Language of text:

Serbian (Latin)

LT

Language of abstract:

English

LA

Country of publication:

Serbia

CP

Locality of publication:

Vojvodina

LP

Publication year:

2014.

PY

Publisher:

Author's reprint

PU

Publication place:

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

PP

Physical

8/46/19/12/41/0

*description:(chapters/pages/literatu
re/tables/images/additional lists):*

PD

Scientific field:

Physics

SF

Scientific discipline:

Nuclear physics

SD

<i>Subject/ Key words:</i>	Efficiency of HPGe detectors, Monte Carlo simulation, Geant4, matrix effect
SKW	
UC	
<i>Holding data:</i>	Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4
HD	
<i>Note:</i>	none
N	
<i>Abstract:</i>	In this work, examination of matrix effects on efficiency of HPGe detectors has been done, using Monte Carlo simulations performed by Geant4 toolkit.
AB	
<i>Accepted by the Scientific Board:</i>	
ASB	26. 06. 2014.
<i>Defended on:</i>	
DE	14. 07. 2014.
<i>Thesis defend board:</i>	
DB	
<i>President:</i>	Istvan Bikit, PhD, full professor
<i>Member:</i>	Dusan Mrdja, PhD, associate professor
<i>Member:</i>	Radomir Kobilarov, PhD, full professor