

Pozicijski osjetljivi detektori gama zračenja

Kožuljević, Ana Marija

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:699391>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-01**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Ana-Marija Kožuljević

POZICIJSKI OSJETLJIVI DETEKTORI GAMA
ZRAČENJA

Diplomski rad

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
FIZIKA; SMJER ISTRAŽIVAČKI

Ana-Marija Kožuljević

Diplomski rad

**Pozicijski osjetljivi detektori gama
zračenja**

Voditelj diplomskog rada: izvanredni profesor, Mihael Makek

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2019.

Zahvaljujem izv. prof. Mihaelu Makeku na njegovoj pomoći, strpljenju i trudu na izradi ovog rada. Hvala Vam što ste bili odličan mentor i na svom prenesenom znanju.

Osobito se zahvaljujem podršci moje obitelji tijekom studija. Mama, tata i Barbara, hvala što ste vjerovali u mene i gurali me u pravom smjeru.

Šimune, hvala na razumijevanju i potpori. Hvala ti na svim posjetima tijekom rokova, ohrabrivanju i zagrljajima.

Također, zahvaljujem svim prijateljima, rodbini i znancima koji su prošli sa mnom ovo putovanje.

Sažetak

U ovom radu su ispitane energijske rezolucije scintilacijskih detektora u raznim geometrijskim konfiguracijama i s nekoliko optičkih veziva, te su rezultati korigirani s obzirom na nelinearni odgovor detektora. Konstruirani su detektori od kristala GaGG:Ce i silicijskih fotomultiplikatora, te u konfiguraciji sa svjetlovodom, a mjerenja su provedena na nekoliko vrijednosti napona. Također, napravljena su mjerenja na nekoliko vrijednosti napona s kristalima CsI:Tl, pomoću kojih su se testirala svojstva kristala s različitim izolacijskim sredstvima te optičkim vezivima. Napravljena je usporedba opaženih vrijednosti energijskih rezolucija detektora ove dvije vrste kristala za gama zračenje od 511 keV. Ovakvi detektori, mogu se posložiti u matrice i čine temelj svih pozicijskih osjetljivih detektora gama zračenja u medicinskom oslikavanju, radioekologiji ili nuklearnoj sigurnosti.

Ključne riječi: scintilacijski detektori, scintilacijski kristali, silicijski fotomultiplikator

Position sensitive gamma ray detectors

Abstract

In this study, energy resolutions of scintillating crystals were tested in different geometric configurations and with several optical connectors. The results were corrected for the influence of the nonlinear response of the silicon photomultiplier. Constructed detectors consist from GaGG:Ce crystals and silicon photomultipliers, and in combinations of GaGG:Ce crystals and a light guide. Measurements were made on several different values of voltage. Detectors were also constructed with CsI:Tl crystals, which were submitted to measurements on different values of voltages. These detectors were tested with different isolating materials and optical connectors. Energy resolutions of the detectors, derived from the measurements of gamma radiation at the energy of 511 keV, are compared. These detectors can make a matrix configuration, and in this configuration they are essential in position sensitive gamma ray detectors in medical imaging, radio-ecology and nuclear safety.

Keywords: scintillation detectors, scintillation crystals, silicon photomultiplier

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Teorijska podloga	3
2.1	Radioaktivni raspadi	3
2.1.1	Nuklearni beta raspadi	4
2.1.2	Gama zračenje	4
2.2	Interakcija gama zračenja s materijom	5
2.2.1	Fotoelektrični efekt	6
2.2.2	Comptonско raspršenje	7
2.2.3	Tvorba parova	8
2.3	Scintilacijski kristali	9
2.3.1	Mehanizam fluoroscencije u anorganskim scintilatorima	9
2.3.2	Karakteristike scintilacijskih materijala	11
2.3.3	GaGG:Ce	11
2.3.4	CsI:Tl	11
2.4	Primjene scintilacijskih detektora	13
2.4.1	Pozitronska emisijska tomografija	14
3	Eksperimentalni postav	16
3.1	Postav za mjerenja GaGG:Ce kristala	16
3.1.1	Priprema pojedinačnih kristala	16
3.1.2	Postav za mjerenja pojedinačnih kristala	16
3.1.3	Priprema sendvič-konfiguracije GaGG:Ce-svjetlovod-GaGG:Ce	17
3.1.4	Postav za mjerenja pojedinačnih sendvič-konfiguracija GaGG:Ce-svjetlovod-GaGG:Ce	18
3.2	Postav za mjerenja CsI:Tl kristala	20
3.2.1	Ispitivanje pojedinačnih kristala	20
3.2.2	Postav za mjerenja pojedinačnih kristala	20
3.3	Silicijski fotomultiplikatori	21
3.3.1	Nelinearnost odaziva i kalibracijska krivulja	22
3.4	Kontrola temperature okoline tijekom eksperimenta	23

4	Rezultati	24
4.1	Obrada rezultata mjerenja	24
4.1.1	Relativna energijska rezolucija detektora	24
4.2	GaGG:Ce	26
4.2.1	Ispitivanje pojedinačnih kristala	26
4.2.2	Ispitivanje jednog sendviča GaGG:Ce-svjetlovod-GaGG:Ce . . .	28
4.3	CsI:Tl	32
4.3.1	Rezultati mjerenja pojedinačnih kristala	32
4.3.2	Usporedba rezultata dobivenih mjerenjima s kristalima CsI:Tl .	36
5	Zaključak	38
	Dodaci	40
A	Tablice sa srednjim vrijednostima položaja fotovrhova i pripadne standardne devijacije prije i nakon kalibracije i korekcije nelinearnosti odziva fotomultiplikatora	40
	Literatura	44

1 Uvod

Opažanje gama zračenja od širokog je interesa u istraživanjima u suvremenoj fizici, ali i fizikalnim primjenama poput biomedicinskog oslikavanja ili opažanja povezana su nuklearnom sigurnošću. Razvoj silicijskih fotomultiplikatora i novih scintilacijskih materijala omogućio je posljednjih godina značajan napredak uređaja za opažanje gama zračenja, što se očituje kroz njihovu poboljšanu razlučivost energija i kvalitetu slika postignutih ovim uređajima.

Jedna od važnih primjena nuklearne fizike je biomedicinsko oslikavanje gama kamerama, SPECT-om (*Single Photon Emission Computed Tomography*), kao i PET-om (*Positron Emission Tomography*). Pozitronska emisijska tomografija (PET) je medicinska tehnika koja za detekciju zračenja koristi segmentirane, pozicijski osjetljive, scintilacijske detektore. Ti detektori se sastoje od scintilacijskih kristala, koji detekcijom anihilacijskog zračenja iz pacijenta rekonstruiraju 3D sliku fizioloških i biokemijskih procesa u tijelu.

Scintilacijski kristali koji se koriste u ovim tehnologijama s razvojem novih materijala postaju sve bolji, te se u ovom radu istražuju svojstva detektora s relativno novim kristalima GaGG:Ce i uspoređuju s rezultatima dobivenim za kristale CsI:Tl. Kristali su proučavani kroz različite geometrijske postavbe, s raznim optičkim sredstvima kao vezivom s fotodetektorom, da bi se provjerile njihove performanse za potrebe pozicijski osjetljivih detektora.

U ovom radu, po poglavljima su obrađene sljedeće teme:

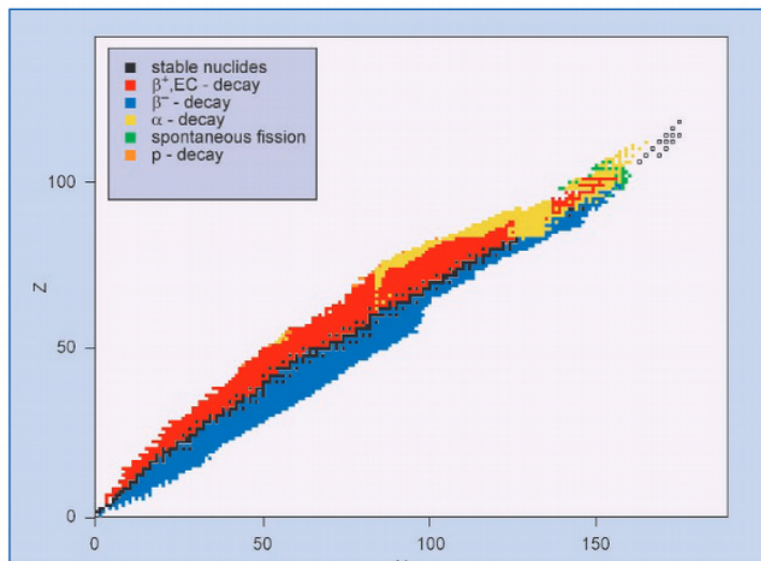
- U drugom poglavlju se nalazi teorijska podloga fizikalnih procesa koji su relevantni za ovo istraživanje, te opis principa rada pozitronske emisijske tomografije.
- U trećem poglavlju se nalaze opisi konfiguracija i provedbe napravljenih eksperimenata, te su opisani utjecaj nelinearnog odziva scintilacijskog fotomultiplikatora s obzirom na energiju upadnog zračenja i korištena kalibracijska krivulja za dobivene energijske spektre.
- Rezultati mjerenja energijskih rezolucija kristala u raznim konfiguracijama se nalaze u četvrtom poglavlju.

- U petom poglavlju se nalaze konačni zaključci doneseni na temelju rezultata eksperimenta, te su predložene mogućnosti za buduća istraživanja.

2 Teorijska podloga

2.1 Radioaktivni raspadi

Spontani procesi u kojima nestabilna jezgra prelazi iz osnovnog ili pobuđenog stanja u stanje koje se nalazi u blizini, ili u samoj Dolini stabilnosti nazivaju se radioaktivni raspadi. Karta nuklearnih izotopa se nalazi na slici 2.1 Originalna jezgra koja se raspada se naziva jezgra roditelj, a jezgra nastala raspadom jezgra kćer.



Slika 2.1: Karta nuklearnih izotopa. Stabilni izotopi elemenata su označeni crnom bojom (Dolina stabilnosti). Preuzeto iz [4].

Radioaktivni raspadi se karakteriziraju prema produktima reakcije koje jezgra roditelj emitira, a produkti mogu biti α , β i γ čestice.

Radioaktivni raspad je stohastički proces. Raspad jedne jezgre u uzorku potpuno je nezavisan o drugim jezgrama, ali broj jezgara roditelja je proporcionalan broju raspada. Broj radioaktivnih jezgara u uzorku N opada s vremenom t prema eksponencijalnom zakonu:

$$N(t) = N(0)e^{-Wt}, \quad (2.1)$$

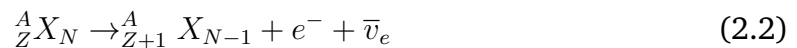
gdje $N(t)$ predstavlja broj jezgri u uzorku u trenutku t , $N(0)$ je broj jezgara u uzorku u trenutku $t = 0$, a W predstavlja konstantu raspada. Konstanta raspada W je vjerojatnost raspada za pojedinu vrstu jezgre, a ovisi o prirodi procesa koji uzrokuje raspad, kao i svojstvima početnog i konačnog stanja jezgri sudionika.

Procesi koji su bitni za ovaj rad su nuklearni beta raspad i gama zračenje.

2.1.1 Nuklearni beta raspadi

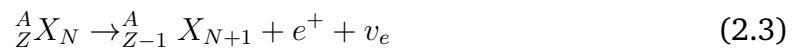
Beta (β) raspad je slabi proces u jezgrama koje imaju višak jedne vrste nukleona. Prilikom procesa mijenja se atomski broj jezgre Z za 1, dok maseni broj A ostaje jednak. Postoje dvije vrste beta raspada neke jezgre X :

β^- raspad:



Tijekom β^- raspada jezgra s viškom neutrona emitira elektron e^- i elektronski antineutrino $\bar{\nu}_e$ prilikom konverzije neutrona u proton. Tako nastaje nova jezgra kćer koja ima atomski broj Z za jedan veći od jezgre roditelja.

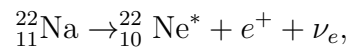
β^+ raspad:



U β^+ raspadu jezgra s viškom protona pretvara proton u neutron i kao produkte procesa emitira pozitron e^+ i elektronski neutrino $\bar{\nu}_e$. Nastala jezgra kćer ima atomski broj Z za jedan manji od jezgre roditelja.

2.1.2 Gama zračenje

Prilikom β -raspada, nastala jezgra kćer često je u pobuđenom stanju. Ova pobuđena stanja se raspadaju prema osnovnom stanju emisijom gama (γ) zračenja/paar. Primjer takve reakcije je β^+ raspad ${}^{22}_{11}\text{Na}$:



prilikom kojeg nastaje pobuđena jezgra kćer ${}^{22}_{10}\text{Ne}^*$. Nuklearnim deekcitacijama jezgra kćer emitira γ zraku energije $E_\gamma = 1274.5$ keV i prelazi u osnovno stanje.

Druga dva produkta β^+ raspada ${}^{22}_{11}\text{Na}$ su pozitron e^+ i elektronski neutrino ν_e . Pozitron se u materijalu anihilira s elektronom, te pri tom nastanu dvije γ zrake energije $E_\gamma = 511$ keV.

Elektron-pozitron anihilacija

Pozitron e^+ je antičestica elektronu e^- . Njihovim vezanjem može nastati egzotični atom pozitronij (Ps), koji je sličan atomu vodika (H). Pozitronij u osnovnom stanju ima orbitalni angularni moment $l = 0$. Kako elektron i pozitron imaju spin $\frac{1}{2}$, ukupni spin će ovisiti o međusobnoj orijentaciji spinova pozitrona i elektrona. Zato pozitronij može u osnovnom stanju imati ukupni angularni moment $J = 0$ ili 1.

Singletno osnovno stanje nastaje kad pozitronski i elektronski spin imaju suprotne smjerove, pa su ukupni spin S i projekcija spina S_z jednaki 0:

$$|S = 0, S_z = 0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle).$$

Pozitronij u ovom stanju naziva se para-pozitronij (p-Ps).

Tripletno osnovno stanje nastaje kad pozitronski i elektronski spin imaju jednake smjerove. Ukupni spin S je u tom slučaju jednak 1, a projekcija spina S_z može poprimiti vrijednosti $-1, 0$ i 1 :

$$|S = 1, S_z = 1\rangle = |\uparrow\rangle|\uparrow\rangle,$$

$$|S = 1, S_z = 0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle + |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle),$$

$$|S = 1, S_z = -1\rangle = |\downarrow\rangle|\downarrow\rangle.$$

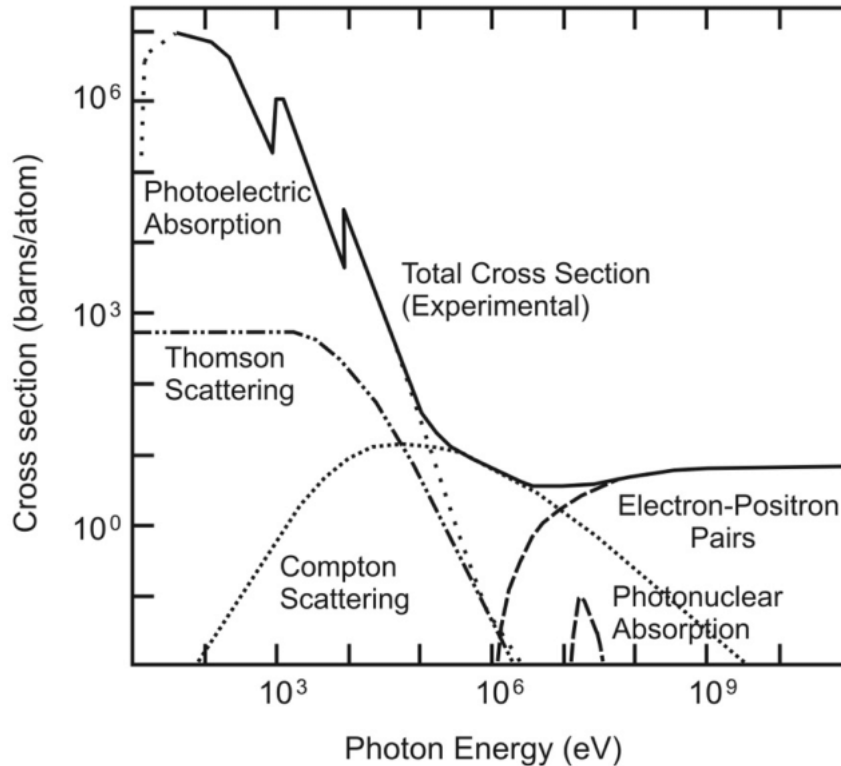
Ovakav pozitronij se naziva orto-pozitronij (o-Ps).

Kako je raspad pozitronija elektromagnetski proces, produkt anihilacije su fotoni. Orto-pozitronij se raspada na neparan broj fotona, dok raspadom para-pozitronija najčešće nastaju dva fotona. Ako se taj raspad promatra u sustavu mirovanja pozitronija, zbog zakona očuvanja količine gibanja fotoni nastali raspadom para-pozitronija moraju se gibati u suprotnim smjerovima s energijama jednakim elektronskoj masi (~ 0.51 keV), umanjenoj za energiju vezanja elektrona i pozitrona (6.8 keV). [13]

2.2 Interakcija gama zračenja s materijom

Za ovaj rad bitni fizikalni procesi preko kojih gama zračenje interagira s materijom su fotoelektrični efekt, Comptonско raspršenje i tvorba parova e^+e^- .

Relativna važnost ovih procesa ovisi i o energiji fotona ($E_\gamma = h\nu$) i atomskom broju Z apsorbirajućeg medija. Na nižim fotonskim energijama, dominira fotoelektrični efekt, na srednjim energijama Comptonov efekt, a na visokim energijama najvjerojatnija je tvorba parova. [1]. Na slici 2.2 može se vidjeti kako se mijenja udarni presjek svakog od procesa interakcije s obzirom na energiju fotona.



Slika 2.2: Udarni presjek procesa u materiji s obzirom na energiju upadnog fotona. [9]

2.2.1 Fotoelektrični efekt

Fotoelektrični efekt (fotoefekt) podrazumijeva emisiju elektrona iz materijala izloženog elektromagnetskom zračenju. Da bi se opazio fotoelektrični efekt, upadni foton mora imati dovoljno visoku energiju da izbije elektron vezan u atomu. Ako je energija vezanja elektrona za atom E_B , elektron će nakon sudara imati energiju E_e :

$$E_e = h\nu - E_B,$$

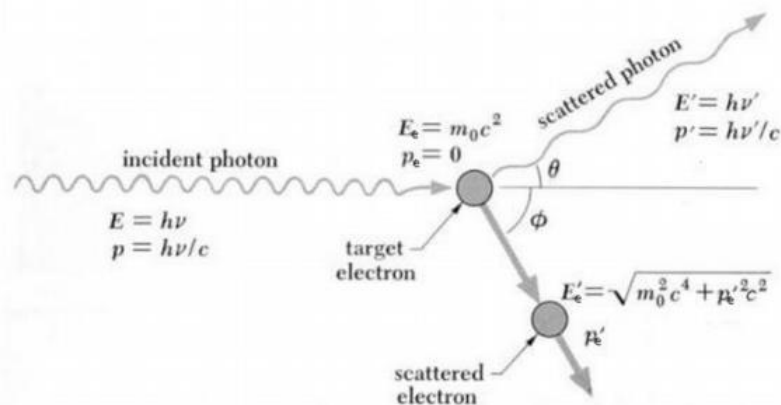
dakle, imat će energiju fotona koji ga je pogodio $h\nu$ umanjenu za energiju vezanja. Ako je energija vezanja elektrona veća od energije upadnog fotona, fotoefekt se neće dogoditi.

Kad se u osjetljivom dijelu detektora dogodi fotoelektrična apsorpcija, fotoelektron brzo preda energiju materijalu i nastaje signal čija se visina detektira. Elektron koji je oslobođen fotoefektom brzo predaje energiju E_e u daljnje sudare s drugim elektronima, stvarajući pobuđenja i Augerove elektrone. Energija vezanja nije izgubljena, već nastaje X-zraka koja je u većini slučajeva detektirana u osjetljivom dijelu detektora kao i fotoelektron.

Fotoelektrični efekt je najbitniji proces za mjerenje energije gama zrake, budući da se u interakciji gotovo sva energija upadnog zračenja predaje elektronu. Ako taj elektron preda svu svoju energiju u osjetljivom dijelu detektora, može se postaviti direktna veza između visine signala iz detektora i energije gama zrake.

Vjerojatnost da se dogodi fotoefekt postaje veća što je elektron jače vezan. Najveća je za elektrone iz K ljuske, pa se na njima događa preko 80% ovih interakcija. Ovisnost udarnog presjeka upadnog fotona energije E o atomskom broju Z proporcionalna je omjeru $\frac{Z^3}{E^3}$, pa se za detektore γ zračenja koriste materijali s velikim atomskim brojem Z .

2.2.2 Comptonско raspršenje



Slika 2.3: Comptonско raspršenje. Preuzeto s [12].

Raspršenje fotona na slobodnom elektronu zovemo Comptonским raspršenjem, pri kojem foton prenese dio svoje energije na elektron, prikazano na slici 2.3. Pri likom procesa vrijede zakoni očuvanja energije (izraz 2.4) i količine gibanja (izraz 2.5) fotona i elektrona prije i poslije sudara:

$$h\nu + m_e c^2 = h\nu' + E'_e, \quad (2.4)$$

$$p_e'^2 = p^2 + p'^2 - 2pp' \cos\theta. \quad (2.5)$$

gdje je $E'_e = \sqrt{(m_e c^2)^2 + (p'_e c)^2}$ energija elektrona nakon sudara.

Uvrštavanjem izraza (2.5) u izraz (2.4) dobiva se veza između kuta raspršenja θ i energije raspršenog fotona:

$$h\nu' = h\nu + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos\theta), \quad (2.6)$$

odnosno,

$$k' = \frac{k_0 \cdot \mu}{\mu + k_0(1 - \cos\theta)}, \quad (2.7)$$

gdje je $\mu = mc^2$, a k_0 i k' iznos valnih vektora upadnog i raspršenog fotona. [8]

Klein-Nishina formula (2.8) nam daje udarni presjek za Comptonско raspršenje nepolariziranih fotona sukladno sa kvantnom elektrodinamikom:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} \alpha^2 r_c^2 P(E_\gamma, \theta)^2 (P(E_\gamma, \theta) + P(E_\gamma, \theta)^{-1} - 1 + \cos^2(\theta)), \quad (2.8)$$

gdje je α konstanta fine strukture, $r_c = \hbar/m_e c$ je komptonски radijus elektrona, a

$$P(E_\gamma, \theta) = \frac{1}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)}$$

je omjer energije fotona prije i nakon sudara.

2.2.3 Tvorba parova

Da bi do procesa tvorbe parova e^+e^- uopće došlo, energija fotona mora bit najmanje 1.022 MeV. U procesu nastaju dvije čestice, elektron i pozitron koji imaju međusobno suprotne smjerove količine gibanja. Atomska jezgra sudjeluje u procesu tako da se osigura da u njemu vrijedi zakon očuvanja količine gibanja. Nakon tvorbe parova, pozitron se anihilira s lokalnim elektronom i nastaju dvije gama zrake (detaljnije u poglavlju 2.1.2). [1]

2.3 Scintilacijski kristali

Scintilacije su svjetlucaње koje materijal pobuđen ionizirajućom česticom emitira tijekom deekscitacije. Kada je scintilacijski materijal pobuđen elektromagnetskim zračenjem ili nabijenom česticom i emitira svjetlost, ta se pojava naziva luminiscencija. Ovisno o trajanju deekscitacije, razlikujemo tri vrste luminiscencije: fosforescenciju, fluorescenciju i zakašnjelu fluorescenciju. Fluorescencije se događaju vrlo brzo (oko 10^{-8} s u anorganskim, a u organskim materijalima i do 10^{-10} s) nakon pobuđenja, a zakašnjela fluorescencija je jednak kao fluorescencija, samo je proces odgođen. Scintilacije su fluorescencije. Prilikom fosforescencije reemisija svjetlosti traje duže (od nekoliko μ s do nekoliko sati) budući da je materijal pobuđen u metastabilno stanje, pa je proces deekscitacije sporiji, a emitirani fotoni imaju veće valne duljine.

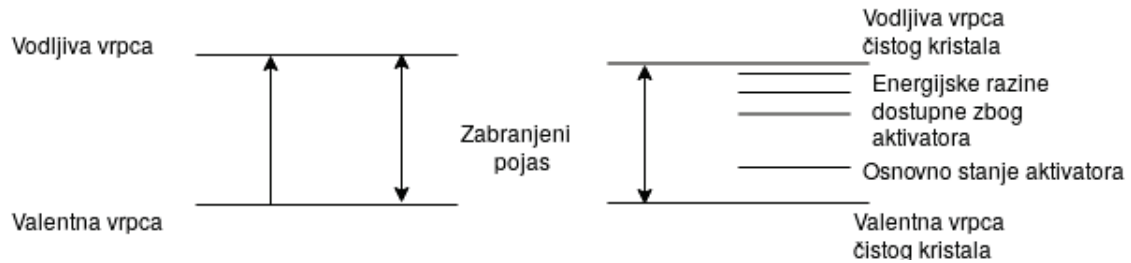
Scintilacijski materijali mogu biti anorganski i organski. Scintilacijski mehanizmi ove dvije vrste materijala su različiti. Organski kristali scintiliraju tako da se slobodni valentni elektroni, koji su upadnom česticom ionizirani, deekscitiraju. U anorganskom kristalu, pobuđeni elektron prelazi iz valentne vrpce u vodljivu ili, ukoliko ima nečistoća, u energijske razine u zabranjenom pojasu stvorenu nečistoćama u kristalu. Deekscitacijom elektrona emitiraju se scintilacije. Za potrebe detekcije γ zračenja poželjno je da materijal ima visoki atomski broj Z , da bi se γ zraka mogla zaustaviti u materijalu, pa su u ovom radu korišteni anorganski scintilacijski kristali, koji, u pravilu, imaju veći Z od organskih scintilatora.

2.3.1 Mehanizam fluorescencije u anorganskim scintilatorima

Scintilacijski mehanizam kristala ovisi o strukturi kristalne rešetke. U čistim anorganskim kristalnim rešetkama (poput NaI), elektronima su dostupne samo određene energetske razine. Elektron u čistom kristalu ne može energije u zabranjenom pojasu između vodljive i valentne vrpce. Apsorpcijom energije elektron se može pobuditi iz valentne u vodljivu vrpcu, čime ostavlja šupljinu u valentnoj vrpci. Povratak elektrona iz vodljive u valentnu vrpcu nije efikasan proces. Zbog toga se kristalu dodaju nečistoće, koje zovemo aktivatori.

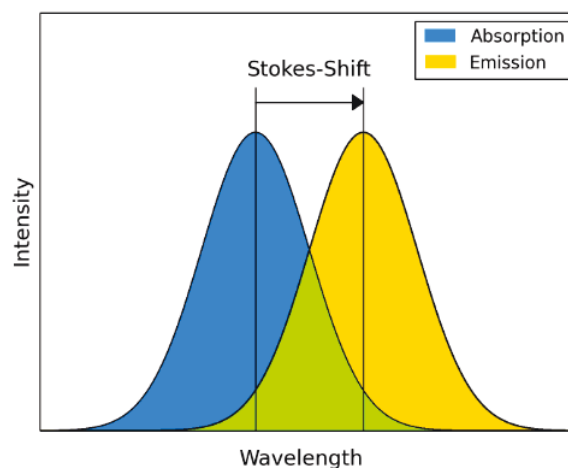
Aktivatori kreiraju posebna mjesta u energijskom spektru rešetke, u čijem se za-

branjenom pojasu promijeni energijska struktura, dok se pri tome očuva energijska struktura kristala. Nove energijske razine unutar zabranjenog pojasa stanjuju energijske razine čistog kristala i elektron se može deekscitirati kroz ove razine natrag u valentnu vrpca, što vidimo na slici 2.4. [5]



Slika 2.4: Prikaz zabranje vrpce čistog kristala (lijevo) i kristala dopiranog nečistoćama (desno). Adaptirano iz [5].

Fotoni emitirani tranzicijom elektrona iz višeg u niže stanje će biti niže energije nego fotoni nastali deekscitacijom u čistom kristalu. Emisijski spektar će se pomaknuti prema većim valnim duljinama. [13] Razlika između valnih duljina maksimalne apsorpcije i maksimuma emisije fluorescencije se naziva Stokesov pomak, koji možemo vidjeti na slici 2.5. Scintilatori su materijali s posebno velikim Stokesovim pomakom, što dozvoljava propagaciju scintilacijske svjetlosti kroz materijal, budući da se emitirani fotoni ne mogu ponovo apsorbirati u materijalu. [2]



Slika 2.5: Stokesov pomak. Preuzeto iz [8].

2.3.2 Karakteristike scintilacijskih materijala

Da bi scintilacijski materijal bio dobar kandidat za njegovu primjenu u izradi detektora, prema [6] i [2] mora imati sljedeće karakteristike:

- materijal mora biti transparentan na valnoj duljini emitirane scintilacijske svjetlosti
- svjetlosna produkcija mora biti visoka, odnosno ionizacijska energija se mora s velikom efikasnošću pretvoriti u svjetlosnu
- količina emitirane svjetlosti treba biti proporcionalna energiji koju je predalo ionizirajuće zračenje
- kratko vrijeme relaksacije bez nakupljanja zaostale svjetlosti
- visoki atomski broj Z za γ spektroskopiju
- mora biti mehanički i kemijski stabilan

Jedan od nekih nedostataka anorganskih kristala je njihova higroskopnost.

2.3.3 GaGG:Ce

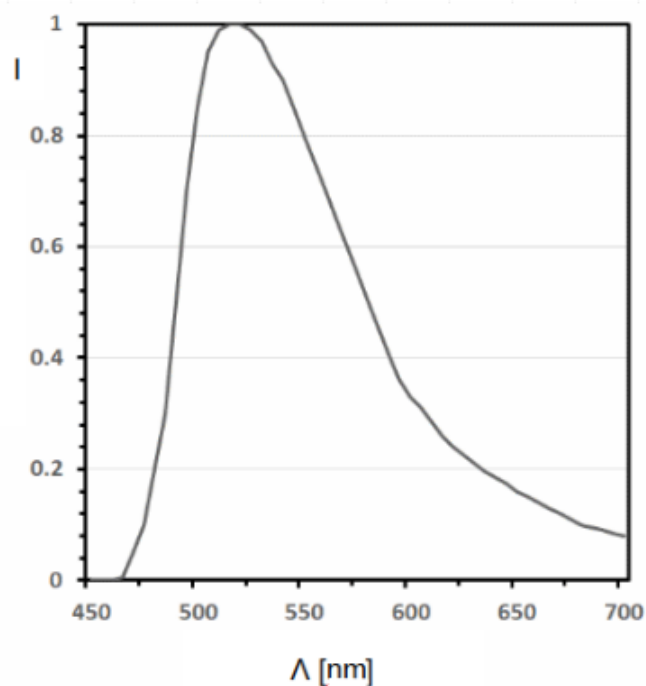
Cerijem dopirani Gadolinij Aluminijski Galij Granat (GaGG:Ce) je relativno novi kristalni scintilator sa potencijalno širokom primjenom u gama spektroskopiji, detektorima zračenja i nuklearnoj medicini. Jedan je od najsajnijih dostupnih scintilatora. Nema intrinzične radioaktivnosti i nije higroskopan. Neka svojstva ovih kristala se nalaze u tablici 2.1. Emisijski spektar kristala može se vidjeti na slici 2.7. Nedostatak ovih kristala je u tome što je emisija svjetlosti iznad 500 nm, u području u kojoj fotomultiplikatori imaju nižu osjetljivost od maksimalne (450 nm). [16]

2.3.4 CsI:Tl

Cezij jodid, jedan od najsajnijih scintilatora, je materijal sa visokom zaustavnom moći za visokoenergetske gama zrake zbog visoke relativne gustoće i atomskog broja. Otporan je na nagle termalne i mehaničke pobude. Pošto je higroskopan, kontakt kristala s vodom i visokom vlagom se treba izbjegavati. CsI(Tl) je relativno spor

GaGG:Ce	
efektivni atomski broj [g/cm ³]	54.4
vrijeme relaksacije [ns]	50-100
gustoća [g/cm ³]	6.63
temperatura tališta [°C]	1850
maksimalna valna duljina emisije [nm]	520
indeks refrakcije na maksimumu emisije	1.9
broj produciranih fotona po keV _γ	40-60

Tablica 2.1: Svojstva kristala GaGG:Ce. Preuzeto iz [16].



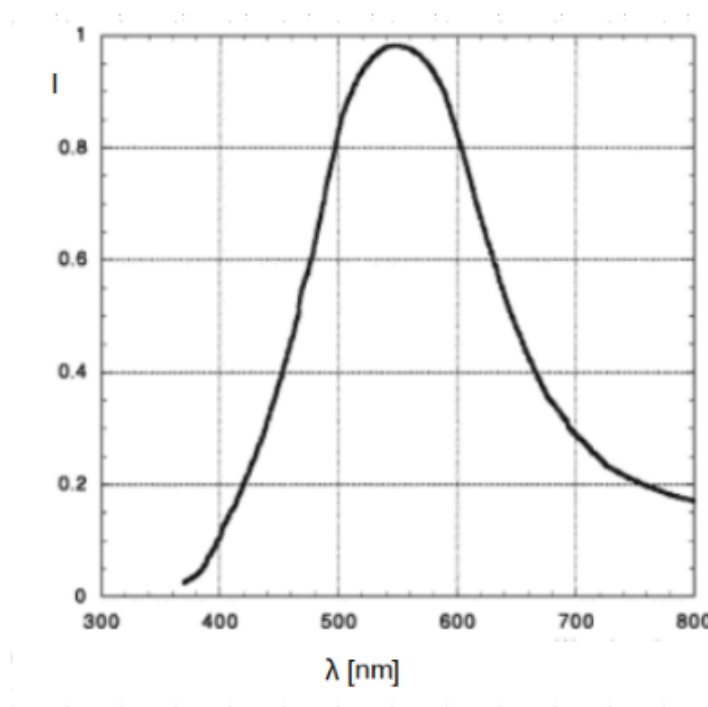
Slika 2.6: Emisioni spektar kristala GaGG:Ce. Adaptirano iz [16]. Intenzitet I je u proizvoljnoj mjernoj jedinici.

scintilator sa prosječnim vremenom raspada od otprilike 1 μ s. Ovo svojstvo postavlja ograničenje na brojanje fotona na velikim brojevima. [14] Neka svojstva ovih kristala se nalaze u tablici 2.2. Emisioni spektar CsI:Tl može se vidjeti na slici 2.7.

U ovom radu uspoređujemo kristale GaGG:Ce i CsI:Tl s obzirom na slični atomski broj Z (54.4 za kristale GaGG-a, 54 za kristale CsI:Tl) i sličan spektralni odgovor (maksimum emisije kristala GaGG-a je na 520 nm, dok je za kristale CsI(Tl) na 550 nm). Prednost CsI:Tl kristala je u tome što je jeftiniji, ali njegove mane je higroskopnost i duža vrijednost relaksacije brze komponente od kristala GaGG:Ce-a. GaGG

CsI(Tl)	
efektivni atomski broj [g/cm^3]	54
vrijeme relaksacije [ns]	900
gustoća [g/cm^3]	4.51
temperatura tališta [K]	894
maksimalna valna duljina emisije [nm]	550
indeks refrakcije na maksimumu emisije	1.79
broj produciranih fotona po keV_γ	54

Tablica 2.2: Svojstva kristala CsI:Tl. Preuzeto iz [14] i [15].



Slika 2.7: Emisijski spektar kristala CsI:Tl. Adaptirano iz [17]. Intenzitet I je u proizvoljnoj mjernoj jedinici.

2.4 Primjene scintilacijskih detektora

Scintilacijski detektori su danas među najpopularnijim izborima za detekciju γ i X zračenja, te nabijenih i neutralnih čestica. Ovi detektori su najčešće korištena metoda detekcije u eksperimentima u nuklearnoj fizici i fizici čestica, kao i u astročestičnoj fizici za detekciju kozmičkih zraka. Koriste se i u potrazi za mineralnim resursima, kao i u svrhu detekcije radioaktivnog zračenja u prirodi.

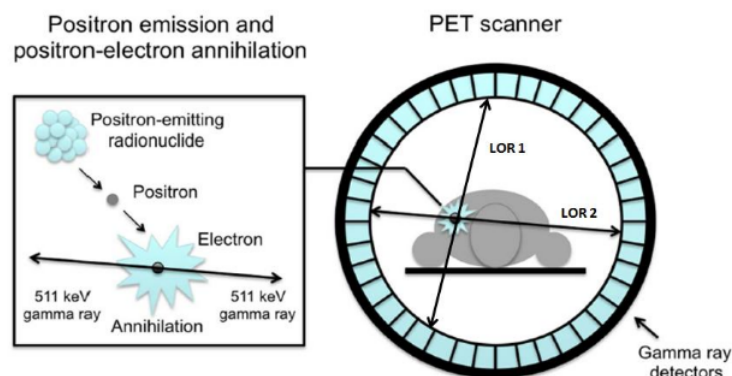
Posebno je zanimljiva njihova upotreba u nuklearnoj medicini, gdje imaju široku primjenu u medicinskoj dijagnostici. Jedan od motiva izrade ovog rada je ispitati kakva svojstva imaju scintilacijski kristali, GaGG:Ce, za moguće primjene uređaja za

biomedicinskom oslikavanju ili uređajima za opažanje radioaktivnosti okoliša.

2.4.1 Pozitronska emisijska tomografija

Pozitronska emisijska tomografija (PET) je jedna od moćnih tehnika medicinskog oslikavanja u nuklearnoj medicini. Prilikom pregleda PET-om, pacijentu se ubrizga farmaceutski marker (tzv. radiofarmak). Radiofarmaci su molekule u kojima je inače stabilan atom zamijenjen s radioaktivnim izotopom istog elementa. Kemijska svojstva markirane molekule su jednaka prirodnim i takva molekula će sudjelovati u svim procesima u tijelu kao i prirodna. Radioaktivni izotop pri raspadu emitira pozitron β^+ kinetičke energije nekoliko 100 keV. Domet ovakvog pozitrona u tijelu je oko 1 mm. Zaustavlja ga anihilacija s okolnim elektronom, prilikom čega nastanu dvije gama zrake energije 511 keV, koje se gibaju u suprotnim smjerovima. Ove dvije gama zrake će, u nekim slučajevima, napustiti tijelo bez naknadnih raspršenja, što znači da će njihova linija kretanja ostati nepromijenjena. Njihova linija kretanja se može rekonstruirati scintilacijskim detektorima. Opažanjem velikog broja ovakvih procesa moguće je rekonstruirati trodimenzionalnu distribuciju anihilacijskih događaja u prostoru i vremenu.

PET je dakle, neinvazivna tehnika koja omogućuje praćenje metaboliziranja markiranih molekula u tijelu. Vrijednost PET-a je u vrlo visokoj osjetljivosti i jako mala količina radioaktivnih spojeva je dovoljna da se prikupi dovoljno informacija. [6] [2] Shematski prikaz metode se nalazi na slici 2.8.



Slika 2.8: Shematski prikaz PET tehnike. Scintilacijski kristali se nalaze na kružnici oko pacijenta te detektiraju gama zračenje emitirano metabolizacijom radiofarmaka. Adaptirano iz [3]

Najbitnija karakteristika scintilatora koji je kandidat za korištenje u PET skeniranju je dobra vremenska rezolucija, velika zaustavna moć i dobra energijska rezolucija. Vremenska rezolucija je bitna jer se njom osigurava da su dvije gama zrake stvarno stigle iz istog događaja, ali i za upotrebu u TOFPET-u (*Time-of-Flight Positron Emission Tomography*). Zaustavna moć omogućuje veliku efikasnost detekcije, što znači da će se opaziti više anihilacijskih događaja, s manjim omjerom signala naspram šuma. Udarni presjek za Comptonско raspršenje u živom tkivu je veći nego udarni presjek za fotoelektrični efekt. Nakon anihilacije, udio γ zraka se raspršuje u tijelu pacijenta. Ako su takvi događaji detektirani, a ne raspoznaju se kao događaji s raspršenjem, uključuju se u konačnu sliku. Energijska rezolucija scintilatora je važna jer dozvoljava odbacivanje takvih događaja, obzirom da će Comptonско raspršenje γ čestice imati nižu energiju od anihilacijskih. [6]

3 Eksperimentalni postav

Pozicijski osjetljivi detektori se najčešće sastoje od scintilacijskih fotomultiplikatora, odnosno piksela detektora. U ovom radu su proučena dva scintilacijska kristala koji su kandidati za piksele u izgradnji takvih detektora, GaGG:Ce i CsI:Tl. Svaki od ovih materijala je ispitan u različitim geometrijama i optičkim konfiguracijama.

3.1 Postav za mjerenja GaGG:Ce kristala

Ispitivanja GaGG:Ce kristala su napravljena s pojedinačnim kristalima i u sendvič konfiguraciji GaGG:Ce-svjetlovod-GaGG:Ce.

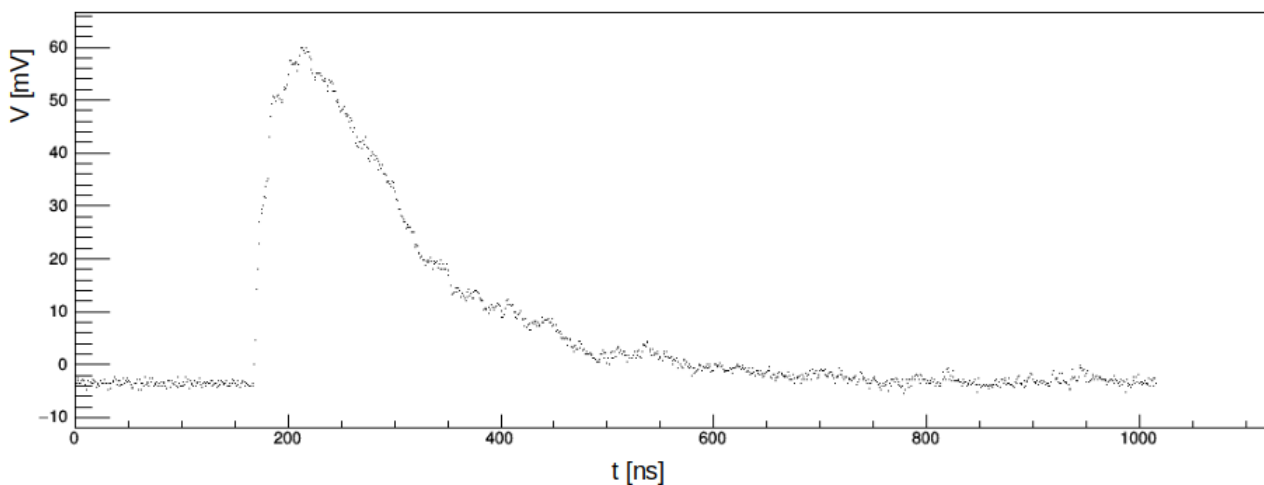
3.1.1 Priprema pojedinačnih kristala

Pojedinačni kristali GaGG:Ce-a, volumena $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ pažljivo su omotani su u teflon debljine 0.2 mm, tako da jedna baza kristala nije pokrivena te umetnuti u plastično kućište (izrađeno 3D ispisom). Ovako mehanički zaštićen od svjetlosti kristal spojen je s kućištem u kojem se nalazi fotodetektor. Postavljeni su tako da je kristal cijelom dodirnom površinom naslonjen na fotodetektor. Vanjsko kućište se dodatno osigurava s trakom za izolaciju. Napravljen je niz mjerenja gdje je ispitan utjecaj optičkog sredstva nanesenog na kontaktnu površinu kristala i fotodetektora, pa su tako ispitane konfiguracije bez optičkog sredstva i s optičkom masti.

3.1.2 Postav za mjerenja pojedinačnih kristala

Fotodetektor u svim mjerenjima pojedinačnih kristala je silicijski fotomultiplikator aktivne površine $3 \times 3 \text{ mm}^2$. Signal iz fotodetektora se očitava digitalizatorom. Digitalizator DRS4 je u mjerenjima pojedinačnih kristala i sendvič-konfiguracije korišten kao digitalni osciloskop, koji omogućuje prikupljanje uzoraka signala iznad nekog definiranog praga (eng. threshold) napona, tako da prikupi vrijednost signala u određenim intervalima. Ukupni broj točaka koji se prikupi za određeni signal je 1024. Frekvencija uzorkovanja koja je odabrana za mjerenja na DRS4 digitalizatoru je 1 GS/s, što odgovara spremanju jedne od 1024 točke uzorka svakih 1 ns. Podaci prikupljeni eksperimentima opisanim u ovom radu su zapisani u binarnom obliku, zbog optimizacije brzine prikupljanja podataka te korištenja memorije.

Na slici 3.1 može se vidjeti kako izledaju signali GaGG:Ce dobiveni pomoću digitalizatora DRS4. Oblik pulsa ima vrlo strm rast, što je dobra odlika kristala GaGG:Ce, te uzak vrh, jer to znači nižu razinu šuma i preciznije mjerenje. *baseline*, odnosno raspon kanala u kojima se određuje taj šum, određen je na temelju prosjeka signala dobivenih između 20. i 70. kanala na digitalizatoru. Integracija signala se provodi između 80. i 1022. kanala. Integracija se, po preporuci proizvođača digitalizatora, ne provodi za zadnja dva kanala zbog mogućnosti velike pogreške. Izračunati *baseline* se oduzima od integriranog spektra.



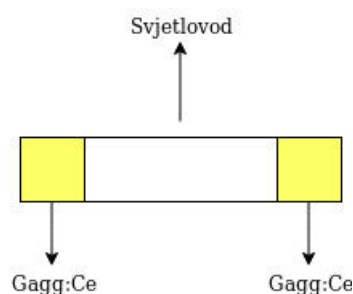
Slika 3.1: Signal dobiven mjerenjem s kristalom GaGG:Ce u mjerenjima bez optičkog sredstva na naponu 56.5 V.

U mjerenjima su dva kristala namještena tako da su postavljeni jedan nasuprot drugog. Između njih, na jednakoj udaljenosti od svakog kristala, postavljen je radioaktivni izvor s gama zrakama kao produktom raspada koje se detektiraju pomoću kristala. Također, GaGG:Ce kristali, ukoliko su obasjani prije pakiranja u teflon, su imali vrlo visok doprinos emisije spore svjetlosne komponente prilikom prvih mjerenja, pa su se zbog toga mjerenja s GaGG:Ce:Ce kristalima odvijala dan nakon što su zaštićeni od svjetlosti da bi se u potpunosti relaksirali.

3.1.3 Priprema sendvič-konfiguracije GaGG:Ce-svjetlovod-GaGG:Ce

U mjerenjima s ovakvom konfiguracijom ispitala su se svojstva GaGG:Ce kristala s obzirom na njihovu poziciju u detektoru (kristali koji se nalaze bliže i dalje silicij-skom fotomultiplikatoru), u svrhu potencijalne primjene ovakvih konfiguracije u 3D osjetljivim detektorima.

Sendvič-konfiguracija GaGG:Ce-svjetlovod-GaGG:Ce je napravljena s dva kristala GaGG:Ce-a i svjetlovodom, tako da je svaki od kristala postavljen na jednu od baza svjetlovoda. Na slici 3.2 može se vidjeti skica sendvič-konfiguracije. Svjetlovod je napravljen od pleksiglasa i ima oblik kvadra volumena $3 \times 3 \times 10 \text{ mm}^3$. Povezivanje svjetlovoda s kristalima je napravljeno na dva načina: koristeći optičku mast ili optički cement. Korišteni cement je Eljen Technology, EJ-500. Ta kompozicija je omotana u teflon kao i pojedinačni kristali, te stavljena u odgovarajuće kućište. U drugom zaštitnom, izolir-trakom oblijepljenom kućištu se nalazi fotodetektor, na koji se postavlja GaGG:Ce kristal bez pokrova od teflona.

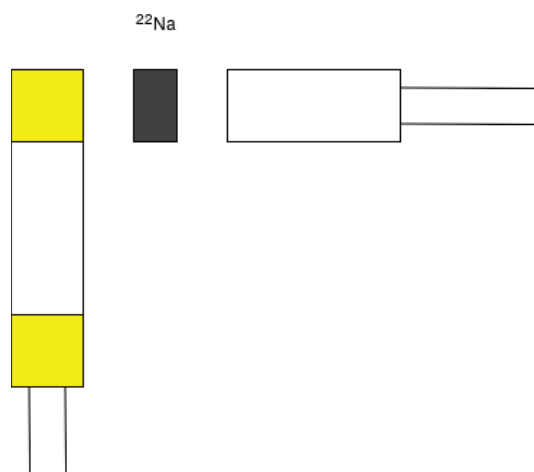


Slika 3.2: Skica sendvič-konfiguracije GaGG:Ce-svjetlovod-GaGG:Ce.

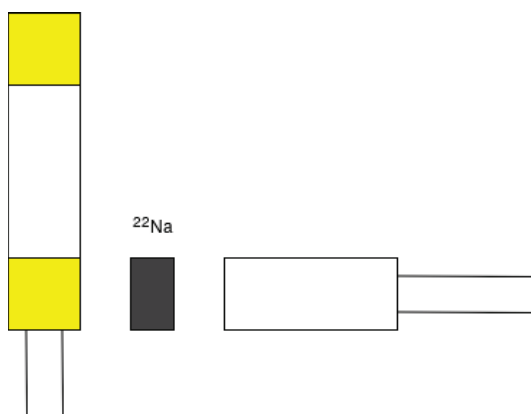
3.1.4 Postav za mjerenja pojedinačnih sendvič-konfiguracija GaGG:Ce-svjetlovod-GaGG:Ce

U eksperimentima je provjeravano da li se mijenja odziv kristala s obzirom na udaljenost od fotomultiplikatora (bliži i dalji kristal). Potencijalna upotreba ovakve konfiguracije je u 3D pozicijskim osjetljivim detektorima, jer se umjesto po cijelom kristalu, interakcija zračenja i kristala može dogoditi na početku ili na kraju konfiguracije. Na slici 3.3, mogu se vidjeti različiti eksperimentalni postavi korišteni u mjerenjima s pojedinačnom sendvič-konfiguracijom.

Ova mjerenja su napravljena u koincidenzijskom postavu s kontrolnim kristalom. Koincidenzijski postav detektira samo fotone koji se detektiraju istovremeno, pa zbog toga u spektru nema fotovrha ^{22}Na na 1.275 MeV. Ovaj postav ograničava broj točaka koje se koriste za kalibraciju i korekciju odaziva na samo dvije, pa se mogu očekivati nešto lošiji rezultati kalibracije i slabije rezolucije.



(a) Postav za mjerenje daljeg kristala



(b) Postav za mjerenje bližeg kristala



(c) Okomiti postav kristala s obzirom na pomoćni kristal

Slika 3.3: Eksperimentalni postav za mjerenje svojstava kristala u sendvič-konfiguraciji.

3.2 Postav za mjerenja CsI:Tl kristala

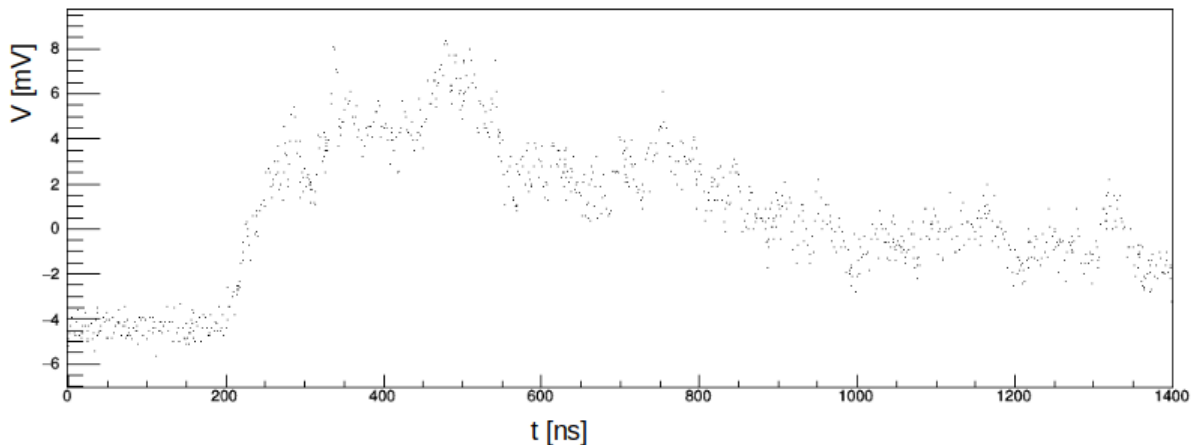
3.2.1 Ispitivanje pojedinačnih kristala

Pojedinačni kristali CsI-a, volumena $3 \times 3 \times 10 \text{ mm}^3$ su omotani teflon debljine 0.2 mm, tako da baza kristala sa strane na kojoj se spaja s fotodetektorom ostane bez pokrivača. Fotodetektor u svim mjerenjima pojedinačnih kristala je silicijski fotomultiplikator aktivne površine $3 \times 3 \text{ mm}^2$. Kad se kristal unese u plastično kućište fotodetektora, postavljeni su tako da je kristal cijelom dodirnom površinom naslonjen na fotodetektor. U mjerenjima s optičkim sredstvima, između kristala i fotodetektora su se postavili optički mediji, optička i silikonska mast te se provjeravalo kakav imaju utjecaj na rezoluciju detektora. Također, napravljen je i set mjerenja koji testira kako omotavanje kristala u aluminijsku foliju, umjesto u teflon, utječe rezoluciju detektora. Cijeli postav je zaštićen s kućištem oblijepljenim izolir-trakom.

3.2.2 Postav za mjerenja pojedinačnih kristala

Kako pojedinačni CsI kristali imaju dugačko vrijeme relaksacije, postavke uzorkovanja digitalizatora DRS4 moraju to reflektirati. Odabrana srednja frekvencija uzorkovanja za kristale CsI je najmanja moguća za korištenje DRS4 digitalizator, a to je 0.7 GS/s. To je ekvivalentno očitavanju jedne točke uzorka svakih 1.4 ns. Ostali detalji eksperimentalnog postava su jednaki postavima za mjerenje pojedinačnih GaGG:Ce kristala, a opisani su u poglavlju 3.1.2. Osvijetljeni CsI:Tl kristali nisu pokazali isto svojstvo kao GaGG:Ce kristali da se sporo relaksiraju jednom kad su osvjetljeni, te su eksperimenti s ovim kristalima provedeni nakon što bi se napravio eksperimentalni postav.

Na slici 3.4 nalazi se oblik signala dobivenog digitalizatorom za kristale CsI:Tl. Očito je da je signal kristala CsI:Tl puno nepravilniji od signala dobivenog GaGG:Ce kristalima, vrh je širi i sporije raste od signala GaGG:Ce. Također, linija signala je šira, pa ovakav rezultat nagovještava da bi u slučaju CsI:Tl rezultati energijske rezolucije trebali biti nešto lošiji od onih dobivenih s GaGG:Ce kristalima. Postupak dobivanja integriranog spektra je analogan postupku opisanom za GaGG:Ce kristale, opisan u poglavlju 3.1.2.



Slika 3.4: Signal dobiven mjerenjem s kristalom CsI:Tl u mjerenjima bez optičkog sredstva na naponu 56.5 V.

3.3 Silicijski fotomultiplikatori

Scintilacijski fotomultiplikatori omogućuju detekciju pojedinačnih fotona, a čine piksele MPPC-a. Svaki piksel u *MultiPixel PhotoCounter*-u (MPPC-u) producira izlazni impuls koji je jednake amplitude svaki put kada detektira foton. U mjerenjima se koristio proizvod tvrtke *Hammamatsu Photonics* oznake S13360-3050CS.

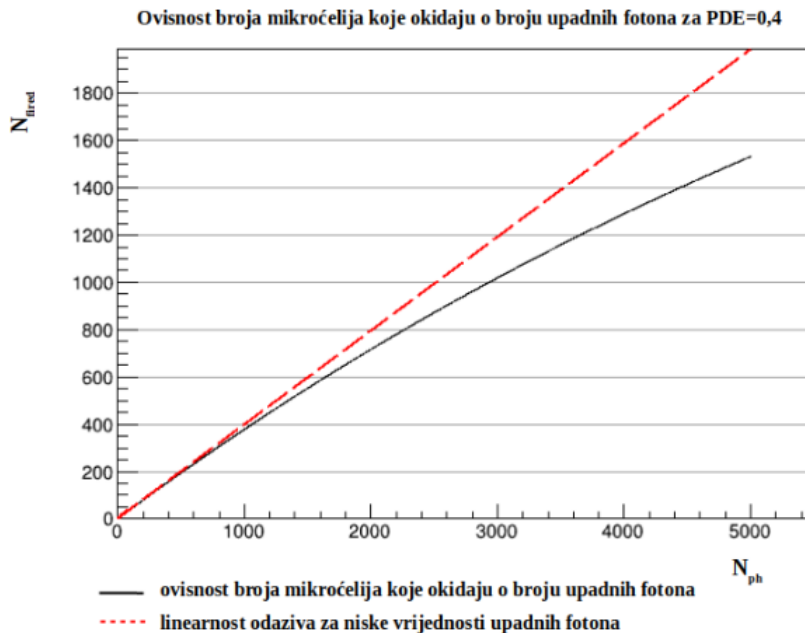
Jedinični element MPPC uređaja, mikroćelija, se sastoji od lavinske fotodiode koja radi u Geigerovom načinu i otpornika gušenja. Geigerov način (eng. *Geiger mode*) producira jaki izlazni signal detekcijom samo jednog fotona. Jednom kada se Geigerovo pražnjenje započne, ne zaustavlja se sve dok postoji električno polje u lavinskoj fotodiodi. Da se zaustavi Geigerovo pražnjenje, u strujni krug, serijski s fotodiodom, se postavlja otpornik-prigušivač. Ovom tehnikom se brzo zaustavlja umnožavanje lavine u lavinskoj fotodiodi, pošto pad u radnoj voltaži uzrokuje struja koja Geigerovim pražnjenjem odlazi u otpornik-prigušivač. Struja koja nastaje Geigerovim pražnjenjem ima oblik pulsa sa velikim nagibom tijekom rasta kada nastaje lavina, dok je izlazna struja u otpornik-prigušivač ima relativno sporo vrijeme pada. [11]

Korišteni fotomultiplikator se sastoji od jednog piksela, u kojoj se nalazi 3600 mikroćelija, a veličina mikroćelije je $50 \mu\text{m}$. Jedna od glavnih karakteristika MPPC fotomultiplikatora je njegovo veliko pojačanje ($1.7 \cdot 10^6$) i visok postotak aktivne površine, odnosno veliki *Fill Factor* od 74%. Tipična vrijednost vjerojatnosti da upadni foton u interakciji s mikroćelijom izazove lavinu ionizacija za ovaj uređaj iznosi 40% (PDE=40%). Spektralna osjetljivost MPPC uređaja je od 270 - 900 nm, a maksimalna

je na $\lambda = 450 \text{ nm}$ što uređaj čini idealnim za očitavanje scintilacijskog svjetla. [10]

3.3.1 Nelinearnost odaziva i kalibracijska krivulja

Svaka mikroćelija MPPC-a daje istu amplitudu svaki put kada detektira foton. Pulsevi generirani sa više od jednog piksela se zbrajaju tako da daju izlazni signal koji je superpozicija događaja koji su se istovremeno detektirali. Svaki piksel daje točno jednu izlaznu vrijednost i ovo svojstvo se ne mijenja s brojem upadnih fotona. Linear-
nost izlaznog signala s detekcijom većeg broja fotona se pogoršava, kako više fotona upada na jedan piksel, umjesto jednog ili dva. U slici 4.2 se može vidjeti kako broj piksela koji su pobuđeni se s višim brojem fotona odmiče od linearosti.



Slika 3.5: Nelinearnost odziva broja mikroćelija koje su pobuđene, s obzirom na broj upadnih fotona. Preuzeto iz [7].

Kako postoji nelinearnost u odzivu fotodetektora, to znači da se i izračunate energije rezolucije moraju prilagoditi nelinearnosti izmjerene energije. Izraz 3.1 nam daje korigiranu vrijednost energije za nelinearnost odaziva. Puni izvod se može naći u [7].

$$E = \left| \frac{M}{N_{\text{fired}}} \cdot \ln \left(1 - \frac{N_{\text{fired}}}{M} \right) \right| \cdot E_{\text{int}} \quad (3.1)$$

Kako u našim mjerenjima nismo mogli izravno odrediti N_{fired} potreban za izračun korekcije energije prema izrazu 3.1, prilagodili smo kalibracijsku krivulju da zadrži

logaritamsku nelinearnost kako se energija povećava, i dobili izraz 3.2.

$$E = a \cdot \ln(1 - b \cdot E_{int}) \quad (3.2)$$

Prilikom kalibracije, zbog nelinearnosti kalibracijske funkcije, energijski spekar je kalibriran i s obzirom na nelinearnost odziva. Za svako napravljeno mjerenje, izračunati su koeficijenti a i b kalibracijske funkcije.

3.4 Kontrola temperature okoline tijekom eksperimenta

Budući da je tijekom provedbe eksperimenata promjena temperature bila i nekoliko stupnjeva, korišten je klima-uređaj koji je osiguravao da su mjerenja obavljena unutar promjene od jednog stupnja Celzija. U svakom eksperimentu je tijekom svakog mjerenja očitana temperatura prostorije i/ili dijela prostorije u kojoj se nalazi postav, te su za ovaj rad izračunate srednje temperature na kojima se napravio svaki set mjerenja. Informacije o srednjoj temperaturi tijekom mjerenja se nalaze u poglavljima gdje su predstavljeni rezultati mjerenja.

4 Rezultati

4.1 Obrada rezultata mjerenja

Dobiveni spektri se kalibriraju tako da se položaj fotovrha identificira sa 511 keV. Spektri su korigirani i s obzirom na nelinearnost odziva silicijskog fotomultiplikatora, te iz korigiranih spektara određujemo energijsku rezoluciju. Svi podaci prezentirani u tablicama su postotci.

4.1.1 Relativna energijska rezolucija detektora

Relativna energijska rezolucija detektora se računa kao omjer širine foto-vrha na pola visine (*FWHM*) i položaja na kojemu se nalazi srednja vrijednost vrha:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{FWHM}{\mu} = \frac{2,35\sigma}{\mu} \quad (4.1)$$

Srednju vrijednost fotovrha (μ) i pripadajuću vrijednost standardne devijacije (σ) određujemo iz prilagodbe Gaussove funkcije fotovrhu. Eliminacija pozadinskog šuma je napravljena dodavanjem eksponencijalne funkcije. Ukupna krivulja prilagođena fotovrhovima je:

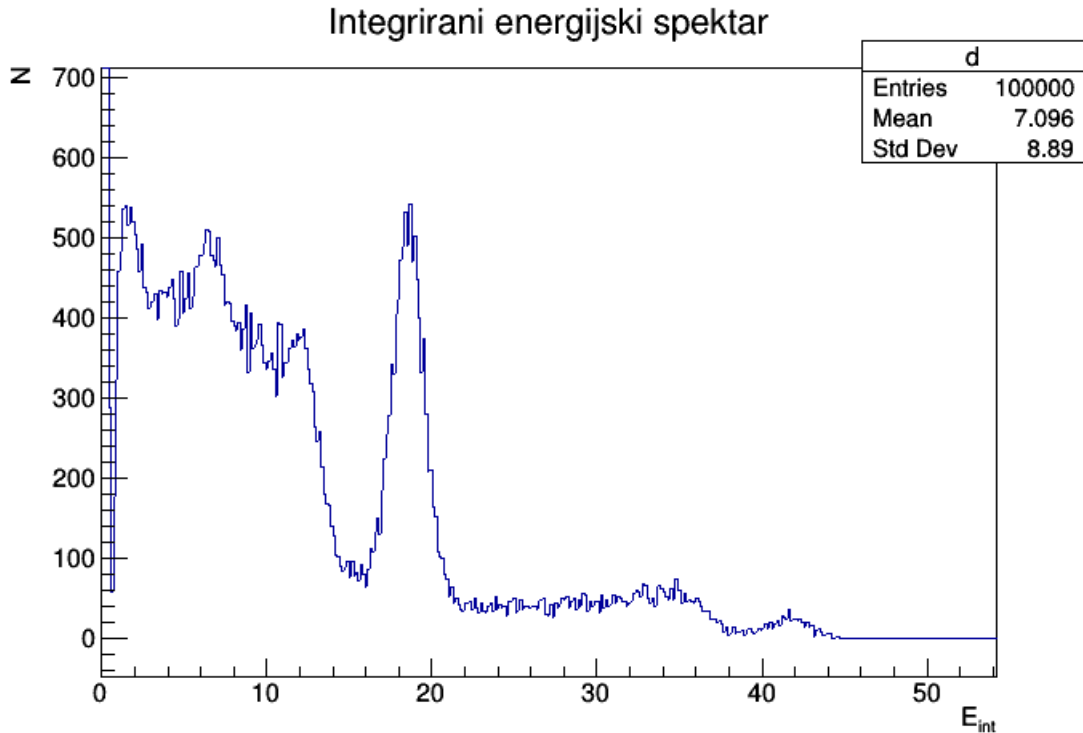
$$[0] * \exp(-0.5((x - [1])/[2])^2) + \exp([3] + [4]), \quad (4.2)$$

koja daje 5 parametara prilagodbe [0]-[4], a za ovaj rad su najbitniji parametri koji odgovaraju srednjoj vrijednosti fotovrha i standardnoj devijaciji iz rezultata prilagodbe. Što je omjer manji, to detektor ima veću rezoluciju.

Za svako od mjerenja, izračunate su relativne energijske rezolucije prije $(\frac{\Delta E}{E})_{\text{prije}}$ i nakon kalibracije i korekcije nelinearnosti $(\frac{\Delta E}{E})_{\text{poslije}}$, što odgovara stvarnoj rezlučivosti detektora. Omjer njihovih vrijednosti daje promjenu rezolucije Δ detektora nakon prilagodbe:

$$\Delta = 1 - \frac{\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_{\text{poslije}}}{\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_{\text{prije}}} \quad (4.3)$$

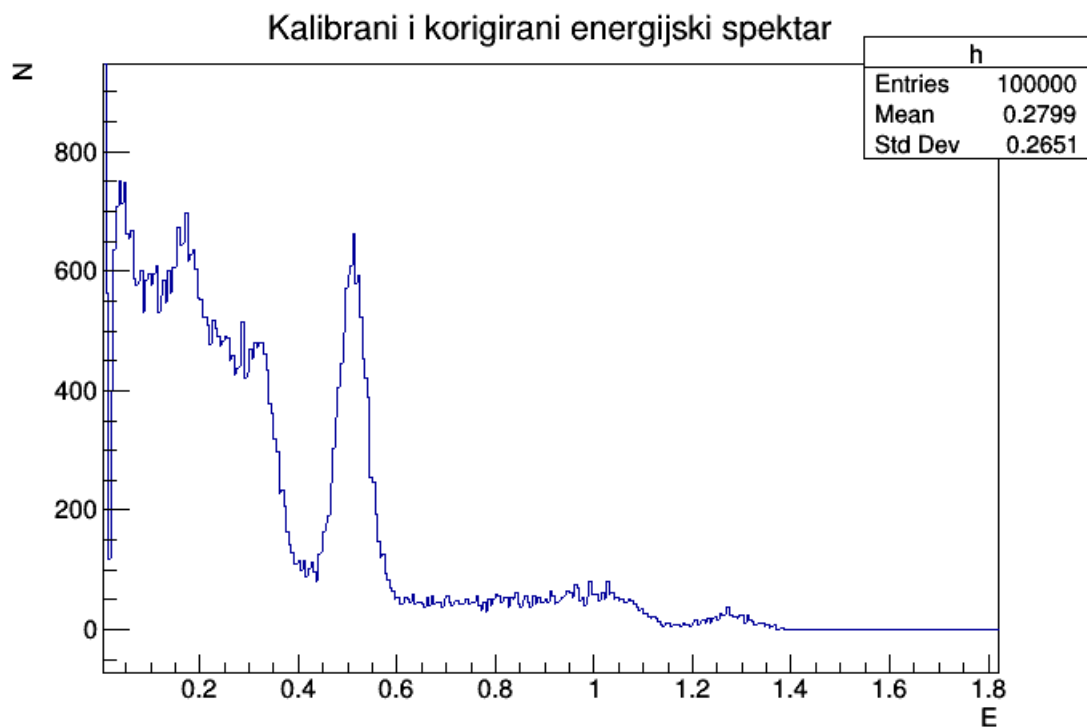
Kalibracija spektara provedena je na način da su se prvo odredili položaji fotovrhova pomoću prilagodbe funkcije 4.2 tako da se dobije njihova srednja vrijednost vrha i pripadna standardna devijacija. To će omogućiti izračun relativne energijske rezolucije prije kalibracije. Primjer integriranog energijskog spektra se nalazi na slici 4.1.



Slika 4.1: Nekalibrirani energijski spektar GaGG:Ce u mjerenjima na 56.5 V bez optičkog sredstva.

Nakon prilagodbe, vrijednosti na kojima se nalaze fotovrhovi se kalibriraju tako da se u slučaju mjerenja s ^{22}Na srednja vrijednost prvog vrha prilagodi na 0.511 MeV-a, a drugi vrh na 1.275 MeV-a. Ova nelinearna prilagodba se radi pomoću izraza 3.2, koja također osigurava korekciju s obzirom na nelinearni odziv silicijskog fotomultiplikatora. Na slici 4.2 nalazi se rezultat kalibracije i korekcije spektra.

Vidljivo je da energijski spektar nakon kalibracije i korekcije ima prvi fotovrh na 0.511 MeV, a drugi fotovrh se nalazi na 1.275 MeV, što znači da je izraz 3.2 uspješno kalibrirao i korigirao integrirani spektar.



Slika 4.2: Kalibrirani i korigirani energijski spektar GaGG:Ce u mjerenjima na 56.5 V bez optičkog sredstva.

4.2 GaGG:Ce

GaGG:Ce kristali ispitivani su pojedinačno i u sendvič-konfiguraciji sa svjetlovodom.

4.2.1 Ispitivanje pojedinačnih kristala

Mjerenja bez i sa optičkim sredstvom

Mjerenja su izvedena u konfiguraciji opisanoj u poglavljima 3.1.1 i 3.1.2. Na 1. kanalu su mjerenja s kristalima GaGG:Ce-a u kontaktu s fotodetektorom bez optičkog sredstva, dok je na 2. kanalu korištena optička mast. Tablica 4.1 prikazuje rezultate dobivene na 1. kanalu, dok tablica 4.2 prikazuju rezultate s 2. kanala. Prosječna temperatura okoline je $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, a broj događaja u mjerenjima na svakom naponu je 100 000.

Mjerenja s GaGG:Ce kristalom su napravljena sa razlikom u napona između mjerenja od 0.5 V, pošto je kristal GaGG:Ce-a relativno novi scintilator, u cilju detaljnijeg ispitivanja njihovih svojstava na različitim naponima. Za mjerenja bez masti na kontaktnoj površini između kristala i fotomultiplikatora u tablici 4.1, možemo vidjeti kako se povećanjem napona rezolucija povećava. Omjeri rezolucija prije i poslije ka-

Napon [V]	$(\Delta E/E)_{\text{prije}}$	$(\Delta E/E)_{\text{poslije}}$	Δ
54.5	13.3 ± 0.2	13.8 ± 0.5	4
55	12.8 ± 0.4	13.6 ± 0.2	6.2
55.5	11.7 ± 0.3	13.9 ± 0.4	11.9
56	12.2 ± 0.2	12.9 ± 0.5	5.7
56.5	11.9 ± 0.4	12.9 ± 0.5	8.4
57	11.8 ± 0.2	12.8 ± 0.2	8.5
57.5	11.8 ± 0.4	12.4 ± 0.5	5.1

Tablica 4.1: Relativne rezolucije detektora prije i poslije kalibracije te rezultatna omjer nakon kalibracije za 1. kanal.

Napon [V]	$(\Delta E/E)_{\text{prije}}$	$(\Delta E/E)_{\text{poslije}}$	Δ
54.5	13.8 ± 0.5	13.8 ± 0.5	0
55	12.7 ± 0.3	14.0 ± 0.1	10
55.5	12.7 ± 0.2	13.3 ± 0.5	4.7
56	12.2 ± 0.2	12.9 ± 0.5	5.7
56.5	12.9 ± 0.4	13.8 ± 0.5	7
57	12.5 ± 0.3	13.8 ± 0.5	10.4
57.5	12.0 ± 0.4	13.9 ± 0.5	15.8

Tablica 4.2: Relativne rezolucije detektora prije i poslije kalibracije te rezultatna promjena nakon kalibracije za 2. kanal.

libracije za skoro sva mjerenja su ispod 10%. S obzirom da je omjer na 55.5 V puno veći od omjera ostalih rezultata, njega isključujemo pri računu prosječnog omjera. Prosječna korekcija rezolucije je $(6 \pm 1)\%$.

U mjerenjima s optičkom masti između kristala i fotomultiplikatora, u tablici 4.2 vidimo pogoršanje u rezoluciji prije kalibracije u usporedbi s mjerenjima bez optičkog sredstva, iz čega slijedi da je stvarna rezolucija detektora nešto slabija od one dobivene za detektor bez optičke masti. U ovim mjerenjima imamo dvije vrijednosti omjera koje ne ulaze u račun prosječnog povećanja rezolucije. Jedna je na 54.5 V, gdje su rezolucije prije i poslije kalibracije jednake, te mjerenje na 57.5 V koje najviše odstupa od ostalih rezultata. Prosječno slabljenje rezolucije na ovom detektoru je $(8 \pm 1)\%$.

Iz ovih mjerenja može se zaključiti kako se nelinearnost odziva ne mijenja značajnije s naponom, te povećava relativnu širinu vrha za za 6% u slučaju da nema optičkog sredstva između kristala i fotodetektora, te 8% ukoliko je korišteno optičko sredstvo optička mast. Stoga relativnu rezoluciju za ostala mjerenja s GaGG:Ce kristalima

određujemo kao

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_{\text{poslije}} = \left(\frac{\Delta E}{E}\right)_{\text{prije}} \times 1.06. \quad (4.4)$$

u slučaju mjerenja bez optičkog sredstva, a u slučaju optičke masti:

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_{\text{poslije}} = \left(\frac{\Delta E}{E}\right)_{\text{prije}} \times 1.08. \quad (4.5)$$

4.2.2 Ispitivanje jednog sendviča GaGG:Ce-svjetlovod-GaGG:Ce

Testiranje sendviča

Nakon što su sastavljeni, sendviči GaGG:Ce-svjetlovod-GaGG:Ce su proučeni tako da se provjeravalo kako izgleda spektar svakog od kristala koji se nalaze bliže i dalje od fotomultiplikatora. Metoda provedbe mjerenja opisana je u poglavljima 3.1.3 i 3.1.4, a u tablicama 4.3 i 4.4 se nalaze rezultati mjerenja. Stvarna energijske rezolucija detektora je ocijenjena pomoću postotka dobivenog iz mjerenja 4.2.1, a budući da su ova mjerenja napravljena bez optičkog sredstva između sendvič-konfiguracije i fotomultiplikatora, za izračun vrijednosti rezolucije se koristi izraz 4.4. Mjerenja u ovim tablicama su napravljena na naponu 55.5 V. Optička sredstva u ovom slučaju služe kao optička veziva između svjetlovoda i kristala. U tablici 4.4 nalaze se mjerenja dvije sendvič konfiguracije u kojima je korišten optički cement kao optičko vezivo, u poziciji okomitoj s obzirom na kontrolni kristal. Mjerenja su napravljena na naponu 57.5 V.

Bliži kristal	$(\Delta E/E)_{\text{prije}}$	$(\Delta E/E)_{\text{poslije}}$
Mast	18.5 ± 0.5	19.6 ± 0.5
Cement	16 ± 1	17 ± 1
Dalji kristal	$(\Delta E/E)_{\text{prije}}$	$(\Delta E/E)_{\text{poslije}}$
Mast	14.4 ± 0.5	15.3 ± 0.5
Cement	22 ± 1	23 ± 1

Tablica 4.3: Relativne rezolucije detektora prije i poslije kalibracije te rezultatna promjena nakon kalibracije za mjerenja bližih i daljih kristala u sendvičima povezanim optičkom mašću i optičkim cementom.

U tablici 4.3, vidimo da su mjerenja bližeg kristala nešto lošija od mjerenja pojedinačnog kristala GaGG:Ce bez optičkog sredstva između kristala i fotomultiplikatora. Razlog tome leži u izmjerenom uzorku događaja, čiji je broj puno manji od

Cement	$(\Delta E/E)_{\text{prije}}$	$(\Delta E/E)_{\text{poslije}}$
Prvi	14.6 ± 0.2	15.5 ± 0.2
Drugi	12.3 ± 0.3	13.0 ± 0.3

Tablica 4.4: Ocjena energijske rezolucije detektora prije i poslije korekcije nelinearnosti mjerenja okomitih na kontrolni kristal u sendvičima optičkim cementom.

mjerenja sa pojedinačnim kristalima - broj događaja za bliži kristal s masti je 20 000, dok je za pojedinačna mjerenja taj broj 100 000. Također, kalibracija spektra je provedena na temelju samo dvije dvije točke, pa se i može očekivati nešto lošiji rezultat. Vidimo kako su rezultati za bliže kristale usporedivi između sendvič-konfiguracije s masti i cementom, s tim da su rezultati dobiveni za konfiguraciju s cementom nešto bolji za mjerenja bližeg kristala.

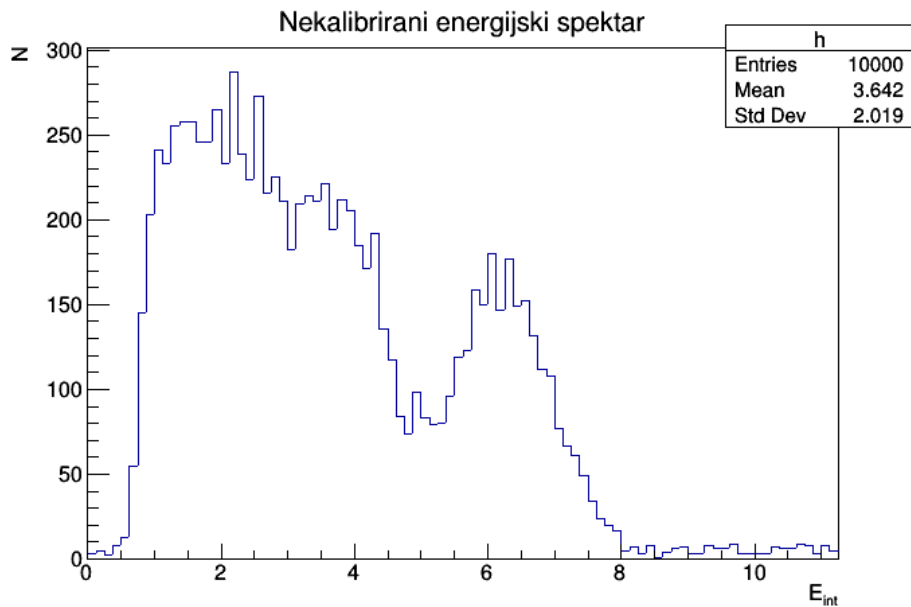
Za dalji kristal, situacija je obrnuta: bolji rezultati su dobiveni u konfiguraciji koja ima optičku mast kao vezivno optičko sredstvo. Moguće objašnjenje za to je u malom uzorku, ali i mogućoj slabijoj propagaciji svjetlosti kroz sendvič-konfiguraciju u usporedbi s konfiguracijom s masti u ovakvom postavu. U tablici 4.4 nalaze se rezultati dva pojedinačna sendviča s cementom kao vezivnim sredstvom u okomitom eksperimentalnom postavu, u kojima se vidi kako ovakvi detektori zapravo nisu toliko loši kao što nagovještava tablica 4.3, s obzirom na to da su rezultatne energijske rezolucije više od onih izmjerenih pomoću daljeg kristala.

Na slici 4.3 nalaze se integrirani spektri dobiveni iz mjerenja bližih i daljih kristala za kristale povezane sa svjetlovodom pomoću optičke masti.

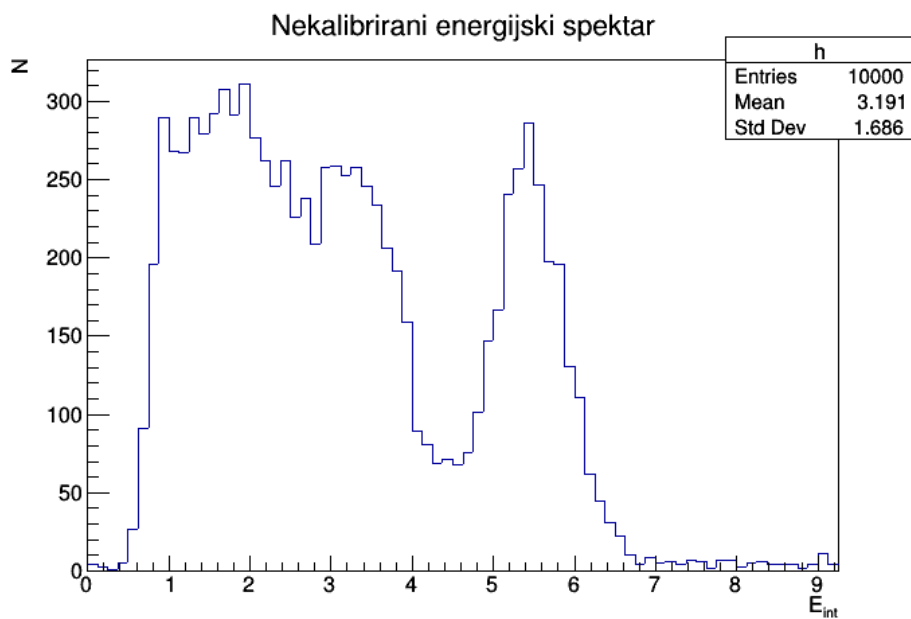
Ono što se primjećuje na spektrima je da je položaj vrha u mjerenjima daljeg kristala skoro isti kao kod vrha dobivenog mjerenjima s bližim kristalom, te je taj vrh nešto uži, što reflektira rezultat dobiven u tablici 4.3.

Na slici 4.4 nalaze se integrirani spektri dobiveni iz mjerenja bližih i daljih kristala za kristale povezane sa svjetlovodom pomoću optičkog cementa.

Na slici 4.4 primjećujemo kako je fotovrh daljeg kristala nešto širi od vrha dobivenog s bližim kristalom, što je rezultat koji smo dobili u tablici 4.3. Također, vidimo da se vrh nalazi na skoro pa istom mjestu u spektru.

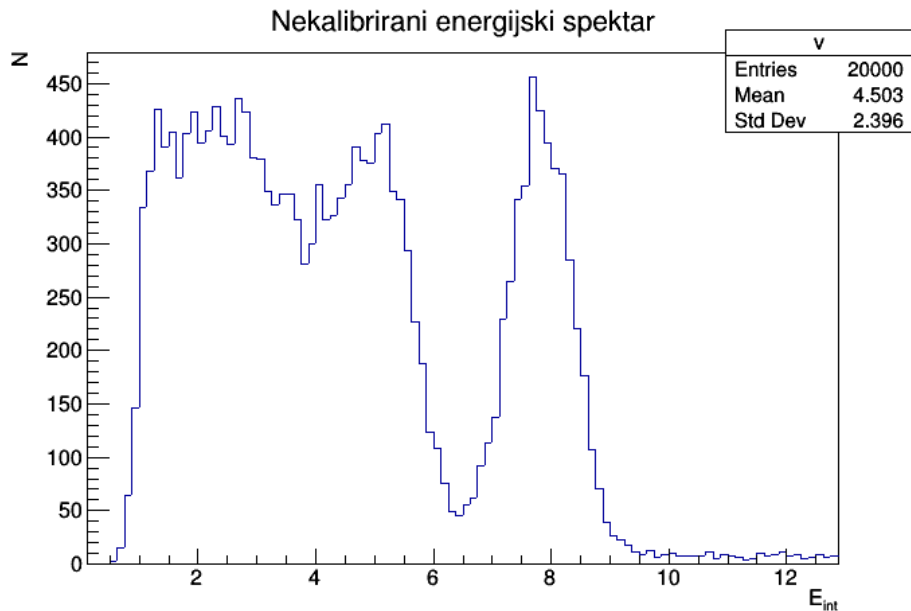


(a) Spektar dobiven mjerenjima bližeg kristala.

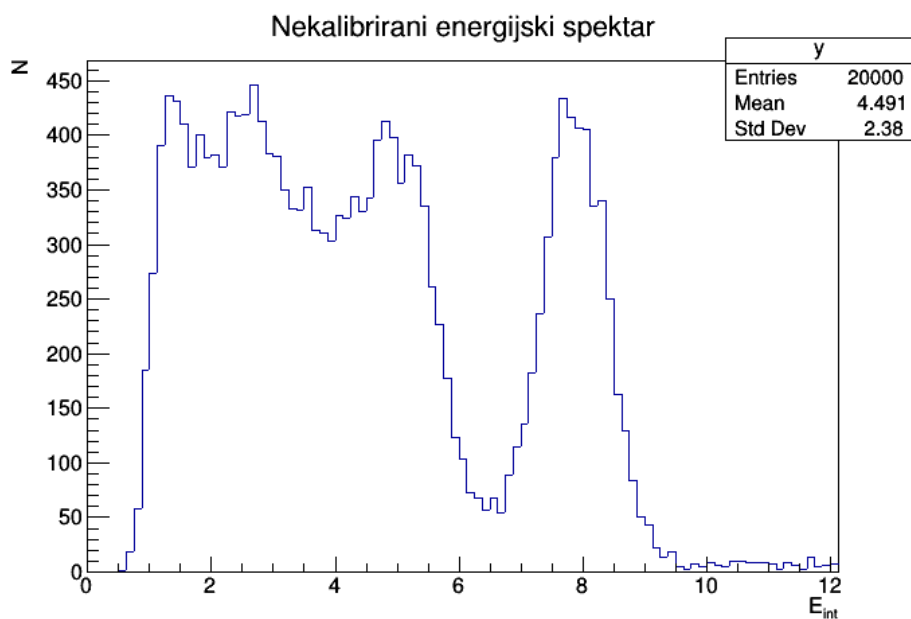


(b) Spektar dobiven mjerenjima daljeg kristala.

Slika 4.3: Usporedba spektara dobivenih mjerenjima bližeg i daljeg kristala s obzirom na fotomultiplikator, za mjerenja sendvič-konfiguracije povezane s optičkom masti.



(a) Spektar dobiven mjerenjima bližeg kristala.



(b) Spektar dobiven mjerenjima daljeg kristala.

Slika 4.4: Usporedba spektara dobivenih mjerenjima bližeg i daljeg kristala s obzirom na fotomultiplikator, za mjerenja sendvič-konfiguracije povezane s optičkim cementom.

Mjerenja s optičkom masti

Okomiti eksperimentalni postav iskorišten je za detaljnije proučavanje detektora u sendvič-konfiguraciji s masti. Temperatura okoline tijekom ovih mjerenja je iznosila $(21 \pm 1)^\circ\text{C}$. Mjerenje je provedeno bez optičkog sredstva između fotomultiplikatora i kristala, pa se za izračun stvarne rezolucije detektora koristi izraz 4.4. U svakom od mjerenja na različitim naponima je uzorak od 50 000 događaja.

Napon [V]	$(\Delta E/E)_{\text{prije}}$	$(\Delta E/E)_{\text{poslije}}$
54.5	13.65 ± 0.01	14.47 ± 0.01
55	12.7 ± 0.4	13.5 ± 0.4
55.5	13.0 ± 0.3	13.8 ± 0.3
56	12.2 ± 0.3	12.9 ± 0.3
56.5	12.4 ± 0.2	13.1 ± 0.2
57	12.5 ± 0.4	13.3 ± 0.4

Tablica 4.5: Relativne rezolucije detektora prije i poslije kalibracije te rezultatna promjena nakon kalibracije za sendvič povezan sa svjetlovodom optičkom masti.

U tablici 4.5 možemo vidjeti rezultate ovog mjerenja. Najlošiji rezultati se dobivaju za najmanji napon, što je očekivano. Iznosi rezolucija na ostalim naponima su unutar statističke pogreške, tako da su rezultati konzistentni na različitim naponima. Usporedbom s rezultatima mjerenja sendvič-konfiguracije s cementom u tablici 4.4, očito je da i u ovom slučaju, s detektorima koji koriste mast se dobivaju niže energijske rezolucije detektora.

4.3 CsI:Tl

Za ispitivanje karakteristika kristala CsI-a, prag detekcije signala je postavljen na 3 mV. Broj događaja u svim mjerenjima za svaki pojedinačni napon je 20 000. Mjerenja su napravljena kako je opisano u poglavlju 3.2. Korišteni radioaktivni izvor u svim mjerenjima je ^{22}Na .

4.3.1 Rezultati mjerenja pojedinačnih kristala

Mjerenja bez optičkog sredstva između kristala i fotodetektora

U tablicama 4.5 i 4.6 nalaze se rezultati obrade podataka za mjerenja energijske rezolucije detektora s kristalom CsI:Tl bez optičkog veziva između kristala i fotomul-

tiplikatora. Prosječna temperatura okoline je $(20\pm 1)^\circ\text{C}$.

Napon [V]	$(\Delta E/E)_{\text{prije}}$	$(\Delta E/E)_{\text{poslije}}$	Δ
54.5	14 ± 1	15.7 ± 0.5	12.1
55.5	12 ± 1	12.5 ± 0.5	4.2
56.5	12 ± 1	13.5 ± 0.5	12.5
57.5	11 ± 1	12.5 ± 0.5	13.6

Tablica 4.6: Relativne rezolucije detektora prije i poslije kalibracije te rezultatna promjena nakon kalibracije za 1. kanal.

Prosječno širenje vrha u slučaju kristala CsI:Tl nakon kalibracije i kompenzacije nelinearnog odziva je 11 ± 2 . U mjerenjima na drugom kanalu, pošto su uvjeti mjerenja bili jednaki, rezolucija detektora procijenjena je preko izraza

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_{\text{poslije}} = \left(\frac{\Delta E}{E}\right)_{\text{prije}} \times 1.1. \quad (4.6)$$

Napon [V]	$(\Delta E/E)_{\text{prije}}$	$(\Delta E/E)_{\text{poslije}}$
54.5	13 ± 1	14 ± 1
55.5	12.4 ± 0.5	13.6 ± 0.5
56.5	12 ± 1	13 ± 0.5
57.5	13 ± 1	14 ± 1

Tablica 4.7: Relativne rezolucije detektora prije i poslije kalibracije te rezultatna promjena nakon kalibracije za 2. kanal.

Uspoređujući mjerenja bez optičkog vezanja kristala GaGG:Ce u tablici 4.1 i CsI:Tl prvo vidimo kako su širine vrhova u prosjeku više proširene kalibracijom spektara CsI:Tl, što upućuje nešto lošiju kalibraciju spektra CsI:Tl, što se i može očekivati, budući da je broj događaja u uzorku sa GaGG:Ce pet puta veći. U mjerenjima na 1. kanalu kristala CsI:Tl, vidimo kako su dobivene relativne rezolucije detektora usporedive s onima dobivenim s kristalom GaGG:Ce, dok su rezolucije na kanalu 2 dosta lošije od onih dobivenih sa spektrom GaGG:Ce.

Mjerenja s optičkom masti između kristala i fotodetektora

U tablicama 4.7 i 4.8 nalaze se rezultati obrade podataka za mjerenja energijske rezolucije detektora koji ima optičku mast između kristala i fotodetektora. Prosječna

temperatura okoline je $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$. Rezolucije detektora nakon kalibracije i korekcije za nelinearni odaziv su dobivene preko izraza 4.6.

Napon [V]	$(\Delta E/E)_{\text{prije}}$	$(\Delta E/E)_{\text{poslije}}$
54.5	16 ± 1	18 ± 1
55.5	13 ± 1	14 ± 1
56.5	13 ± 1	14 ± 1
57.5	14 ± 1	15 ± 1

Tablica 4.8: Relativne rezolucije detektora prije i poslije kalibracije te rezultatna promjena nakon kalibracije za 1. kanal.

Napon [V]	$(\Delta E/E)_{\text{prije}}$	$(\Delta E/E)_{\text{poslije}}$
54.5	13 ± 1	14 ± 1
55.5	12 ± 1	13 ± 1
56.5	12 ± 1	13 ± 1
57.5	12 ± 1	13 ± 1

Tablica 4.9: Relativne rezolucije detektora prije i poslije kalibracije za 2. kanal.

Usporedbom dobivenih rezultata sa rezultatima detektorima koji sadrže GaGG:Ce kristal umjesto CsI u tablici 4.2. Vidimo kako su rezultati za oba ova mjerenja lošiji nego u mjerenjima istog postava bez optičkog veziva. Usporedbom rezultata mjerenja s masti u ova dva detektora, vidimo kako su rezultati slični, tj. nema prevelikih odstupanja u vrijednostima relativne rezolucije detektora u detektoru koji koristi GaGG:Ce kristal s obzirom na detektor koji se sastoji od CsI:Tl kristala. Vidimo kako su greške u slučaju kristala CsI:Tl veće nego u slučaju GaGG:Ce, što je posljedica broja događaja u mjerenjima, kao i u slučaju mjerenja bez masti. Za veću preciznost rezultata, mjerenje se treba napraviti s većim uzorkom.

Mjerenja sa silikonskom masti između kristala i fotodetektora

U tablicama 4.10 i 4.11 nalaze se rezultati obrade podataka za mjerenja energijske rezolucije detektora sa silikonskom masti kao optičkom vezivu kristala s fotodetektorom. Prosječna temperatura okoline za vrijeme prikupljanja uzorka je $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$. Rezolucije detektora nakon kalibracije i korekcije za nelinearni odaziv su dobivene preko izraza 4.6.

Napon [V]	$(\Delta E/E)_{\text{prije}}$	$(\Delta E/E)_{\text{poslije}}$
54.5	17 ± 1	19 ± 1
55.5	14 ± 1	15 ± 1
56.5	14 ± 1	15 ± 1
57.5	13 ± 1	14 ± 1

Tablica 4.10: Relativne rezolucije detektora prije i poslije kalibracije za 1. kanal.

Napon [V]	$(\Delta E/E)_{\text{prije}}$	$(\Delta E/E)_{\text{poslije}}$
54.5	24 ± 2	26 ± 2
55.5	13 ± 1	14 ± 1
56.5	14 ± 1	15 ± 1
57.5	13 ± 1	14 ± 1

Tablica 4.11: Relativne rezolucije detektora prije i poslije kalibracije za 2. kanal.

Iz tablica rezultata vidimo kako su rezultati mjerenja sa silikonskom masti dosta lošija od mjerenja sa i bez masti između kristala i detektora.

Mjerenja s aluminijskom folijom kao omotačem kristala CsI-a

U tablicama 4.12 i 4.13 nalaze se rezultati obrade podataka za mjerenja energijske rezolucije detektora na U ovim mjerenjima nisu korištena optička sredstva. Prosječna temperatura okoline je $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$. Rezolucije detektora nakon kalibracije i korekcije za nelinearni odaziv su dobivene preko izraza 4.6.

Napon [V]	$(\Delta E/E)_{\text{prije}}$	$(\Delta E/E)_{\text{poslije}}$
54.5	14 ± 1	15 ± 1
55.5	14 ± 1	15 ± 1
56.5	12 ± 1	13 ± 1
57.5	10.8 ± 0.4	11.9 ± 0.4

Tablica 4.12: Relativne rezolucije detektora prije i poslije kalibracije za 1. kanal.

U ovim mjerenjima vidimo nešto bolje rezultate od mjerenja provedenih sa optičkim sredstvom između kristala i fotomultiplikatora. Usporedbom s tablicama 4.8 i 4.9, te 4.10 i 4.11, energijske rezolucije dobivene mjerenjima s aluminijskom folijom su bolje na skoro svim naponima. Također, u ovim mjerenjima izmjerena je najniža energijska rezolucija detektora testiranih u svim mjerenjima. Na naponu od 57.5 V, ta rezolucija iznosi $(11.9 \pm 0.4)\%$.

Napon [V]	$(\Delta E/E)_{\text{prije}}$	$(\Delta E/E)_{\text{poslije}}$
54.5	15±1	17±1
55.5	11.5±0.4	12.7±0.4
56.5	12±1	13±1
57.5	12±1	13±1

Tablica 4.13: Relativne rezolucije detektora prije i poslije kalibracije za 2. kanal.

4.3.2 Usporedba rezultata dobivenih mjerenjima s kristalima CsI:Tl

U tablici 4.14 se nalaze rezolucije detektora s obzirom na eksperimentalni postav, a rezultati su za 1. kanal, dok su u tablici 4.15 rezultati dobiveni na 2. kanalu.

Napon [V]	teflon - bez sredstva	optička mast	silikonska mast	aluminijska folija
54.5	15.7±0.5	18±1	19±1	15±1
55.5	12.5±0.5	14±1	15±1	15±1
56.5	13.5±0.5	14±1	15±1	13±1
57.5	12.5±0.5	15±1	14±1	11.9±0.4

Tablica 4.14: Usporedba rezultata dobivenih za mjerenja iz 1. kanala. U tablici se nalaze energijske rezolucije detektora s CsI:Tl kristalima.

Napon [V]	teflon - bez sredstva	optička mast	silikonska mast	aluminijska folija
54.5	14±1	14±1	26±2	17±1
55.5	13.6±0.5	13±1	14±1	12.7±0.4
56.5	13±1	13±1	15±1	13±1
57.5	14±1	13±1	14±1	13±1

Tablica 4.15: Usporedba rezultata dobivenih za mjerenja iz 2. kanala. U tablici se nalaze energijske rezolucije detektora s CsI:Tl kristalima. Svi rezultati su napisani u obliku postotka.

Usporedbom vrijednosti u tablici 4.14, vidimo kako su najprecizniji rezultati dobiveni mjerenjima bez optičkog sredstva dok je kristal omotan u teflon. Najlošije rezolucije su u mjerenjima na 54.5 V. Najbolju relativnu energijsku rezoluciju detektora smo dobili u mjerenjima s aluminijskom folijom, te mjerenja kad je kristal omotan u teflon na naponima 55.5 i 57.5 V. Ostali rezultati ostalih mjerenja međusobno usporedivi.

Usporedbom vrijednosti u tablici 4.15, vidimo kako su svi rezultati mjerenja međusobno slični. Rezultati mjerenja s kristalom u teflonu u ovom slučaju nisu dala najbolju

rezoluciju detektora, već je ona usporediva s rezultatima drugih mjernih metoda. Najmanje rezolucije kristala su ponovno izmjerene na 54.5 V, u slučaju mjerenja sa silikonskom masti. U mjerenjima u kojima je kristal omotan aluminijskom folijom je dobivena najveća rezolucija na naponu 55.5 V.

5 Zaključak

U ovom radu ispitani su scintilacijski detektori koji se sastoje od kristala GaGG:Ce i CsI:Tl, u cilju istraživanja svojstava kristala GaGG:Ce za upotrebu u detekciji zračenja, primarno u pozicijski osjetljivim detektorima gama zračenja. Koristila su se optička veziva: optička mast i silikonska mast, kao i konfiguracija bez sredstva između kristala i fotomultiplikatora. Također su se proučavali kristali GaGG:Ce u kombinaciji sa svjetlovodom te kako se ponašaju kristali CsI:Tl omotani u aluminijsku foliju, umjesto u teflon.

Najbolje relativne energijske rezolucije detektora su se izmjerile u slučaju kristala GaGG:Ce, u mjerenjima koja su izvedena bez optičkih sredstava između kristala i fotomultiplikatora, što vrijedi i za mjerenja s kristalima CsI:Tl. Rezolucije dobivene s optičkom masti su usporedive s vrijednostima dobivenim za mjerenja CsI:Tl. Kako su razlike u rezultatima između ova dva kristala vrlo male, a kako su mjerenja s CsI:Tl kristalima napravljena s pet puta manjim uzorkom, kao sljedeći korak u ispitivanju ovih detektora bi se trebala napraviti duža i detaljnija studija CsI:Tl, da bi se preciznost mjerenja povećala, kako bismo mogli opaziti značajnije razlike između rezultata ovih mjerenja.

U mjerenjima sa sendvič-konfiguracijom, testirani su kristali GaGG:Ce postavljeni bliže i dalje od fotomultiplikatora. Usporedbom mjerenja sendvič-konfiguracije koja kao vezivni materijal između kristala i fotomultiplikatora koristi optičku mast sa sendvič-konfiguracijom koja kao vezivno sredstvo koristi optički cement, vidimo kako su rezultati za mjerenja bližeg kristala nešto sličnija od mjerenja daljih kristala, gdje je razlika u dobivenim rezolucijama oko 8%, što je duplo veća razlika nego u mjerenjima za bliže kristale. Dodatna mjerenja su napravljena da bi se testirali sendviči s cementom u okomitom postavu na kontrolni kristal, koja su pokazala da rezolucije dobivene sa ovakvim postavom ipak usporedivi s rezultatima dobivenim sa sendvič-konfiguracijom s masti. Ove konfiguracije bi trebalo ponoviti s većim brojem mjerenja, pošto su mjerenja napravljena tako da je uzorak za ove sendviče bio 20 000 događaja, te još preciznije složenim sendvič-konfiguracijama. Fotovrhovi bližeg i daljeg kristala u slučaju sendvič-konfiguracije s masti i postava s cementom se nalaze na skoro istim položajima, što je priželjkivani rezultat ovog eksperimenta, koji govori

da se spektar kristala sendvič-konfiguracije gotovo ne mijenja s obzirom na to koji je kristal pobuđen.

U mjerenjima pojedinačnih kristala CsI:Tl s aluminijskom folijom bez optičkog sredstva i sa silikonskom masti kao optičkim sredstvom. vidimo kako su rezultati dobiveni sa aluminijsku foliju slični rezultatima dobivenim s teflonom, a najviša rezolucija detekora izmjerila upravo u ovom postavu. U mjerenjima sa silikonskom masti, dobiveni su najlošiji rezultati od svih mjerenja. Najniža izmjerena rezolucija je na naponu 54.5 V i iznosi $(26 \pm 2)\%$. Silikonska mast se pokazala kao najlošije optičko sredstvo koje se koristilo u ovim mjerenjima, dok su rezultati dobiveni s aluminijem usporedivi s mjerenjima kristala omotanih u teflon, te bi se ovi rezultati trebali bolje proučiti.

Dodaci

Dodatak A Tablice sa srednjim vrijednostima položaja fotovrhova i pripadne standardne devijacije prije i nakon kalibracije i korekcije nelinearnosti odziva fotomultiplikatora

Napon [V]	σ_{prije} [MeV]	$\sigma_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]	μ_{prije} [MeV]	$\mu_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]
54.5	23.4±0.4	30±1	415±1	511±1
55	33±1	29.50±0.4	606±1	510.5±0.4
55.5	40±1	29±1	803±1	511.2±0.5
56	53±1	28±1	1017±1	510.9±0.5
56.5	62±2	28±1	1266±1	511±1
57	78±1	27.9±0.5	1551±1	510±0.7
57.5	98±3	26±1	1959±2	494±1

Tablica A.1: Rezultati prije i poslije prilagodbe za GaGG:Ce pojedinačne kristale u postavu bez optičkog veziva.

Napon [V]	σ_{prije} [MeV]	$\sigma_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]	μ_{prije} [MeV]	$\mu_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]
54.5	30±1	30±1	511±1	511±1
55	38±1	30.5±0.3	7051±1	5111±1
55.5	52±1	29±1	963±1	511±1
56	62±2	30±1	1199±1	510±1
56.5	82±3	30±1	1491±2	511±1
57	98±2	30±1	1836±2	511±1
57.5	117±4	29±1	2287±3	492±1

Tablica A.2: Rezultati prije i poslije prilagodbe za GaGG:Ce pojedinačne kristale u postavu s optičkom masti.

Bliži kristal	σ_{prije} [MeV]	$\sigma_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]	μ_{prije} [MeV]	$\mu_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]
Mast	41±1	44±1	520±1	573±1
Cement	32±1	36±1	464±1	511±1
Dalji kristal	σ_{prije} [MeV]	$\sigma_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]	μ_{prije} [MeV]	$\mu_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]
Mast	31±1	34±1	506±1	558±1
Cement	34±1	35±1	356±1	553±1

Tablica A.3: Rezultati prije i poslije prilagodbe za bliže i dalje GaGG:Ce kristale foto-multiplikatoru u sendvič-konfiguraciji GaGG:Ce-svjetlovod-GaGG:Ce

Cement	σ_{prije} [MeV]	$\sigma_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]	μ_{prije} [MeV]	$\mu_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]
Prvi	75±1	32.8±0.4	1209±1	511.2±0.4
Drugi	78±1	29.5±0.1	1492±1	371±1

Tablica A.4: Rezultati prije i poslije prilagodbe za dvije sendvič-konfiguracije GaGG:Ce-svjetlovod-GaGG:Ce s cementom kao optičkim vezivom

Napon [V]	σ_{prije} [MeV]	$\sigma_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]	μ_{prije} [MeV]	$\mu_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]
54.5	23.4±0.1	310±2	402.9±0.1	5110±2
55	29±1	300±1	538±1	511±1
55.5	40±1	28±1	703±1	511±1
56	53±1	29±1	902±1	511±1
56.5	58±2	30±1	1101±1	511±1
57	71±2	30±1	1335±2	511±1

Tablica A.5: Rezultati prije i poslije prilagodbe za sendvič-konfiguraciju u kojoj su GaGG:Ce kristali povezani optičkom masti sa svjetlovodom.

Napon [V]	σ_{prije} [MeV]	$\sigma_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]	μ_{prije} [MeV]	$\mu_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]
54.5	12±1	34±1	197.3±0.5	508±1
55.5	17±1	270±1	332±1	506±1
56.5	45±3	29±1	864±2	506±1
57.5	60±3	27±1	1284±3	506±1

Tablica A.6: Rezultati prije i poslije prilagodbe za CsI:Tl kristale u postavu bez optičkog sredstva na 1. kanalu.

Napon [V]	σ_{prije} [MeV]	$\sigma_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]	μ_{prije} [MeV]	$\mu_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]
54.5	14±1	32±1	245±1	508±1
55.5	25±1	280±1	474±1	506±1
56.5	41±3	25±1	817±2	507±1
57.5	65±3	26±1	1218±3	505±1

Tablica A.7: Rezultati prije i poslije prilagodbe za CsI:Tl kristale u postavu bez optičkog sredstva na 2. kanalu.

Napon [V]	σ_{prije} [MeV]	$\sigma_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]	μ_{prije} [MeV]	$\mu_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]
54.5	18±1	37±1	268±1	511±1
55.5	28±2	280±2	518±2	511±1
56.5	46±2	32±2	834±2	511±1
57.5	74±5	31±3	1221±5	515±2

Tablica A.8: Rezultati prije i poslije prilagodbe za CsI:Tl kristale u postavu s optičkom masti na 1. kanalu.

Napon [V]	σ_{prije} [MeV]	$\sigma_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]	μ_{prije} [MeV]	$\mu_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]
54.5	17±1	31±2	300±1	511±1
55.5	29±2	25±2	551±2	511±1
56.5	44±2	28±1	886±2	511±1
57.5	67±5	29±2	1285±5	509±2

Tablica A.9: Rezultati prije i poslije prilagodbe za CsI:Tl kristale u postavu s optičkom masti na 2. kanalu.

Napon [V]	σ_{prije} [MeV]	$\sigma_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]	μ_{prije} [MeV]	$\mu_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]
54.5	16±1	36±2	220±1	510±1
55.5	27±1	310±1	466±1	507±1
56.5	45±2	32±2	768±2	507±2
57.5	62±3	31±2	1137±3	507±1

Tablica A.10: Rezultati prije i poslije prilagodbe za CsI:Tl kristale u postavu sa sili-konskom masti na 1. kanalu.

Napon [V]	σ_{prije} [MeV]	$\sigma_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]	μ_{prije} [MeV]	$\mu_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]
54.5	25±2	50±5	249±1	511±3
55.5	31±2	260±2	545±2	509±2
56.5	52±4	31±2	889±3	503±2
57.5	72±1	21±3	1336±6	509±3

Tablica A.11: Rezultati prije i poslije prilagodbe za CsI:Tl kristale u postavu sa sili-konskom masti na 2. kanalu.

Napon [V]	σ_{prije} [MeV]	$\sigma_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]	μ_{prije} [MeV]	$\mu_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$ [MeV]
54.5	14±1	34±1	228±1	505±1
55.5	27±2	260±1	468±2	507±2
56.5	39±2	29±2	767±2	506±2
57.5	53±2	24±1	1148±3	507±2

Tablica A.12: Rezultati prije i poslije prilagodbe za CsI:Tl kristale u postavu s alumi-nijskom folijom na 1. kanalu.

Napon [V]	σ_{prije}	$\sigma_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$	μ_{prije}	$\mu_{\text{poslije}} / \times 10^{-3}$
54.5	18±1	33±1	274±1	507±1
55.5	26±1	26±1	533±2	467±1
56.5	45±2	29±1	875±2	505±1
57.5	65±7	29±2	1306±5	504±1

Tablica A.13: Rezultati prije i poslije prilagodbe za CsI:Tl kristale u postavu s aluminijskom folijom na 2. kanalu.

Bibliography

- [1] Attix, Frank Herbert, Introduction to radiological physics and radiation dosimetry, Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH Co. KGaA, 2004.
- [2] Wieczorek, A., Development of novel plastic scintillators based on polyvinyltoluene for the hybrid J-PET/MR tomograph. Doktorski rad. Krakow: Institute of Physics, Jagiellonian University, 2017.
- [3] Van der Veldt, A.A.M, Smit, E.F. and Lammertsma, A.A. Positron Emission Tomography as a method of measuring drug delivery to tumors in vivo: the example of [11C] docetaxel. *Frontiers in Oncology*. 2013.
- [4] Mackintosh R., Ai-Khalili J., Jonson B., Pena Nucleus T.: A trip into the heart of matter., Baltimore, MD : The Johns Hopkins University Press, , 2001
- [5] Opis rada anorganičkih scintilacijskih detektora. https://www.science.mcmaster.ca/radgrad/images/6R06CourseResources/4R6Notes4_ScintillationDetectors.pdf, 29. 7. 2019.
- [6] Tavernier, S., Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- [7] Gačić, V. Opažanje gama zračenja segmentiranim scintilacijskim detektorima. Diplomski rad. Zagreb : Prirodoslovno-matematički fakultet, 2017.
- [8] Hebecker D., Development of a single photon detector with wavelength shifting and light guiding technology. Diplomski rad. Bonn: Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, 2014.
- [9] Graf ovisnosti udarnog presjeka fotona s njegovom energijom https://www.researchgate.net/figure/Photon-energy-dependent-cross-sections-Cross-sections-of-the-photoelectric-absorption_fig18_281185409, 21. 9. 2019.

- [10] S13360 series MPPCs for precision measurement, https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13360_series_kapd1052e.pdf 22. 9. 2019.
- [11] MPPC® and MPPC® module for precision measurement, https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/mppec_kapd0004e.pdf, 19. 9. 2019.
- [12] Shematski prikaz Comptonovog raspršenja. <http://universe-review.ca/I15-72-Compton1.jpg>, 23. 9. 2019.
- [13] Harpen, M.D.: Positronium: Review of symmetry, conserved quantities and decay for the radiological physicist. Medical Physics, Vol. 31, No. 1, January 2004
- [14] Cesium Iodide Scintillation Material, <https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/csitl-and-na-material-data-sheet.pdf>, 25. 9. 2019
- [15] Svojstva kristala CsI(Tl) https://www.advatech-uk.co.uk/csi_tl.html, 25. 9. 2019
- [16] Svojstva kristala GaGG:Ce, https://www.advatech-uk.co.uk/gagg_ce.html, 25. 9. 2019
- [17] Belogurov S., Bressi G., Carugno G., Conti E., Ianuzzi D., Meneguzzo A. T.: CsI(Tl) infrared scintillation light yield and spectrum, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment Volume 449, Issues 1–2, 11 July 2000, Pages 254–259