



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Kalibracija efikasnosti HPGe detektora pomoću softvera Angle i LabSOCS

Diplomski rad

Mentor:
prof. dr Jovana Nikolov

Kandidat:
Goran Stanić

April, 2019.

Sadržaj

1 Uvod	3
2 Gama zračenje	4
2.1 Interakcija gama zračenja sa materijom	4
2.1.1 Fotoelektrični efekat	5
2.1.2 Komptonovo rasejanje	5
2.1.3 Stvaranje para elektron-pozitron	6
3 Detektori gama zračenja	8
3.1 Poluprovodnički detektori	8
3.2 Princip rada poluprovodničkih detektora	9
3.3 HPGe detektori	10
3.4 Efikasnost detektora	11
4 Softveri i kalkulacije	13
4.1 Angle	13
4.1.1 Matematički model	13
4.2 LabSOCS	16
5 Kalibracija efikasnosti	17
6 Karakteristike detektora	20
7 Uzorci i geometrije	21
8 Rezultati i diskusija	22
9 Zaključak	27
10 Prilog	28

Predgovor

Ovaj diplomski rad predstavlja jednu zaokruženu celinu mojih studija na Departmanu za fiziku, Prirodnno-matematičkog fakulteta, Univerziteta u Novom Sadu. Cilj je predstavljanje teme kojom sam se najviše bavio u toku studiranja, a to je pored medicinske fizike, nuklearna fizika, tačnije detekcija gama zračenja iz životnog okruženja. Ovim putem htio bih da se zahvalim svom mentoru prof. dr Nikolov Jovani koja mi je predstavljala veliku podršku u toku studiranja kako u realizaciji ovog rada i upoznavanju sa naučnim metodom i svim njegovim začkoljicama, tako i putem nebrojenih pisama preporuke i reči hvale koje su me odvele daleko, dr Tucaković Ivani sa Instituta Ruđer Bošković u Zagrebu na izdašnim savetima, koja je uzgred sprovodila merenja na HPGe detektorima na svom institutu, kao i kalkulacije efikasnosti na softveru *LabSOCS*, prof. dr Mrđi Dušanu na velikoj tehničkoj pomoći (dozvoli da mu zaposednem računar na nekoliko meseci), upoznavanjem sa softverom Angle, kao i većitoj spremnosti da odgovori na moja pitanja i naravno svim zaposlenima na odseku za nuklearnu fiziku koji su bili više nego otvoreni da me prime u svoju malu zajednicu i omoguće mi da se bavim onim što zaista volim, naučno-istraživačkim radom.

Rezultati diplomskog rada su iskorišćeni za publikaciju u časopisu *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 920 (2019) 81-87* pod nazivom *Angle vs. LabSOCS for HPGe efficiency calibration* (doi.org/10.1016/j.nima.2018.12.059).

1 Uvod

Petnaesti je februar 1564. godine, građani Pize tumaraju blatnjavim ulicama, vršeći svoje građanske poslove, hraneći svoju neretko bolesnu decu, plaćajući crkvi i gradskim vlastima ne-male dažbine, i sve po starom običaju, a potpuno nesvesni promene u vazduhu, nesvesni novorođenog deteta koje plače, deteta koje će transformisati svet u kom žive jednom zasvagda, deteta po imenu Galileo. Na studijama medicine, Galileo dobija priliku da prisustvuje predavanju iz geometrije koje mu menja tok interesovanja i okreće ga svetu matematike i zakonima univerzuma. Njegova shvatanja sveopšte povezanosti između ova dva stuba realnosti (*"Filozofija je ispisana u veličanstvenoj knjizi, univerzumu... Napisana je jezikom matematike, a njena slova i reči su trouglovi, krugovi i ostale geometrijske figure..."*) su isklesala točak naučnog metoda, točak koji će se kotrljati vekovima, udišući tako u pluća njegovih sledbenika inspiraciju i vidike koji dosežu daleko.

Od Keplera, preko Huka, do Njutna i Lajbnica, od Frenklina, preko Heršela, do Kelvina i Pastera, od Bolcmana, preko Rendgena, do Ajnštajna i Bora, za ovim velikanom redaju se najveće ličnosti čovečanstva, sve vreme se postavljajući jedni drugima na ramena¹. Pozajmio bih analogiju filozofa Nika Bostroma kojom on opisuje situaciju u nauci. Od astronomskih opservacija, do izučavanja fundamentalnih čestica, svi ovi naučnici su izvlačili kuglice znanja iz jedne velike neprozirne urne. Najčešće su te kuglice bile bele boje i one su predstavljaće otkrića koja su bila za opšte dobro čovečanstva. Međutim, s vremenom na vreme, nekom bi zapalo da izvuče sivkastu kuglicu. Takva kuglica bi bila predstavnik onih otkrića koja su sa sobom donela i stvaranje i destrukciju, poput cepanja atoma (nuklearne elektrane i nuklearno oružje). Prateći ovakva otkrića i havarije koje su se dešavale kao njihov rezultat, javljale su se grane nauke koje su imale za cilj da na neki način pokušaju da osiguraju bezbednost čovečanstva i da ga zaštite od posledica. Razvojem detektoriskih tehnika i kompjuterske moći, ove naučne grane, i tehnike kojima se služe, stale su na čvrsto tlo, i danas se ponašaju kao sigurnosni alarm i prva linija odbrane ljudske rase. One i njima slične oblasti istraživanja igraju vrlo bitnu ulogu u našem društvu, jer osim zaštite igraju i potencijalnu ulogu filtera kroz koji bi "sive" kuglice prolazile, te tako obasipale civilazaciju samo svojim "belim" nijansama.

Istraživački rad koji se nalazi pred čitaocem opisuje jednu takvu tehniku sa njena dva različita aspekta i kao i svaki drugi, nepristrasni rad, predstavlja jedini mogući i najlogičniji tok naučne spoznaje, oslanjajući se na stari, a pozivajući na novi naučni diskurs.

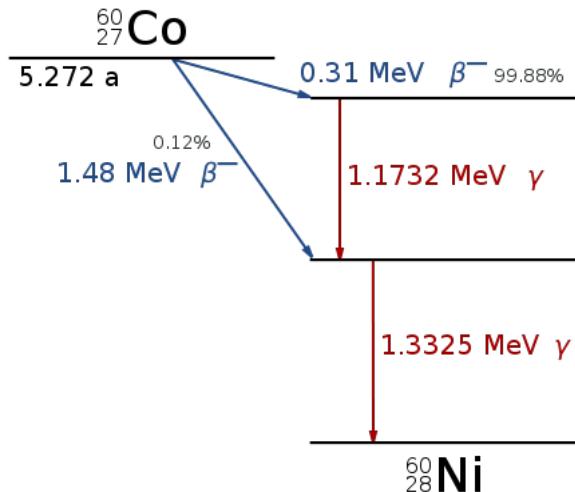
¹ *"Ako sam video više nego drugi, to je zato što sam stajao na ledima divova"* - Isak Njutn

2 Gama zračenje

Gama zračenje (gama zraci) je elektromagnetsko zračenje koje se sastoji od fotona čija se energija (frekvencija) nalazi na samom kraju visokoenergetskog dela elektromagnetskog spektra. Otkrio ga je francuski fizičar i hemičar Pol Villard (fra. Paul Villard) 1900. godine dok je izučavao zračenje koje je emitovao radijum prilikom svog gama raspada, a imenovao Ernest Raderford (eng. Ernest Rutherford) 1903. godine.

Do emisije gama zračenja dolazi kada jezgro iz pobjuđenog stanja prelazi u neko niže ili osnovno energetsko stanje. Tom prilikom se emituje jedan gama kvant čija je energija jednak energetskoj razlici stanja između kojih se ovaj prelaz vrši. Energija gama zračenja se kreće u opsegu od desetak keV do nekoliko (ne više od 10) MeV [1]. Gama zraci predstavljaju ionizujuće zračenje pa se zbog toga smatraju za opasne po živi svet. Bilo kako bilo, njihova upotreba u radiodijagnostici i radioterapiji se pokazala kao više nego korisna, te su kao takvi, gama zraci postali neophodna stavka u životima mnogih ljudi.

Osnovni izvori gama zračenja u prirodi su gama raspadi radioizotopa poput ^{40}K ili ^{60}Co (Slika 1), ali može se naći i kao sekundarno zračenje nastalo u mnogobrojnim interakcijama kosmičkih zrakova sa Zemljinom atmosferom. Kao takvo vrlo je pogodno za praćenje radioaktivnog zagađenja sredine i kao pomoć u očuvanju zdravlja ljudi.



Slika 1: Šema raspada ^{60}Co i odgovarajuće energije prelaza

2.1 Interakcija gama zračenja sa materijom

Postoje tri osnovna vida interakcije gama zračenja sa materijom koji doprinose njenoj apsorpciji:

- Fotoelektrični efekat
- Komptonovo rasejanje
- Stvaranje para elektron-pozitron

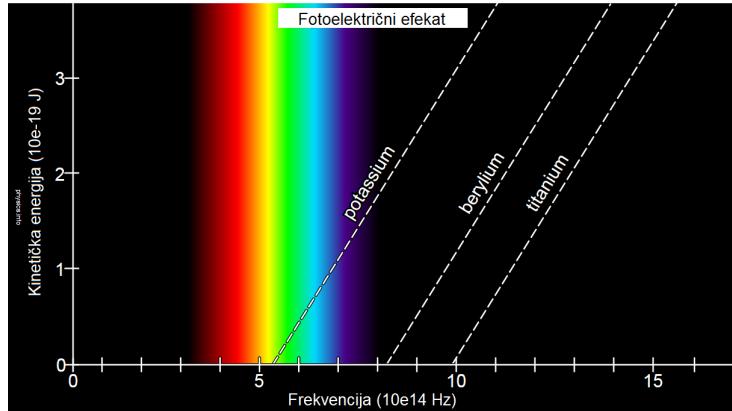
2.1.1 Fotoelektrični efekat

U procesu fotoelektrične apsorpcije foton interaguje sa atomom i predajući svu svoju energiju, nestaje. Umesto njega, fotoelektron, kojem je energija deponovana, biva izbačen sa jedne od ljudskih atoma sa kojim je foton stupio u interakciju. Interakcija se uvek odvija sa atomima kao celinama, a nikad sa slobodnim elektronima. Za gama zrake sa dovoljnom energijom najveća je verovatnoća da će elektron biti izbačen sa najčvršće vezane, K ljudske. Fotoelektron će nositi energiju jednaku

$$E_e = h\nu - E_b , \quad (1)$$

gde E_b predstavlja vezivnu energiju fotoelektrona. Za gama zrake energije veće od nekoliko stotina keV, fotoelektron odnosi većinu upadne energije fotona.

Osim fotoelektrona, interakcija za sobom ostavlja ionizovani atom sa neupražnjjenim mestom na jednoj od njegovih orbitala. Ovo mesto se vrlo brzo popunjava zahvatom jednim od slobodnih elektrona iz okoline i/ili reorganizacijom elektrona između ljudsaka samog atoma. Zbog toga može doći do stvaranja jednog ili više fotona u opsegu x-zraka (Slika 2). U vrlo retkim slučajevima postoji mogućnost da tzv. Ožeov (fra. Auger) elektron sa sobom odnese energiju eksitacije atoma, time menjajući ulogu x-zraka tj. karakterističnog zračenja [2].

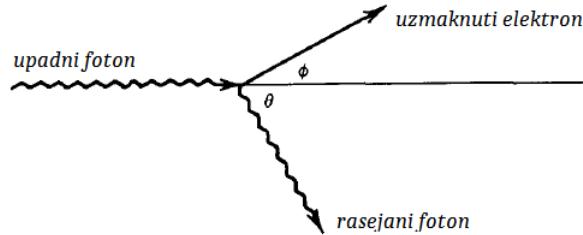


Slika 2: Grafički prikaz fotoelektričnog efekta

2.1.2 Komptonovo rasejanje

Proces interakcije kod Komptonovog rasejanja se odvija između upadnog fotona i elektrona apsorbera. On predstavlja dominantni mehanizam interakcije za gama zrake energija tipičnih za izvore koji u sebi sadrže radioizotope. Kod Komptonovog rasejanja upadni foton se rasejava pod određenim uglom θ u odnosu na svoj prvobitni pravac kretanja ostavljajući elektronu s kojim se sudario određen deo svoje prvobitne energije. Kako su mogući svi uglovi rasejanja, energija koja se prenese elektronu se kreće od nulte pa sve do velikog dela energije gama kvanta.

Izraz koji povezuje transfer energije sa uglom rasejanja za bilo koju datu interakciju se može izvesti iz izraza za zakon održanja energije i zakon održanja impulsa. Tako, koristeći notaciju iz Slike 3 možemo pokazati da važi



Slika 3: Skica Komptonovog efekta

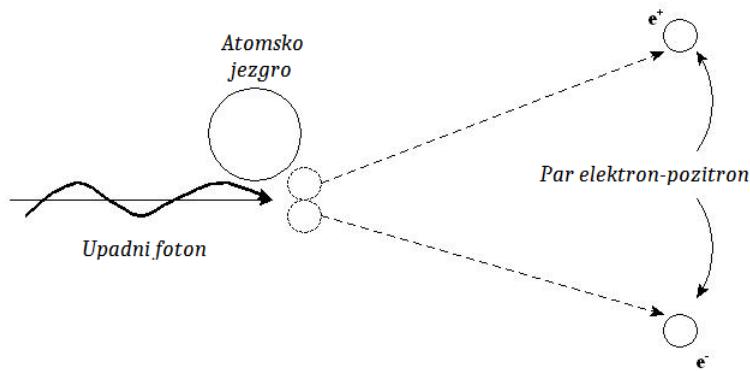
$$h\nu = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)}, \quad (2)$$

gde je $m_0 c^2$ energija mirovanja elektrona (0.511 MeV).

Za male uglove rasejanja θ , vrlo mala količina energije se prenese elektronu. Sa druge strane bitno je naglasiti da i pri uglovima od $\theta = \pi$ foton zadržava određenu količinu početne energije [2].

2.1.3 Stvaranje para elektron-pozitron

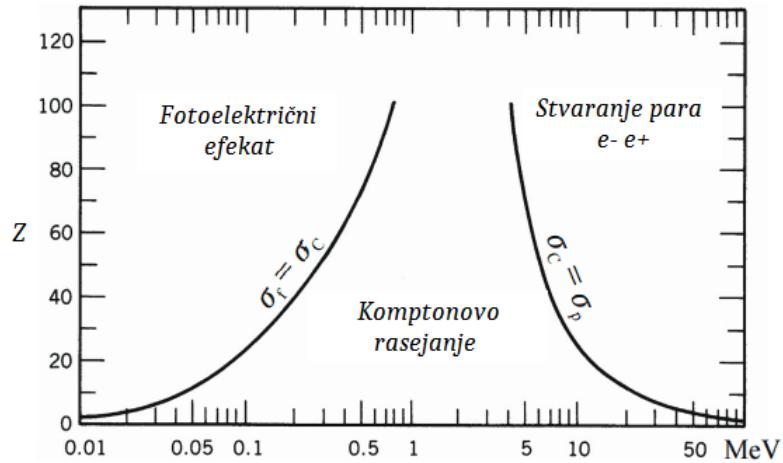
Ukoliko foton sa sobom nosi energiju koja je duplo veća od mase mirovanja elektrona (1.022 MeV), postoji verovatnoća da dođe do tzv. stvaranja para elektron-pozitron. U toku interakcije, koja se mora odvijati u prisustvu Kulonovog polja jezgra, gama foton nestaje i biva zamenjen parom elektron-pozitron. Sav energetski višak preko 1.022 MeV koji je foton nosio sa sobom odlazi u kinetičku energiju koju elektron i pozitron dele između sebe (Slika 4). S obzirom da će doći do anihilacije pozitrona u materijalu, nakon njegovog usporenenja, mogu se očekivati dva anihilaciona fotona kao sekundarni produkti interakcije [2].



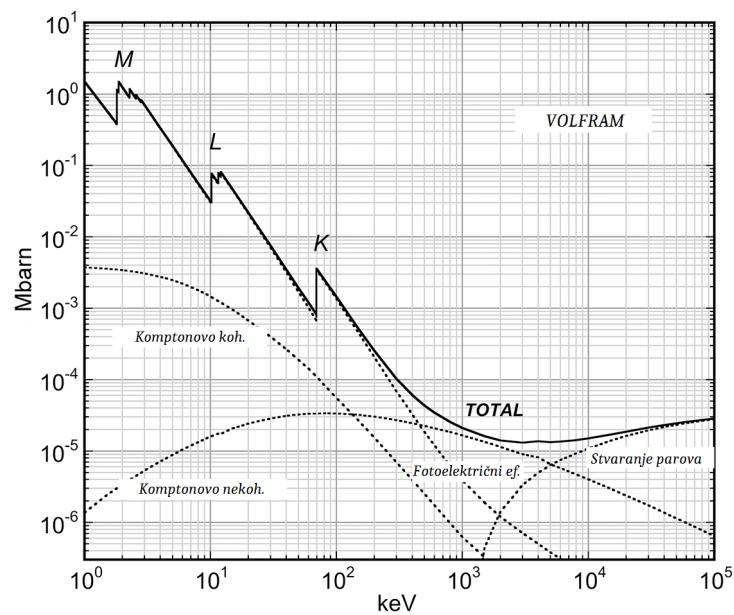
Slika 4: Shema stvaranja para elektron-pozitron

Relativna zastupljenost gore navedena tri procesa za različite materijale i energije gama zraka je prikazana na Slici 5, gde dve razdelne linije predstavljaju mesta jednake verovatnoće

dešavanja procesa između kojih se nalaze, dok je na Slici 6 prikazana verovatnoća dešavanja svakog od procesa za određeni materijal.



Slika 5: Relativna zastupljenost svaka od tri procesa interakcije gama zračenja sa materijom



Slika 6: Verovatnoća odvijanja nekog od procesa interakcije u zavisnosti od energije za dati materijal

3 Detektori gama zračenja

Kako bi se gama zraci mogli detektovati oni moraju interagovati sa materijom, a ta interakcija mora biti zabeležena. Srećom, elektromagnetna priroda gama zraka im omogućuje da ostvaruju značajne interakcije sa elektronima atoma koji sačinjavaju materijal kroz koji prolaze. Ključni proces u detekciji gama fotona je ionizacija koja nastaje kada foton pređa deo ili svoju celokupnu energiju elektronu. Jonizovani elektroni se sudaraju sa drugim atomima i oslobađaju još veći broj elektrona, koji mogu dalje da ionizuju materiju. Oslobođeno nanelektrisanje se može detektovati bilo direktno pomoću proporcionalnog brojača ili poluprovodničkih detektora, ili indirektno pomoću scintilacionih detektora, a sve u cilju opažanja gama fotona i određivanja njihovih energija. Kao konačni rezultat dobija se električni impuls čiji je napon proporcionalan količini deponovane energije u medijumu [1].

Kao što je prethodno pomenuto, detektori mogu raditi na različitim principima i biti sačinjeni od različitih materijala. U ovom radu glavni fokus će biti na poluprovodničkim detektorima koji koriste specifične osobine ovih materijala kako bi što bolje prikupili nanelektrisanja proizvedena njihovom ionizacijom.

3.1 Poluprovodnički detektori

Pre nego što krenemo sa opisivanjem detektora i njihovih karakteristika, trebalo bi objasniti koje su to karakteristike poluprovodničkih materijala, generalno. Naime, za poluprovodnike je karakteristična njihova periodična struktura. Zahvaljujući kovalentnim vezama koje se formiraju, stvaraju se specifične energetske zone koje dalje diktiraju ponašanje elektrona u datom materijalu. Nižu (u energetskom smislu), valentnu zonu popunjavaju elektroni koji su vezani za čvorove kristalne rešetke dok je viša, provodna zona okarakterisana postojanjem slobodnih elektrona koji doprinose provodnosti materijala. Ove dve zone su razdvojene tzv. energetskim proceppom (zabranjenom zonom) koju čine zabranjena elektronska stanja, a koji poluprovodniku dodeljuje osobine kako provodnika, tako i izolatora.

Ukoliko dovođenjem energije elektron napusti kovalentnu vezu te pređe u provodnu zonu poluprovodnika, on iza sebe ostavlja prazninu odnosno šupljinu stvarajući par elektron-šupljina. Elektroni i šupljine se mogu kretati pod uticajem primjenjenog spoljašnjeg polja, ali na suprotnu stranu jedno od drugog. Pomeranje obe ove vrste nanelektrisanja doprinosi opaženoj provodnosti poluprovodnog materijala.

Provodnost poluprovodnika u velikoj meri zavisi od temperature na kojoj se on nalazi. Naime, verovatnoća da se proizvede jedan par elektron-šupljina u jedinici vremena je data sledećim izrazom

$$p(T) = CT^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right), \quad (3)$$

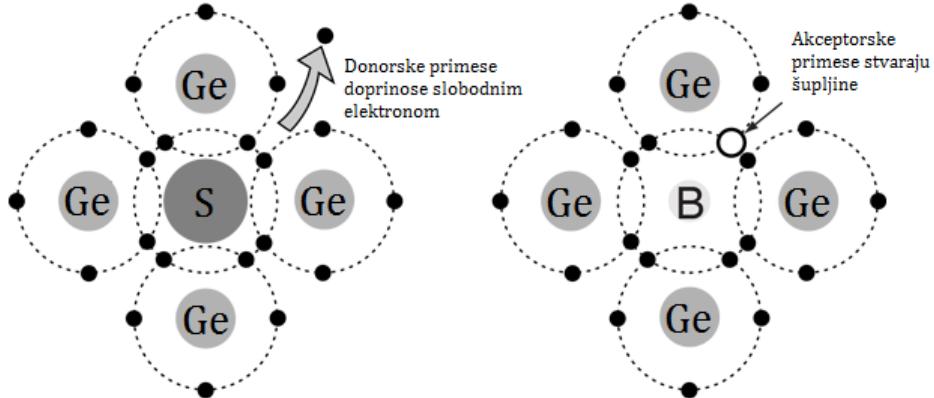
gde je T absolutna temperatura, E_g širina energetskog procepa, k Boltzmanova konstanta, a C konstanta proporcionalnosti karakteristična za materijal.

Kao što se može videti iz eksponencijalnog člana, verovatnoća termalne eksitacije je u velikoj meri zavisna od odnosa širine energetskog procepa i absolutne temperature. Ukoliko je širina procepa reda veličina nekoliko elektronvolti (eV) termalna eksitacija će stvoriti dovoljno veliku provodnost da materijal bude klasifikovan kao poluprovodnik.

Osobine poluprovodnika takođe zavise od primesa koje sadrže u svojoj kristalnoj strukturi. Kako bismo ilustrovali efekat dopiranja (uvodenja primesa) koristićemo se germanijumom u kristalnoj formi. Kao četvorovalentan, u normalnim uslovima germanijum ostvaruje kristalnu strukturu gde jedan atom formira četiri kovalentne veze sa četiri susedna atoma (Slika 7). Sada ćemo razmotriti slučaj kada se u kristalu germanijuma nalaze male količine primesa, bilo namerno dodatih, bilo zaostalih nakon procesa prečišćavanja. Smatramo da su primese u vidu petovalentnih atoma (pr. sumpor) i da će pri vrlo malim koncentracijama, reda veličina ppm², supstitucijom zauzeti mesto jednom atomu germanijuma. Kako su atomi sumpora petovalentni, nakon formiranja četiri kovalentne veze, jedan elektron će ostati kao slabo vezani “višak”. Ova situacija rezultuje u vrlo lakom otkidanju tog jednog slabo vezanog elektrona, međutim ovog puta bez zaostale šupljine na njegovom mestu. Primese ovog tipa se nazivaju donorske primese, a poluprovodnici n-tipa. Kako primesni elektroni nisu deo kristalne rešetke oni mogu da zauzimaju mesto unutar inače zabranjene zone. Kao takvi imaju energiju vrlo blisku provodnoj zoni te će i najmanje termičke eksitacije, reda veličina meV, biti dovoljne da ih pobude u provodnu zonu, tj. ionizuju.

Sa druge strane, ukoliko umesto petovalentnih atoma koristimo trovalentne (pr. bor) dobijemo situaciju u kojoj će između primesnog atoma i okolnih atoma germanijuma biti ostvarene samo tri kovalentne veze dok će jedan elektron ostati nesparen (Slika 7). Ove primese se nazivaju akceptorima, jer na mesto nesparene kovalentne veze vrlo lako može da dođe elektron iz neke druge veze ostavljajući za sobom šupljinu, dok se poluprovodnici nazivaju poluprovodnicima p-tipa. Ove akceptorske primese takođe rezultuju u nivoima koji se nalaze unutar inače zabranjene energetske zone, osim što je ovog puta energetski nivo bliže valentnoj zoni.

Iz prethodno navedenog može se zaključiti da su glavni nosioci nanelektrisanja za poluprovodnike n-tipa elektroni, dok su za one p-tipa glavni nosioci šupljine [3, 4].



Slika 7: Šematski prikaz dopiranog poluprovodnika, sa leve strane n-, a sa desne p-tipa

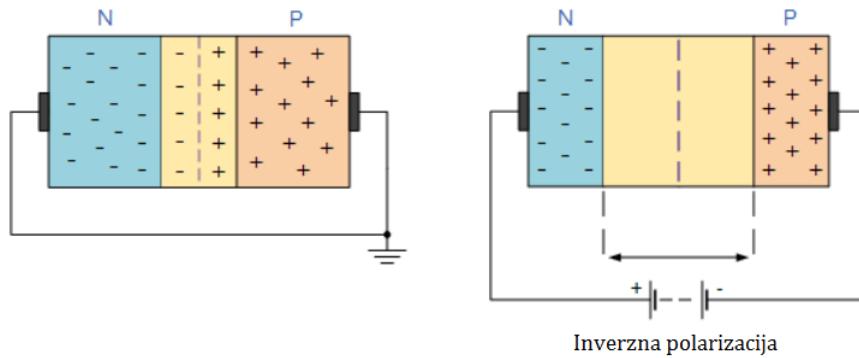
3.2 Princip rada poluprovodničkih detektora

Ako se poluprovodnici p- i n-tipa dovedu u kontakt (p-n spoj), elektroni iz poluprovodnika n-tipa će difundovati ka onom p-tipa kako bi tamo popunjavalii šupljine. Kao rezultat ovog difuzionog procesa, stvorice se višak negativnog nanelektrisanja u poluprovodniku p-tipa, dok će n-tip usled odsustva elektrona biti pozitivno nanelektrisan u oblasti blizu spoja. Proces difuzije će trajati onoliko dugo dok se na spoju ne stvori električno polje dovoljnog intenziteta da onemogući

²eng. parts per million - jedan u milion

dalju preraspodelu naelektrisanja. Deo poluprovodnika oko spoja u kome se odvijaju pomenuti difuzioni procesi naziva se oblast prostornog naelektrisanja. U ovoj oblasti postoji električno polje što je čini veoma sličnom kondenzatoru, samo što je ovde prostor u kome električno polje vlada ispunjen poluprovodničkim materijalom, a ne vazduhom. U slučaju kada bi neko zračenje prolazeći kroz ovako stvorenu oblast vršilo ionizaciju, stvarali bi se elektroni i šupljine koje bi postojeće električno polje usmeravalo na suprotne strane. Dovoljno bi bilo da se na krajeve ovakvog spoja postave elektrode kako bi se stvorenno naelektrisanje prikupilo.

Ukoliko se na krajeve p-n spoja dovede napon tako da spoj bude inverzno polarizovan (negativan kraj na p-delu, a pozitivan na n-delu) oblast prostornog naelektrisanja će se značajno povećati (Slika 8). Ako sada kroz oblast prostornog naelektrisanja prođe neko ionizujuće zračenje, elektroni i šupljine će se mnogo efikasnije prikupiti na elektrodama nego kada je unutar oblasti vladalo električno polje koje je poticalo samo od kontaktne potencijala. Sakupljeno naelektrisanje može da stvori naponski signal pomoću kog se vrlo precizno može odrediti energija zračenja koje je prošlo kroz radnu zapreminu detektora [1].



Slika 8: Prikaz p-n spoja u ravnotežnom stanju i inverzno polarizovanog p-n spoja

3.3 HPGe detektori

Pre nego što se upustimo u analizu HPGe detektora nakratko ćemo se osvrnuti na osnovne karakteristike germanijuma (Ge) kao najčešće korišćenog poluprovodničkog materijala. Pregled ovih karakteristika se može videti u Tabeli 1.

Tabela 1: Osnovne karakteristike germanijuma kao poluprovodničkog materijala

Ge	
Atomski broj	32
Atomska masa	72.60
Maseni broj stabilnih izotopa	70-72-73-74-76
Gustina (300K); g/cm ³	5.32
Atoma/cm ³	$4.41 \cdot 10^{22}$
Dielektrična konstanta	16
Širina zabranjene zone (300 K); eV	0.665
Širina zabranjene zone (0 K); eV	0.746
Pokretljivost elektrona (77 K); cm ² /V · s	$3.6 \cdot 10^4$
Pokretljivost šupljina (77 K); cm ² /V · s	$4.2 \cdot 10^4$

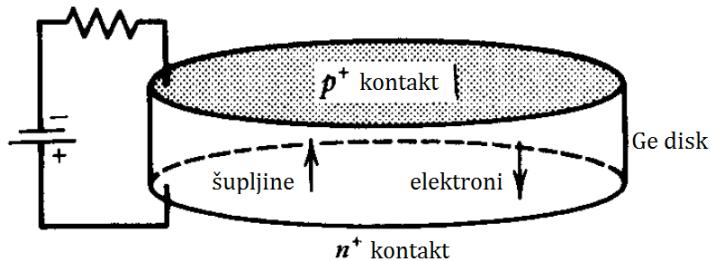
Kod različitih metoda detekcije zračenja najveći problem predstavlja sloj prostornog nanelektrisanja, tj. aktivna zapremina detektora. Naime, ukoliko je ovaj sloj tanak, samo alfa čestice i drugo kratkodometno zračenje mogu biti detektovani dok je u slučaju gama zračenja potrebno da ovaj sloj bude mnogo deblji. Čak i koristeći germanijumske ili silikonske detektore normalne čistoće vrlo je teško postići debljinu slojeva prostornog nanelektrisanja veću od 2 do 3 mm, uprkos primenjivanju spoljašnjeg napona na krajevima p-n spoja blizu granice probaja. Rešenje problema možemo potražiti u jednačini pomoću koje se određuje debljina aktivne zapremine poluprovodnika

$$d = \left(\frac{2\epsilon V}{eN} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

gde je V primjenjeni napon, N koncentracija nečistoća u poluprovodničkom materijalu, a ϵ i e dielektrična konstanta i elementarno nanelektrisanje, respektivno. Za dati napon, značajnije debljine sloja prostornog nanelektrisanja se mogu postići samo smanjivanjem ukupnog broja nečistoća N .

Način na koji se može doći do ovakvog cilja je taj da se sve više usavršavaju tehnike prečišćavanja koje bi bile sposobne da spuste koncentraciju nečistoća na otprilike 10^{10} atoma/cm³. Ukoliko se vratimo u jednačinu (4) možemo zaključiti da se pri ovakvoj čistoći germanijuma debljina aktivne zapremine može proširiti na 10 mm pomoću primjenjenog napona od oko 1000 V. Srećom, ovakve tehnike su razvijene početkom 80-ih godina prošlog veka, čime je postignuta koncentracija nečistoća reda 1 u 10^{12} . Detektori proizvedeni pomoću ovog ultra-čistog germanijuma se nazivaju HPGe (*High Purity Germanium*) detektori.

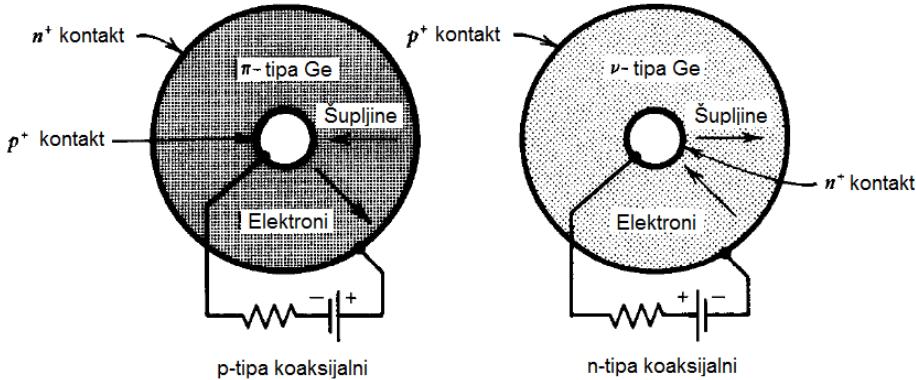
U zavisnosti od procesa proizvodnje HPGe detektori mogu biti $\pi(p)$ -tipa ili $\nu(n)$ -tipa, a po konfiguraciji mogu biti planarni ili koaksijalni (Slike 9 i 10) [2].



Slika 9: Shema planarnog HPGe detektora; u slučaju detektora ν -tipa p^+ kontakt je ispravljački dok je kod π -tipa to n^+ kontakt

3.4 Efikasnost detektora

Svi detektori zračenja će u principu dati izlazni signal za svaki pojedinačni kvant zračenja koji interaguje sa aktivnom zapreminom. Za primarno nanelektrisano zračenje poput alfa i beta čestica, interakcija u vidu ionizacije ili eksitacije će se dogoditi odmah po ulazu čestice u aktivnu zapreminu. Već nakon što čestica prevali put koji je znatno kraći od njenog dometa, stvorice se dovoljan broj jonskih parova čime će se zasigurno dobiti merljiv signal. Stoga je vrlo jednostavno napraviti takvu postavku da detektor “vidi” svaku alfa i beta česticu koja mu uđe u aktivnu zapreminu. Pod ovim uslovima, kaže se da detektor ima efikasnost od 100%.



Slika 10: Shema koaksijalnog HPGe detektora π -tipa i ν -tipa

Sa druge strane, za nenaelektrisano zračenje poput gama zračenja ili neutrona detekcija je moguća tek kada se odvije mnogo značajnija interakcija sa materijalom detektora. S obzirom da ove vrste zračenja mogu da pređu velike udaljenosti pre nego što do interakcije dođe, detektori koji ih detektuju su najčešće manje nego 100% efikasni. Imajući ovo u vidu postaje neophodno imati preciznu meru efikasnosti detektora kako bi se mogao konstruisati odnos između izbrojanih impulsa i broja čestica koje su pale na površinu detektora.

Zgodno je podeliti efikasnost na dve podgrupe: *apsolutnu* i *svojstvenu*. Apsolutna efikasnost se definiše kao

$$\varepsilon_{abs} = \frac{\text{broj detektovanih impulsa}}{\text{broj emitovanih čestica od strane izvora}} \quad (5)$$

i zavisi kako od karakteristika detektora tako i od geometrije postavke (primarno, udaljenosti izvora od detektora). Svojstvena efikasnost sa druge strane se definiše kao

$$\varepsilon_{int} = \frac{\text{broj detektovanih impulsa}}{\text{broj čestica koje dospeju do detektora}}. \quad (6)$$

Kada je u pitanju izotropni izvor zračenja, dve veličine su povezane jednostavnom relacijom $\varepsilon_{int} = \varepsilon_{abs} \cdot (4\pi/\Omega)$, gde je Ω prostorni ugao detektora viđen sa položaja izvora.

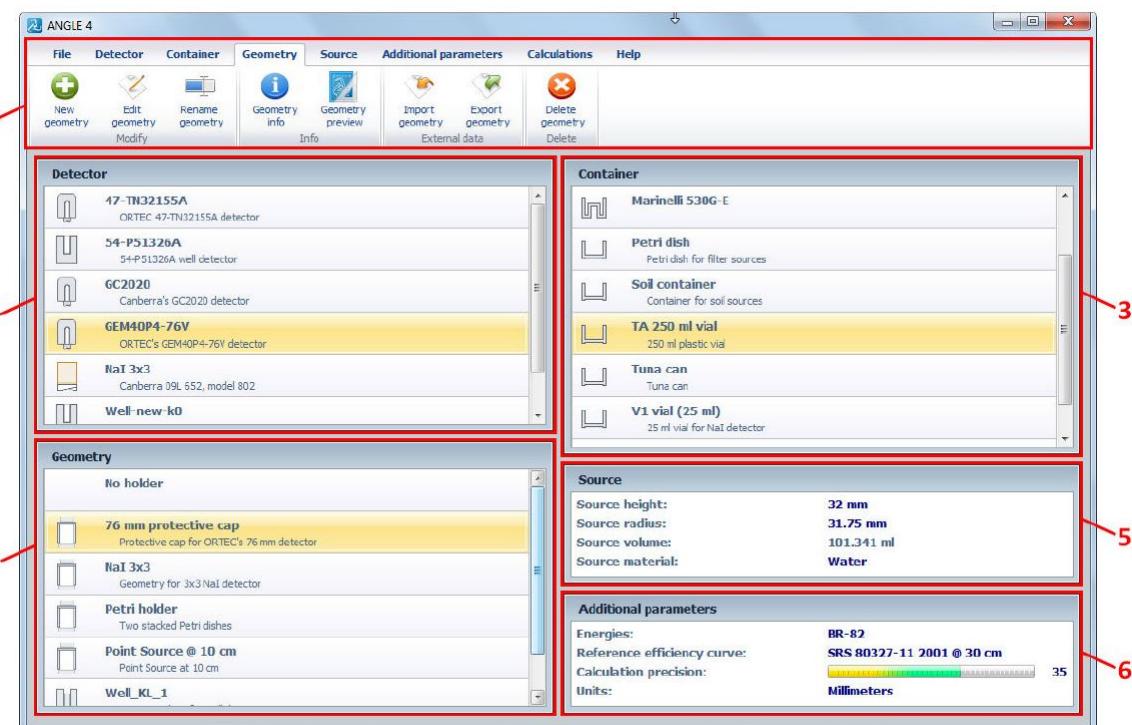
Bilo kako bilo, mnogo je pogodnije koristiti vrednosti svojstvene nego apsolutne efikasnosti, jer svojstvena efikasnost sa sobom nosi mnogo manju zavisnost od geometrije nego apsolutna. Ona obično zavisi od materijala od kog je detektor sačinjen, energije zračenja i fizičke debljine detektora u pravcu iz kog zračenje dolazi. Kako god, geometrijska zavisnost nije u potpunosti isključena. Blaga zavisnost od udaljenosti izvora od detektora ostaje zbog toga što se srednja dužina puta koje zračenje pređe u detektoru menja (iako malo) sa ovom veličinom [2].

4 Softveri i kalkulacije

4.1 Angle

Angle je napredan softver za računanje efikasnosti HPGe i NaI detektora baziran na konceptu transfera efikasnosti. Ova metoda koristi izmerene efikasnosti poznatih referentnih konfiguracija zajedno sa modelima prostornih uglova kako bi se što preciznije odredila efikasnost za različite spremnike, uzorke i detektore. Poluempirijski pristup, implementiran u Angle-u, ima potencijala da bude precizniji od čisto matematičkih modela zbog velikih grešaka koje se mogu javiti pri nedovoljno dobrom poznavanju karakteristika detektora, poput defekata u kristalu, debljine kontakta itd. Kod ne-matematičkog pristupa, sve nabrojane greške se poništavaju merenjem referentnih uzoraka na istovetnim detektorima [5]. Rad Jovanovića i dr. [6] i reference navedene u njemu detaljno objašnjavaju koncept koji leži iza koda [7].

Na slici 11 prikazan je korisnički interfejs softvera, a u opisu slike su data objašnjenja za funkcije raznih prozora.



Slika 11: Korisnički interfejs Angle-a: 1. traka sa osnovnim funkcijama, 2. prozor za definisanje osobina detektora, 3. prozor za podešavanje oblika i sastava posuda za uzorke, 4. prozor za definisanje geometrije, tj. međusobnog položaja detektora i uzorka, 5. prozor za definisanje uzoraka i 6. prozor za dodatne parametre (preciznost kalkulacije, kriva efikasnosti, itd.)

4.1.1 Matematički model

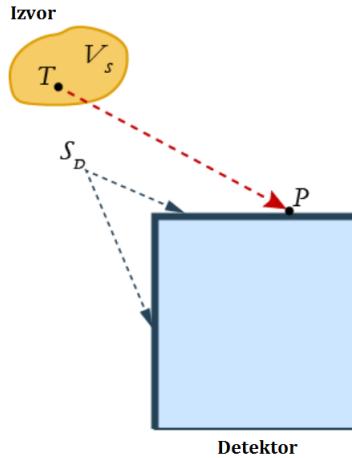
Ukoliko izvor gama zračenja označimo sa S i detektor sa D , efektivni prostorni ugao se definiše kao

$$\bar{\Omega} = \int_{V_S S_D} d\bar{\Omega}, \quad (7)$$

gde je V_S zapremina izvora, S_D površina detektora okrenuta prema izvoru, a

$$d\bar{\Omega} = \frac{F_{att} F_{eff} \overrightarrow{TP} \cdot \vec{n}_u}{|\overrightarrow{TP}|^3} d\sigma. \quad (8)$$

Ovde je T proizvoljna tačka u zapremini V_S , P proizvoljna tačka na površini S_D , a \vec{n}_u jedinični vektor normalan na $d\sigma$, infinitezimalno mali deo površine S_D . Jednačina (7) je stoga petostruki integral. Faktorom F_{att} uračunavamo atenuaciju gama fotona koji prolazi kroz radnu zapreminu detektora prateći pravac vektora \overrightarrow{TP} , dok F_{eff} opisuje verovatnoću neelastične interakcije fotona sa materijalom detektora. Iz toga možemo zaključiti da ova dva faktora uzimaju u obzir geometrijske i kompozicione parametre materijala kroz koji foton prolazi.

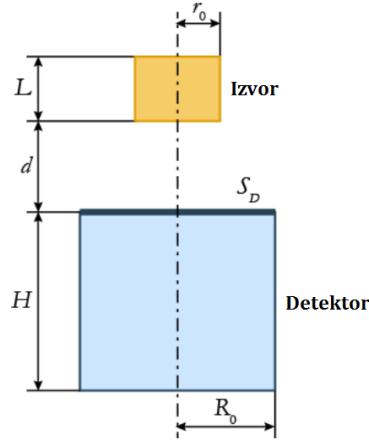


Slika 12: Slikoviti opis različitih veličina karakterisanih u tekstu iznad

Kako se kroz ceo rad proteže analiza zasnovana na cilindričnim geometrijama izvora pokazaćemo kako bi izgledao integral koji bi Angle računao u tom slučaju. Za slušaj aksijalne simetrije detektora i izvora, i za poluprečnik izvora koji je manji od poluprečnika detektora ($r_0 < R_0$) iz jednačine (7) dobijamo

$$\bar{\Omega} = \frac{4}{r_0^2 L} \int_0^L (d + l) dl \int_0^{r_0} r dr \int_0^\pi d\varphi \int_0^{R_0} \frac{F_{att} F_{eff} R dR}{[R^2 - 2Rr \cos \varphi + r^2 + (d + l)^2]^{3/2}}. \quad (9)$$

Vidimo da se gorespomenuti petostruki integral svodi na četverostruki baš zbog prirode aksijalne simetrije. Jednačina (9) pokriva kako slučaj tačkastog izvora ($r_0 = 0, L = 0$), tako i izvora u obliku diska ($L = 0$).

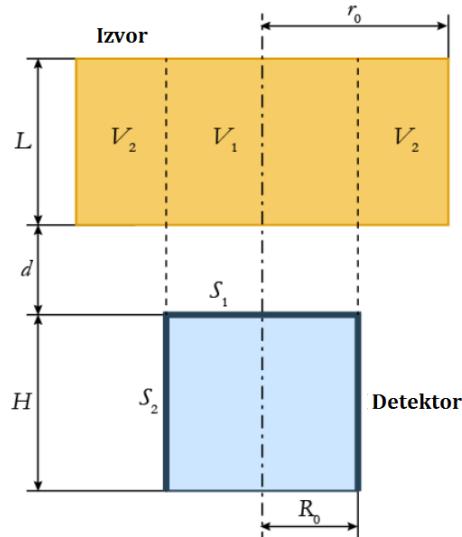


Slika 13: Konfiguracija izvora i detektora za slučaj $r_0 < R_0$

Što se tiče izvora sa poluprečnikom većim od onog od detektora ($r_0 > R_0$) sledeća jednačina važi

$$\begin{aligned} \bar{\Omega} &= \int_{V_1 S_1} d\bar{\Omega} + \int_{V_2(S_1+S_2)} d\bar{\Omega} \\ &= \frac{4}{r_0^2 L} \int_0^L (d+l) dl \int_0^{r_0} r dr \int_0^\pi d\varphi \int_0^{R_0} \frac{F_{att} F_{eff} R dR}{[R^2 - 2Rr \cos \varphi + r^2 + (d+l)^2]^{3/2}} \\ &\quad + \frac{4 R_0}{(r_0^2 - R_0^2) L} \int_0^L dl \int_{R_0}^{r_0} r dr \int_0^{\varphi_0} d\varphi \int_{-H}^0 \frac{F_{att} F_{eff} (r \cos \varphi - R_0) dh}{[R_0^2 - 2R_0 r \cos \varphi + r^2 + (d+l-h)^2]^{3/2}}, \end{aligned} \quad (10)$$

gde je $\varphi_0 = \varphi_0(r) = \arctan\left(\frac{\sqrt{r^2 - R_0^2}}{R_0}\right)$. [8]



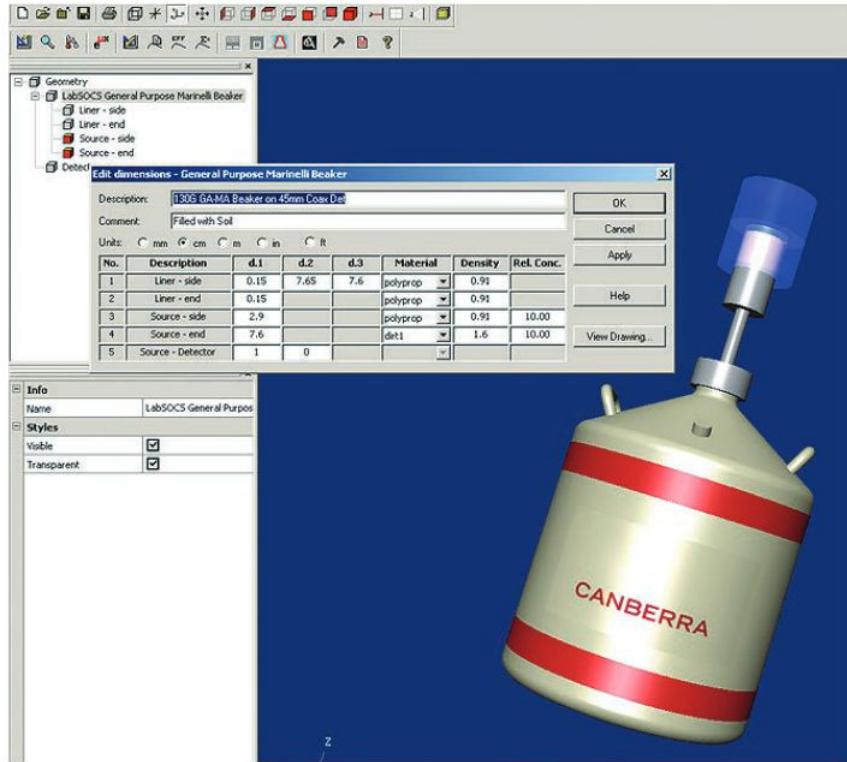
Slika 14: Konfiguracija izvora i detektora za slučaj $r_0 > R_0$

4.2 LabSOCS

LabSOCS (Laboratory Sourceless Object Calibration Software) je komercijalno dostupan softver za kalibraciju koji se koristi dobro poznatim osobinama fizike gama zraka. Kalkulacije efikasnosti su zasnovane na Monte Carlo simulacijama i fabričkim merenjima. Kombinacija karakteristika detektora sačinjenih pomoću *MCNP* (Monte Carlo N Particle) koda [9], matematičkih reprezentacija geometrijskih šablonata, kao i fizičkih parametara uzorka omogućavaju korisniku da sprovede kalibraciju efikasnosti za različite uzorke bez potrebe za radioaktivnim izvorima. Ovo omogućuje brzu i preciznu kalibraciju mnogih geometrija koje bi u suprotnom bile vrlo komplikovane (npr. nevodenii uzorci), bez trošenja vremena na dobavljanje referentnih uzoraka i vršenje simulacija pomoću njih, bez potrebe za poznavanjem radiohemije kako bi simulacija bila precizna, i bez velikih troškova za nabavku standarda [10].

U sam kod je implementirana baza podataka preseka reakcija za različite nuklide, koja je izvučena iz *2002 MCPLIB04* biblioteke, a koja predstavlja fotoatomsku bazu podataka za implementaciju u MCNP transportnom kodu.

Iako je karakterizacija detektora neophodna, postoji određen slobodan prostor za izmene. Naime, unapred izmodelovanim kućištima detektora moguće je menjati geometriju, apsorbere kao i materijale od kojih je uzorak sačinjen. Korisnički interfejs je prikazan na Slici 15.



Slika 15: Korisnički interfejs softvera LabSOCS

Nećemo se upuštati u sam proces funkcionisanja Monte Carlo simulacija i načine njihove implementacije s obzirom da je literatura na ovu temu neiscrpna, a pokrivanje svih stavki od značaja bi predstavljalo temu diplomskog rada za sebe. U bibliografiji su navedeni samo neki od značajnijih knjiga i radova [9, 11, 12].

5 Kalibracija efikasnosti

Kao rezultat merenja putem gama spektrometrije dobija se spektar pikova koji potiču od različitih radionuklida. Ovi pikovi su slika broja detektovanih fotona koji su potekli od određenih radionuklida i pomoću njih se može izračunati njihova aktivnost. Kako bi se ovakva metoda ispravno implementirala i kako bi se dobili rezultati visokog kvaliteta, od suštinske važnosti je dobro poznavanje efikasnosti detektora kako za različite energije, tako i za različite matrice i geometrije izvora. Računanja efikasnosti može teći na tri načina:

1. Direktnom metodom uz pomoć standarda sa poznatim aktivnostima radionuklida kada aproksimacije nisu potrebne,
2. Korišćenjem softvera za numeričke kalkulacije,
3. Korišćenjem i softvera i standarda u tzv. poluempirijskim kalkulacijama.

Ovaj proces se naziva kalibracija efikasnosti i ključni je deo svakog merenja pomoću detektora kod kojih se efikasnost menja sa promenom eksperimentalnih parametara [13].

Efikasnost bi trebalo da se računa za energijske intervale gde očekujemo da ćemo pronaći emitere gama zraka. Za one koji se mogu naći u prirodi i koji se očekuju u uzorcima iz životne sredine efikasnost bi trebalo da se zna za energije između 46.5 keV (^{210}Pb) i 1460.8 keV (^{40}K). Kako je ovaj energijski interval poprilično širok, određivanje efikasnosti direktnom metodom bi zahtevalo velik broj standarda što implicira visoke troškove, kao i iscrpljujuća i dugotrajna merenja [14]. Kako bi se pronašla alternativa, računanje efikasnosti je počelo da se vrši pomoću Monte Carlo simulacija koje se baziraju na proizvolnjom uzorkovanju podataka i dobijanju rezultata numeričkim putem. S druge strane ova tehnika ima svoje mane kada je količina informacija o karakteristikama detektora i sastavu matrice nedovoljna [15]. U ovom slučaju se postavljaju nesigurne aproksimacije čime se nepouzdanost rezultata povećava. Mnogobrojni radovi se bave ovom temom [16] - [22].

Velik broj softverskih paketa je posvećen sprovođenju računanja efikasnosti, neki od kojih su Angle [5, 6], LabSOCS [9], EFFTRAN [17], ETNA [23], MEFFTRAN [24], GESPECOR [25], GEANT4 [26]... Cilj ovog rada će biti u poređenju dva različita softvera, jednog za poluempirijsku (AngleTM), a drugog za matematičku (LabSOCSTM, *Mirion Technologies, Canberra*) kalibraciju efikasnosti. Simulacije pomoću Angle-a su sprovedene u Laboratoriji za nuklearnu fiziku na Univerzitetu u Novom Sadu, a analize pomoću LabSOCS-a u Laboratoriji za radioekologiju Instituta Ruđer Bošković u Zagrebu. Različite geometrije uzoraka, detektori i matrice su analizirane, a rezultati međusobno upoređeni.

LabSOCS i Angle koriste različite metode za kalibraciju efikasnosti. Angle se oslanja na postupak zvan transfer efikasnosti. Ova procedura uzima u obzir da se pomoću precizno određene efikasnosti detektora kalibracionim izvorom sa strogo definisanim sastavom i aktivnostima, može izračunati izmerena aktivnost nepoznatog uzorka. Jednostavna relacija izvedena iz modela predloženog od strane Moensa i dr. [27] koja se koristi za kalkulacije je data

$$\varepsilon_x = \varepsilon_{ref} \frac{\bar{\Omega}_x}{\bar{\Omega}_{ref}} , \quad (11)$$

gde ε predstavlja efikasnost, a $\bar{\Omega}$ prostorni ugao. Potpisano *ref* i *x* su simboli poznatih i nepoznatih veličina, respektivno. Efektivni prostorni uglovi kako referentnog tako i nepoznatog

uzorka moraju biti određeni. Efektivni prostorni ugao je vrednost koja zavisi od tri faktora (atenuacije gama zraka, geometrije i odgovora detektora) i usko je povezan sa efikasnošću detektora. Iz tog razloga ograničenja su dvostruka: (1) zavisna od korisnika - neprecizno opisivanje geometrije, i (2) zavisna od softvera - atenuacija gama fotona i odgovor detektora kao parametri koje softver automatski računa u zavisnosti od vrste detektora.

Proces računanja referentne efikasnosti je sledeći. Dobro definisani izvori sa poznatim aktivnostima se mere, te se nakon analize pikova, koji odgovaraju tačno određenim radionuklidima, efikasnost može izračunati pomoću sledeće formule

$$\varepsilon_{ref} = \frac{N}{t \cdot p_\gamma \cdot A}, \quad (12)$$

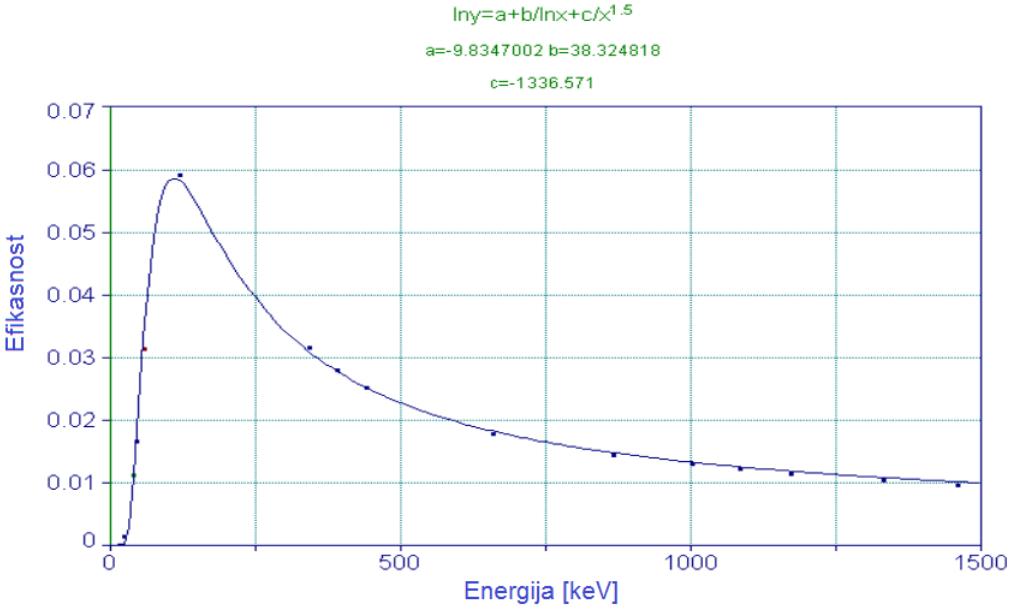
gde je N ukupan broj detektovanih gama fotona, t vreme sakupljana podataka, p_γ verovatnoća za emisiju fotona date energije, a A aktivnost radionuklida. Koincidentni faktor sumiranja³ nije uključen u razmatranje u ovom radu. Nakon računanja referentnih efikasnosti za određene radionuklide (energije) na red dolazi računanje efektivnih prostornih uglova pomoću željenog softvera kako za referentni tako i za nepoznati uzorak. Broj energija za koje se vrše kalkulacije se obično bira da bude oko 15, a one same, u zavisnosti od potreba datog zadatka, mogu biti razdvojene ili koracima jednake veličine ili mogu biti birane proizvoljno. Nakon što su kalkulacije izvršene i podaci prikupljeni, relacija (11) se koristi kako bi se odredile nepoznate vrednosti efikasnosti i kako bi se generisala kriva efikasnosti za različite kombinacije detektora, geometrija i sastava izvora. Fitovanje krive efikasnosti je vršeno pomoću softvera sa vrlo zanimljivim oso-binama, TableCurve (TC). Naime, po unosu x i y koordinate tačaka (u našem slučaju energije i efikasnosti) korisnik može da bira između 2000 različitih funkcija. Nakon selekcije željene funkcije, softver izbacuje njenu punu formu sa parametrima kao i sam izgled fita (Slika 16). Ukoliko je funkcija prekomplikovana da bi se sa njom dalje manipulisalo, korisnik može da bira novu funkciju koja gotovo jednako dobro opisuje tačke na grafiku ali je pogodnija za dalje unose i korišćenje.

LabSOCS se sa druge strane služi numeričkim metodama za rešavanje istog zadatka. Razlika bi bila u tome što u ovom slučaju za računanje efikasnosti nisu potrebni radioaktivni izvori jer se preseći reakcija za nuklide izvlače iz *2002 MCPLIB04* biblioteke, a efikasnost za određeni skup parametara se dobija direktno iz softvera. Broj energija i njihov raspon je integrisan unutar softvera i uglavnom broji između 10 i 15 energija u rasponu od 45 keV do 2 MeV. Proces je brži i manje naporan, ali isto tako manje transparentan za korisnika.

Geometrija detektora, uzorka, njihov međusobni položaj, kao i sadržaj izvora, moraju biti vrlo dobro definisani kako bi se kalkulacije precizno izvršile [28] - [31]. Osnovna razlika između dva programa u određivanju specifikacija je ta da su u LabSOCS-u karakteristike detektora fabrički definisane i ne mogu biti ni na koji način menjane, dok se u Angle-u karakteristike detektora unose takoreći ručno. Pri korišćenju LabSOCS-a ovo može predstavljati veliku prepreku ukoliko korisnik želi da testira efikasnost za skup parametara sa novim tipom detektora koji nije fabrički okarakterisan. U ovom slučaju, samo vrlo grube kalkulacije su moguće i to ukoliko je korisnik u mogućnosti da nađe detektor sa sličnim karakteristikama u bazi podataka.

Oba softvera uzimaju u obzir samoapsorpciju uzorka, a sastav, gustina i oblik merenih uzorka se nalaze među unetim parametrima [7]. Biblioteka predefinisanih materijala je sastavni deo oba softvera i može se proširivati novim unosima. Ovo se može uraditi bilo mešanjem

³Koincidentni faktor sumiranja - faktor koji opisuje slučaj kada dolazi do koincidentne detekcije dva gama fotona koji potiču od istog izvora. Razlog ovome je nedovoljno dobra vremenska rezolucija detektora.



Slika 16: Primer krive efikasnosti

postojećih materijala bilo definisanjem novih na osnovu njihovih gustina i hemijskih formula, ili procentualnim odnosom elementarnih sastojaka. Ovakav način definisanja materijala unosi značajnu nesigurnost u račun ukoliko sastav datog materijala nije precizno određen. Sličan problem može nastati i pri definisanju materijala od kojih su sačinjeni kućište i apsorberi koji se nalaze između uzorka i detektora.

Merne nesigurnosti za izračunate aktivnosti su uzete u obzir koristeći formulu

$$u_A = \sqrt{(\delta N) + (\delta \varepsilon)} , \quad (13)$$

gde δN predstavlja statističku nesigurnost broja događaja, a $\delta \varepsilon$ nesigurnost efikasnosti. Proširena nesigurnost se dobija množenjem standardne nesigurnosti faktorom pokrivanja koji je izabran da bude 2, što dalje obezbeđuje nivo pouzdanosti od oko 95%.

Kao što je navedeno u [10], matematička kalibracija efikasnosti kod LabSOCS-a daje rezultate sa tačnošću od 4-5% na energijama većim od 400 keV. Kako je većina energija koje se posmatraju u ovom radu veća od 400 keV, nesigurnost efikasnosti se uzima za 5% kod oba softvera.

6 Karakteristike detektora

Karakteristike HPGe detektora koji su korišćeni za merenje gama spektara su dati u Tabeli 2, zajedno sa svojim odgovarajućim skraćenicama koje će se koristiti u daljoj diskusiji.

Ono što je bilo značajno za tok ovog rada je činjenica da su softveri testirani na različitim konfiguracijama HPGe detektora (planarni, koaksijalni) i na detektorima sa različitim relativnim (svojstvenim) efikasnostima. Ovakva postavka nam je omogućila da mnogo efektivnije testiramo softvere i uvidimo njihove prednosti i mane. Sa druge strane, bitno je naglasiti da nije postojala mogućnost da se HPGe detektori iz Novog Sada testiraju na LabSOCS-u zbog njegovih mana koje su prodiskutovane u Odeljku 5.

U budućim istraživanjima ćemo pokušati da prenebregnemo ovaj nedostatak kako bismo mogli da dođemo do još pouzdanijih podataka o uspešnosti funkcionisanja kako Angle-a tako i LabSOCS-a.

Tabela 2: Karakteristike korišćenih HPGe detektora (NS - Novi Sad; ZG - Zagreb)

Naziv	Proizvođač	Tip	Relativna efikasnost [%]	Rezolucija [keV] na energiji [keV]
M_{NS}	Canberra	n-tipa koaksijalni sa zatvorenim krajem	22.3	1.1 na 122 2.0 na 1332
L_{NS}	Ortec	GMX sa proširenim dometom	32.0	1.9 na 662
K_{NS}	Canberra	koaksijalni sa standardnim elektrodama	35.0	1.2 na 122 2.0 na 1332
B_{NS}	Canberra	koaksijalni sa zatvorenim krajem i proširenim dometom	100.0	1.4 na 122 2.0 na 1332
B_{ZG}	Canberra	planarni širokoenergetski	34.0	1.9 na 1332
$B2_{ZG}$	Canberra	planarni širokoenergetski	48.0	2.0 na 1332
E_{ZG}	Canberra	koaksijalni sa zatvorenim krajem i proširenim dometom	38.0	0.8 na 122 1.7 na 1332

7 Uzorci i geometrije

Kako bi se u što većoj meri proverile mogućnosti korišćenih softvera, sprovedeno je testiranje različitih matrica u cilindričnim geometrijama. Karakteristike uzoraka i odgovarajućih geometrija su date u Tabeli 3, dok su fotografije uzoraka *carboprop-a*, đubriva (NPK) i monokalcijum fosfata prikazane na kraju rada u Prilogu (Slika 26). Uzorci zemljišta i vegetacije su uzeti iz MRAD-26 PT sheme (2017), a njihove fotografije se takođe nalaze u Prilogu [32].

Vrlo precizno poznavanje uzoraka je potrebno kako bi se izvodile bilo matematičke, bilo poluempijske kalibracije efikasnosti. Stoga je postojala potreba da se osim gustine (dominantan faktor) odredi i tačan hemijski sastav korišćenih materijala. Bez zvaničnog sertifikata od proizvođača ovaj postupak može da iziskuje određenu količinu sistematskih grešaka. Ispostavilo se da je definicija uzoraka u ovom radu bila zadovoljavajuća tako da se takve greške nisu pojavljivale.

Ono što preostaje za neka buduća istraživanja je da se utvrdi da li, i u koliko meri, postoji uticaj granulacije uzoraka na kvalitet kalkulacija, s obzirom da ne postoji način da se u softverima definiše ova specifična karakteristika.

Tabela 3: Karakteristike korišćenih uzoraka i geometrija

Matrica	Sastav	Granulacija	Oblik	Materijal	D [mm]	H [mm]
Zemljište	Grubo peskovito	Rel. fino	Cilindar	Plastika	62	49
Vegetacija	Biljni materijal	Glatko krupno	Cilindar	Plastika	62	49
NPK đubrivo za travnjake	Male kugle	D = 0.5 mm	Cilindar	Plastika	55	105
Carboprop	Keramičke kuglice	D = 0.5 mm	Cilindar	Plastika	61	70
Monokalcijum fosfat	Nepravilna zrnca	Rel. fino	Cilindar	Plastika	54	69

8 Rezultati i diskusija

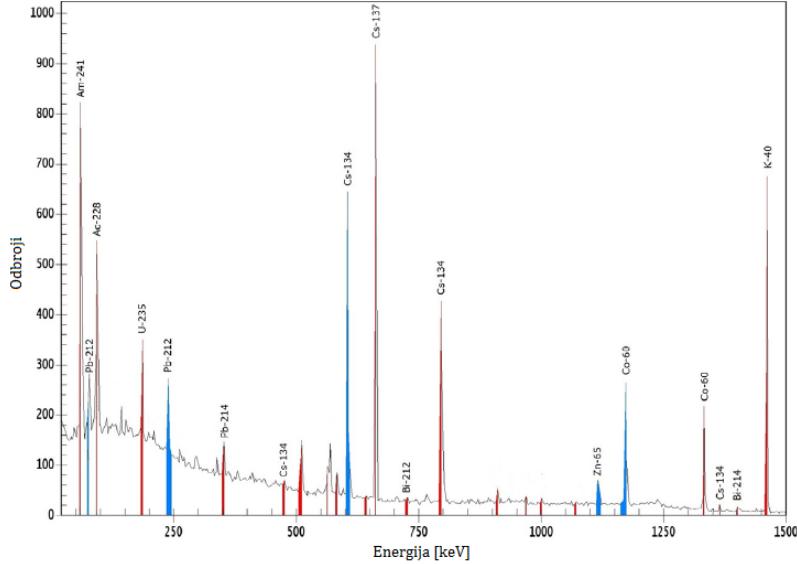
Koncentracije aktivnosti dobijene za različite energije i detektore su predstavljene u Tabelama 4-8 u Prilogu i Slikama 19-23. Kako bismo imali što bolju vizuelnu predstavu rezultata, tačke na Slikama 19-23 su za mali iznos energije razmagnute jedna u odnosu na drugu, u poređenju sa tačnim iznosima energija koji su dati u Tabelama 4-8. Osim koncentracije aktivnosti, u Tabelama 4-8 se nalazi i *z-score* (čitaj cet skor) koji je izračunat na sledeći način

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s}, \quad (14)$$

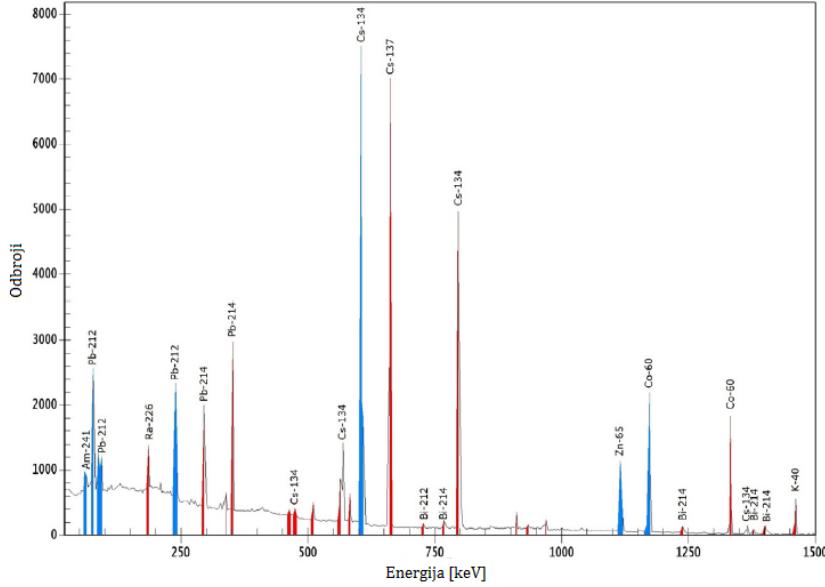
gde je \bar{x} srednja vrednost koncentracije aktivnosti za različite detektore na istim energijama, a s standardna devijacija. Ova vrednost je vrlo značajna u procenjivanju kvaliteta dobijenih rezultata. Naime, *z-score* označava koliko je standardnih devijacija izračunata vrednost udaljena od srednje vrednosti. U daljem toku rada je uzimano da je vrednost za *z-score* do ± 2 prihvatljiva. Analiziranjem rezultata u Tabelama 4-8 evidentno je da se svi *z-score*-ovi nalaze unutar ovih vrednosti.

Značajnija odstupanja od srednje vrednosti primećena su na niskim energijama kao što je i očekivano [33, 34], a kreću se čak do 35% sa znatnim brojem vrednosti unutar granice od 15%. Uprkos znatnim razlikama između rezultata dobijenih pomoću dva softvera, odstupanje svakog kako od srednje vrednosti, tako i od vrednosti iz MRAD-26 PT sheme je unutar prihvatljivih granica.

Kako je pri merenju uzorka zemljišta i vegetacije tipična statistička nesigurnost površine ispod foto-pika između 10 i 15%, ne postoji velika prednost u preciznijem kalibriranju efikasnosti HPGe detektora. Iako je, u suštini, moguće imati veću preciznost na samom foto-piku, merenja koja bi dovela do tog rezultata bi morala trajati mnogo duže, što nije standardna laboratorijska praksa. Uz navedene spekture prikazana su još dva spektra gama zračenja, jedan iz vegetacije i jedan iz zemljišta, kako bi se bolje predstavila statistička nesigurnost kod uzorka iz životne sredine (Slike 17 i 18).



Slika 17: Reprezentativni spektar gama zračenja iz uzorka vegetacije



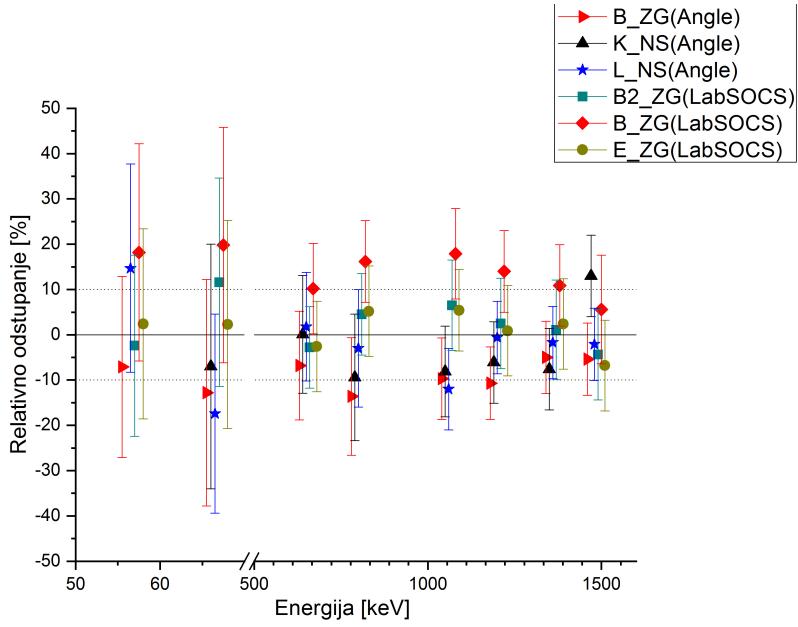
Slika 18: Reprezentativni spektar gama zračenja iz uzorka zemljišta

U toku obrađivanja rezultata imali smo na umu činjenicu da je absolutna kalibracija efikasnosti postignuta čak do preciznosti od 0.15-0.2% [35,36], međutim ovakva preciznost bi zahtevala mnogo komplikovaniju proceduru i opsežniju kombinaciju merenja i Monte Carlo simulacija, što u ovom radu nije bilo prekopotrebno.

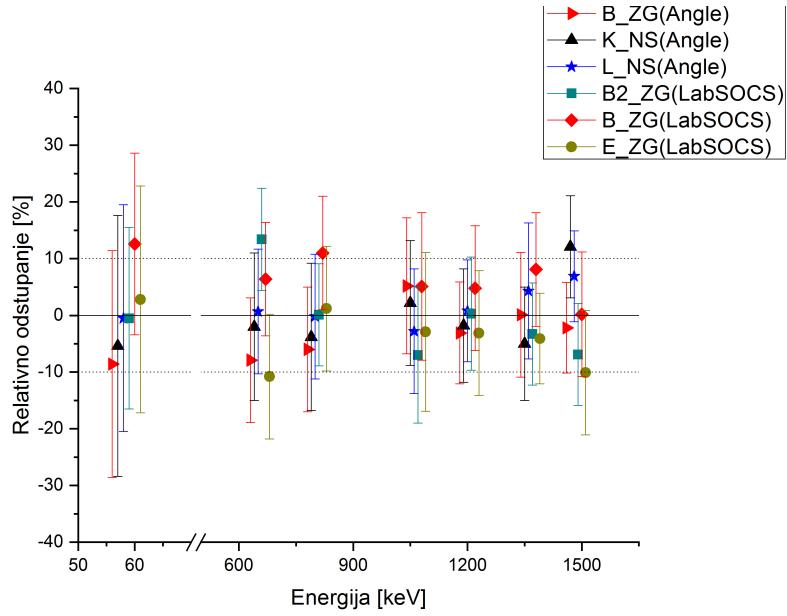
U sledećem delu rada ćemo se pozabaviti samim rezultatima i implikacijama koje iz njih sude.

U Tabeli 4 i na Slici 19, očigledno je da postoji zadovoljavajuće slaganje između dva softvera (unutar 10% relativne devijacije od srednje vrednosti), sa izuzetkom rezultata na niskim energijama. Za detektor B_{ZG} javlja se značajnije odstupanje od očekivane vrednosti kod oba softvera. Ovaj efekat se može pripisati mogućim nedostacima pri karakterizaciji detektora kao i unutar samih specifikacija datih od strane proizvođača, ili pak omaškama pri definisanju matrice, koja se može razlikovati od softvera do softvera. Trebalo bi naglasiti da rezultat na 59.6 keV za detektor K_{NS} nije prikazan na grafiku zbog prevelikog odstupanja koje je iznosilo čak 35%. Bilo kako bilo, rezultat je predstavljen u Tabeli 4 sa odgovarajućim z -score-om.

U Tabeli 5 i na Slici 20 opet se može pronaći dobro slaganje između dva softvera, ali ovog puta bez velikog odstupanja u slučaju B_{ZG} detektora. Upoređujući prethodne dve slike (Slika 19 i 20) može se zaključiti da je u našem slučaju precizno poznavanje sastava uzorka igralo ključnu ulogu u smanjivanju odstupanja. Čini se da su uzorci biljnog porekla predvidljiviji po pitanju svog sadržaja, što rezultuje u boljem slaganju između procena efikasnosti različitim softverima.



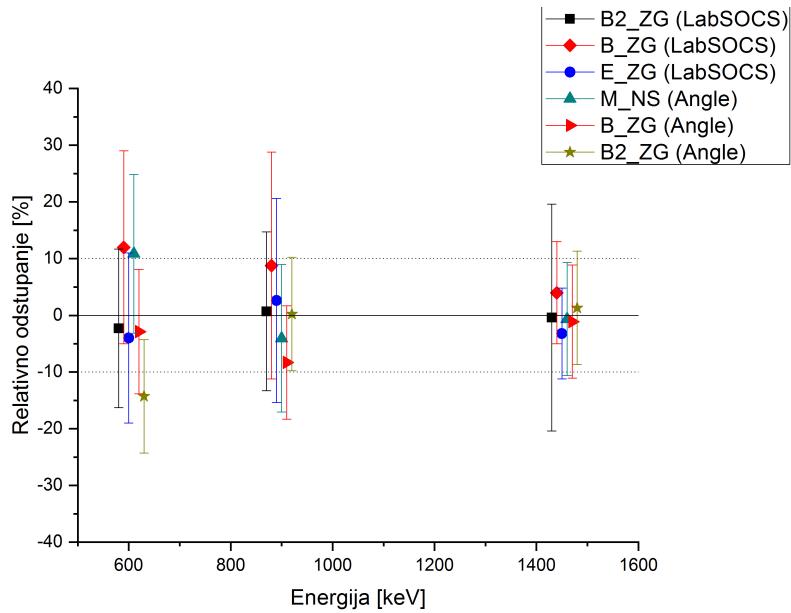
Slika 19: Zavisnost relativnog odstupanja od radioizotopa (energije) i detektora navedenih u Tabeli 4; tačke iste boje predstavljaju isti detektor



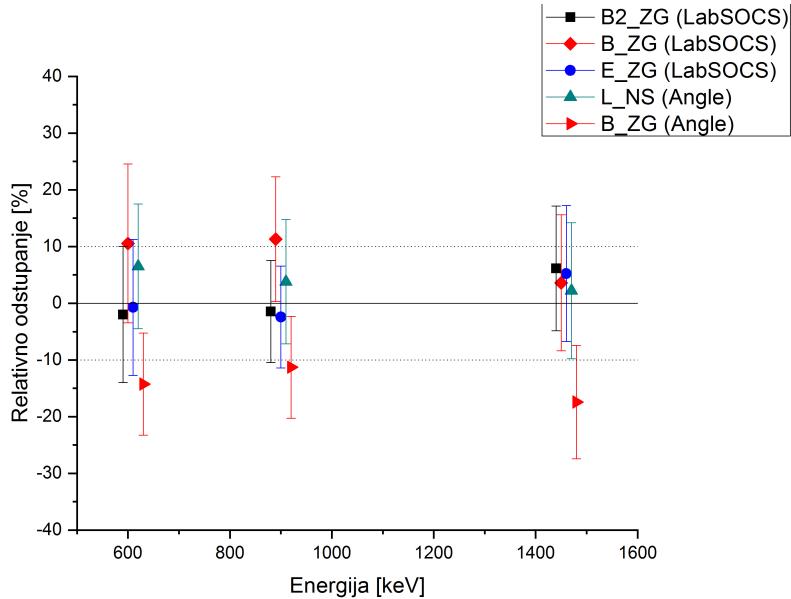
Slika 20: Zavisnost relativnog odstupanja od radioizotopa (energije) i detektora navedenih u Tabeli 5

Što se tiče uzoraka malo komplikovaniјeg sastava i granulacije situacija je sledeća. U slučaju NPK đubriva (Tabela 6, Slika 21), preciznost kalkulacija se pokazala kao vrlo dobra, tačnije većinom unutar 10%. Približno jednaka tačnost se može pripisati klasi parametara za uzorak *carboprop-a*, uz izuzetak *B_{ZG}* detektora kod kog se relativno odstupanje kreće od 10 do 15%. Vredi još jednom napomenuti da je najverovatniji razlog ovome taj da slabo poznavanje sastava uzorka u kombinaciji sa nedostajućom dokumentacijom potrebnom za pravilnu karakterizaciju

ovog detektora daje znatnija odstupanja.



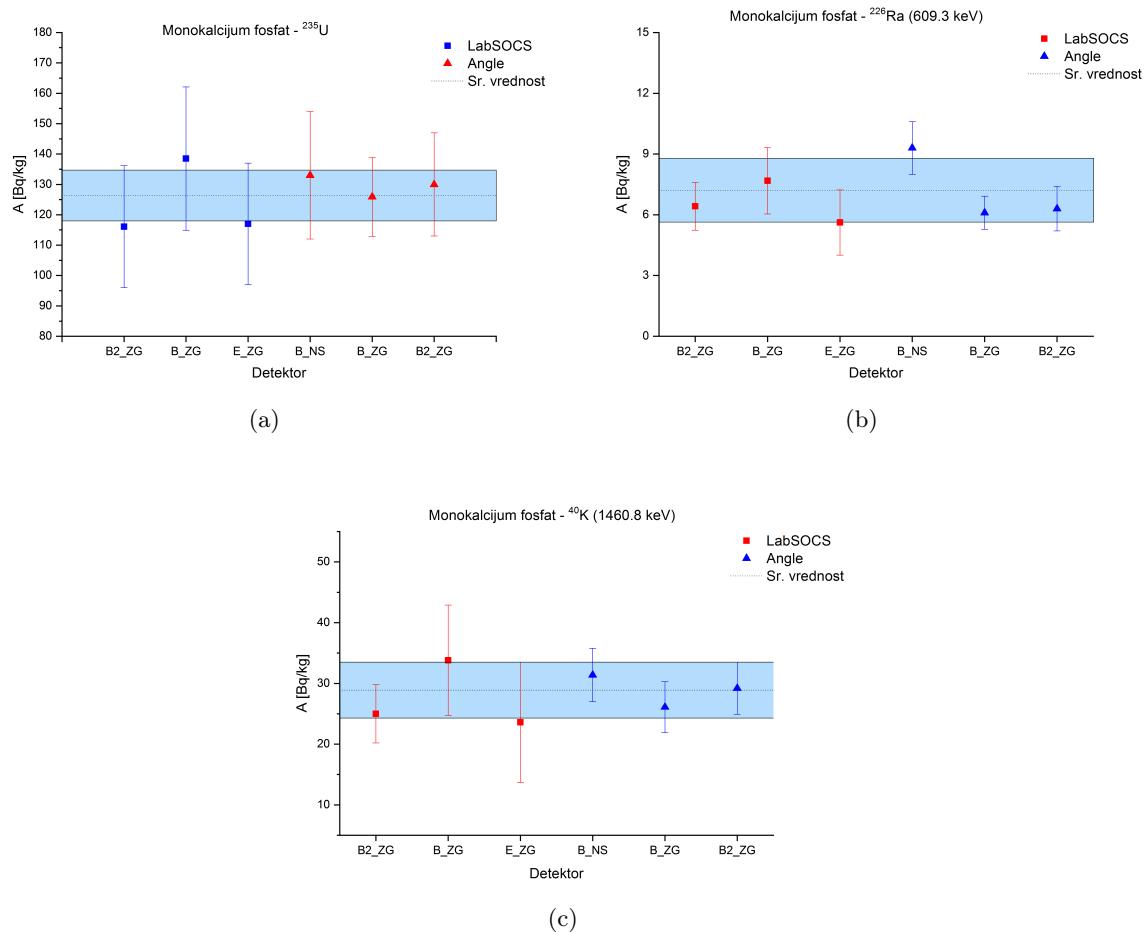
Slika 21: Zavisnost relativnog odstupanja od radioizotopa (energije) i detektora navedenih u Tabeli 6



Slika 22: Zavisnost relativnog odstupanja od radioizotopa (energije) i detektora navedenih u Tabeli 7

Sama činjenica da su dobijene vrednosti za relativno odstupanje, prikazane na Slikama 21 i 22, u granicama od 10% pokazuje da je uzimanje vrednosti od 5% za nesigurnost kod efikasnosti opravdano i da se mogu dobiti zadovoljavajući rezultati za gama spektrometrijska merenja uzorka iz životne sredine.

Za kraj, za rezultate u Tabeli 8 i na Slikama 23a, 23b i 23c korišćen je malo drugačiji pristup. Zbog izuzetno malih aktivnosti uzorka, a samim tim i većih grešaka i odstupanja od srednje vrednosti, da smo se zadržali na načinu prikazivanja od pre, ne bi bilo sasvim očigledno da su dobijeni rezultati zapravo u dobrom slaganju jedni sa drugima. U pitanju je uzorak monokalcijum fosfata i važno je naglasiti da je ovaj uzorak imao veće aktivnosti ^{235}U nego ^{235}Th , koji je bio praktično nemerljiv, te je, kako bi se pokazale mogućnosti ova dva softvera i na niskim energijama, odlučeno da se prikažu rezultati za uranijum. Međutim, iako smo videli da su ovakve kalkulacije moguće, ne treba se na njih oslanjati dok se ne sprovedu dalja istraživanja u ovoj energetskoj oblasti čime bi se iskristalisale kombinacije parametara koje bi bile najefikasnije.



Slika 23: Grafički prikaz koncentracije aktivnosti koristeći podatke iz Tabele 8; svetlo plavi pravougaonici predstavljaju relativno odstupanje od srednje vrednosti u jedinicama Bq kg^{-1} ; grafici su imenovani na sledeći način: (a) ^{235}U ; (b) ^{226}Ra ; (c) ^{40}K

9 Zaključak

Kroz ovaj rad smo mogli da vidimo da dva softvera namenjena kalibraciji efikasnosti (Angle i LabSOCS) daju uporedive i konzistentne rezultate za različite detektore, matrice i geometrije. U svakodnevnoj praksi jedne gama spektrometrijske laboratorije sprovodi se veliki broj merenja uzoraka raznih veličina, geometrija i sastava. Iz tog razloga je potreba za velikim brojem referentnih materijala različitih sastava (sadržaj radioizotopa, granulacija, matrica i geometrija) više nego očigledna, ali ovakve laboratorijske zalihe iziskuju velike troškove, a procedure koje ih implementiraju dugotrajna i iscrpljujuća mera. Jedan način kako bi se ovakvi problemi izbegli je korišćenje matematičkih ili poluempijskih kalkulacija, koje sa svoje strane nose određen broj ograničenja koja se moraju uzeti u obzir.

Kroz rad je ustanovljeno da su odstupanja reda 10% ili manje (sa izuzetkom nekolicine), dobijena uporedivanjem različitih kompleta parametara, prihvatljiva, čime se implicira da se kako Angle, tako i LabSOCS mogu uzimati u obzir prilikom kalibracije efikasnosti detektora gama zračenja. Takođe, nešto što nije eksplicitno diskutovano u radu je činjenica da su kalkulacije i za planarne i za koaksijalne detektore bile zadovoljavajuće.

Testiranjem ova dva softvera mogao se izvući jedan bitan zaključak, a to je da se mogu implementirati sa zadovoljavajućom preciznošću u svakodnevnoj laboratorijskoj praksi, što je prikazano u Tabelama 4-8 kroz vrednosti *z-score-a*.

Što se tiče ograničenja dva softvera situacija je sledeća. Kod LabSOCS-a je glavni problem nemogućnost korišćenja na novoinstaliranim detektorima s obzirom da je fabrička karakterizacija neophodna. Ovo zahteva slanje detektora u *CANBERRA*-u te samim tim njegovu neaktivnost u laboratoriji. Angle-ove mane sa druge strane su te što su za njegovo korišćenje prekopotrebni referentni materijali, koji sami po sebi mogu biti poprilično skupoceni, kao i nužnost plejade često nedostupnih ili nepoznatih karakteristika detekora.

Ovo istraživanje je takođe pokazalo da u niskoenergetskom delu spektra (< 500 keV) oba detektora daju predvidiva i očekivana odstupanja od srednje vrednosti, koja se uzgred poklapaju sa onima publikovanim od strane drugih autora [7, 13, 21, 33, 34]. Ovakvi rezultati zahtevaju temeljnije istraživanje pomoću drugih i drugačijih kodova (kao npr. GEANT4 [37] i EFFTRAN [21]) ili pak preciznijim definisanjem detektora i karakteristika uzoraka. Prvi pristup je već na pomolu u Laboratoriji za nuklearnu fiziku u Novom Sadu gde je započeto istraživanje sa *EFFTRAN*-om.

10 Prilog

Sadržaj priloga je numerisan i u njemu se nalaze sve one stavke na koje se pozivalo u pređašnjem tekstu, a za koje je bilo pogodnije da budu prikazane odvojeno od centralnog dela rada bilo zbog preglednosti bilo zbog redundantnosti ("pogledati u Prilogu...").



Slika 24: Sastav uzorka zemljišta



Slika 25: Sastav uzorka vegetacije; uzorak je pre merenja bio osušen i sprašen



(a)

(b)



(c)

Slika 26: Sastav uzoraka koji su korišćeni pored standardnih uzoraka zemljišta i vegetacije; spremnici u kojima se uzorci nalaze nisu isti kao oni koji su se stavljali u detektor; slike su imenovane na sledeći način: (a) NPK; (b) Carboprop; (c) Monokalcijum fosfat

Tabela 4: Koncentracija radioaktivnosti različitih radioizotopa u uzorku zemljišta

Detektor	A [Bq kg ⁻¹]							
	²⁴¹ Am (59.6 keV)	²³⁸ U (63.3 keV)	¹³⁷ Cs (661.7 keV)	¹³⁴ Cs (795.8 keV)	⁶⁵ Zn (1115.5 keV)	⁶⁰ Co (1173.2 keV)	⁶⁰ Co (1332.5 keV)	⁴⁰ K (1460.8 keV)
<i>B</i> _{ZG} (LabSOCS)	16.6 ± 3.4 z = -0.13	96 ± 20 z=0.83	289 ± 35 z=-0.48	348 ± 42 z=0.42	246 ± 20 z=0.55	177 ± 14 z=0.29	171 ± 14 z=0.17	365 ± 32 z=-0.56
<i>B</i> _{ZG} (LabSOCS)	20.1 ± 4.1 z = 1.03	103 ± 22 z=1.42	328 ± 39 z=1.76	387 ± 47 z=1.49	272 ± 22 z=1.52	197 ± 16 z=1.66	188 ± 15 z=1.67	403 ± 35 z=0.73
<i>E</i> _{ZG} (LabSOCS)	17.4 ± 3.6 z = 0.13	88 ± 20 z=0.17	290 ± 35 z=-0.45	350 ± 42 z=0.47	243 ± 20 z=0.46	175 ± 14 z=0.11	174 ± 14 z=0.37	355 ± 31 z=-0.88
<i>B</i> _{ZG} (Angle)	15.8 ± 3.4 z = -0.40	75 ± 21 z=-0.92	270 ± 27 z=-1.18	288 ± 29 z=-1.25	208 ± 22 z=-0.82	155 ± 17 z=-1.27	161 ± 18 z=-0.77	361 ± 39 z=-0.70
<i>K</i> _{NS} (Angle)	11.2 ± 3.3 z = -1.93	80 ± 23 z=-0.50	301 ± 30 z=0.03	302 ± 30 z=-0.86	212 ± 22 z=-0.69	163 ± 16 z=-0.73	156 ± 16 z=-1.17	431 ± 45 z=1.68
<i>L</i> _{NS} (Angle)	19.5 ± 3.9 z = 0.83	71 ± 19 z=-1.25	306 ± 31 z=0.32	323 ± 33 z=-0.28	203 ± 21 z=-1.02	172 ± 17 z=-0.07	166 ± 17 z=-0.27	373 ± 40 z=-0.27

Tabela 5: Koncentracija radioaktivnosti različitih radioizotopa u uzorku vegetacije

Detektor	A [Bq kg ⁻¹]						
	²⁴¹ Am (59.6 keV)	¹³⁷ Cs (661.7 keV)	¹³⁴ Cs (795.8 keV)	⁶⁵ Zn (1115.5 keV)	⁶⁰ Co (1173.2 keV)	⁶⁰ Co (1332.5 keV)	⁴⁰ K (1460.8 keV)
<i>B</i> _{ZG} (LabSOCS)	61 ± 12 z = -0.07	103 ± 10 z=1.49	62.4 ± 7.0 z=0.02	26.9 ± 3.5 z=-1.41	48.5 ± 4.2 z=0.73	46.5 ± 4.2 z=-0.63	(108 ± 9) · 10 z=-0.82
<i>B</i> _{ZG} (LabSOCS)	69 ± 14 z=1.93	96 ± 12 z=0.71	69.2 ± 7.8 z=1.88	30.4 ± 3.2 z=1.03	49.6 ± 4.8 z=1.40	52.1 ± 4.8 z=1.56	(117 ± 10) · 10 z=0.02
<i>E</i> _{ZG} (LabSOCS)	61 ± 12 z=-0.07	80.6 ± 9.8 z=-1.20	61.6 ± 6.8 z=-0.20	28.1 ± 3.2 z=-0.59	45.9 ± 4.0 z=-0.98	46.2 ± 4.0 z=-0.78	(105 ± 9) · 10 z=-1.21
<i>B</i> _{ZG} (Angle)	56 ± 10 z=-1.33	83.4 ± 8.5 z=-0.88	58.6 ± 5.8 z=-1.02	30.4 ± 3.6 z=1.05	45.9 ± 4.8 z=-0.98	48.2 ± 5.1 z=0.01	(114 ± 11) · 10 z=-0.27
<i>K</i> _{NS} (Angle)	58 ± 10 z=-0.82	88.6 ± 9.1 z=-0.22	60.0 ± 6.3 z=-0.65	29.6 ± 3.7 z=0.44	46.5 ± 5.0 z=-0.56	45.7 ± 5.0 z=-0.56	(130 ± 13) · 10 z=1.45
<i>L</i> _{NS} (Angle)	63 ± 12 z=0.43	91.2 ± 9.5 z=0.08	62.2 ± 6.7 z=-0.04	28.1 ± 4.1 z=-0.56	47.8 ± 5.3 z=0.24	50.2 ± 5.6 z=0.82	(124 ± 13) · 10 z=0.82

Tabela 6: Koncentracija radioaktivnosti različitih radioizotopa u uzorku đubriva (NPK)

Detektor	A [Bq kg ⁻¹]		
	²²⁶ Ra (609.3 keV)	²³² Th (911.2 keV)	⁴⁰ K (1460.8 keV)
<i>B</i> ₂ _{ZG} (LabSOCS)	17.1 ± 2.4 z = -0.22	21.2 ± 3.0 z=0.12	(156 ± 13) · 10 z=-0.16
<i>B</i> _{ZG} (LabSOCS)	19.6 ± 3.0 z = 1.22	22.9 ± 4.1 z=1.50	(163 ± 14) · 10 z=1.64
<i>E</i> _{ZG} (LabSOCS)	16.8 ± 2.7 z = -0.39	21.6 ± 3.7 z=0.45	(152 ± 13) · 10 z=-1.31
<i>M</i> _{NS} (Angle)	19.4 ± 2.4 z = 1.10	20.2 ± 2.7 z=-0.69	(156 ± 16) · 10 z=-0.27
<i>B</i> _{ZG} (Angle)	17.0 ± 1.9 z = -0.28	19.3 ± 2.1 z=-1.42	(155 ± 15) · 10 z=-0.45
<i>B</i> ₂ _{ZG} (Angle)	15.0 ± 1.7 z = -1.43	21.2 ± 2.2 z=-0.04	(159 ± 16) · 10 z=0.54

Tabela 7: Koncentracija radioaktivnosti različitih radioizotopa u uzorku Carboprop-a

Detektor	A [Bq kg ⁻¹]		
	²²⁶ Ra (609.3 keV)	²³² Th (911.2 keV)	⁴⁰ K (1460.8 keV)
<i>B</i> ₂ _{ZG} (LabSOCS)	109 ± 13 z = -0.21	150 ± 14 z=-0.17	91.4 ± 9.1 z=0.63
<i>B</i> _{ZG} (LabSOCS)	122 ± 15 z = 1.11	169 ± 16 z=1.35	89 ± 10 z=0.37
<i>E</i> _{ZG} (LabSOCS)	110 ± 13 z = -0.08	148 ± 14 z=-0.29	91 ± 10 z=0.53
<i>L</i> _{NS} (Angle)	118 ± 12 z = 0.68	158 ± 16 z=0.46	88 ± 10 z=0.22
<i>B</i> _{ZG} (Angle)	95.0 ± 9.5 z = -1.50	135 ± 14 z=-1.35	71.1 ± 8.4 z=-1.77

Tabela 8: Koncentracija radioaktivnosti različitih radioizotopa u uzorku monokalcijum fosfata

Detektor	A [Bq kg ⁻¹]		
	²³⁵ U (143.8 keV)	²²⁶ Ra (609.3 keV)	⁴⁰ K (1460.8 keV)
<i>B</i> ₂ _{ZG} (LabSOCS)	116 ± 20 z = -1.18	6.4 ± 1.2 z=-0.35	25.0 ± 4.8 z=-0.81
<i>B</i> _{ZG} (LabSOCS)	136 ± 24 z = 1.31	7.7 ± 1.6 z=0.57	33.8 ± 9.1 z=1.41
<i>E</i> _{ZG} (LabSOCS)	117 ± 20 z = -1.12	5.6 ± 1.6 z=-0.94	23.6 ± 9.9 z=-1.16
<i>B</i> _{NS} (Angle)	133 ± 21 z = 0.70	9.3 ± 1.3 z=1.73	31.4 ± 4.4 z=0.81
<i>B</i> _{ZG} (Angle)	126 ± 13 z = -0.08	6.1 ± 1.1 z=-0.59	26.1 ± 4.2 z=-0.53
<i>B</i> ₂ _{ZG} (Angle)	130 ± 17 z = 0.37	6.3 ± 0.82 z=-0.44	29.2 ± 4.3 z=0.25

Bibliografija

- [1] M. Krmar, *Uvod u nuklearnu fiziku*, Novi Sad: Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku, 2013.
- [2] G. F. Knoll, *Radiation detection and measurement*, 3rd Ed., John Wiley and Sons, 1999.
- [3] G. Gilmore, *Practical Gamma-Ray Spectrometry*, John Wiley and Sons, 2008.
- [4] Z. Mijatović, *Osnovi elektronike i digitalne elektronike*, Novi Sad: Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, 2000.
- [5] *Angle 4, Efficiency Calculations for Semiconductor and Scintillation Detectors*, User Guide, 2016.
- [6] S. Jovanović, A. Dlabac, N. Mihaljević, P. Vukotić, J. Radioanal. Nucl. Chem. 218 (1997).
- [7] K. Abbas, et al., Appl. Radiat. Isot. 56 (2002) 703.
- [8] S. Jovanović, A. Dlabac, N. Mihaljević, *IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 49*, Vienna, Austria, (2017) 141-158.
- [9] J. F. Briesmeister (Ed.), *MCNP A General Monte Carlo N-Particle Transport Code*, Report LA-12625-M, Ch.1, Los Alamos National Laboratory.
- [10] F. L. Bronson, J. Radioanal. Nucl. Chem. 255 (2003) 137.
- [11] C. P. Robert, G. Casella, *Monte Carlo Statistical Methods*, Springer, 2010.
- [12] N. T. Thomopoulos, *Essentials of Monte Carlo Simulation: Statistical Methods for Building Simulation Models*, Springer, 2013.
- [13] J. Krneta Nikolić, M. Rajačić, D. Todorović, et al., J. of Spectrosc. (2018) 5392658.
- [14] M. J. Daza, B. Quintana, M. Garcia Tavalera, F. Fernandez, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 470 (2010) 520.
- [15] G. Haase, D. Tait, A. Wiechen, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 361 (1995) 240.
- [16] M. C. Lepy, et al., Appl. Radiat. Isot. 55 (2001) 493.
- [17] T. Vidmar, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 550 (2005) 603.
- [18] D. F. Palacios, et al., Radiat. Meas. 43 (2008) 77.
- [19] T. Vidmar, N. Celik, N. Cornejo Diaz, et al., Appl. Radiat. Isot. 68 (2010) 355.
- [20] M. B. Challan, Appl. Radiat. Isot. 82 (2013) 166.
- [21] J. Nikolić, T. Vidmar, D. Joković, M. Rajačić, D. Todorović, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 763 (2014) 347.
- [22] E. E. Belgin, G. A. Aycik, Radiat. Meas. 73 (2015) 36.
- [23] M. C. Lepy, M. M. Be, F. Piton, *Note Technique LNHB 01/09/A*, 2004.
- [24] J. Krneta Nikolić, T. Vidmar, et al., J. Environ. Radioact. 165 (2016) 191-196.

- [25] O. Sima, et al., J. Radioanal. Nucl. Chem. 248 (2001) 359-364.
- [26] S. Agostinelli, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 506.
- [27] L. Moens, J. De Donder, X. Lin, et al., Nucl. Instr. Methods Phys. Res. 187 (1981) 451.
- [28] M. Taskaeva, et al., Appl. Radiat. Isot. 47 (1996) 981.
- [29] J. Gasparro, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 594 (2008) 196.
- [30] T. Vidmar, J. Gasparro, Appl. Radiat. Isot. 67 (2009) 2057.
- [31] S. J. Bell, et al., Appl. Radiat. Isot. 70 (2012) 2737.
- [32] *T. N. I. Evaluation Report, MRAD-26 Study*, Customer Number R460987, 2009.
- [33] S. Kaminski, A. Jakobi, C. Wilhelm, Appl. Radiat. Isot 94 (2014) 306.
- [34] I. Tucaković, D. Barišić, Z. Grahek, Appl. Radiat. Isot. 126 (2017) 162.
- [35] R. G. Helmer, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res A 511 (2003) 360.
- [36] B. Blank, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 776 (2015) 34.
- [37] M. A. Schumaker, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 570 (2007) 437.

Biografija studenta



Goran Stanić je rođen 2. marta 1995. godine u Novom Sadu. Završio je Osnovnu školu "Jovan Popović" i Gimnaziju "Jovan Jovanović Zmaj" u Novom Sadu gde je bio član gimnazijskog hora koji je osvajao državne i međunarodne nagrade. Osnovne akademske studije fizike - smer medicinska fizika, upisuje 2014. godine na Prirodno-matematičkom fakultetu, Univerziteta u Novom Sadu. U toku studija proveo je jedan semestar u Hajdelbergu (Nemačka) u sklopu programa razmene studenata ERASMUS+. Prisustvovao je mnogobrojnim konferencijama iz oblasti medicinske dijagnostike i terapije, zaštite životne sredine i popularizacije i razvoja nauke. Osim toga, 2018. godine je bio student dvomesečne letnje škole u Darmštatu (Nemačka) u sklopu GSI instituta za nuklearnu i čestičnu fiziku. Master studije planira da nastavi u Nemačkoj.

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: Diplomski rad

VR

Autor: Goran Stanić

AU

Mentor: prof. dr Jovana Nikolov

MN

Naslov rada: Kalibracija efikasnosti HPGe detektora pomoću softvera Angle i LabSOCS

NR

Jezik publikacije: srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda: srpski/engleski

JI

Zemlja publikovanja: Republika Srbija

ZP

Uže geografsko područje: Vojvodina

UGP

Godina: 2019.

GO

Izdavač: Autorski reprint

IZ

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

MA

Fizički opis rada: 10 poglavlja/ 36 strana/ 37 referenci/ 26 slika

FO

Naučna oblast: Fizika

NO

Naučna disciplina: Nuklearna fizika

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči: Kalibracija efikasnosti, Angle, LabSOCS, Gama spektrometrija

PO

UDK

Čuva se: Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

ČU

Važna napomena: Rezultati diplomskog rada su iskorišćeni za publikaciju u časopisu *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 920 (2019) 81-87* pod nazivom *Angle vs. Lab-SOCS for HPGe efficiency calibration* (doi.org/10.1016/j.nima.2018.12.059).

VN

Izvod: Kvantitativno određivanje radionuklida pomoću gama spektrometrije zahteva veliku preciznost određivanja efikasnosti detekcije. Postoji veliki broj različitih softvera koji se bave ovim aspektom. Cilj ovog rada je bio da se uporede različite metode i softveri koji se koriste za modelovanje kalibracije efikasnosti i analize iste. Iz tog razloga, isti uzorci vegetacije i zemljišta poznatih aktivnosti su mereni koristeći HPGe detektore u dve laboratorije koje koriste različite softvere za kalibraciju efikasnosti i analize. S jedne strane LabSOCS, koji se zasniva na čisto matematičkim kalkulacijama, a sa druge Angle, koji zastupa poluempirijski pristup. Kodovi su testirani i na uzorcima sa nepoznatim referentnim vrednostima (različite geometrije i matrice).

IZ

Datum prihvatanja teme od NN veća: Mart, 2019.

DP

Datum odbrane: 08.04.2019.

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik: prof. dr Dušan Mrđa, redovni profesor

član: prof. dr Jovana Nikolov, vanredni profesor

član: prof. dr Dušan Zorica, vanredni 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: Goran Stanić

AU

Mentor: Prof. Dr. Jovana Nikolov

MN

Title: Angle vs. LabSOCS for HPGe efficiency calibration

TI

Language of text: Serbian (Latin script)

LT

Language of abstract: English

LA

Country of publication: Republic of Serbia

CP

Locality of publication: Vojvodina

LP

Publication year: 2019.

PY

Publisher: Author's reprint

PU

Publication place: Faculty of Sciences, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

PP

Physical description: 10 chapters/ 36 pages/ 37 references/ 26 pictures

PD

Scientific field: Physics

SF

Scientific discipline: Nuclear physics

SD

Subject/Key words: Efficiency calibration, Angle, LabSOCS, gamma spectrometry

SKW

UDK

Holding data: Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

HD

Note: Results of this final paper have been used for a publication of a paper in a scientific journal *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A* 920 (2019) 81-87 under the title *Angle vs. LabSOCS for HPGe efficiency calibration* (doi.org/10.1016/j.nima.2018.12.059).

N

Abstract: The quantitative determination of radionuclides by gamma ray spectrometry requires a high accuracy of detection efficiency determination. Different software codes for efficiency determination are available. The aim of this work was to compare different methods and software used for efficiency calibration modelling and analyses. For that purpose, same samples of vegetation and soil of known activities were measured using HPGe detectors in two laboratories which are employing different software for mathematical efficiency calibrations and analyses, LabSOCS which is based on purely mathematical calculations and Angle which uses a semi-empirical approach. The codes were also tested on samples with unknown reference values (different geometries and matrices).

AB

Accepted by the Scientific Board: March, 2019

ASB

Defended on: 8th of April, 2019

DO

Thesis defend board:

DB

President: Prof. Dr. Dušan Mrđa, Full professor

Member: Prof. Dr. Jovana Nikolov, Associate professor

Member: Prof. Dr. Dušan Zorica, Associate professor