

# Opažnje gama zračenja segmentiranim scintilacijskim detektorima

---

Gačić, Valentina

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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:217:194633>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-29**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

Valentina Gačić

OPAŽANJE GAMA ZRAČENJA  
SEGMENTIRANIM SCINTILACIJSKIM  
DETEKTORIMA

Diplomski rad

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ  
FIZIKA I INFORMATIKA; SMJER NASTAVNIČKI

**Valentina Gačić**

Diplomski rad

**Opažanje gama zračenja  
segmentiranim scintilacijskim  
detektorima**

Voditelj diplomskog rada: doc. dr. sc. Mihael Makek

Ocjena diplomskog rada: \_\_\_\_\_

Povjerenstvo: 1. \_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

Datum polaganja: \_\_\_\_\_

Zagreb, 2017.

Ovom prilikom želim zahvaliti svom mentoru doc.dr.sc Mihaelu Makeku na vodstvu, iznimnoj pomoći, svim savjetima i strpljenju pri izradi ovog diplomskog rada. Hvala Vam što ste uvijek bili dostupni kada mi je pomoć bila potrebna.

Veliko hvala i svim profesorima, a posebice profesorici P. Pećini na ukazanom povjerenju; iako nikada nisam bila "Vaš" student od Vas sam jako puno naučila. Također se želim zahvaliti i svim ostalim djelatnicima Fizičkog odsjeka koji su mi bili od velike pomoći tijekom ovih pet godina studija.

Osobito se želim zahvaliti svojim roditeljima na bezuvjetnoj ljubavi i podršci. Mama, oprost za svaku sijedu; Tata, oprost za izgublenu kosu. Hvala i ostalim članovima uže i šire obitelji, a posebno tetkama na svim ručkovima, kavama, druženjima, napunjenim frižiderima... Veliko hvala mojim sestrama Maji, Marti i Emi: "Imati sestru znači imati najboljeg prijatelja do kraja života!".

Želim se zahvaliti i svim prijateljima, kako onima koje sam stekla za vrijeme studija tako i onima koji su uz mene od malih nogu. Posebno hvala Katarini i Nikoli na zajedničkim učenjima, bezbrojnim kavama, ponekim izlascima. Vi ste obitelj koju sam si sama birala. Hvala i Vedrani na svim donesenim voćkama, a posebno hvala na rajčici! Hvala i Filomeni, iako je mala još, već je pravi prijatelj.

Za kraj, želim se zahvaliti Anti na strpljenju, razumijevanju i pruženoj ljubavi, svim vožnjama od okretišta do okretišta i točnim vremenskim prognozama.

Bez svih Vas ovo ništa ne bi bilo moguće!

## Sažetak

Mnogi dijagnostički sustavi koji se danas primjenjuju u medicini se zasnivaju na temeljnim fizikalnim pojavama. Jedna od najpoznatijim tehnika medicinskog oslikavanja je pozitronska emisijska tomografija (PET). Princip rada PET-a se temelji na detekciji dvaju fotona nastalih pri anihilaciji pozitrona. U reakciji pozitrona s elektronom dolazi do stvaranja dvaju gama zraka energije  $511 \text{ keV}$  koje se emitiraju pod kutom od  $180^\circ$ . U Laboratoriju za nuklearnu fiziku konstruiran je scintilacijski detektor od LFS scintilacijskog kristala i  $4 \times 4$  MPPC silicijskog fotomultiplikatora. U ovom diplomskom radu mjerene su energije gama zračenja koje potječe od anihilacije pozitrona nastalog pri  $\beta^+$  raspadu izotopa natrija  $^{22}\text{Na}$ . Također su ispitana i važna svojstva detektora kao što su energijska i vremenska razlučivost. Osim toga, istražene su i ovisnosti amplitude dobivenih signala iz detektora o naponu, ovisnosti amplitude signala o temperaturi i kako udaljenost točke interakcije kolimiranog snopa gama zračenja od fotomultiplikatora utječe na dobivene signale.

Ključne riječi: scintilacijski detektor, pozitronska anihilacija

# Gamma radiation measurements with segmented scintillation detectors

## Abstract

Many diagnostic systems that are used in medicine today are based on fundamental laws of physics. One of the most important techniques for medical imaging is positron emission tomography (PET). PET is based on the principle of detecting gamma radiation which is produced by electron-positron annihilation in which we observe two resulting photons, both having an energy of around  $511\text{keV}$  and are emitted at an angle of  $180^\circ$ . In our nuclear physics laboratory, a scintillation detector was constructed out of LFS scintillation crystals and  $4 \times 4$  MPPC silicon photomultiplier. In this diploma thesis, we measured the energy of gamma rays from the annihilation of positrons which were created by  $\beta^+$  decay of sodium isotope  $^{22}\text{Na}$ . Some important detector properties were also evaluated, such as energy and time resolution. In addition, we explored signal amplitude dependence of voltage, signal amplitude dependence of temperature and how the gamma beam distance from the photomultiplier affects the obtained signals.

Keywords: scintillation detector, positron annihilation

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
1.1	Interakcija gama zračenja s materijom . . . . .	1
1.2	Scintilacijski detektori . . . . .	5
1.3	Anorganski kristali . . . . .	7
1.4	Silicijski fotomultiplikator . . . . .	9
1.5	Primjena scintilacijskih detektora u nuklearnoj medicini . . . . .	13
1.5.1	Gama kamera . . . . .	13
1.5.2	Jednofotonska emisijska kompjuterizirana tomografija, SPECT .	13
1.5.3	Pozitronska emisijska tomografija, PET . . . . .	14
<b>2</b>	<b>Eksperimentalni postav</b>	<b>16</b>
2.1	LFS scintilator . . . . .	16
2.2	Matrica silicijskih fotomultiplikatora . . . . .	18
2.3	Pojačala . . . . .	19
2.4	Digitalizator impulsa . . . . .	20
2.5	Radioaktivni izvor . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Mjerenja i rezultati</b>	<b>22</b>
3.1	Napon proboja . . . . .	24
3.2	Odgovor detektora . . . . .	26
3.2.1	Ovisnost odgovora detektora o naponu . . . . .	27
3.2.2	Ovisnost odgovora detektora o temperaturi . . . . .	31
3.2.3	Broj opaljenih mikroćelija . . . . .	33
3.3	Kalibracija detektora . . . . .	38
3.4	Energijska razlučivost . . . . .	40
3.5	Vremenska razlučivost . . . . .	42
3.6	Ispitivanje oblika signala . . . . .	46
<b>4</b>	<b>Zaključak</b>	<b>52</b>
<b>5</b>	<b>Metodički dio</b>	<b>54</b>
	<b>Literatura</b>	<b>75</b>

# 1 Uvod

Gama zračenje ima važnu ulogu, ne samo u istraživanjima u nuklearnoj fizici i fizici čestica, već i u medicinskim primjenama i industriji. Nuklearne tehnike koriste se u medicini za otkrivanje bolesti (dijagnostika) i liječenje (terapija) raka. Jedna od najpoznatijih dijagnostičkih tehnika u nuklearnoj medicini je pozitronska emisijska tomografija (PET). Pozitronska emisijska tomografija se temelji upravo na detekciji gama zračenja koje potječe od anihilacije pozitrona. Pri anihilaciji pozitrona i elektrona dolazi do emisije dvaju gama zraka koje imaju identičnu energiju i emitiraju se pod kutom od  $180^\circ$ . Gama zračenje možemo detektirati scintilacijskim detektorima. Scintilacijski detektori su jedni od najčešćih i najraširenijih detektora u nuklearnoj fizici i fizici čestica. Detektor se sastoji od scintilatora, materijala koji upijanjem elektromagnetskog zračenja ili snopa nuklearnih čestica emitira vidljivu svjetlost (scintilacije). Prvi uređaj za detekciju čestica koji je radio na principu scintilacija konstruirao je William Crookes 1903. Uređaj se sastojao od fluorescentnog ekrana čiji bi premaz od cinkovog sulfida (ZnS) stvarao slabe scintilacije svaki put kada bi bio pogođen  $\alpha$  česticom. Zbog bljeskova svjetlosti koje je emitirao, uređaj je nazvan spintariskop po grčkoj riječi spinter što znači iskra. Scintilacije su bile vidljive pomoću mikroskopa promatranjem u zamračenoj prostoriji. Daljnjim napretkom tehnologije razvijen je fotomultiplikator, uređaj koji scintilacije pretvara u električni impuls koji se dalje može analizirati i dati informacije o upadnom zračenju.

## 1.1 Interakcija gama zračenja s materijom

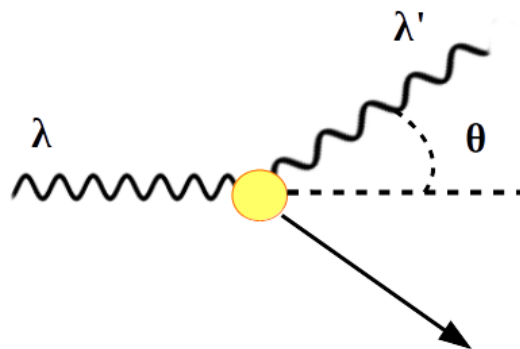
Gama zračenje je vrsta elektromagnetskog zračenja vrlo visoke frekvencije i energije. Gama zrake su otkrili 1900. godine Villard i Becquerel kao zračenje iz urana i radija [1]. Iako gama zračenje ubrajamo u oblike radioaktivnog raspada, kod gama raspada ne dolazi do promjene broja protona ili neutrona u jezgri kao kod alfa i beta raspada. Kod gama raspada dolazi do oslobođenja energije iz pobuđene jezgre emisijom gama zrake koja ima znatno veću prodornost nego alfa i beta zrake. Prolaskom kolimiranog snopa gama zračenja kroz materijal njegov intenzitet eksponencijalno slabi s debljinom materijala:  $I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu_l x}$ , gdje je  $I_0$  početni intenzitet zračenja,  $x$  debljina materijala, a  $\mu_l$  linearni koeficijent atenuacije.



Ovakva ovisnost gama zraka o debljini materijala kroz koji prolaze neposredna je posljedica načina interakcije gama zraka s materijalom. Najvažnija tri načina interakcije gama zračenja s materijalom za područja energija gama zraka emitiranih iz radioaktivnih izvora su:

- Comptonovo raspršenje
- Fotoelektrični efekt
- Tvorba parova  $e^+e^-$

Comptonovo raspršenje je proces u kojemu gama zraka gubi samo dio svoje energije u interakciji s elektronom. Zakon očuvanja energije i impulsa ne dozvoljava potpuni prijenos energije gama zrake slobodnom ili slabo vezanom elektrону. Prilikom sudara fotona i slobodnog elektrona, foton se raspršuje o elektron pod kutom  $\theta$  u odnosu na smjer upada i dio energije predaje elektronu. Budući da foton dio energije preda elektronu, dolazi do povećanja njegove valne duljine (1.1).



Slika 1.1: Grafički prikaz Comptonovog raspršenja. Upadni fotona valne duljine  $\lambda$  raspršuje se pod kutom  $\theta$  na mirnom elektronu.

Nakon raspršenja, energija elektrona je jednaka gubitku energije upadne gama zrake umanjene za energiju vezanja elektrona. No, budući da je energija vezanja elektrona uglavnom puno manja od razlike energije upadne ( $E_\gamma$ ) i raspršene gama zrake ( $E_\gamma'$ ), možemo reći da je energija elektrona nakon raspršenja upravo jednaka toj razlici energija:  $E_e = E_\gamma - E_\gamma'$ . Iz zakona očuvanja energije i zakona očuvanja količine gibanja slijedi da je razlika valne duljine raspršenog ( $\lambda'$ ) i upadnog fotona ( $\lambda$ ) jednaka:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e \cdot c}(1 - \cos\theta). \quad (1.1)$$

Iz jednadžbe (1.1) je vidljivo da je valna duljina raspršene gama zrake najveća kada se zraka odbije pod kutom od  $180^\circ$ . Budući da je valna duljina gama zrake obrnuto proporcionalna njenoj energiji ( $E_\gamma = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ ), tada je energija raspršene gama zrake minimalna, a prijenos energije s fotona na elektron najveći. Maksimalan prijenos energije s fotona na elektron u spektru je poznat kao Comptonov rub (eng. *Compton edge*). Kada se gama zraka rasprši pod malim kutom  $\theta$ , prijenos energije je vrlo mali te odbijeni elektron ima energiju vrlo blizu nule. Ponekad gama zraka može biti raspršena unatrag, pod kutom od  $180^\circ$ , u materijalu koji okružuje detektor. Ako je nakon toga ta zraka apsorbirana u detektoru ona može biti vidljiva u dobivenom spektru iz scintilacijskog detektora. Takvo raspršenje nazivamo raspršenjem unazad (eng. *back-scattering*).

Fotoelektrični efekt je fizikalna pojava kod koje djelovanjem elektromagnetskim zračenjem dolazi do izbijanja vezanih elektrona iz atoma. Proučavanjem elektromagnetskih valova tu je pojavu otkrio 1887. H. Hertz [2]. Hertz je primijetio da se među elektrodama cijevi s plinom pojavljuje iskra pri znatno nižem naponu ukoliko se elektrode obasjaju ultraljubičastom svjetlošću. 1888. godine, Hallwachs [3] je obasjavajući metalne pločice ultraljubičastom svjetlošću primijetio da iz metala izlaze negativno nabijene čestice. U nizu daljnjih eksperimenata otkriveno je nekoliko svojstava fotoelektričnog efekta koja su bila u kontradikciji s dotadašnjim predodžbama o elektromagnetskim valovima. Na primjer, pri mjerenju energije fotoelektrona, Lenard [4] je primijetio da energija fotoelektrona ne ovisi o intenzitetu svjetlosti već o frekvenciji elektromagnetskog zračenja. Objašnjenje za fotoelektrični efekt dao je 1905. Einstein uvođenjem hipoteze o fotonima, kvantima elektromagnetskog zračenja. Elektromagnetski valovi, frekvencije  $\nu$ , predstavljaju roj čestica, fotona, energije  $h \cdot \nu$ . Pri interakciji fotona s vezanim elektronom može doći do potpune apsorpcije fotona samo ako je njegova energija veća od energije vezanja elektrona. Tu energiju vezanja nazivamo izlaznim radom  $\phi$ . Kada dođe do apsorpcije fotona, dio dobivene energije elektron utroši na svladavanje energije vezanja  $\phi$ , a ostatak prelazi u njegovu kinetičku energiju,  $E_k$ :

$$E_\gamma = E_k + \phi. \quad (1.2)$$

Fotoelektrični efekt se ne može dogoditi na slobodnom elektronu zbog zakona očuvanja energije i impulsa. Naime, kako bi vrijedio zakon očuvanja impulsa, atomska jezgra uz koju je vezan elektron mora preuzeti dio impulsa u suprotnu stranu. Budući da je u fotoelektričnom efektu gama zraka u potpunosti apsorbirana, fotoefekt je najvažnija interakcija za mjerenje energije gama zrake. U interakciji se gotovo sva energija gama zrake predaje elektronu, te ako taj elektron preda svu svoju energiju detektoru, može se uspostaviti veza između visine impulsa iz detektora i energije gama zrake. U amplitudnom spektru dobivenom iz scintilacijskog detektora tu energiju prepoznamo kao foto-vrh (eng. *photo-peak*).

Tvorba parova je proces u kojemu se jedan foton transformira u čestica-antičestica par. Za transformaciju fotona u čestica-antičestica par, foton mora minimalno imati energiju koja odgovara dvostrukoj energiji mirovanja čestice.

$$E_{\gamma} = 2 \cdot mc^2 \quad (1.3)$$

Minimalna energija fotona potrebna da bi nastao elektron-pozitron par iznosi  $E_{\gamma} = 1022 \text{ keV}$ . Nakon ovakve interakcije nastali pozitron i elektron se brzo zaustavljaju u materijalu i predaju mu svu svoju energiju, a gama zraka nestaje.

Pozitron je antičestica elektronu. Pozitron ima identičnu masu i spin kao i elektron, ali ima suprotan predznak naboja, odnosno pozitivno je nabijen. Pozitron, osim procesom tvorbe parova, može nastati i pri  $\beta^{-}$  radioaktivnom raspadu. U interakciji pozitrona s elektronom dolazi do anihilacije. Anihilacija je proces u kojemu pri sudaru čestice sa svojom antičesticom nastaju nove čestice. Anihilacija pozitrona se može dogoditi direktno, pri čemu se emitiraju dva fotona energije  $511 \text{ keV}$  u suprotnim smjerovima pod kutom od  $180^{\circ}$ . Također, u nekim materijalima elektron i pozitron mogu činiti metastabilno vezano stanje koje se naziva pozitronij (Ps). Pozitronij je vrlo sličan atomu vodika, ali nema jezgru već pozitron i elektron kruže oko zajedničkog centra mase. Vrijeme života pozitronija je vrlo kratko te također anihilira pri čemu emitira gama zračenje.

## 1.2 Scintilacijski detektori

Scintilacijski detektori se sastoje od scintilacijskog materijala (scintilatora) koji se, izravno ili preko svjetlovoda, povezuje s fotomultiplikacijskom cijevi ili silicijskim fotomultiplikatorom (SiPM). Scintilacijski materijal ima svojstvo da apsorpcijom elektromagnetskog zračenja ili nabijenih čestica proizvodi svjetlosni bljesak (scintilaciju) te se ta svjetlost zatim dovodi do fotomultiplikatora gdje se pretvara u slabu struju fotoelektrona koja se dalje pojačava. Tako dobiveni signal se može elektronski analizirati. Prolaskom kroz scintilator nabijene čestice gube energiju. Svrha scintilacijskog detektora je da energiju, koja se gubi prolaskom kroz scintilacijski materijal, pretvara u električni impuls. Scintilacijski materijali imaju svojstvo luminiscencije. Kako zračenje prolazi kroz scintilator, atomi i molekule koji sačinjavaju scintilator apsorbiraju i reemitiraju energiju upadnog zračenja u obliku vidljive svjetlosti. Ako se reemisija svjetlosti događa neposredno nakon apsorpcije (u vremenskom razmaku od  $10^{-8}$  sekundi) taj proces se naziva fluorescencija. Ako je reemisija odgođena zbog toga što je pobuđeno stanje metastabilno stanje onda se taj proces naziva fosforescencija. Vremenski razvoj procesa reemisije može se opisati [5]:

$$N(t) = \frac{N_0}{\tau_d} e^{-t/\tau_d}, \quad (1.4)$$

gdje je  $N(t)$  broj emitiranih fotona u vremenu  $t$ ,  $N_0$  je ukupan broj emitiranih fotona, a  $\tau_d$  konstanta raspada. Bolji opis, u nekim slučajevima, daje eksponencijalni raspad s dvije komponente [5]:

$$N(t) = A \cdot e^{-t/\tau_f} + B \cdot e^{-t/\tau_s}, \quad (1.5)$$

gdje su  $\tau_f$  i  $\tau_s$  konstante raspada. Općenito je jedna komponenta puno brža pa ih stoga nazivamo brza i spora komponenta. Postoji šest tipova scintilacijskih materijala koji se koriste danas. To su organski kristali, organske tekućine, plastike, stakla, plinovi i anorganski kristali.

Glavne karakteristike scintilacijskih detektora su:

#### a) ENERGIJSKA RAZLUČIVOST:

Energijska razlučivost detektora je sposobnost detektora da razluči dvije bliske energije ulaznog zračenja. Relativnu energijsku rezoluciju definiramo pomoću izraza:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{FWHM}{\mu}, \quad (1.6)$$

gdje je FWHM (eng. *Full Width at Half Maximum*) širina vrha na pola visine u spektru rekonstruirane energije, a  $\mu$  broj kanala na kojemu se nalazi maksimum vrha. Uz pretpostavku da raspodjela energije u vrhu ima oblik Gausijana FWHM možemo lako izračunati ako poznajemo standardnu devijaciju foto-vrha:  $FWHM = 2\sigma\sqrt{2\ln(2)} \approx 2,35\sigma$ .

#### b) VREMENSKI ODAZIV:

Bitna karakteristika scintilacijskih detektora je vrijeme odaziva (eng. *response time*). Vrijeme odaziva je vrijeme koje je potrebno detektoru da od trenutka dolaska upadnog zračenja generira izlazni signal. Kako bi detektor imao što bolji vremenski odaziv, bitno je da se signal što brže formira u oštar impuls. U sustavima s dva ili više detektora možemo promatrati razliku u vremenu primanja signala sa detektora i tada govorimo o vremenskoj rezoluciji. Vremensku rezoluciju sustava dva detektora predstavlja širina vrha na polovici visine histograma primanja signala s dva detektora, FWHM.

#### c) APSORPCIJA:

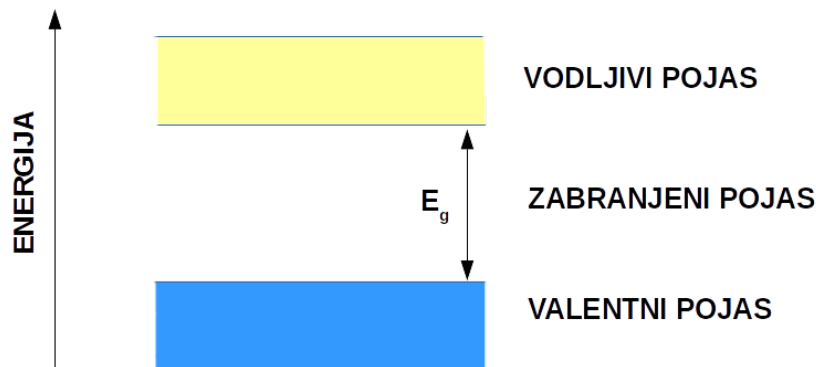
Budući da se princip rada scintilacijskog detektora temelji na svojstvu luminiscencije scintilacijskih materijala izrazito je bitno da scintilator ima veliku sposobnost apsorpcije ionizirajućeg zračenja. Osim toga, najvažniji način interakcije gama zračenja s materijom koji omogućuje mjerenje energije gama zračenja pomoću scintilacijskih detektora je fotoelektrični efekt. Veću vjerojatnost za interakciju gama zračenja u obliku fotoelektričnog efekta imaju atomi s većim rednim brojem Z. Zbog toga bi materijali od kojih je sačinjen scintilacijski detektor trebali biti od atoma što većeg rednog broja. Također, kod fotoelektričnog efekta sva energija gama zrake se predaje elektronu. Da bi taj elektron predao svu svoju energiju detektoru materijal od kojega je sačinjen detektor mora imati što kraću atenuacijsku duljinu.

#### d) MEHANIČKA I KEMIJSKA SVOJSTVA:

Ovisno o vrsti scintilatora koji čini detektor mehanička i kemijska svojstva mogu jako varirati. Neki anorganski scintilatori su higroskopni te pri uporabi moraju biti zaštićeni od vlage (na primjer NaI(Tl)). Za razliku od anorganskih scintilacijskih kristala, organski kristali su jako tvrdi pa ih je teško oblikovati, ali su zato organske plastike (poliviniltoluen, polifenilbenzen, polistiren...) izrazito fleksibilne i proizvode se u raznim veličinama i oblicima te su relativno jeftine. Za većinu scintilatora količina emitirane svjetlosti od strane scintilatora i konstanta raspada jako ovise o promjeni temperature. Taj je efekt izraženiji kod anorganskih kristala nego kod organskih scintilatora. S obzirom na raznolika svojstva scintilacijskih materijala, njihov izbor pri sastavljanju scintilacijskog detektora ovisi o njegovoj konačnoj primjeni.

### **1.3 Anorganski kristali**

Iako je poznato mnogo vrsta scintilacijskih materijala koji se upotrebljavaju za detekciju zračenja, jedni od najvažnijih scintilatora za detekciju gama zračenja su anorganski kristali. Glavno svojstvo svakog scintilacijskog materijala je da pretvara energiju ionizacije u svjetlosnu energiju. Za izradu anorganskih scintilacijskih detektora se većinom koriste kristali alkalijskih halida dopirani malom koncentracijom nečistoća koje nazivamo aktivatori. Luminiscencija anorganskih scintilatora je svojstvo kristalne strukture samoga materijala. Gotovo svi dobri anorganski scintilatori su aktivirani dodavanjem određenih atoma druge vrste u kristalnu rešetku. U slučaju NaI(Tl) dodaju se atomi talija na mjestima natrijevih atoma u kristalnoj rešetci. Te nečistoće čine sami kristal luminiscentnim, pa se mjesta gdje se nečistoće nalaze nazivaju luminiscentni centri. Elektroni su u kristalu smješteni u energijske zone odvojene intervalom energije u kojima nije dozvoljeno ni jedno energijsko stanje elektrona. Tu zonu nazivamo zabranjeni pojas. Pojas energije označen kao valentni pojas u osnovnom stanju (na temperaturi apsolutne nule) potpuno je popunjen elektronima i elektroni se u njemu duž cijelog kristala mogu slobodno gibati. Za razliku od njega, vodljivi pojas je u osnovnom stanju potpuno prazan. Vodljivi pojas je odvojen od valentnog pojasa za energiju  $E_g$  kao što prikazuje slika 1.2, koja je znatno veća od termičke energije elektrona. Elektroni se mogu prebaciti iz valentnog u vodljivi pojas različitim procesima u kojima se apsorbira energija. Nakon prelaska, elektron se u



Slika 1.2: Shematski prikaz stanja valentnih elektrona u kristalu.

vodljivom pojasu može slobodno gibati. Ako se u kristalu uspostavi električno polje, elektroni će se u vodljivom pojasu gibati u smjeru višeg potencijala, pa će kristal tada voditi struju. Također, nakon prelaska elektrona iz valentnog u vodljivi pojas, elektron iz susjednog atoma može preskočiti u 'šupljinu' koja je nastala u valentnom pojasu. Pobuđeni elektron također može ostati vezan uz šupljinu, pa se takvo vezano stanje para elektron-šupljina naziva eksiton. Eksitoni se također mogu slobodno kretati po kristalu ali njihovo gibanje ne predstavlja vođenje struje. U idealnom kristalu luminiscentna emisija svjetlosti je otežana budući da je energija fotona točno jednaka razlici energije donjeg ruba vodljivog i gornjeg ruba valentnog pojasa. Iz toga razloga se ti fotoni s velikom vjerojatnošću apsorbiraju. Luminiscentni centri, koji se nalaze u zabranjenom pojasu na mjestima nepravilnosti u kristalu, upravo imaju ulogu smanjenja energije fotona. Kada visoko energetska čestica prolazi kroz kristal, ona uzrokuje ionizaciju i pobuđenje elektrona. Elektroni svojim sudarima izbacuju druge elektrone u viša stanja. Na taj način se postiže stanje u kojemu je mnogo elektrona na donjem rubu vodljivog, a mnogo šupljina na gornjem rubu valentnog pojasa. Ako dolazi do izravne rekombinacije para elektron-šupljina, to će dovesti do emisije fotona koji se neposredno apsorbira jer mu je energija upravo jednaka  $E_g$ . Međutim, tako apsorbirani foton proizvodi novi par elektron-šupljina. Ako par elektron-šupljina koji se slobodno kreće kroz kristal naiđe na luminiscentni centar dolazi do emisije fotona koji se slabo apsorbira jer mu je energija manja od  $E_g$ . Takav foton izlazi van iz kristala.

## 1.4 Silicijski fotomultiplikator

Silicijski fotomultiplikatori predstavljaju novu generaciju detektora elektromagnetnog zračenja. Princip rada silicijskih fotomultiplikatora se zasniva na poluvodičkim elektroničkim elementima, lavinskim fotodiodama. Silicijska fotodioda je p-n spoj unutar kojeg se nalazi područje osiromašenja. Kada je foton apsorbiran u siliciju može doći do prebacivanja elektrona iz valentne u vodljivu vrpću te se stvara par elektron-šupljina. Ako silicijsku fotodiodu postavimo na razliku potencijala, unutar područja osiromašenja se uspostavlja električno polje koje uzrokuje gibanje pozitivnih šupljina prema anodi, odnosno elektrona prema katodi. U takvoj situaciji, kada imamo postavljenu razliku potencijala na krajevima p-n spoja, apsorpcija fotona će uzrokovati tok struje kroz p-n spoj. Ako postavimo dovoljno veliko električno polje u području osiromašenja ( $\sim 5 \cdot 10^5 \text{ V/cm}$ ), prijenosnici naboja mogu biti ubrzani do točke kada je njihova kinetička energija dovoljno velika da stvore sekundarni par elektron-šupljina. Taj proces nazivamo udarna ionizacija. Na taj način, jedan apsorbirani foton može izvesti više ionizacija koje se šire kroz silicij. U trenutku kada dioda postane vodljiva, javlja se tok struje i taj proces se naziva Geigerovo pražnjenje. Fotodiode koje rade u Geigerovom načinu koriste mehanizam proboja kako bi povećale pojačanje i nazivaju se SPAD diode (eng. *Single Photon Avalanche Diode*). Jednom kada se uspostavi tok struje, on se treba zaustaviti ili prigušiti. To se postiže uporabom otpornika koji ograničavaju odvod struje od strane diode za vrijeme proboja. Taj proces dovodi do smanjenja napona nepropusne polarizacije kojeg vidi dioda do vrijednosti ispod njenog napona proboja što zaustavlja lavinu ionizacija. Zatim se dioda ponovno napuni i slobodna je za detekciju. Silicijski fotomultiplikatori su polja sastavljena od nezavisnih SPAD senzora, od kojih svaki ima svoj otpor gušenja koji se zajedno nazivaju mikroćelije ili pikseli. Kada mikroćelija silicijskog fotomultiplikatora registrira apsorbirani foton, pokreće se Geigerova lavina koja uzrokuje tok fotostruje kroz mikroćeliju. Zbog pada napona na otporu gušenja dolazi do smanjenja napona na diodi do vrijednosti ispod napona proboja te se guši fotostruja i na taj način sprječava daljnji rad u Geigerovom načinu. Kada se fotostruja uguši, napon na diodi se ponovno puni do normalne vrijednosti napona nepropusne polarizacije. Vrijeme koje je potrebno da se mikroćelija ponovno napuni naziva se vrijeme oporavka. Vrijeme oporavka senzora je određeno konstantom ponovnog punjenja



mikroćelije [6]:

$$\tau_{RC} = C_d \cdot (R_q + R_s \cdot N), \quad (1.7)$$

gdje je  $C_d$  efektivni kapacitet mikroćelije,  $R_q$  otpor gušenja,  $R_s$  sav preostali otpor mikroćelije, a  $N$  ukupan broj mikroćelija. Budući da kapacitet mikroćelije ovisi o površini, vrijeme oporavka će varirati za različite veličine mikroćelija. Također, nije čitava površina silicijskog fotomultiplikatora osjetljiva na svjetlo. Svaka mikroćelija mora biti odvojena od susjedne radi optičke i elektroničke izolacije, te je potreban neki dio površine za otpornike gušenja i praćenje signala. Veličinu koja govori o postotku površine silicijskog fotomultiplikatora osjetljivog na svjetlo nazivamo faktor popunjenosti (eng. *Fill Factor*). Veće mikroćelije imaju veći postotak aktivne površine, odnosno veći Fill Factor, što rezultira u većoj efikasnosti pri detekciji fotona i većem pojačanju, ali imaju veći kapacitet i duže vrijeme oporavka.

Bitni parametri silicijskih fotomultiplikatora su:

- NAPON PROBOJA (eng. *Breakdown Voltage*,  $V_{br}$ )

Napon proboja je napon pri kojemu je električno polje u području osiromašenja dovoljno veliko da dođe do Geigerovog pražnjenja. Napon proboja se očituje u grafu ovisnosti struje o naponu kao iznenadni porast vrijednosti struje, a njegova prava vrijednost se može odrediti iz pravca u  $\sqrt{I} - V$  grafu. Senzor obično radi na naponu 10% – 25% većem od napona proboja, a razlika između radnog napona i napona proboja se naziva nad-napon (eng. *Overvoltage*).

$$V_{radni} = V_{br} + \Delta V \quad (1.8)$$

- POJAČANJE

Pojačanje definiramo kao iznos naboja stvorenog po svakom detektiranom fotonu. Pojačanje ovisi o nad-naponu i kapacitetu mikroćelije, a možemo ga računati kao:  $G = \frac{C \cdot \Delta V}{q}$ , gdje je  $q$  jedinični naboj elektrona.

- EFIKASNOST DETEKCIJE FOTONA (eng. *Photon Detection Efficiency*, *PDE*)

Efikasnost detekcije fotona je mjera osjetljivosti silicijskog fotomultiplikatora i ona je funkcija valne duljine upadne svjetlosti, postavljenog nad-napona i faktora popunjenosti mikroćelije. PDE predstavlja statističku vjerojatnost da

upadni foton u interakciji s mikroćelijom izazove lavinu ionizacija.

- TAMNA STRUJA (eng. *Dark Count Rate, DCR*)

DCR je glavni izvor šumova. Tamna struja dolazi od termički generiranih elektrona koji iniciraju lavinu. Budući da su signali koji dolaze od fotonom generiranih elektrona i termički generiranih elektrona identični, ne možemo ih razlikovati, ali šum možemo smanjiti postavljanjem praga.

- OPTIČKI MEĐUKONTAKT (eng. *Optical Crosstalk*)

Optički međukontakt je dodatna komponenta koja pojačava šumove. Za vrijeme lavine, prijenosnici naboja u području polja visoke energije mogu emitirati fotone koji uzrokuju sekundarnu lavinu u susjednoj mikroćeliji. Ti fotoni su većinom iz spektra blizu infracrvenog zračenja i mogu prijeći znatnu udaljenost kroz silicij. Po jednom elektronu u p-n spoju, tipično se emitira  $2 \cdot 10^{-5}$  infracrvenih fotona. Oni u susjednu mikroćeliju mogu doći na više načina: direktno, refleksijom od materijala koji čini vrh senzora ili refleksijom od dna p-n spoja. Optički međukontakt je definiran kao vjerojatnost da mikroćelija u kojoj se događa lavina uzrokuje lavinu u sekundarnoj mikroćeliji. Optički međukontakt raste s porastom nad-napona zbog povećanja broja nosioca naboja u spoju.

- NAKNADNO OKIDANJE (eng. *Afterpulsing*)

Za vrijeme proboja, nosioci naboja mogu biti uhvaćeni od strane nečistoća u kristalnoj rešetci silicija. Nakon odgode od nekoliko nanosekundi, zatočeni nosioci naboja se otpuštaju te mogu uzrokovati novu lavinu što nazivamo naknadno ili odgođeno okidanje.

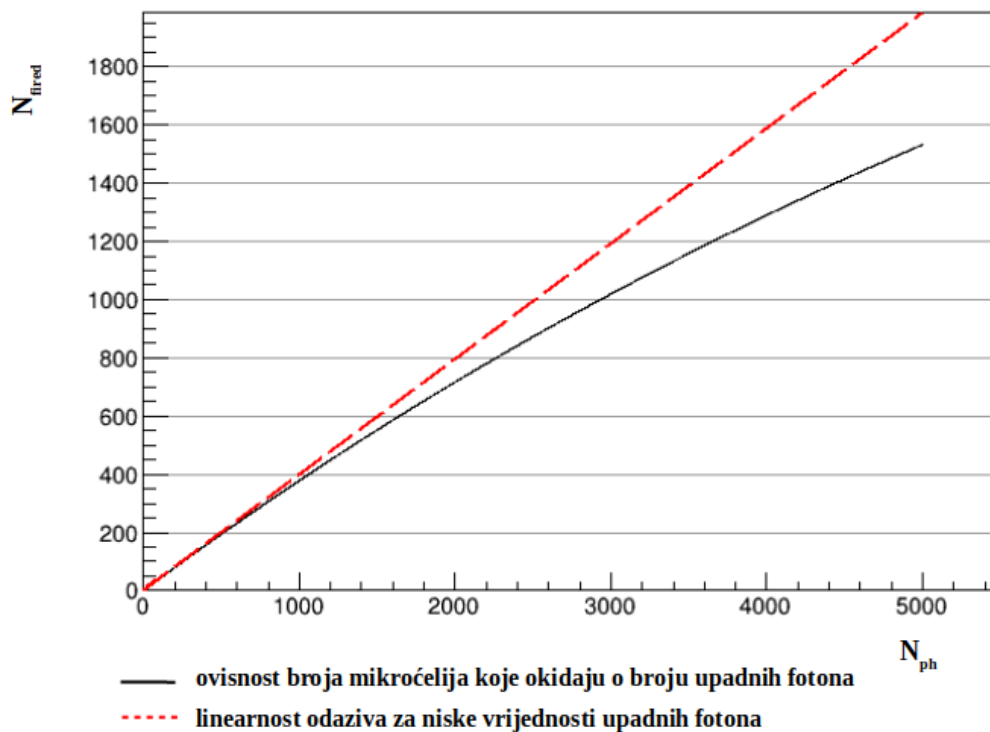
- DINAMIČKI RASPON I LINEARNOST

Dinamički raspon silicijskog fotomultiplikatora možemo definirati kao optički raspon za koje senzor daje koristan izlazni signal. Dinamički raspon je funkcija ukupnog broja mikroćelija, nad-napona i valne duljine upadnih fotona [6].

$$N_{fired}(M, V, \lambda) = M \left( 1 - e^{-\frac{PDE(V, \lambda) \cdot N_{ph}}{M}} \right), \quad (1.9)$$

gdje je  $N_{fired}$  broj mikroćelija koje okidaju,  $N_{ph}$  broj upadnih fotona, M ukupan

broj mikroćelija, PDE efikasnost detekcije fotona. Za niske vrijednosti upadnih fotona senzor pokazuje linearan odaziv, odnosno svaki foton pobuđuje zasebnu mikroćeliju. No, kako se broj upadnih fotona približava broju okinutih mikroćelija raste i vjerojatnost apsorpcije više fotona unutar istog piksela. Odstupanje od linearnosti, prikazano na slici 1.3, također je povezano i s brojem mikroćelija u senzoru.



Slika 1.3: Odstupanje odaziva detektora od linearnosti u ovisnosti o broju upadnih fotona.

## **1.5 Primjena scintilacijskih detektora u nuklearnoj medicini**

Iako se scintilacijski detektori najviše koriste u eksperimentalnoj nuklearnoj fizici i fizici elementarnih čestica, svoju su primjenu našli u različitim ljudskim djelatnostima. Jedne od najpoznatijih primjena scintilacijskih detektora su medicinsko oslikavanje i kontrola radioaktivnosti uzorka. U medicini se koriste u dijagnostičke svrhe, a najpoznatije dijagnostičke tehnike koje se zasnivaju na radu scintilacijskih detektora su: Gama kamera, SPECT i PET.

### **1.5.1 Gama kamera**

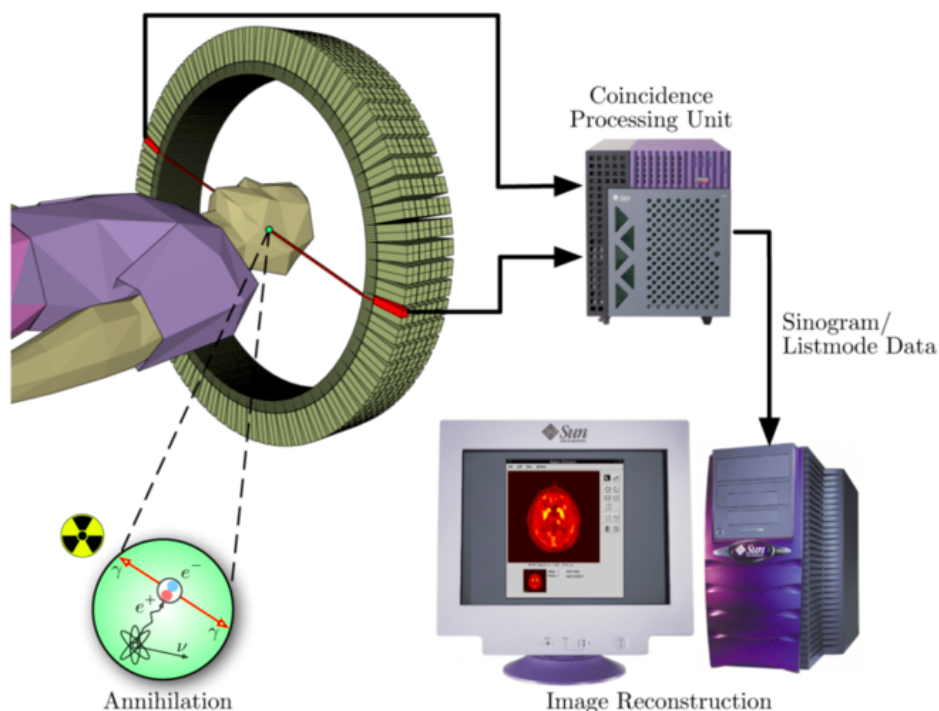
Gama kamera je uređaj koji služi za praćenje raspodjele radioizotopa u tijelu koji emitiraju po samo jednu gama zraku, a pacijent ih unosi netom prije snimanja. Gama kamera se sastoji od scintilacijskog detektora i kolimatora. Kolimator se koristi kako bi propustio samo gama zrake koje dolaze pod malim kutom do detektora te je zbog toga prostorna rezolucija gama kamere mala, 8-12 mm. Radionuklidi korišteni kod pretraga gama kamerom najčešće imaju vrijeme poluraspada nekoliko sati što je dovoljno dugo da se dobije slika, ali ne i predugo kako se pacijent ne bi nepotrebno izlagao zračenju. Na temelju snimanja gama kamerom mogu se dobiti informacije o anatomskej strukturi tijela ali i o fiziološkoj funkciji tijela.

### **1.5.2 Jednofotonska emisijska kompjuterizirana tomografija, SPECT**

SPECT (eng. *Single-Photon Emission Computed Tomography*) je tehnika tomografskog snimanja u nuklearnoj medicini koja se temelji na detekciji gama zračenja, a radionuklidi koji se koriste u SPECT-u, kao i kod gama kamere, pri raspadu emitiraju samo po jedan  $\gamma$  foton. SPECT sustav se sastoji od scintilacijskog detektora s kolimatorom koji  $\gamma$  fotone usmjerava na scintilacijski kristal gdje se energija  $\gamma$  zračenja pretvara u vidljivu svjetlost. Scintilacijski kristal je povezan s fotomultiplikatorom te svjetlosni signal dobiven iz scintilacijskog kristala pretvara u elektronički. Scintilacijski detektor može rotirati oko pacijenta za  $360^\circ$  ili  $180^\circ$  te se zaustavlja svakih  $3^\circ$  do  $6^\circ$ . Pri svakom zaustavljanju, na temelju detektiranih gama zraka stvaraju se 2D projekcije. Iz mnoštva 2D projekcija dobivenih pod različitim kutovima, pomoću računalnih algoritama se stvara 3D slika.

### 1.5.3 Pozitronska emisijska tomografija, PET

PET (eng. *Positron-Emission Tomography*) je tehnika tomografskog snimanja u nuklearnoj medicini koja se temelji na anihilaciji pozitrona s elektronom pri čemu dolazi do emisije para fotona od kojih svaki ima energiju približno jednaku  $511 \text{ keV}$ . PET sistem se sastoji od niza scintilacijskih detektora smještenih u prostorno uređenje u obliku prstena oko pacijenta te se na taj način omogućuje istovremeno dobivanje informacija iz više različitih projekcijskih kutova. Dva para fotona koji nastaju anihilacijom pozitrona emitiraju se pod kutom od  $180^\circ$ , a linija koja spaja dva nasuprotna detektora koji detektiraju emitirane fotone se naziva linija odaziva, LOR (eng. *Line Of Response*). Prikupljanje većeg broja takvih linija daje osnovu za rekonstrukciju slike. Shematski prikaz rada PET-a dan je na slici 1.4.

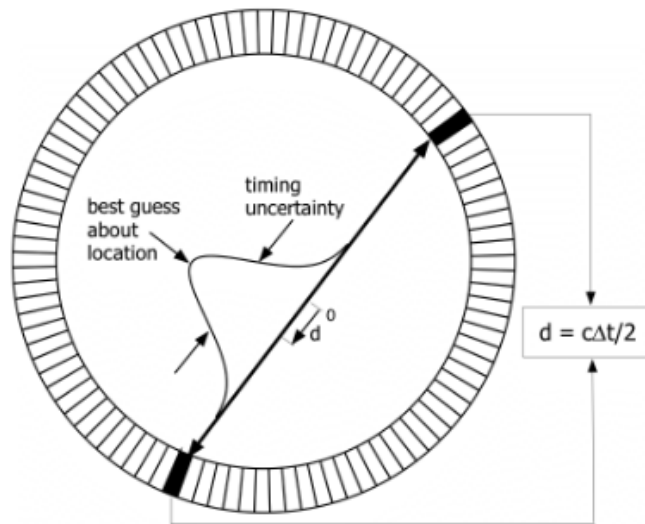


Slika 1.4: Shematski prikaz principa rada PET-a [7].

Za razliku od PET-a, TOFPET (eng. *Time Of Flight Positron-Emission Tomography*) omogućuje precizno određivanje vremena detekcije svakog koincidencijskog fotona nastalog anihilacijom pozitrona. Na temelju vremenske razlike ( $\Delta t$ ) između detekcije dva anihilacijska fotona moguće je odrediti lokaciju ( $d$ ) duž linije odaziva na kojoj se dogodila anihilacija (slika 1.5). Lokaciju anihilacije možemo odrediti prema relaciji:

$$d = \frac{c\Delta t}{2}, \quad (1.10)$$

gdje je  $c$  brzina svjetlosti, a  $\Delta t$  vremenska rezolucija, odnosno vremenska razlika između okidanja dva detektora.

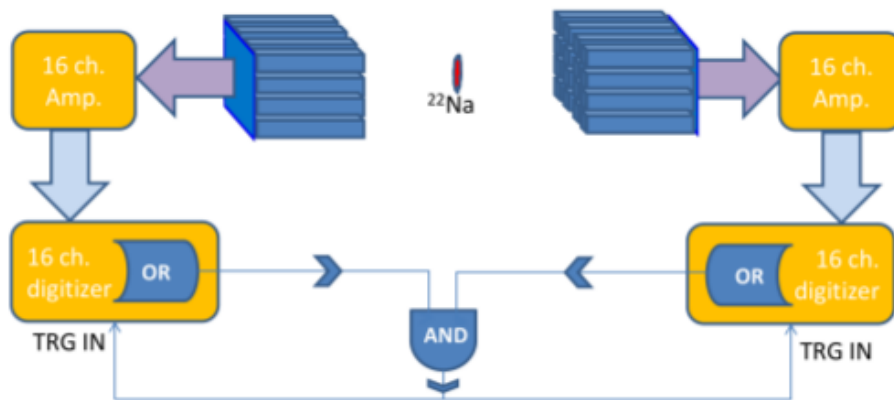


Slika 1.5: Određivanje lokacije anihilacije u radu TOFPET-a [8].

Kako bi se što točnije odredila lokacija anihilacije potrebno je da vremenska rezolucija detektora bude što bolja.

## 2 Eksperimentalni postav

Cilj ovoga rada bio je konstruirati i testirati scintilacijski detektor za mjerenje energije gama zraka dobivenih anihilacijom pozitrona. Detektor se sastoji od LFS (eng. *Lutetium Fine Silicate*) [9] kristala spojenog na silicijski fotomultiplikator. Kao izvor gama zračenja korišten je radioaktivni izotop natrija  $^{22}\text{Na}$ . Shema eksperimentalnog postava za mjerenje energije gama zračenja prikazana je na slici 2.1. Svaki od detektora spojen je na digitalizator impulsa koji pretvara elektroničke signale dobivene iz detektora u digitalne. Analiza dobivenih podataka vršena je pomoću ROOT platforme.



Slika 2.1: Shematski prikaz središnjeg eksperimentalnog postava [10].

### 2.1 LFS scintilator

Poznato je mnogo vrsta anorganskih kristala koji se koriste za detekciju  $X$  i  $\gamma$  zračenja, a koji su svoju primjenu našli u industriji, medicini, istraživanjima u nuklearnoj fizici i fizici čestica. Jedan od takvih materijala je LFS kristal [9]. Budući da je za detekciju gama zračenja bitno da scintilacijski materijal ima veliki atomski broj i veliku gustoću što određuje njegovu efikasnost, te veliku emisiju svjetlosti što određuje razlučivost samog detektora, krajem sedamdesetih godina prošlog stoljeća započeo je intenzivan razvoj scintilacijskih kristala koje odlikuju takva svojstva. Među prvima je razvijen BGO (eng. *bismuth germanate*) koji ima veliku gustoću, veliki atomski broj, za razliku od na primjer NaI(Tl) nije higroskopan, ali ima malu emisiju svjetlosti i relativno

je spor. U drugoj polovici osamdesetih godina razvijen je LSO (eng. *lutetium orthosilicate*) koji je također zbog velike gustoće i velikog atomskog broja vrlo pogodan za detekciju gama zraka. Njegova prednost u odnosu na BGO kristal je veća emisija svjetla, oko 40 – 75% na skali NaI(Tl), i relativno brzo vrijeme porasta signala. Međutim, sami kristal sadrži mali dio radioaktivnog izotopa lutecija koji se raspada beta raspadom što ga čini nepogodnim za mjerenja gdje se nastoji eliminirati prisutnost pozadinskog zračenja. Također, LSO detektori imaju nešto slabiju energijsku rezoluciju od NaI(Tl). Još jedan scintilacijski kristal na bazi lutecija koji se koristi za detekciju  $\gamma$  zračenja je LYSO (eng. *lutetium-yttrium oxyorthosilicate*). LYSO također ima veliku gustoću i velik atomski broj, te kao i LSO relativno brzu konstantu raspada, oko  $40ns$ . Prednost LYSO scintilacijskog kristala u odnosu na LSO je malo veća emisija svjetlosti, oko 70 – 80% na skali NaI(Tl). Daljnjim napretkom, razvijen je LFS scintilacijski materijal koji je zadržao najbolja svojstva LSO, LYSO i sličnih scintilatora kao što su velika gustoća, velik atomski broj i mala duljina atenuacije. LFS scintilator odlikuju velika emisija svjetla, oko 80 – 85% na skali NaI(Tl) i brza konstanta raspada ( $< 33 ns$ ). Energijska rezolucija LFS scintilatora na energiji  $662 keV$  iznosi oko 8%. U tablici 2.1 dana je usporedba osnovnih karakteristika NaI(Tl), BGO, LSO, LYSO i LFS scintilatora.

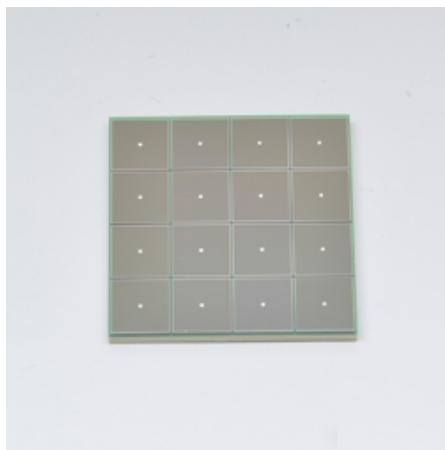
	NaI(Tl)	BGO	LSO	LYSO	LFS
gustoća / $gcm^{-3}$	3,67	7,13	7,4	7,1	<b>7,35</b>
atomski broj	51	74	66	66	<b>64</b>
duljina atenuacije / $cm$	2,6	1,11	1,14	1,12	<b>1,15</b>
konstanta raspada / $ns$	230	300	40	41	$< 33$
emisija svjetla [ $NaI(Tl) = 100\%$ ]	100	7 – 12	40 – 75	70 – 80	<b>80-85</b>
indeks loma	1,85	2,15	1,82	1,81	<b>1,81</b>
energijska razlučivost na $622keV$ / %	8	12 – 14	10 – 14	8	<b>8</b>
higroskopnost	DA	NE	NE	NE	<b>NE</b>

Tablica 2.1: Glavne karakteristike NaI(Tl), BGO, LSO, LYSO i LFS scintilatora [9].



## 2.2 Matrica silicijskih fotomultiplikatora

U ovom radu korišten je  $4 \times 4$  MPPC (eng. *Multi-Pixel Photon Counter*) silicijski fotomultiplikator prikazan na slici 2.2.



Slika 2.2:  $4 \times 4$  MPPC matrica serije S13361-3050 [11].

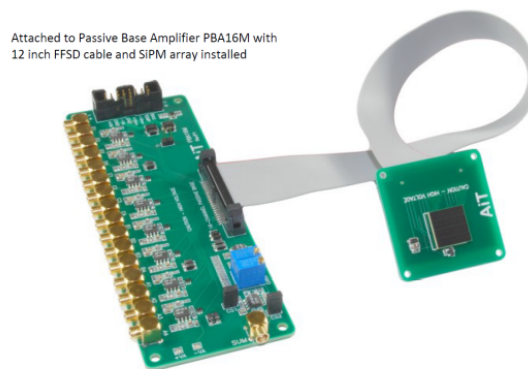
Jedinični element MPPC uređaja, piksel, se sastoji od lavinske fotodiode koja radi u Geigerovom načinu i otpornika gušenja. Uređaj se sastoji od 16 MPPC-ova, a ukupna površina svakog MPPC-a je  $3 \times 3 \text{ mm}$ . Svaki MPPC ima 3584 piksela koje nazivamo mikroćelije. Udaljenost od centra jednog do centra susjednog piksela iznosi  $50 \mu\text{m}$ . Ovaj silicijski fotomultiplikator radi na relativno niskom naponu. Tipični napon proboja za ovaj detektor iznosi  $V_{br} = (53 \pm 5) \text{ V}$  pa je preporučeni radni napon  $V_{radni} = V_{br} + 3 \text{ V}$ . Jedna od glavnih karakteristika MPPC fotomultiplikatora je njegovo veliko pojačanje ( $1,7 \cdot 10^6$ ) i visok postotak aktivne površine, odnosno veliki Fill Factor (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  $320 - 900 \text{ nm}$ , a maksimalna je na  $\lambda_p = 450 \text{ nm}$  što uređaj čini idealnim za očitavanje scintilacijskog svjetla. Sve navedene karakteristike MPPC detektora dane su u tablice 2.2.

PARAMETAR	SIMBOL	VRIJEDNOST	MIJERNA JEDINICA
broj kanala	—	16(4 × 4)	—
efektivna površina po kanalu	—	3 × 3	mm
broj mikroćelija	—	3584	—
Fill Factor	—	74	%
indeks loma	—	1,55	—
spektralna osjetljivost	$\lambda$	320 – 900	nm
maksimum spektralne osjetljivosti	$\lambda_p$	450	nm
efikasnost detekcije fotona (450nm)	PDE	40	%
pojaćanje	G	$1,7 \cdot 10^6$	—
napon proboja	$V_{br}$	$53 \pm 5$	V
radni napon	$V_{radni}$	$V_{br} + 3$	V

Tablica 2.2: Glavne karakteristike MPPC matrice [11].

### 2.3 Pojaćala

Signali dobiveni iz silicijskog fotomultiplikatora su relativno slabi te ih treba pojaćati prije same obrade u elektronićkim jedinicama. Pojaćalo bi se trebao nalaziti što bliže samom detektoru te njegove ulazne karakteristike, kao što su impedancija i kapacitacija, trebaju odgovarati upotrijebljenom detektoru. U tu svrhu je u eksperimentu korišteno šesnaest kanalno AiT Instruments PBA16M pojaćalo čije ulazne karakteristike odgovaraju  $4 \times 4$  MPPC silicijskom fotomultiplikatoru. Pojaćalo ima mogućnost odabira duljine elektrićnih vodića te ima šesnaest kanala za izlaz signala i jedan kanal koji daje sumu svih kanala. Ovisno o duljini korištenih elektrićnih vodića, vrijeme porasta signala dobivenih iz pojaćala može biti 10 – 15ns. Na slici 2.3 je prikazano pojaćalo korišteno u eksperimentu.



Slika 2.3: Šesnaest kanalno pojačalo korišteno u eksperimentu.

## 2.4 Digitalizator impulsa

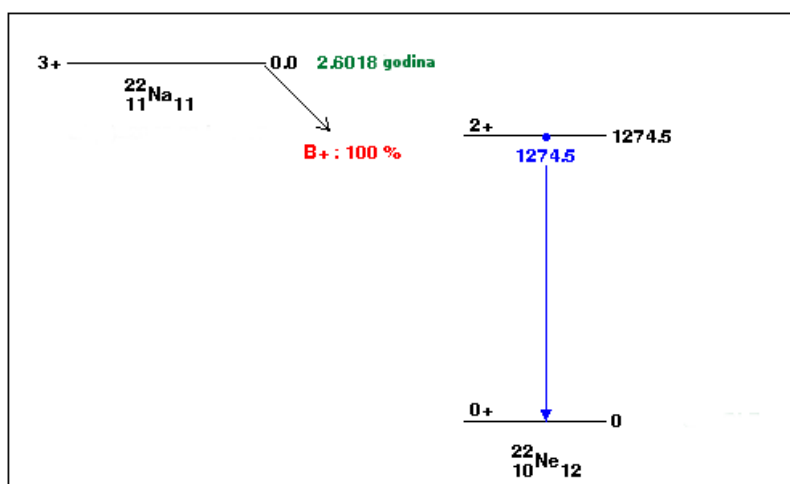
Kao digitalizator pulsa korištena je CAEN model V1743 [12] koji sadrži 16 kanala za digitalizaciju. V1743 koristi SAMLONG čip koji sadrži niz prekidnih kondenzatora (eng. *Switched Capacitor Digitizer*) koji omogućavaju brzinu uzimanja uzorka od 3,2 GS/s. Moguće je pohraniti do 7 punih događaja po kanalu uzastopno, gdje je jedan događaj  $1024 \cdot 12$  bita. Svaki ulazni kanal opremljen je diskriminatorom sa 16-bitnim programljivim pragom. Digitalizator obrađuje zahtjeve sa svih kanala kako bi se generirao okidač koji će osigurati da su događaji sa svih kanala istovremeni. Zajednički okidač može biti ostvaren *software-ski*, ulazom TRG-IN na digitalizatoru impulsa ili bilo kojom kombinacijom diskriminatora s pojedinog kanala i/ili TRG-IN. Tijekom procesa pretvorbe analognog u digitalni signal, V1743 ne može podnijeti druge okidače, čime se stvara mrtvo vrijeme (eng. *dead-time*) - vrijeme u kojemu sustav ne može ispravno procesuirati događaje. Za V1743 maksimalno mrtvo vrijeme iznosi  $125\mu\text{s}$ . S obzirom na brzinu uzorkovanja i broj bitova, V1743 je prikladan za vrlo brze signale poput onih koji dolaze iz brzih scintilatora povezanih sa silicijskim fotomultiplikatorom.

## 2.5 Radioaktivni izvor

Kao radioaktivni izvor za ispitivanje sustava korišten je izotop natrija  $^{22}\text{Na}$ .  $^{22}\text{Na}$  ima dugo vrijeme poluživota  $T_{1/2} = 2,6$  godina i raspada se  $\beta^+$  raspadom na  $^{22}\text{Ne}^*$  koji se nalazi u pobuđenom stanju kao što prikazuje jednačina 2.1.



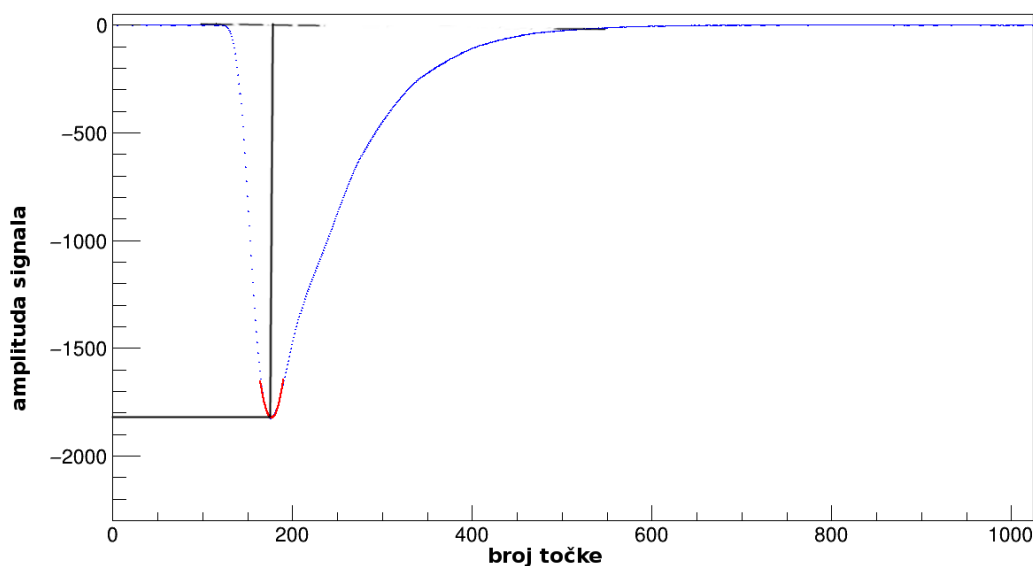
3,7 ps nakon nastanka pozitrona, jezgra neona emitira gama zraku energije 1270 keV prilikom vraćanja u osnovno stanje. Nedugo zatim dolazi do anihilacije pozitron i elektrona, te se emitiraju dvije gama zrake energije 511 keV. Budući da je u procesu anihilacije količina gibanja očuvana, gama zrake se emitiraju pod kutom od  $180^\circ$ . Shematski prikaz raspada  $^{22}\text{Na}$  dan je na slici 2.4.



Slika 2.4: Shematski prikaz raspada radioaktivnog izotopa natrija  $^{22}\text{Na}$  [13].

### 3 Mjerenja i rezultati

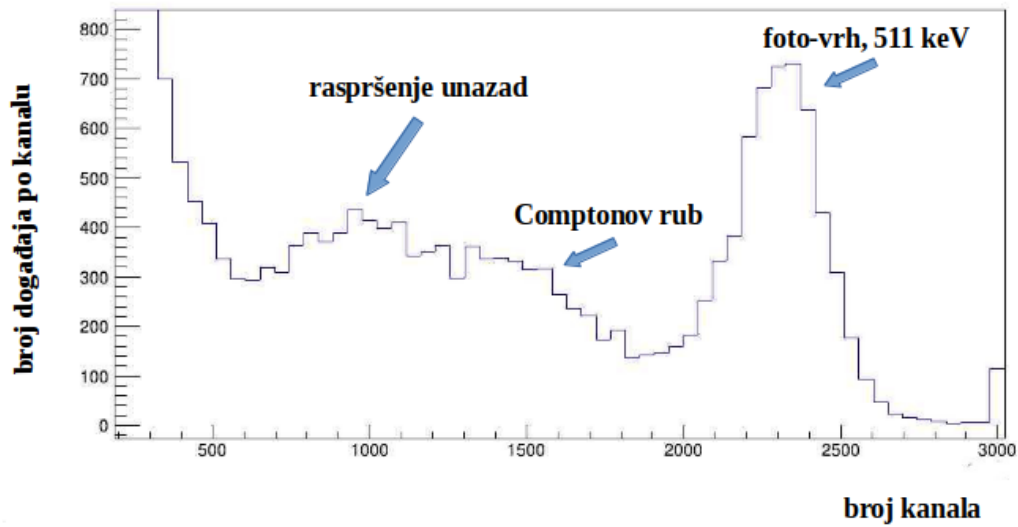
Za vrijeme trajanja eksperimenta ukupno je napravljeno dvadeset i pet mjerenja na šest različitih napona, deset različitih temperatura, pet različitih udaljenosti kolimiranog snopa gama zračenja od fotomultiplikatora te četiri zasebna mjerenja za određivanje vremenske razlučivosti detektora. Prvi korak pri analizi podataka je bio rekonstrukcija energije na temelju signala dobivenih pomoću digitalizatora impulsa. Rekonstrukcija energije je izvršena na dva načina, integracijom signala i određivanjem amplitude signala. Rekonstrukcija energije pomoću amplitude je ostvarena na način da je za svaki događaj na vrh pulsa prilagođen polinom drugog stupnja. Na temelju parametara dobivenih prilagodbom polinoma drugog stupnja određena je točka koja odgovara minimumu funkcije. Zatim je određena visina signala kao što prikazuje slika 3.1. Vrijednosti visine signala za svaki događaj su spremene u histogram.



Slika 3.1: Određivanje visine signala za rekonstrukciju energije pomoću amplitude.

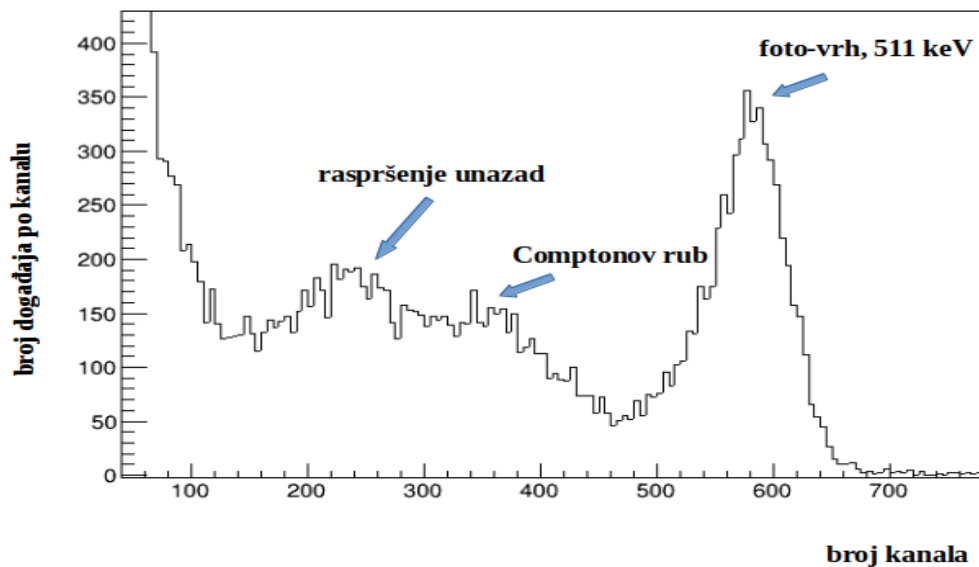
Primjer spektra rekonstruirane energije dobivenog određivanjem amplitude signala nalazi se na slici 3.2.

Kao što je vidljivo na slici 3.1, jedan puls čine 1024 točke. Rekonstrukcija energije pomoću integracije signala je ostvarena zbrajanjem od stote do šestote točke pulsa te dijeljenjem toga zbroja s brojem korištenih točaka. Vrijednosti dobivene takvim zbrajanjem točaka pulsa za svaki događaj su spremene u histogram.



Slika 3.2: Spektar dobiven rekonstrukcijom energije preko amplitude na detektoru 1, kanalu 5. Kao izvor zračenja korišten je  $^{22}\text{Na}$ , postavljeni napon na detektoru je iznosio 53,7 V, a srednja vrijednost temperature na kojoj je radio detektor 19,3°C.

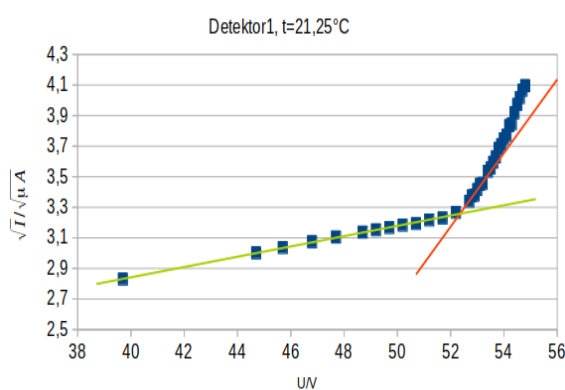
Primjer spektra rekonstruirane energije dobivenog pomoću integracije signala nalazi se na slici 3.3.



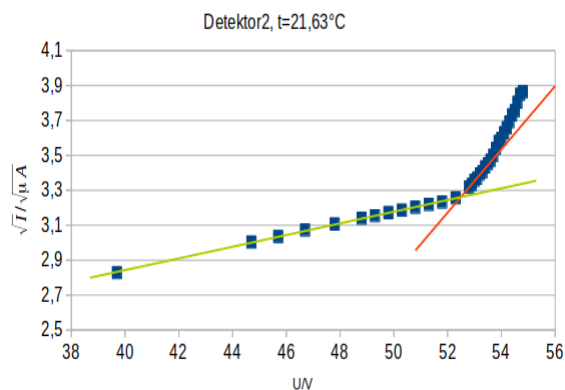
Slika 3.3: Spektar dobiven rekonstrukcijom energije preko integrala signala na detektoru 1, kanalu 5. Kao izvor zračenja korišten je  $^{22}\text{Na}$ , postavljeni napon na detektoru je iznosio 53,7 V, a srednja vrijednost temperature na kojoj je radio detektor 19,3°C.

### 3.1 Napon proboja

Kao što je već spomenuto u poglavlju 2.2 napon proboja,  $V_{br}$ , je napon pri kojemu je električno polje u području osiromašenja dovoljno veliko da dođe do Geigerovog pražnjenja. Vrijednost napona proboja se može odrediti iz sjecišta pravaca u  $\sqrt{I} - V$  grafu [6]. U svrhu određivanja napona proboja napravljena su mjerenja struje u ovisnosti o naponu na tri različite temperature. Budući da su mjerenja dugo trajala, srednja vrijednost temperature na detektoru 1 pri svakom mjerenju se nešto razlikuje od srednje vrijednosti temperature na detektoru 2. Slika 3.4 prikazuje graf ovisnosti struje o naponu pri srednjoj vrijednosti temperature  $21,25^{\circ}C$  na detektoru 1 i srednjoj vrijednosti temperature  $21,63^{\circ}C$  na detektoru 2. Na grafu možemo primijetiti dva područja različitih ovisnosti struje o naponu postavljenom na detektor. Na područja koja pokazuju linearnu ovisnost struje o postavljenom naponu prilagođeni su pravci kao što je prikazano na slici 3.4. Pronalaženjem koordinate  $x$  točke sjecišta pravaca  $y_1$  i  $y_2$  dobivamo vrijednost napona proboja  $V_{br} = 52,27V$  na detektoru 1 i napona proboja  $V_{br} = 52,49V$  na detektoru 2.



(a) Graf  $\sqrt{I} - V$  na detektoru 1.

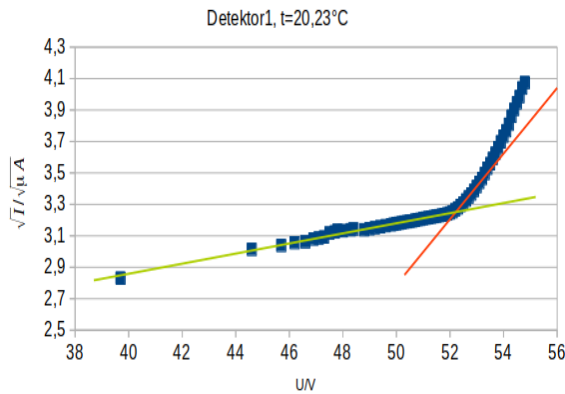


(b) Graf  $\sqrt{I} - V$  na detektoru 2.

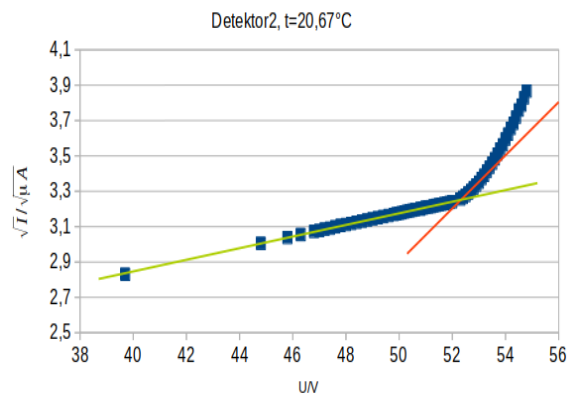
Slika 3.4: Ovisnost struje o naponu postavljenom na detektoru 1 i na detektoru 2. Srednja vrijednost temperature na detektoru 1 je iznosila  $21,25^{\circ}C$  (3.4a), a  $21,63^{\circ}C$  na detektoru 2 (3.4b).

Slika 3.5 prikazuje graf ovisnosti struje o naponu pri srednjoj vrijednosti temperature  $20,23^{\circ}C$  na detektoru 1 i srednjoj vrijednosti temperature  $20,67^{\circ}C$  na detektoru 2. Pronalaženjem jednadžbi pravaca za dva područja različitih linearnih ovisnosti te određivanjem točke sjecišta ta dva pravca dobivene su vrijednosti napona proboja

$V_{br} = 52,24V$  na detektoru 1 i napona proboja  $V_{br} = 52,47V$  na detektoru 2 za ovaj slučaj.

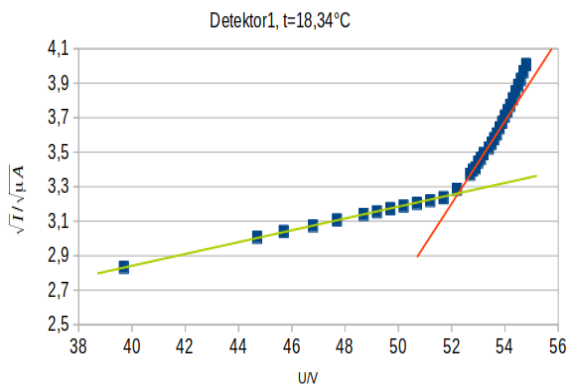


(a) Graf  $\sqrt{I} - V$  na detektoru 1.

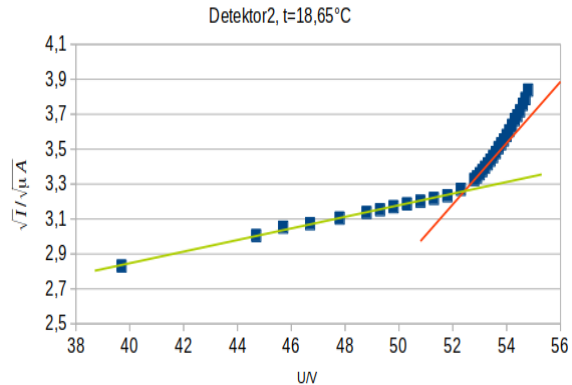


(b) Graf  $\sqrt{I} - V$  na detektoru 2.

Slika 3.5: Ovisnost struje o naponu postavljenom na detektoru 1 i na detektoru 2. Srednja vrijednost temperature na detektoru 1 je iznosila  $20,23^{\circ}C$  (3.5a), a  $20,67^{\circ}C$  na detektoru 2 (3.5b).



(a) Graf  $\sqrt{I} - V$  na detektoru 1.

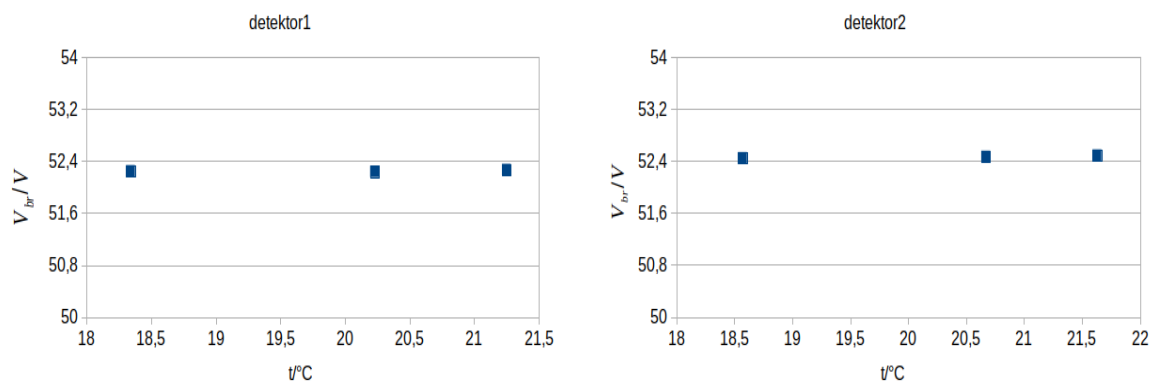


(b) Graf  $\sqrt{I} - V$  na detektoru 2.

Slika 3.6: Ovisnost struje o naponu postavljenom na detektoru 1 i na detektoru 2. Srednja vrijednost temperature na detektoru 1 je iznosila  $18,34^{\circ}C$  (3.6a), a  $18,65^{\circ}C$  na detektoru 2 (3.6b).

Na slici 3.6 je prikazan graf ovisnosti struje o naponu pri srednjoj vrijednosti temperature  $18,34^{\circ}C$  na detektoru 1 i srednjoj vrijednosti temperature  $18,65^{\circ}C$  na detektoru 2. Istim postupkom kao u prethodna dva slučaja određene su vrijednosti napona proboja  $V_{br} = 52,25V$  na detektoru 1 i napona proboja  $V_{br} = 52,45V$  na detektoru 2 za ovaj slučaj. Nakon što su određene vrijednosti napona proboja na tri različite temperature ispitana je i ovisnost napona proboja o temperaturi. Ovisnost napona proboja o temperaturi na detektoru 1 je dana na slici 3.7a, a ovisnost napona proboja o temperaturi na detektoru 2 je dana na slici 3.7b.





(a) Detektor 1.

(b) Detektor 2.

Slika 3.7: Ovisnost napona proboja o temperaturi na detektoru 1 (3.7a) i na detektoru 2 (3.7b).

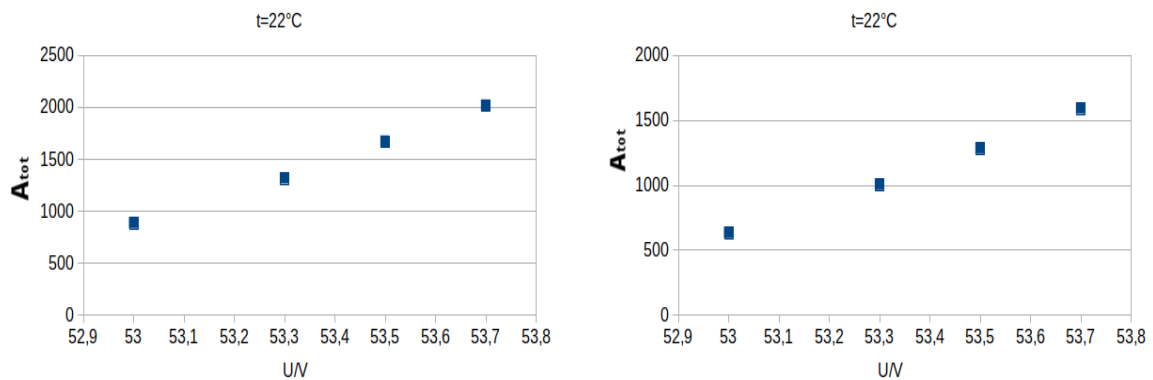
Na temelju grafova sa slike 3.7 ne uočavamo ovisnost napona proboja o temperaturi. Kako bismo sa sigurnošću mogli tvrditi da napon proboja ne ovisi o temperaturi bilo bi potrebno izvesti više mjerenja na većem rasponu temperatura. Mjerenjima na tri različite temperature dobivena je srednja vrijednost napona proboja na detektoru 1,  $V_{br} = 52,25V$ . Vrijednost napona proboja istaknuta od strane proizvođača za detektor 1 iznosi  $52,0V$ , što je malo manje od vrijednosti dobivene našim mjerenjima. Isto je tako srednja vrijednost napona proboja za sva tri mjerenja na detektoru 2,  $53,47V$ , nešto veća od vrijednosti napona proboja na detektoru 2 danog od strane proizvođača  $52,1V$ .

### 3.2 Odgovor detektora

U ovom poglavlju je dan pregled postupka kojim smo utvrdili kako odgovor detektora ovisi o postavljenom naponu na detektoru. Ovisnost odgovora detektora o naponu je ispitana na temelju mjerenja na šest različitih napona. Također je ispitana i ovisnost odgovora detektora o temperaturi na temelju mjerenja na deset različitih temperatura pri konstantnom naponu  $53,7V$ . Naposljetku je određen prosječan broj mikroćelija koje okidaju za vrijeme rada detektora te je ispitana i ovisnost broja mikroćelija koje okidaju o naponu i o temperaturi.

### 3.2.1 Ovisnost odgovora detektora o naponu

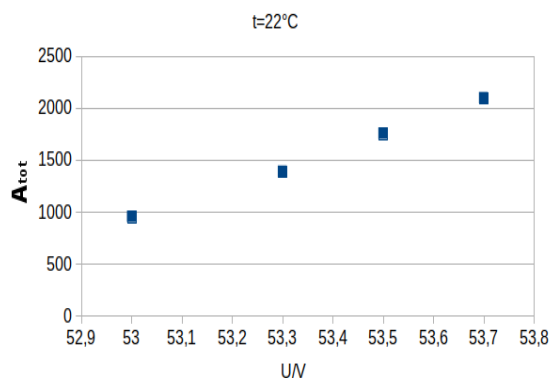
Ovisnost srednje amplitude signala o naponu i ovisnost širine foto-vrha dobivenog rekonstrukcijom energije pomoću amplitude o naponu je ispitana na temelju mjerenja na četiri različita napona pri srednjoj vrijednosti temperature mjerenja  $22^{\circ}\text{C}$  i  $22,1^{\circ}\text{C}$  za dva detektora. Prilagodбом Gaussove funkcije na foto-vrh kao rezultat dobivamo podatke o standardnoj devijaciji  $\sigma$  i srednjoj vrijednosti  $\mu$  označenog foto-vrha u histogramu. Ovisnost srednje amplitude signala o naponu je ispitana na kanalima 5 i 12 detektora 1 i kanalima 5 i 12 detektora 2. Na slici 3.8 su dani usporedni grafovi ovisnosti amplitude signala o naponu na kanalu 5 detektora 1 i detektora 2, a na slici 3.9 usporedni grafovi na kanalu 12 detektora 1 i detektora 2. Na slikama 3.8 i 3.9 je vidljivo da srednja vrijednost amplitude signala raste linearno s porastom napona. Ova promjena se javlja kao posljedica promjene broja mikroćelija koje okidaju s naponom (slika 3.25) i promjene amplitude jednog fotoelektrona s naponom (slika 3.22) što će kasnije biti prikazano u poglavlju 3.2.3.



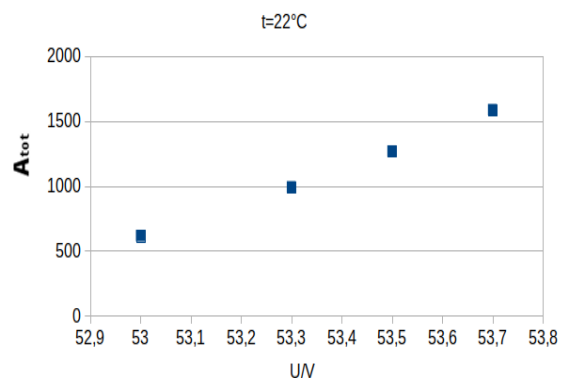
(a) Kanal 5 detektora 1.

(b) Kanal 5 detektora 2.

Slika 3.8: Ovisnost srednje amplitude signala o naponu pri konstantnoj temperaturi na kanalu 5 detektora 1 (3.8a) i detektora 2 (3.8b).



(a) Kanal 12 detektora 1.

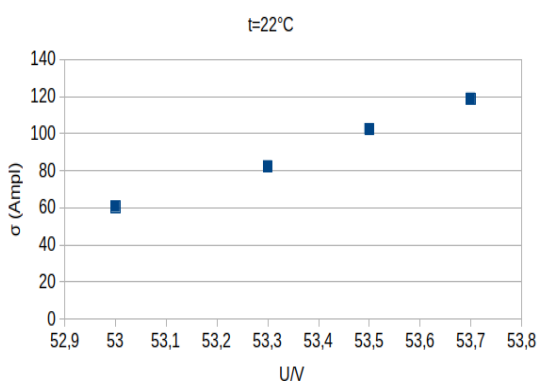


(b) Kanal 12 detektora 2.

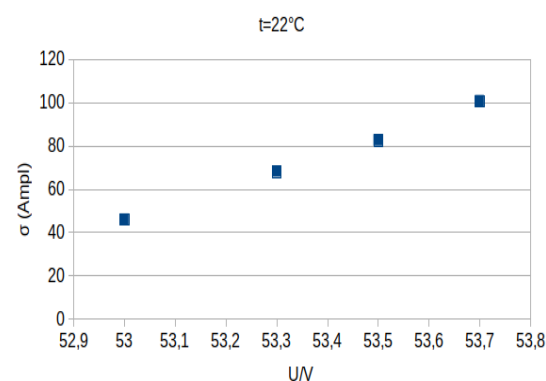
Slika 3.9: Ovisnost srednje amplitude signala o naponu pri konstantnoj temperaturi na kanalu 12 detektora 1 (3.9a) i detektora 2 (3.9b).

Primjenom linearne regresije na grafove prikazane na slikama 3.8 i 3.9 određene su jednadžbe pravca za svaki pojedini graf. Na temelju dobivenih jednadžbi određene su vrijednosti srednje amplitude signala za jedanaest različitih napona te su ti podatci korišteni za određivanje ovisnosti broja mikroćelija koje okidaju o naponu, što će kasnije biti prikazano u ovom poglavlju (3.2.3).

Ovisnost standardne devijacije foto-vrha dobivenog rekonstrukcijom energije pomoću amplitude o naponu je također ispitana na kanalima 5 i 12 detektora 1 i detektora 2. Iz usporednih grafova danih na slikama 3.10 i 3.11 može se zaključiti da i standardna devijacija raste linearno s porastom postavljenog napona na detektoru.

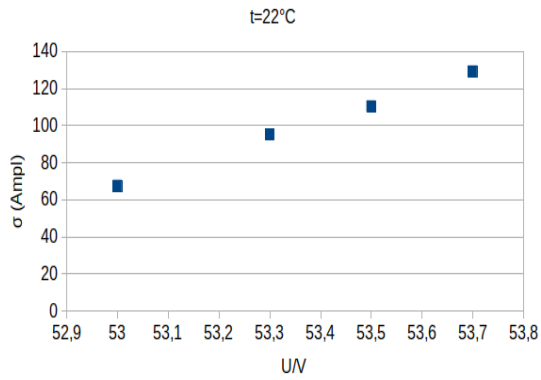


(a) Kanal 5 detektora 1.

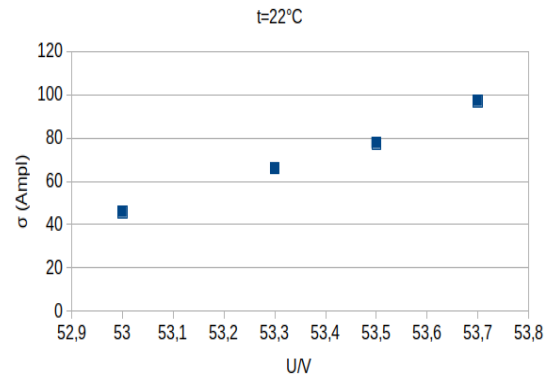


(b) Kanal 5 detektora 2.

Slika 3.10: Ovisnost standardne devijacije foto-vrha dobivenog rekonstrukcijom energije pomoću amplitude o naponu pri konstantnoj temperaturi na kanalu 5 detektora 1 (3.10a) i detektora 2 (3.10b).



(a) Kanal 12 detektora 1.

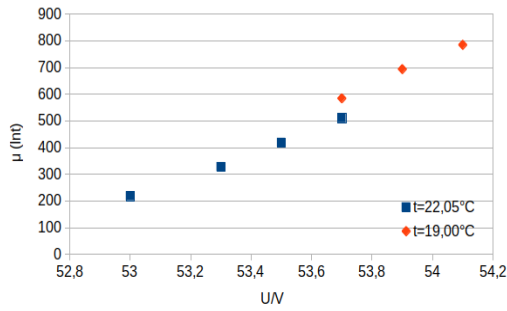


(b) Kanal 12 detektora 2.

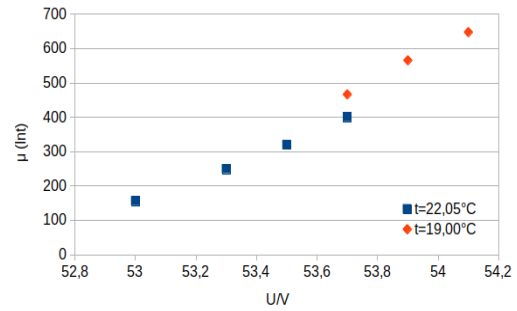
Slika 3.11: Ovisnost standardne devijacije foto-vrha dobivenog rekonstrukcijom energije pomoću amplitude o naponu pri konstantnoj temperaturi na kanalu 12 detektora 1 (3.11a) i detektora 2 (3.11b).

Također je ispitana ovisnost broja kanala na kojemu se nalazi maksimum ( $\mu(Int)$ ) foto-vrha dobivenog rekonstrukcijom energije pomoću integrala o naponu i ovisnost standardne devijacije ( $\sigma(Int)$ ) foto-vrha dobivenog rekonstrukcijom energije pomoću integrala o naponu. Za ovaj korak je bilo potrebno prilagoditi Gaussovu funkciju na foto-vrh svakog kanala za mjerenja na četiri različita napona pri srednjoj vrijednosti temperature mjerenja  $22^{\circ}C$  i  $22,1^{\circ}C$ , te za mjerenja na tri različita napona pri srednjoj vrijednosti temperature mjerenja  $18,9^{\circ}C$ ,  $19^{\circ}C$  i  $19,1^{\circ}C$ . Na slici 3.12 su dani usporedni grafovi ovisnosti  $\mu(Int)$  o naponu na kanalu 5 detektora 1 i detektora 2, a na slici 3.13 uporedni grafovi na kanalu 12 detektora 1 i detektora 2. I ovdje je vidljivo da  $\mu(Int)$  raste s porastom napona, ali također i da su vrijednosti  $\mu(Int)$  veće na nižim temperaturama za isti napon što ćemo detaljnije razmatrati kasnije u ovom poglavlju (3.2.2).

Iz grafova ovisnosti standardne devijacije ( $\sigma(Int)$ ) foto-vrha dobivenog rekonstrukcijom energije pomoću integrala o naponu se također može zaključiti da  $\sigma(Int)$  raste linearno s porastom napona te da je veća na nižim temperaturama pri istom naponu (slika 3.14 i 3.15).

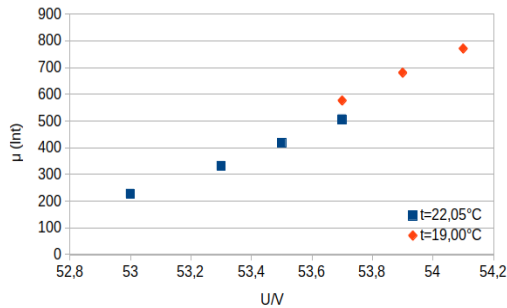


(a) Kanal 5 detektora 1.

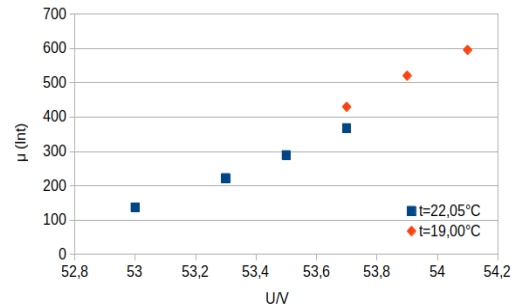


(b) Kanal 5 detektora 2.

Slika 3.12: Ovisnost  $\mu(Int)$  o naponu pri konstantnoj temperaturi na kanalu 5 detektora 1 (3.12a) i detektora 2 (3.12b). Na grafovima su kvadratima prikazane vrijednosti dobivene pri srednjoj temperaturi 22,05°C, a rombovima pri srednjoj temperaturi 19°C.

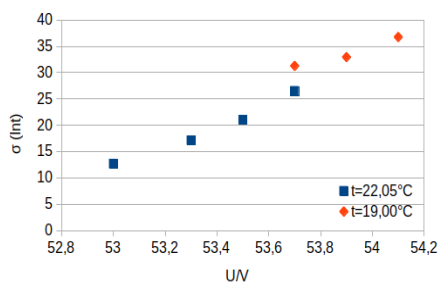


(a) Kanal 12 detektora 1.

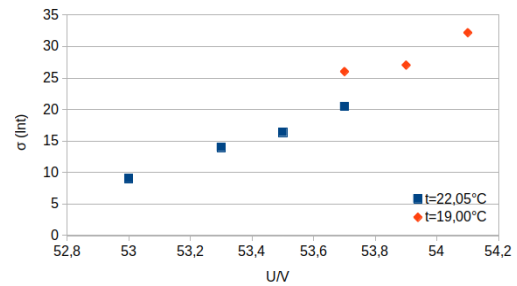


(b) Kanal 12 detektora 2.

Slika 3.13: Ovisnost  $\mu(Int)$  o naponu pri konstantnoj temperaturi na kanalu 12 detektora 1 (3.13a) i detektora 2 (3.13b). Na grafovima su kvadratima prikazane vrijednosti dobivene pri srednjoj temperaturi 22,05°C, a rombovima pri srednjoj temperaturi 19°C.

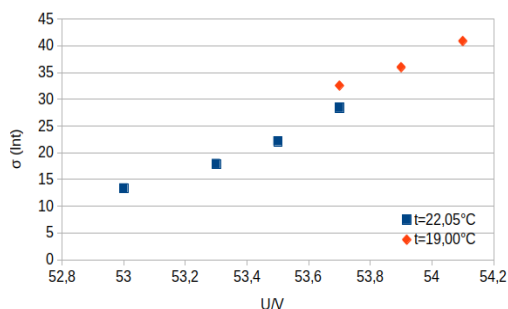


(a) Kanal 5 detektora 1.

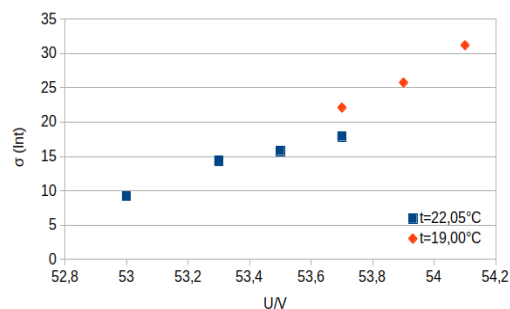


(b) Kanal 5 detektora 2.

Slika 3.14: Ovisnost  $\sigma(Int)$  o naponu pri konstantnoj temperaturi na kanalu 5 detektora 1 (3.14a) i detektora 2 (3.14b). Na grafovima kvadrati prikazuju vrijednosti dobivene pri srednjoj temperaturi 22,05°C, a rombovi pri srednjoj temperaturi 19°C.



(a) Kanal 12 detektora 1.

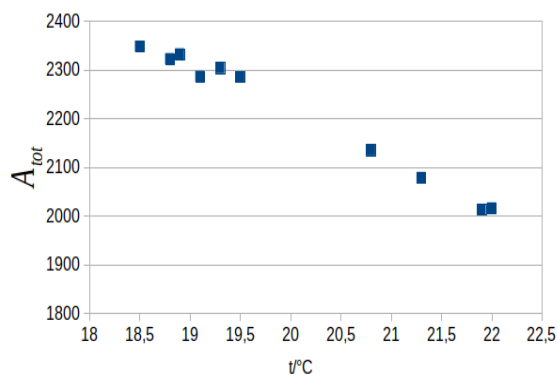


(b) Kanal 12 detektora 2.

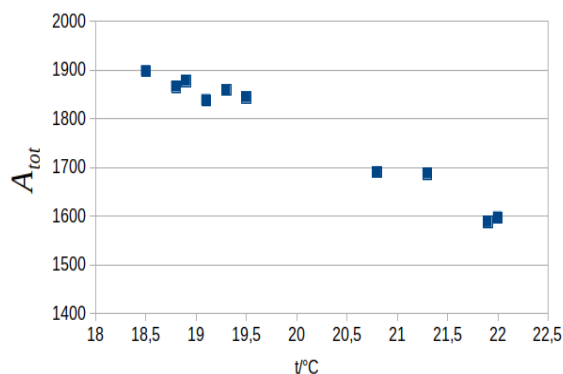
Slika 3.15: Ovisnost  $\sigma(Int)$  o naponu pri konstantnoj temperaturi na kanalu 12 detektora 1 (3.15a) i detektora 2 (3.15b). Na grafovima su kvadratima prikazane vrijednosti dobivene pri srednjoj temperaturi  $22,05^{\circ}C$ , a rombovi pri srednjoj temperaturi  $19^{\circ}C$ .

### 3.2.2 Ovisnost odgovora detektora o temperaturi

Ovisnost srednje amplitude signala o temperaturi je ispitana na temelju mjerenja na deset različitih temperatura pri konstantnom naponu,  $U = 53,7 V$ . Grafovi koji prikazuju ovisnost srednje amplitude signala o temperaturi su dani na slici 3.16 za kanal 5 detektora 1 i detektora 2, te na slici 3.17 za kanal 12 detektora 1 i 2. Iz dobivenih grafova vidimo da se srednja amplituda signala smanjuje s porastom temperature što se javlja kao posljedica ovisnosti amplitude jednog fotoelektrona o temperaturi (slika 3.23), što će biti objašnjeno u poglavlju 3.2.3.

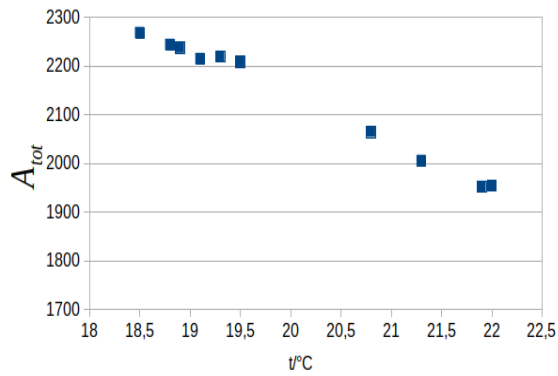


(a) Kanal 5 detektora 1.

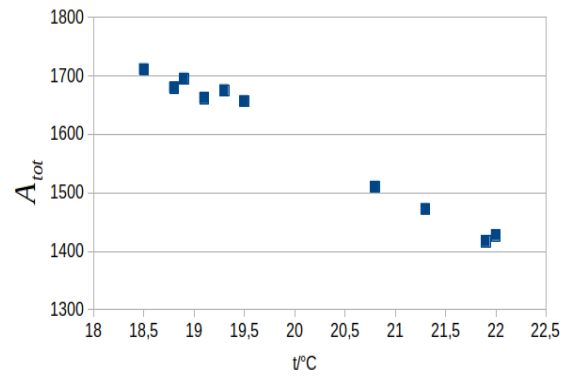


(b) Kanal 5 detektora 2.

Slika 3.16: Ovisnost amplitude signala o temperaturi pri konstantnom naponu ( $U = 53,7V$ ) na kanalu 5 detektora 1 (3.16a) i detektora 2 (3.16b).



(a) Kanal 12 detektora 1.

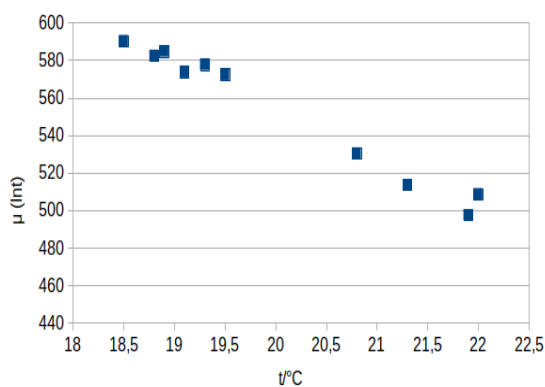


(b) Kanal 12 detektora 2.

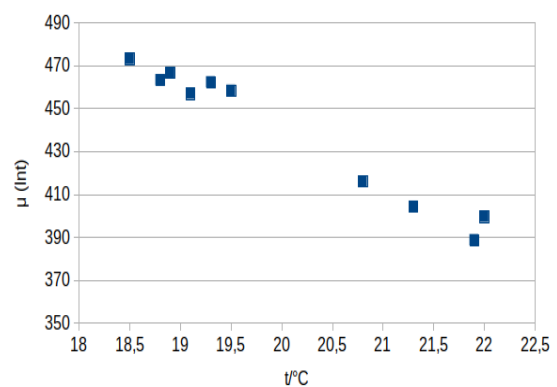
Slika 3.17: Ovisnost amplitude signala o temperaturi pri konstantnom naponu ( $U = 53,7V$ ) na kanalu 12 detektora 1 (3.17a) i detektora 2 (3.17b).

Primjenom linearne regresije na grafove prikazane na slikama 3.16 i 3.17 određene su jednačbe pravca za svaki pojedini graf. Na temelju dobivenih jednačbi određene su vrijednosti srednje amplitude signala za dvanaest različitih temperatura pri konstantnom naponu ( $U = 53,7V$ ), te su ti podatci korišteni za određivanje ovisnosti broja mikroćelija koje okidaju o temperaturi (poglavlje 3.2.3).

Na temelju istih mjerenja ispitana je i ovisnost broja kanala na kojemu se nalazi maksimum ( $\mu(Int)$ ) foto-vrha dobivenog rekonstrukcijom energije pomoću integrala o temperaturi. Iz dobivenih grafova (slika 3.18 i 3.19) također primjećujemo da se  $\mu(Int)$  smanjuje s porastom temperature.

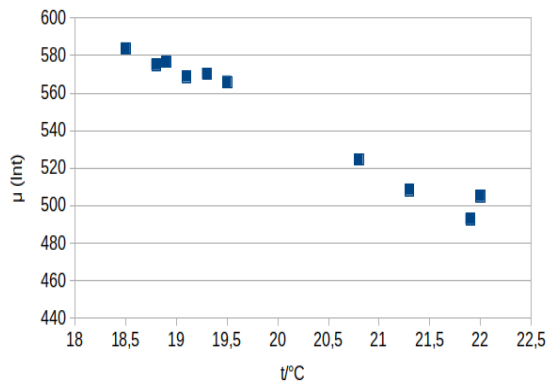


(a) Kanal 5 detektora 1.

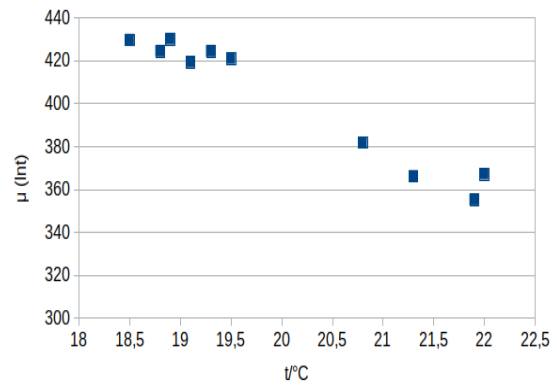


(b) Kanal 5 detektora 2.

Slika 3.18: Ovisnost broja kanala na kojemu se nalazi maksimum ( $\mu(Int)$ ) foto-vrha dobivenog rekonstrukcijom energije pomoću integrala o temperaturi pri konstantnom naponu ( $U = 53,7V$ ) na kanalu 5 detektora 1 (3.18a) i detektora 2 (3.18b).



(a) Kanal 12 detektora 1.



(b) Kanal 12 detektora 2.

Slika 3.19: Ovisnost broja kanala na kojemu se nalazi maksimum ( $\mu(Int)$ ) foto-vrha dobivenog rekonstrukcijom energije pomoću integrala o temperaturi pri konstantnom naponu ( $U = 53,7V$ ) na kanalu 12 detektora 1 (3.19a) i detektora 2 (3.19b).

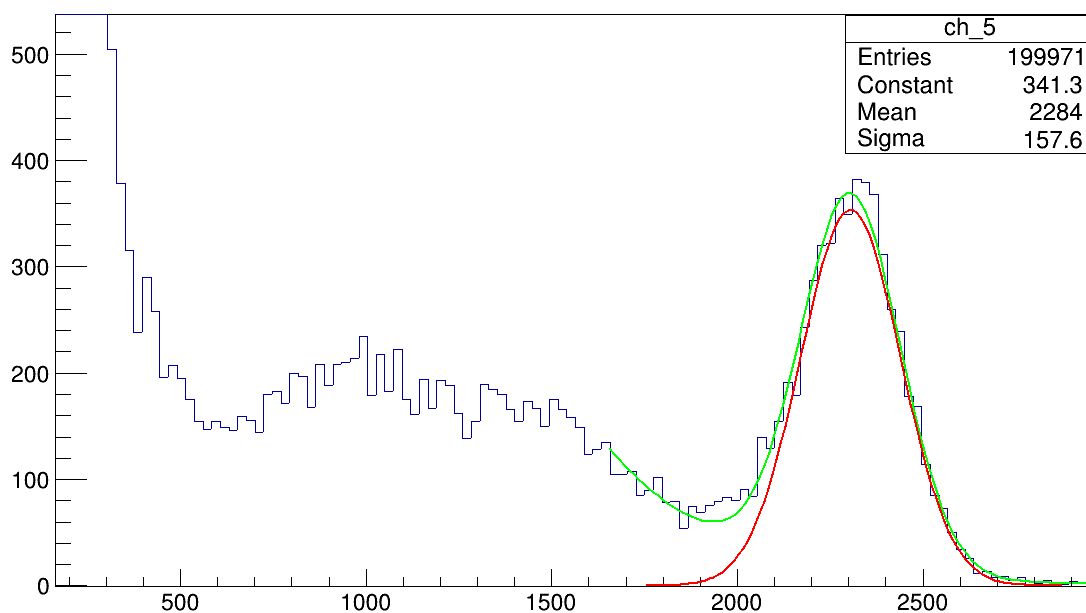
### 3.2.3 Broj opaljenih mikroćelija

Svaki MPPC u matrici silicijskih fotomultiplikatora korišten u eksperimentu sastoji se od 3584 mikroćelije. Budući da se Geigerova lavina koja uzrokuje tok struje kroz mikroćeliju pokreće onda kada mikroćelija registrira apsorbirani foton, zanimalo nas je koliki je prosječan broj mikroćelija koje okidaju za vrijeme rada detektora. Broj mikroćelija koje okidaju ( $N_{fired}$ ) smo odredili eksperimentalno kao omjer srednje amplitude  $A_{tot}$  i amplitude jednog fotoelektrona  $a_{1p.e.}$ . Srednja amplituda ( $A_{tot}$ ) je ustvari broj kanala na kojemu se nalazi srednja vrijednost  $\mu$  foto-vrha dobivenog rekonstrukcijom energije pomoću amplitude. Bilo je potrebno za svako mjerenje, na svakom kanalu prilagoditi Gaussovu funkciju na foto-vrh kako bi odredili standardnu devijaciju  $\sigma$  i srednju vrijednost  $\mu$  označenog foto-vrha u histogramu (slika 3.20).

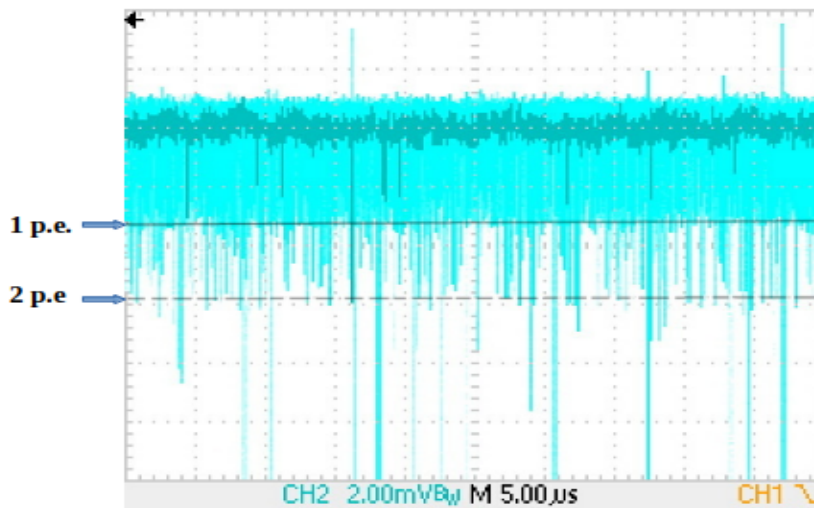
Amplituda jednog fotoelektrona,  $a_{1p.e.}$ , je određena mjerenjima na osciloskopu. Slika 3.21 prikazuje izgled signala iz detektora na osciloskopu. Punom linijom je na slici naznačena amplituda jednog fotoelektrona, a isprekidanom linijom amplituda dva fotoelektrona.

Budući da amplituda jednog fotoelektrona ovisi o naponu i o temperaturi, napravljena su mjerenja na šesnaest različitih napona i tri različite temperature (slika 3.22).





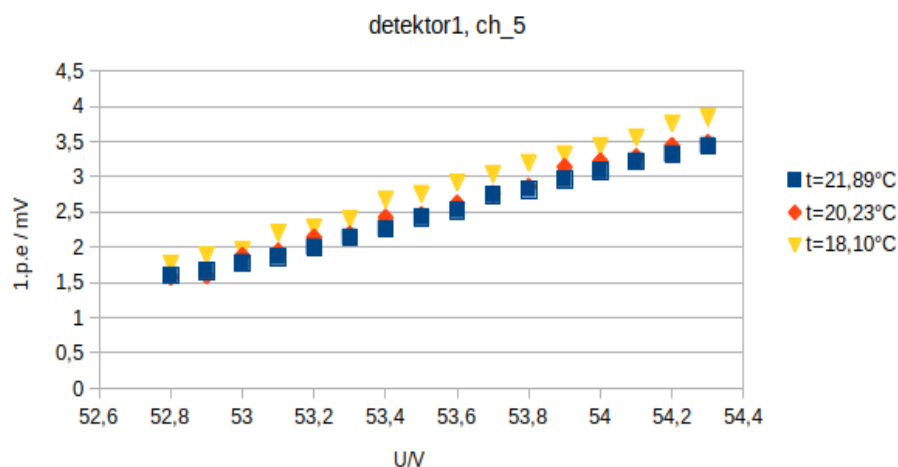
Slika 3.20: Prilagodba Gaussove funkcije na foto-vrh u spektru dobivenom rekonstrukcijom energije pomoću amplitude. Slika prikazuje spektar dobiven na detektoru 1, na kanalu 5. Kao izvor zračenja korišten je  $^{22}\text{Na}$ , postavljeni napon na detektoru je iznosio 53,7 V, a srednja vrijednost temperature na kojoj je radio detektor 19,3°C.



Slika 3.21: Izgled signala iz detektora na osciloskopu.

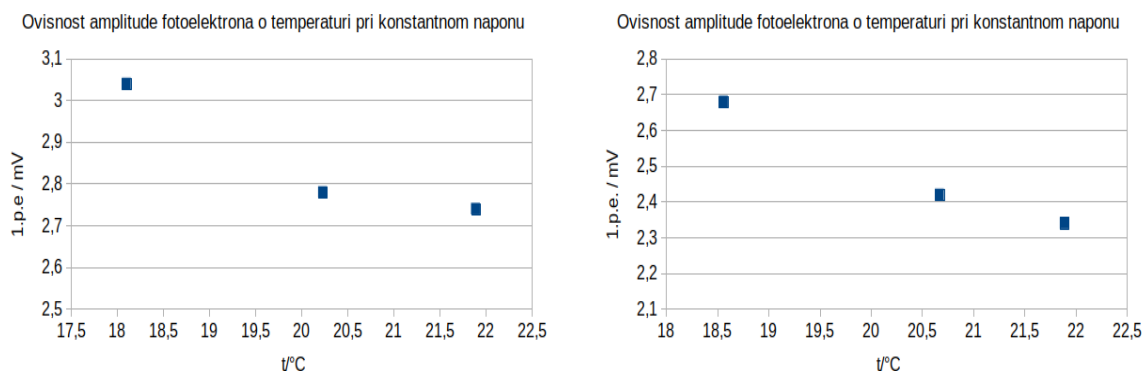
Na slici 3.22 je vidljivo da amplituda jednoga fotoelektrona raste s porastom napona. Primjenom linearne regresije određene su jednadžbe pravca ovisnosti amplitude jednog fotoelektrona o naponu za tri različite temperature  $t = 21,89^\circ\text{C}$ ,  $t = 20,23^\circ\text{C}$  i  $t = 18,10^\circ\text{C}$  što će kasnije poslužiti za određivanje ovisnosti broja mikroćelija koje okidaju o naponu, na danoj temperaturi.

### Ovisnost amplitude fotoelektrona o naponu pri konstantnoj temperaturi



Slika 3.22: Graf ovisnosti amplitude jednog fotoelektrona o naponu pri konstantnoj temperaturi, za tri različite temperature. Graf je dobiven iz podataka mjerenih na osciloskopu na kanalu 5 detektora 1.

Zatim je određena ovisnosti amplitude jednog fotoelektrona o temperaturi pri konstantnom naponu,  $U = 53,7 \text{ V}$ . Sa slike 3.23 je vidljivo da se pri porastu temperature amplituda jednog fotoelektrona smanjuje.



(a) Kanal 5 detektora 1.

(b) Kanal 5 detektora 2.

Slika 3.23: Ovisnost amplitude jednog foto-elektrona o temperaturi pri konstantnom naponu,  $U = 53,7 \text{ V}$ . Slika 3.23a prikazuje kanal 5 detektora 1, a slika 3.23b kanal 5 detektora 2.

Primjenom linearne regresije na taj graf dobivamo jednadžbu ovisnosti amplitude jednog fotoelektrona o temperaturi na temelju koje ćemo odrediti ovisnost broja mikroćelija koje okidaju o temperaturi. Amplitude jednog fotoelektrona su također mjerne na kanalu 12 detektora 1 i kanalu 12 detektora 2.

Iz dobivenih vrijednosti određen je broj mikroćelija koje okidaju:

$$N_{fired}(V, T) = \frac{A_{tot}(V, T)}{a_{1p.e.}(V, T)}. \quad (3.1)$$

Broj mikroćelija koje okidaju je povezan s brojem upadnih fotona:

$$N_{fired}(M, V, \lambda) = M \left( 1 - e^{-\frac{PDE(V, \lambda) \cdot N_{ph}}{M}} \right). \quad (3.2)$$

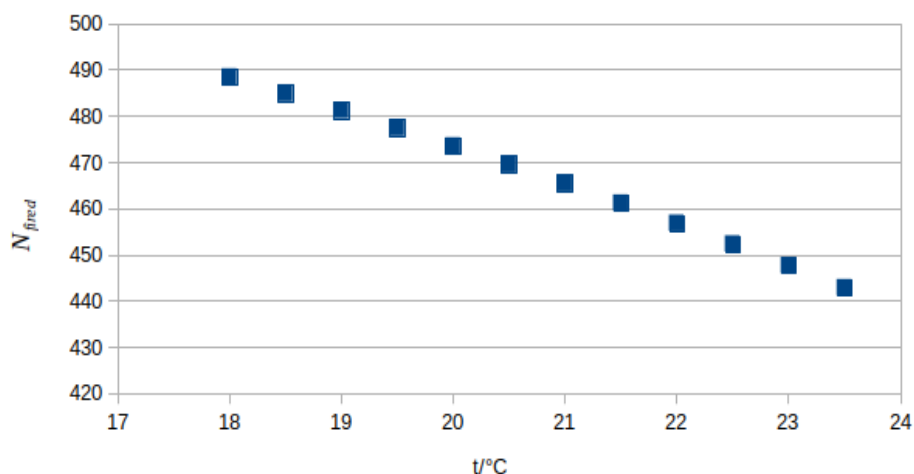
U tom izrazu pojavljuje se veličina koja opisuje efikasnost detekcije fotona (PDE) koja ovisi o naponu i temperaturi, te je stoga ispitana i ovisnost broja mikroćelija koje okidaju o temperaturi i naponu. Efikasnost detekcije fotona je veličina koja opisuje statističku vjerojatnost da ulazni foton u interakciji s mikroćelijom izazove lavinu ionizacija. PDE definiramo kao [6]:

$$PDE = QE(\lambda) \cdot P_{av}(V, T) \cdot F, \quad (3.3)$$

gdje je  $QE(\lambda)$  kvantna efikasnost koja je mjera vjerojatnosti da foton stvori par elektron-šupljina unutar aktivnog volumena senzora,  $P_{av}(V, T)$  je mjera vjerojatnosti nastanka lavine koja uzima u obzir da neće svi prijenosnici naboja unutar aktivnog volumena moći uzrokovati lavinu ionizacija, a  $F$  je Fill Factor.

Na temelju jednadžbe pravca dobivene linearnom regresijom za ovisnost amplitude jednog fotoelektrona o temperaturi ( $y = -0,0816x + 4,4841$ ) određene su vrijednosti amplitude jednog fotoelektrona za dvanaest različitih temperatura. Ovisnost amplitude signala o temperaturi je određena prilagodbom Gaussove funkcije na foto-vrh dobiven rekonstrukcijom energije preko amplitude za mjerenja na deset različitih temperatura pri konstantnom naponu ( $U = 53,7 V$ ) kako je prikazano u poglavlju 3.2.2. Primjenom linearne regresije na graf ovisnosti amplitude signala o temperaturi dobivena je jednadžba pravca:  $y = -100,1334x + 4215,9768$ , za kanal 5 na detektoru 1. Uvrštavanjem dobivenih vrijednosti za  $A_{tot}(T)$  i  $a_{1p.e.}(T)$  u jednadžbu 3.1 dobiven je broj mikroćelija koje okidaju na pojedinoj temperaturi. Iz grafa 3.24 je vidljivo da se broj mikroćelija koje okidaju smanjuje s porastom temperature.

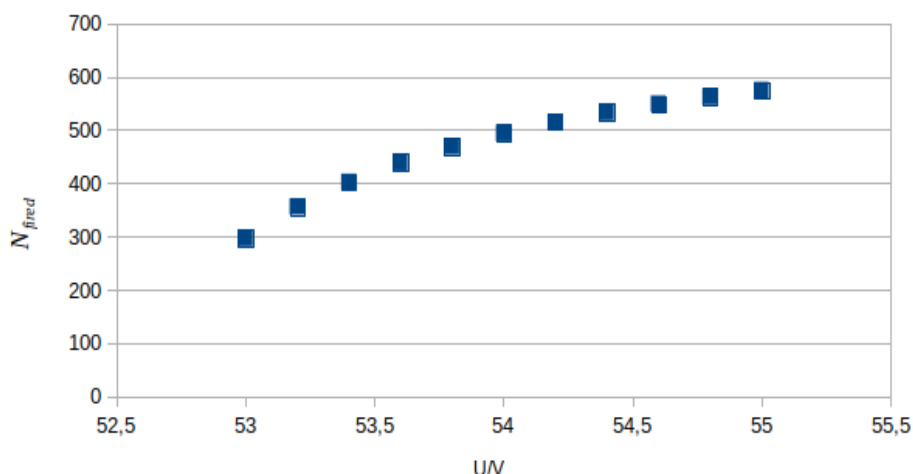
Ovisnost broja mikroćelija koje okidaju o temperaturi pri konstantnom naponu



Slika 3.24: Graf ovisnosti broja mikroćelija koje okidaju o temperaturi na kanalu 5 detektora 1.

Za proučavanje ovisnosti broja opaljenih mikroćelija o naponu pri konstantnoj temperaturi odabrana je temperatura od  $22^\circ\text{C}$ . Na isti način kao i u slučaju ovisnosti broja mikroćelija koje okidaju o temperaturi, određena je amplituda jednog fotoelektrona na temelju jednadžbe pravca dobivene primjenom linearne regresije na graf ovisnosti amplitude jednog fotoelektrona o naponu pri temperaturi od  $22^\circ\text{C}$ . Ovisnost amplitude signala o naponu pri konstantnoj temperaturi je određena prilagodbom Gaussove funkcije na foto-vrh dobiven rekonstrukcijom energije preko amplitude za mjerenja na četiri različita napona pri srednjoj temperaturi mjerenja u rasponu od  $22^\circ\text{C} - 22,1^\circ\text{C}$  kao što je prikazano u poglavlju 3.2.1. Primjenom linearne regresije na graf ovisnosti amplitude signala o naponu dobivena je jednadžba pravca:  $y = 1619,1668x - 84950,4439$ , za kanal 5 na detektoru 1. Uvrštavanjem dobivenih vrijednosti za  $A_{\text{tot}}(V)$  i  $a_{1p.e.}(V)$  u jednadžbu 3.1 dobiven je broj mikroćelija koje okidaju za jedanaest različitih napona (slika 3.25). Isti postupak je ponovljen za kanal 12 na detektoru 1 i kanale 5 i 12 na detektoru 2.

Ovisnost broja mikroćelija koje okidaju o naponu pri konstantnoj temperaturi



Slika 3.25: Graf ovisnosti broja mikroćelija koje okidaju o naponu na kanalu 5 detektora 1.

Prosječan broj mikroćelija koje okidaju za vrijeme rada detektora izmjeren na kanalu 5 detektora 1 je 450. Mjerenja su pokazala da se broj mikroćelija koje okidaju smanjuje s porastom temperature. Povećanje temperature dovodi do bržeg titranja atoma kristalne rešetke LFS kristala što usporava nosioce naboja unutar kristala. Ta pojava uzrokuje smanjenje vjerojatnosti da se dogodi lavina ionizacija. Isto tako se pokazalo da se broj mikroćelija koje okidaju povećava s postavljanjem većeg radnog napona na detektoru. Povećanjem radnog napona raste i brzina nosioca naboja što dovodi do povećanja vjerojatnosti da se dogodi lavina ionizacija.

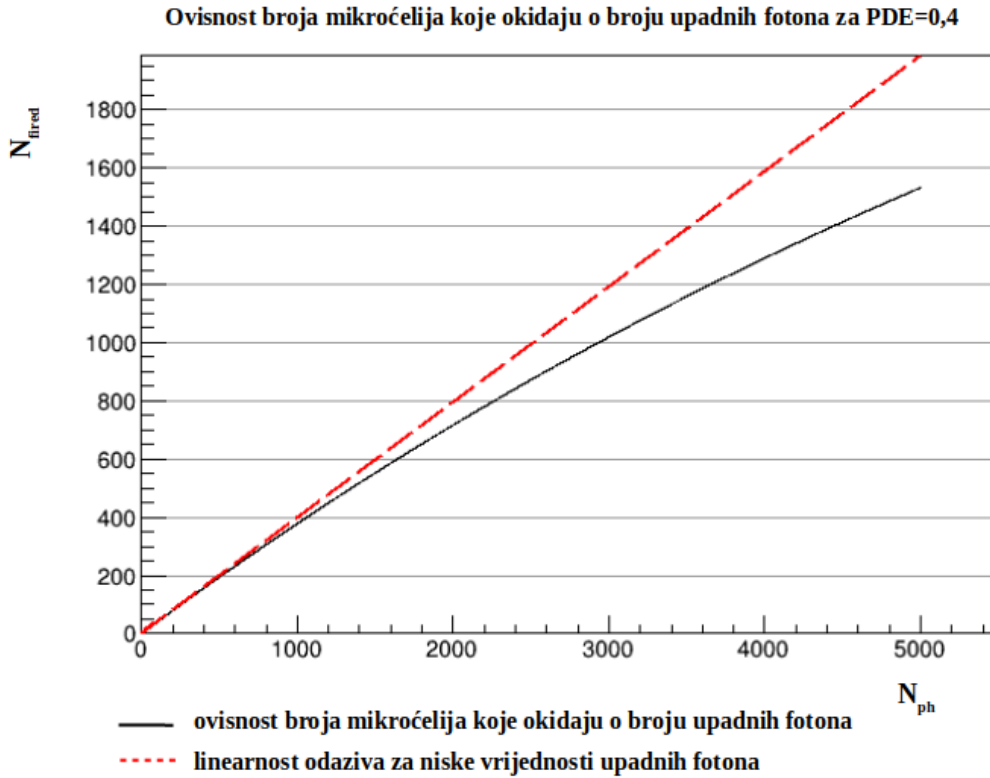
### 3.3 Kalibracija detektora

Prvi korak pri kalibraciji energije je ispraviti svaki kanal za nelinearnost odaziva silicijskog fotomultiplikatora. Kako je već spomenuto u poglavlju 2.2 za niske vrijednosti upadnih fotona senzor pokazuje linearan odaziv, no kako se broj upadnih fotona približava broju aktivnih mikroćelija, raste i vjerojatnost apsorpcije više fotona unutar istog piksela. Veza između broja upadnih fotona i mikroćelija koje okidaju je dana izrazom:

$$N_{fired}(M, V, \lambda) = M \left( 1 - e^{-\frac{PDE(V, \lambda) \cdot N_{ph}}{M}} \right), \quad (3.4)$$

gdje je  $N_{fired}$  broj mikroćelija koje okidaju,  $N_{ph}$  broj upadnih fotona,  $M$  ukupan broj mikroćelija, PDE efikasnost detekcije fotona.

Slika 3.26 prikazuje odstupanje od linearnosti u ovisnosti o broju upadnih fotona za slučaj kada efikasnost detekcije fotona (PDE) iznosi 40% što je tipična vrijednost za MPPC fotomultiplikator korišten u mjerenjima. Ukupan broj mikroćelija ( $M$ ) MPPC uređaj je 3584.



Slika 3.26: Graf ovisnosti broja mikroćelija koje okidaju o broju upadnih fotona i odstupanja od linearnosti o broju upadnih fotona. Ukupan broj mikroćelija iznosi 3584, a efikasnost detekcije fotona 0,4.

Iz jednadžbe 3.4 možemo izraziti broj upadnih fotona:

$$N_{ph} = -\frac{M}{PDE} \cdot \ln \left( 1 - \frac{N_{fired}}{M} \right). \quad (3.5)$$

Korigiranu vrijednost energije ( $E$ ) za nelinearnost odaziva u spektru dobivenom preko integracije signala možemo dobiti kao:

$$E = \frac{N_{ph} \cdot PDE}{N_{fired}} \cdot E_{int}, \quad (3.6)$$

gdje je  $E_{int}$  vrijednost energije u spektru dobivenom preko integrala prije korekcije za nelinearnost. Uvrštavanjem jednadžbe 3.5 u jednadžbu 3.6 dobivamo izraz za korigiranu vrijednost energije na nelinearnost odaziva.

$$E = \left| \frac{M}{N_{fired}} \cdot \ln \left( 1 - \frac{N_{fired}}{M} \right) \right| \cdot E_{int}. \quad (3.7)$$

Nakon ispravljanja svakog kanala za nelinearnost odaziva, drugi korak pri kalibraciji energije je izjednačavanje vrijednosti foto-vrha svakog kanala s energijom  $511\text{keV}$ . Budući da je u mjerenjima kao izvor radioaktivnog zračenja korišten  $^{22}\text{Na}$  čiji je spektar zračenja poznat, za očekivati je da će detektori u koincidenciji detektirati gama zračenje nastalo anihilacijom pozitrona čija energija iznosi upravo  $511\text{keV}$ . Cijeli postupak je bilo potrebno ponoviti za svako pojedinačno mjerenje.

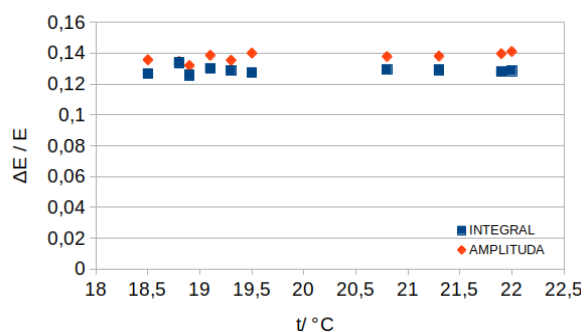
### 3.4 Energijska razlučivost

Relativnu energijsku rezoluciju detektora smo računali kao omjer širine foto-vrha na pola visine (FWHM) i broja kanala na kojemu se nalazi srednja vrijednost vrha.

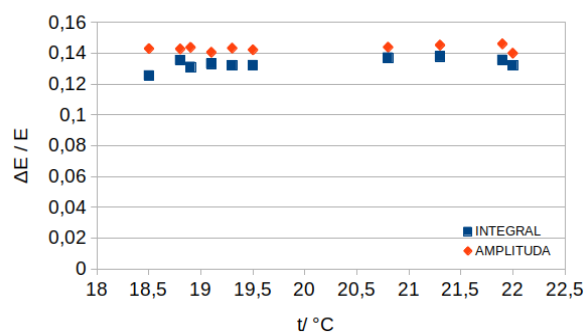
$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{FWHM}{\mu} = \frac{2,35\sigma}{\mu} \quad (3.8)$$

Kako bismo odredili vrijednost standardne devijacije ( $\sigma$ ) i srednje vrijednosti foto-vrha ( $\mu$ ), bilo je potrebno prilagoditi Gussovu funkciju na foto-vrh svakog mjerenja. Na temelju mjerenja na deset različitih temperatura pri konstantnom naponu,  $U = 53,7\text{V}$  ispitana je ovisnost relativne energijske rezolucije detektora o temperaturi. Određena je relativna energijska rezolucija za spektre rekonstruirane energije dobivene integracijom signala i spektre rekonstruirane energije dobivene određivanjem amplitude. Na slici 3.27 su dani grafovi ovisnosti relativne energijske rezolucije o temperaturi na kanalu 5 detektora 1 i detektora 2.

Iz dobivenih grafova, metodom najmanjih kvadrata kod linearne regresije, određene su vrijednosti koeficijenata pravaca i pripadne vrijednosti nepouzdanosti koeficijenata. Sve dobivene vrijednosti su dane u tablici 3.1.



(a) Kanal 5 detektora 1.



(b) Kanal 5 detektora 2.

Slika 3.27: Ovisnost relativne energijske rezolucije o temperaturi na temelju histograma dobivenog rekonstrukcijom energije pomoću integrala i rekonstrukcijom energije pomoću amplitude pri konstantnom naponu ( $U = 53,7V$ ) na kanalu 5 detektora 1 (3.27a) i na kanalu 5 detektora 2 (3.27b). Kvadratima je označena relativna energijska rezolucija dobivena na temelju histograma rekonstruirane energije pomoću integrala, a rombovima pomoću amplitude.

detektor	rekonstrukcija energije	a	Ma	b	Mb
1	integral	-0,00004	0,00057	0,13	0,01
1	amplituda	0,0014	0,0005	0,11	0,01
2	integral	0,0015	0,0008	0,10	0,02
2	amplituda	0,0003	0,0005	0,14	0,01

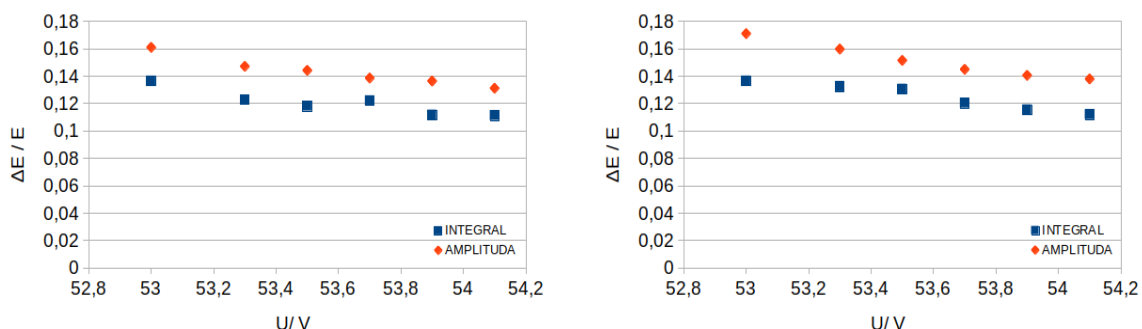
Tablica 3.1: Tablica s vrijednostima koeficijenata pravaca i pripadnih nepouzdanosti koje opisuju ovisnost relativne energijske rezolucije o temperaturi na kanalu 5.

Na temelju podataka danih u tablici 3.1 može se zaključiti da se relativna energijska rezolucija ne mijenja s porastom temperature od  $18,5^{\circ}C$  do  $22^{\circ}C$ . Također, na temelju grafova danih na slici 3.27 vidljivo je da rekonstrukcija energije pomoću integrala daje bolju relativnu energijsku rezoluciju od one dobivene rekonstrukcijom energije preko amplitude. Srednja vrijednost relativne energijske rezolucije dobivene rekonstrukcijom energije pomoću integrala za navedenih deset mjerenja iznosi 12,9%, a srednja vrijednost relativne energijske rezolucije dobivene rekonstrukcijom energije pomoću amplitude 13,7%. Navedene vrijednosti se odnose na kanal 5 detektora 1. Srednja vrijednost relativne energijske rezolucije na kanalu 5 detektora 2 pomoću integrala iznosi 13,3%, a pomoću amplitude 14,3%.

Zatim je ispitana i ovisnost relativne energijske rezolucije o naponu za mjerenja na četiri različita napona pri temperaturi  $22,05^{\circ}C$  i to na temelju histograma rekonstruirane energije pomoću amplitude i pomoću integrala. Na slici 3.28 su dani grafovi



ovisnosti relativne energijske rezolucije o naponu na kanalu 5 detektora 1 i detektora 2.



(a) Kanal 5 detektora 1.

(b) Kanal 5 detektora 2.

Slika 3.28: Ovisnost relativne energijske rezolucije o naponu na temelju histograma dobivenog rekonstrukcijom energije pomoću integrala i rekonstrukcijom energije pomoću amplitude na kanalu 5 detektora 1 (3.28a) i na kanalu 5 detektora 2 (3.28b). Kvadrati označavaju relativnu energijsku rezoluciju dobivenu na temelju histograma rekonstruirane energije pomoću integrala, a rombovi pomoću amplitude.

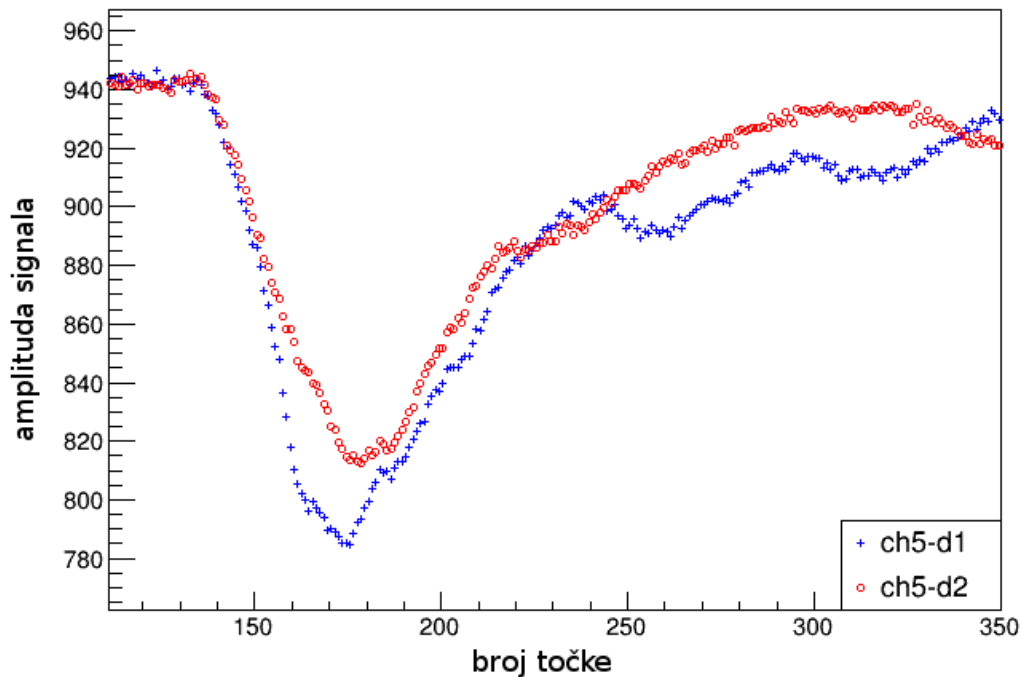
Iz grafova danih na slici 3.28 može se zaključiti da je, za mjerene napone (53,0V – 54,1V), relativna energijska rezolucija to bolja što je radni napon veći.

### 3.5 Vremenska razlučivost

Vremensku rezoluciju detektora predstavlja širina vrha na polovici visine histograma vremenske razlike primanja signala s dva detektora:

$$FWHM = 2\sigma\sqrt{2\ln(2)} \approx 2,35\sigma. \quad (3.9)$$

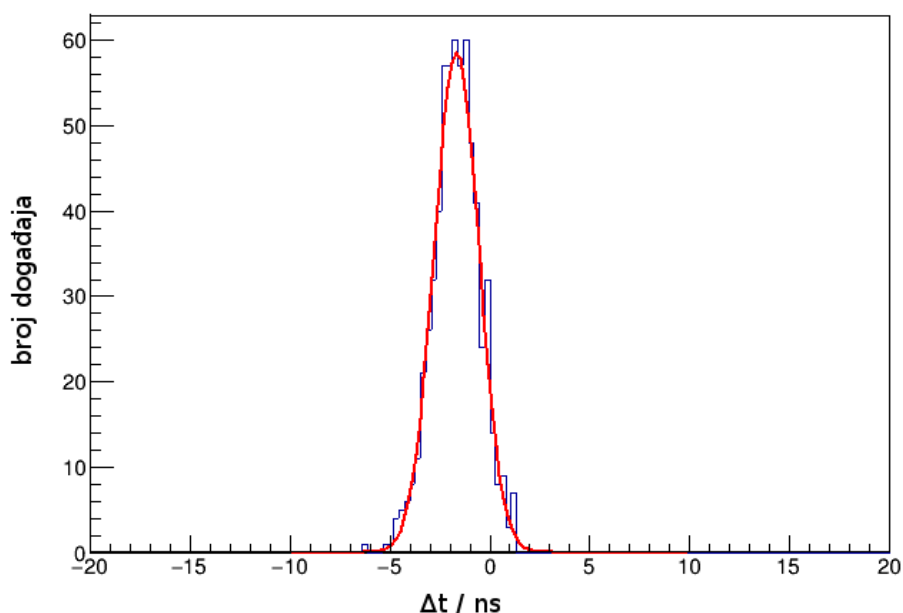
Histogram vremenske razlike primanja signala sa dva detektora smo odredili na nekoliko načina. Kako bismo eliminirali utjecaj međusobne sinkronizacije dva digitalizatora impulsa na vremensku rezoluciju detektora, na jednom digitalizatoru impulsa smo promatrali određene kanale s detektora 1 i detektora 2. U ovom radu, ćemo prikazati dva načina određivanja vremenske razlike primanja signala. Slika 3.29 prikazuje izgled signala u području interesa na kanalu 5 detektora 1 (križići) i na kanalu 5 detektora 2 (kružići) za jedan događaj.



Slika 3.29: Izgled signala na kanalu 5 detektora 1 i na kanalu 5 detektora 2 za jedan događaj.

### 1. način za određivanje vremenskog odgovora:

U prvom slučaju, pri određivanju vremenske rezolucije, promatrana je točka svakog događaja koja odgovara 30% amplitude signala na kanalu 5 detektora 1 i na kanalu 5 detektora 2. Ta točka je određena na način da je najprije pronađena točka koja odgovara maksimumu signala te je na temelju nje određena točka koja odgovara 30% maksimalne vrijednosti. Zatim je napravljena prilagodba pravca kroz četiri susjedne točke u okolini točke koja odgovara 30% amplitude signala kako bi u konačnici bilo moguće točno odrediti  $x$  koordinatu dane točke. U histogram vremenske razlike primanja signala sa dva detektora su spremene razlike vrijednosti  $x$  koordinate za kanal 5 detektora 1 i kanal 5 detektora 2, ali su propuštani samo oni signali za koje vrijedi da je energija dobivena rekonstrukcijom pomoću integrala jednaka  $\mu \pm 2\sigma$ . Naposljetku je na dobiveni histogram vremenske razlike prilagođena Gaussovu funkciju kako bi se odredila vrijednost standardne devijacije dobivenog histograma (slika 3.30).

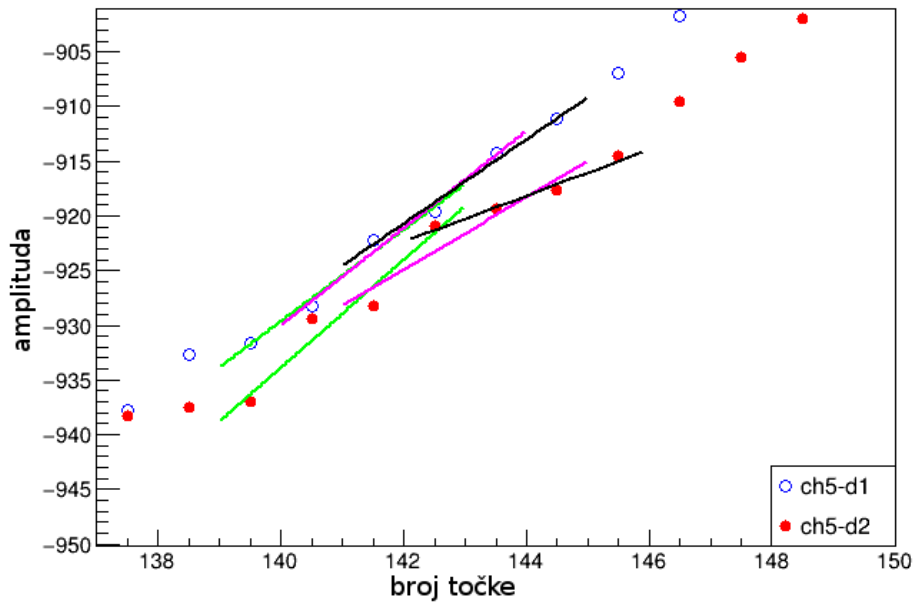


Slika 3.30: Histogram vremenske razlike primanja signala s kanala 5 detektora 1 i kanala 5 detektora 2. Histogram je dobiven na temelju određivanja točke koja odgovara 30% amplitude signala.

Vrijednost standardne devijacije iznosi  $\sigma = 1,12353ns$ , iz čega slijedi da je vremenska rezolucija za ovaj slučaj:  $\Delta t = 2,35\sigma = 2,64ns$ .

## 2. način za određivanje vremenskog odgovora:

U drugom slučaju, vremenska rezolucija je određena na način da smo postavili tri bliske vrijednosti praga u iznosu od 930, 925 i 920 kao što prikazuje slika 3.31. Bilo je potrebno pronaći točku signala svakog događaja čija je vrijednost na  $y$  osi upravo jednaka vrijednosti praga. Kako bismo bili u mogućnosti odrediti  $x$  koordinate koje točno odgovaraju vrijednostima 930, 925 i 920 na  $y$  osi, najprije je bilo potrebno pronaći prvu točku iznad zadane vrijednosti. Zatim je kao i u prethodnom slučaju napravljena prilagodba pravca kroz četiri susjedne točke u okoline te točke (slika 3.31). Na kraju su određene  $x$  koordinate točaka koje odgovaraju zadanim  $y$  vrijednostima.



Slika 3.31: Uvećani dio signala s pripadnim pravcima za dane vrijednosti praga na kanalu 5 detektora 1 (ch5-d1) i na kanlu 5 detektora 2 (ch5-d2).

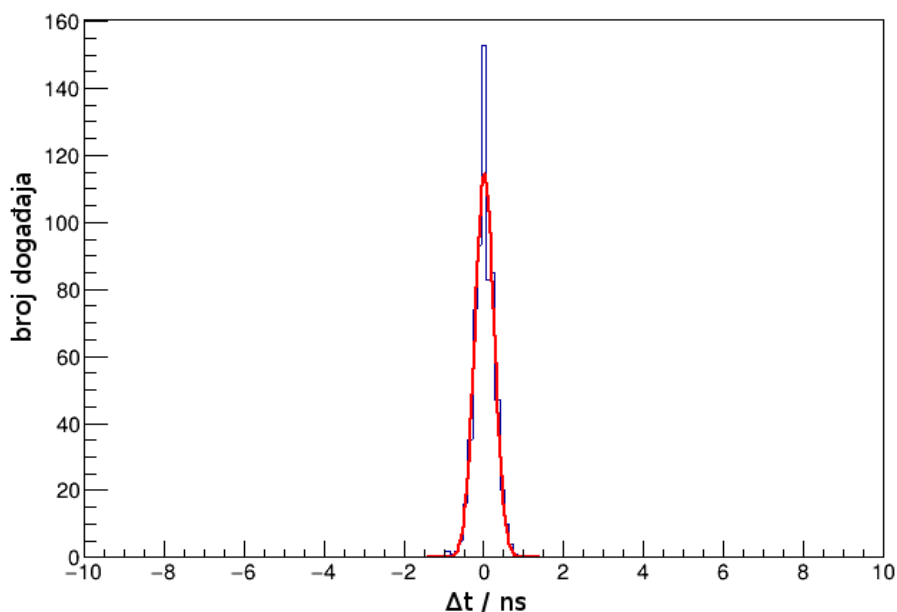
U histogram vremenske razlike primanja signala sa dva detektora ( $\Delta t$ ) su spremane razlike srednje vrijednosti  $x$  koordinata za tri vrijednosti praga za kanal 5 detektora 1 ( $t_{d1}$ ) i kanal 5 detektora 2 ( $t_{d2}$ ).

$$\Delta t = t_{d1} - t_{d2},$$

$$t_{d1} = \frac{x_{1d1} + x_{2d1} + x_{3d1}}{3}, \quad t_{d2} = \frac{x_{1d2} + x_{2d2} + x_{3d2}}{3}.$$

Kao i u prethodnom slučaju propušteni su samo oni signali za koje vrijedi da je energija jednaka  $\mu \pm 2\sigma$ . Na slici 3.32 se nalazi dobiveni histogram vremenske razlike. Vrijednost standardne devijacije iznosi  $\sigma = 0,222667ns$ , a iz toga slijedi da je vremenska rezolucija:

$$\Delta t = 2,35\sigma = 0,523ns.$$

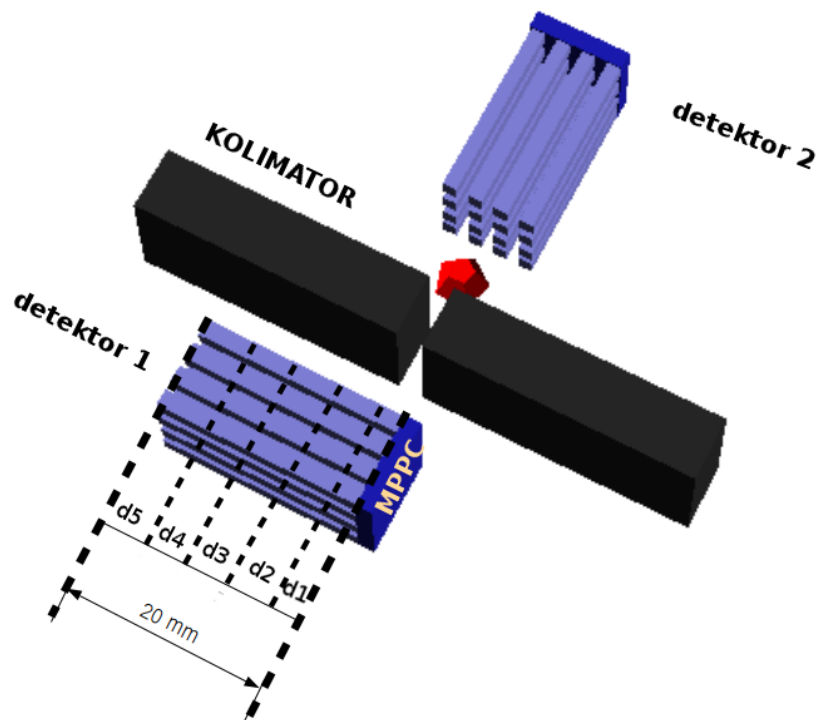


Slika 3.32: Histogram vremenske razlike dobiven na temelju određivanja srednje vrijednosti  $x$  koordinata za tri vrijednosti praga: 930, 925 i 920.

### 3.6 Ispitivanje oblika signala

Naposljetku smo željeli ispitati kako udaljenost točke interakcije u kristalu od fotomultiplikatora utječe na dobiveni signal. U tu smo svrhu modificirali eksperimentalni postav kao što je prikazano na slici 3.33.

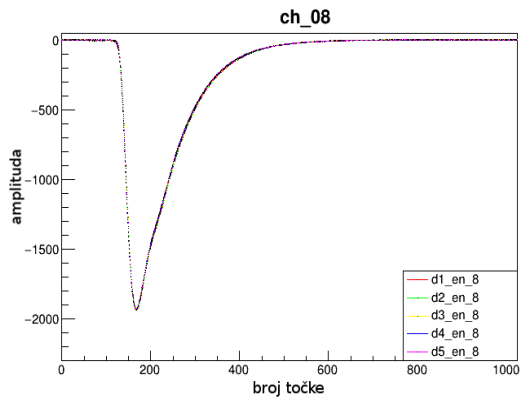
LFS kristal korišten u eksperimentu ima ukupnu duljinu  $20\text{mm}$ . Zamišljenim linijama smo podijelili kristal na pet udaljenosti od fotomultiplikatora, s tim da se udaljenost  $d_1$  nalazi  $2\text{mm}$  od fotomultiplikatora. Pomoću kolimatora smo snop zračenja iz radioaktivnog izotopa natrija  $^{22}\text{Na}$  usmjerili točno na određenu udaljenost. Ukupno je napravljeno pet mjerenja na pet različitih udaljenosti od fotomultiplikatora. Kako bismo pokazali utječe li udaljenost koliminiranog snopa od fotomultiplikatora najprije smo crtali dobivene signale na osmom, devetom, desetom i jedanaestom kanalu. Slika 3.34 prikazuje dobivene signale mjerene kada je snop usmjeren na udaljenost  $d_1 = 2\text{mm}$ ,  $d_2 = 6\text{mm}$ ,  $d_3 = 10\text{mm}$ ,  $d_4 = 14\text{mm}$  i  $d_5 = 18\text{mm}$  od fotomultiplikatora na kanalu osam i kanalu devet, a slika 3.35 prikazuje dobivene signale za mjerenja na pet različitih udaljenosti na kanalima deset i jedanaest.



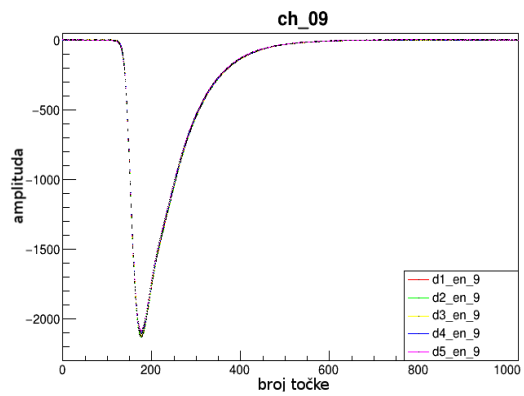
Slika 3.33: Eksperimentalni postav za ispitivanje ovisnosti o udaljenosti od fotomultiplikatora.

Prikazani signali na slikama 3.34 i 3.35 predstavljaju ustvari usrednjene signale svih događaja za koje je ispunjen uvjet da je energija signala veća od  $\mu + \sigma$  i manja od  $\mu - \sigma$ , gdje su  $\mu$  i  $\sigma$  vrijednosti dobivene prilagodbom Gaussove funkcije na spektar dobiven rekonstrukcijom energije pomoću amplitude.

Iz dobivenih prikaza signala danih na slikama 3.34 i 3.35 uočavamo da nema razlike u izgledu signala u ovisnosti o udaljenosti točke interakcije u kristalu od fotomultiplikatora. Ono što možemo uočiti na uvećanom prikazu signala danog na slici 3.36 je mala razlika u amplitudi signala za pojedinu udaljenost. Međutim, budući da smo pokazali u poglavlju 3.2.2 da amplituda signala ovisi o temperaturi ovu razliku u amplitudi signala na pojedinoj udaljenosti možemo pripisati upravo promijeni temperature za vrijeme trajanja svih pet mjerenja.

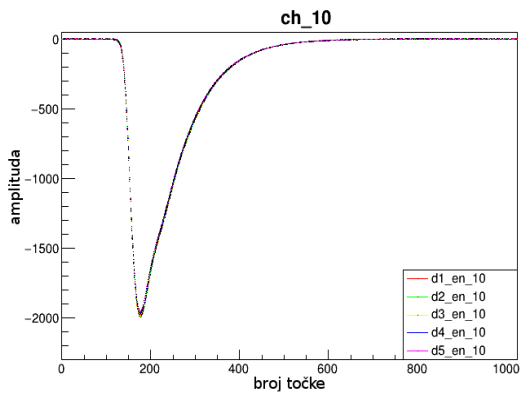


(a) Kanal osam detektora 1.

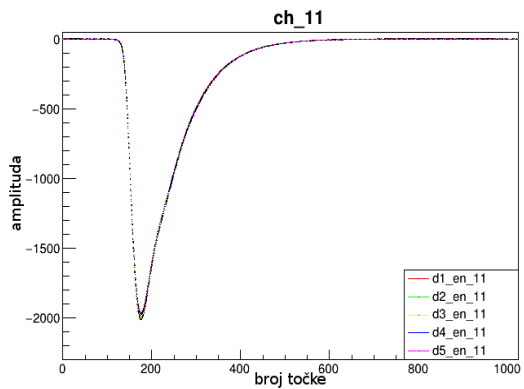


(b) Kanal devet detektora 1.

Slika 3.34: Ovisnost izgleda signala o udaljenosti kolimiranog snopa od fotomultiplikatora na kanalu 8 detektora 1 (3.34a) i na kanalu 9 detektora 1 (3.34b).

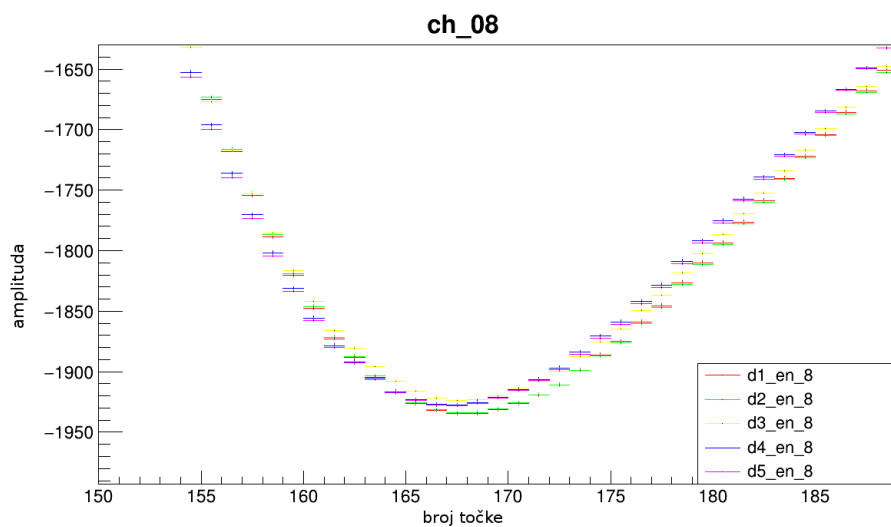


(a) Kanal deset detektora 1.



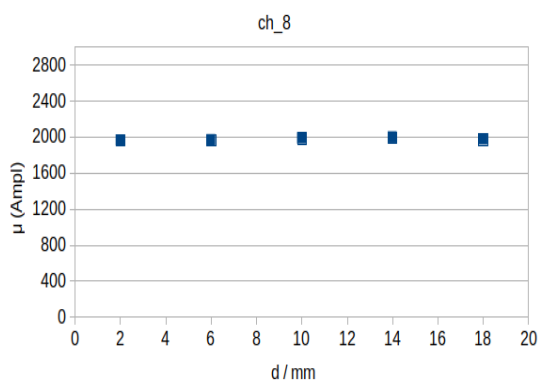
(b) Kanal jedanaest detektora 1.

Slika 3.35: Ovisnost izgleda signala o udaljenosti kolimiranog snopa od fotomultiplikatora na kanalu 10 detektora 1 (3.35a) i na kanalu 11 detektora 1 (3.35b).

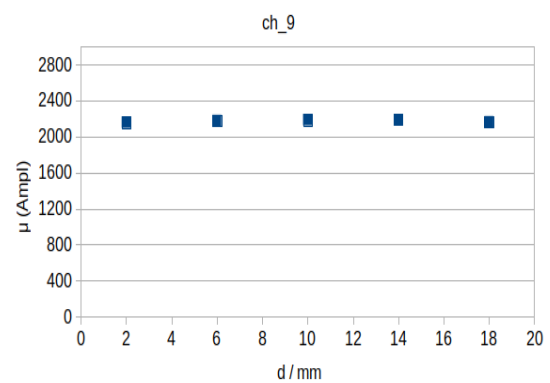


Slika 3.36: Uvećani prikaz signala na kanalu 8 za pet različitih udaljenosti točke interakcije gama zračenja od fotomultiplikatora.

Kako bismo korigirali amplitudnu ovisnost o temperaturi, kao srednju vrijednost temperature svih mjerenja uzeli smo  $21^{\circ}\text{C}$ . Postupkom opisanim u poglavlju 3.2.2 određene su ovisnosti amplitude dobivene rekonstrukcijom energije pomoću amplitude i pomoću integrala o temperaturi pri konstantnom naponu ( $53,7\text{V}$ ) za kanale 8, 9, 10 i 11. Na temelju tih ovisnosti odredili smo kolika bi bila amplituda na temperaturi  $21^{\circ}\text{C}$  za svaki pojedini kanala. Prilagodбом Gaussove funkcije na spektre dobivene rekonstrukcijom energije pomoću amplitude odredili smo mjerene vrijednosti amplitude na svakom kanalu. Kako bismo korigirali ovisnost mjerene vrijednosti amplitude o temperaturi odredili smo odstupanje izračunatih vrijednosti amplitude na temelju jednadžbe pravca na temperaturi  $21^{\circ}\text{C}$  od vrijednosti koju bi pravac imao na svakoj pojedinoj temperaturi mjerenja. To odstupanje smo pridodali stvarnoj mjerenoj vrijednosti amplitude. Na slici 3.37 i 3.38 su dani grafovi ovisnosti amplitude signala dobiveni rekonstrukcijom energije pomoću amplitude u ovisnosti o udaljenosti točke interakcije kristala od fotomultiplikatora.



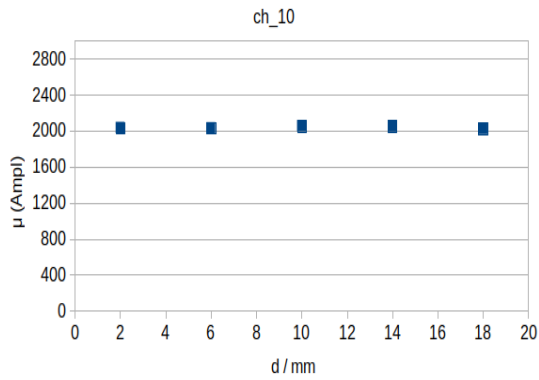
(a) Kanal osam detektora 1.



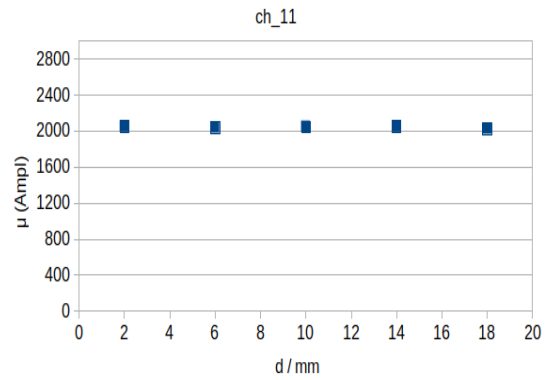
(b) Kanal devet detektora 1.

Slika 3.37: Ovisnost amplitude signala dobivenog rekonstrukcijom energije pomoću amplitude o udaljenosti kolimiranog snopa od fotomultiplikatora na kanalu 8 detektora 1 (3.37a) i na kanalu 9 detektora 1 (3.37b).





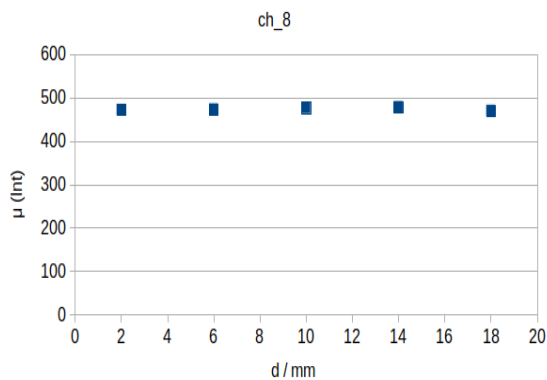
(a) Kanal deset detektora 1.



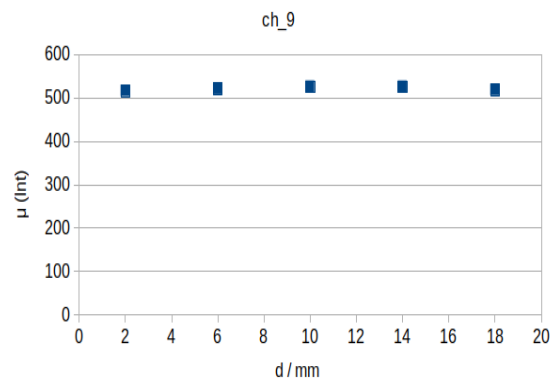
(b) Kanal jedanaest detektora 1.

Slika 3.38: Ovisnost amplitude signala dobivenog rekonstrukcijom energije pomoću amplitude o udaljenosti kolimiranog snopa od fotomultiplikatora na kanalu 10 detektora 1 (3.38a) i na kanalu 11 detektora 1 (3.38b).

Za spektar dobiven rekonstrukcijom energije pomoću integrala je ponovljen identičan postupak kao i kod određivanja ovisnosti amplitude o udaljenosti od fotomultiplikatora kod spektra rekonstruirane energije pomoću amplitude te su dobiveni grafovi prikazani na slikama 3.39 i 3.40.

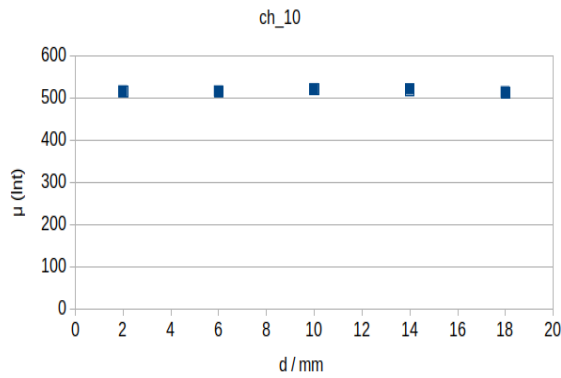


(a) Kanal osam detektora 1.

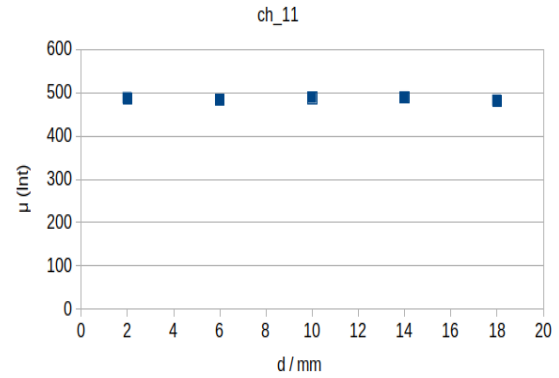


(b) Kanal devet detektora 1.

Slika 3.39: Ovisnost broja kanala na kojemu se nalazi prosjek ( $\mu(Int)$ ) foto-vrha dobivenog rekonstrukcijom energije pomoću integrala o udaljenosti kolimiranog snopa od fotomultiplikatora na kanalu 8 detektora 1 (3.39a) i na kanalu 9 detektora 1 (3.39b).



(a) Kanal deset detektora 1.



(b) Kanal jedanaest detektora 1.

Slika 3.40: Ovisnost broja kanala na kojemu se nalazi prosjek ( $\mu(Int)$ ) foto-vrha dobivenog rekonstrukcijom energije pomoću integrala o udaljenosti kolimiranog snopa od fotomultiplikatora na kanalu 10 detektora 1 (3.40a) i na kanalu 11 detektora 1 (3.40b).

Kao što se može primijetiti iz danih grafova koji prikazuju amplitude korigirane za ovisnost o temperaturi, amplituda ne ovisi o udaljenosti točke interakcije kolimiranog snopa zračenja u kristalu od fotomultiplikatora. S obzirom da imamo kristale koji su polirani, rezultat je u skladu s očekivanjima. Zbog totalne refleksije unutra kristala, bez obzira na kojoj udaljenosti se događa interakcija, isti broj fotona će doći do fotomultiplikatora.

## 4 Zaključak

U ovom diplomskom radu ispitan je rad novih scintilacijskih detektora konstruiranih u Laboratoriju za nuklearnu fiziku koji se sastoje od LFS kristala i  $4 \times 4$  MPPC silicijskog fotomultiplikatora. Kao radioaktivni izvor za ispitivanje sustava korišten je izotop natrija  $^{22}\text{Na}$ . Obrada prikupljenih podataka je vršena pomoću ROOT platforme. Prvi korak pri analizi podataka je bio rekonstrukcija energije na temelju signala dobivenih pomoću digitalizatora impulsa. Rekonstrukcija energije je izvršena na dva načina, integracijom signala i određivanjem amplitude signala. Zatim je rekonstruirane spektre energije bilo potrebno kalibrirati. Glavni korak pri kalibraciji energije je bio ispraviti svaki kanal za nelinearnost odaziva silicijskog fotomultiplikatora. Na temelju dobivenih spektara određena je energijska rezolucija detektora. Pokazalo se da je energijska rezolucija za spektre rekonstruirane energije pomoću integrala nešto bolja nego energijska rezolucija za spektre rekonstruirane energije pomoću amplitude. Na naponu  $53,7\text{V}$  energijska rezolucija za spektre energije rekonstruirane pomoću integrala iznosi  $12,9\%$  na energiji  $511\text{keV}$ . Također se pokazalo da je relativna energijska rezolucija to bolja što je radni napon veći. Nadalje, željeli smo ispitati ovisnost relativne energijske rezolucije o temperaturi. Međutim, pokazalo se da se relativna energijska rezolucija ne mijenja s porastom temperature od  $18,5^\circ\text{C}$  do  $22^\circ\text{C}$ .

Vremensku rezoluciju detektora smo određivali na nekoliko načina. Najbolja metoda se pokazala metoda postavljanja tri bliske vrijednosti praga. Dobivena vremenska rezolucija za taj slučaj iznosi  $523\text{ps}$  što je nešto lošije od vremenske rezolucije novijih TOFPET uređaja korištenih u medicini. Moguće rješenje za postizanje bolje vremenske rezolucije je u korištenju bržih pojačala, odnosno pojačala s vremenom porasta signala manjim od  $15\text{ns}$ , te mjerenjima na višim naponima.

Nadalje, u ovome radu se pokazalo da amplituda signala dobivenih iz scintilacijskih detektora sastavljenih od LFS kristala i  $4 \times 4$  MPPC silicijskog fotomultiplikatora raste linearno s porastom radnog napona što se javlja kao posljedica promijene broja mikroćelija koje okidaju s naponom. Također je utvrđeno da se amplituda signala smanjuje s porastom temperature što se javlja kao posljedica ovisnosti amplitude jednog fotoelektrona o temperaturi.

U radu je određen i napon proboja detektora za tri različite temperature. Napon proboja za ovaj detektor se kreće između  $52,24V$  i  $52,49V$  što je nešto više od vrijednosti napona proboja istaknutih od strane proizvođača koje se kreću između  $52,0V$  i  $52,1V$ . Budući da je napon proboja mjeren za samo tri relativno bliske temperature, ne može se sa sigurnošću potvrditi ovisnost napona proboja o temperaturi. Bilo bi potrebno izvesti više mjerenja u kontroliranim uvjetima bez temperaturnih oscilacija. Naposljetku smo željeli ispitati utječe li udaljenost točke interakcije snopa gama zračenja u kristalu od fotomultiplikatora na dobiveni signal. Mjerenjima se pokazalo da udaljenost snopa od fotomultiplikatora ne utječe niti na izgled signala niti na njegovu amplitudu što se i može očekivati u kristalima čije su stranice polirane i obložene refleksivnim materijalom.

## 5 Metodički dio

[14–19]

Iako tradicionalna predavačka nastava može biti učinkovita za prenošenje informacija, edukacijska istraživanja u fizici su pokazala da takav oblik nastave ne razvija visok stupanj razumijevanja samog gradiva kod učenika. Veliko Hakeovo istraživanje provedeno na 6542 učenika i studenta je pokazalo da su pri rješavanju konceptualnih testova iz mehanike grupe učenika kojima je nastava bila interaktivno usmjerena ostvarile puno bolje rezultate od skupina učenika kojima se pristupilo tradicionalnim predavačkim pristupom [24]. U tradicionalnom predavačkom obliku nastave nastavnik je u središtu pozornosti, a ne učenik. Iako se i u tradicionalnoj predavačkoj nastavi od učenika očekuje visok intelektualni angažman, on se nažalost najčešće ne postiže u dovoljnoj mjeri. Kako bi se riješio taj problem, te omogućio direktan uvid u istraživački karakter fizike kao znanstvene discipline u zadnje vrijeme se sve više tradicionalna predavačka nastava zamjenjuje s interaktivnom istraživački usmjerenom nastavom fizike.

Interaktivnu nastavu fizike možemo definirati kao svaki oblik nastave koja promiče aktivno učenje, a ostvaruje se kroz interakciju nastavnika i učenika, ali i učenika međusobno. Prilikom aktivnog učenja, učenik postavlja sam sebi pitanja o sadržaju kojega uči, stalno testira svoje znanje i razumijevanje, te naposljetku evaluira vlastito razumijevanje. Interaktivnost u nastavi se postiže različitim metodama kao što su: razredna rasprava, konceptualna pitanja s karticama, kooperativno rješavanje zadataka, interaktivno izvođenje pokusa te računalne interaktivne metode.

Istraživački usmjerena nastava je oblik nastave koji omogućuje razumijevanje fizike kroz kombiniranje znanja i znanstvenog razmišljanja i zaključivanja, potiče smisljenije i dublje učenje od pukog memoriranja, omogućuje direktan uvid u istraživački karakter fizike kao znanstvene discipline. Istraživački usmjerena nastava fizike je organizirana tako da učenici traže odgovore na znanstvena pitanja, formuliraju i testiraju hipoteze, osmišljavaju i provode pokuse, samostalno zapisuju svoja predviđanja, opažanja i zaključke, prezentiraju drugim učenicima svoje rezultate i argumentirano ih brane. Dobar istraživački usmjeren sat započinje otvaranjem problema pomoću uvodnog pitanja koje će osim motivacije dati i polaznu točku za razmišljanje, te prikupiti učeničke ideje i dati uvid u njihova predznanja. Zatim slijedi demonstracijski

pokus koji služi za upoznavanje nove pojave ili koncepta. Potom nastavnik postavlja glavno istraživačko pitanje te s učenicima diskutira kako provesti istraživanje gdje će ispitati o čemu navedena pojava ovisi. Nakon provedenog istraživanja, slijedi konstruiranje modela i matematički opis pojave. Naposljetku, u završnom dijelu sata nastavnik različitim interaktivnom metodama provjerava stupanj razumijevanja kod učenika, potiče stvaranje veza između pojedinačnih elemenata novo-stečenoga znanja, povezuje novo znanje sa situacijama iz stvarnog života, ali također evaluira i pripremu i izvedbu svoga sata.

U nastavku je dana priprema za interaktivan istraživački sat fizike za nastavnu jedinicu "Radioaktivnost i vrste radioaktivnih raspada". Priprema je pisana za četvrti razred gimnazije i predviđena je za dva školska sata. Iako je temelj istraživački usmjerene nastave pokus, u nekim nastavnim jedinicama nije moguće provesti istraživačke pokuse u kojima bi se istražile karakteristike navedene pojave kao što je na primjer slučaj u ovoj nastavnoj jedinici pri opisivanju karakteristika  $\alpha$  i  $\beta$  radioaktivnih raspada. U tu se svrhu umjesto pokusa na satu koristimo računalnim simulacijama. Da bi simulacija bila korisna, a ne samo zanimljiva, važno je simulaciju izvoditi isto kao i stvarni pokus. Simulacija mora biti popraćena pitanjima koja navode učenike na razmišljanje i zaključivanje o danoj pojavi. Za ovaj nastavni sat je osmišljeno da učenici u grupama po dvoje sami prolaze kroz simulaciju uz pomoć radnog listića koji ih navodi kako koristiti simulaciju te pitanjima potiče na razmišljanje i samostalno zaključivanje. Ako nismo u mogućnosti posuditi računalnu učionicu za taj nastavni sat, također je moguće da profesor simulaciju izvodi frontalno na svom računalu, ali i tada je nužno učenike voditi kroz simulaciju pitanjima kao da se izvodi stvarni pokus. Važnost ove nastavne jedinice ne leži samo u razumijevanju gradiva već i u činjenici da se zračenje iz radioaktivnih izvora koristi u medicini u dijagnostičke i terapijske svrhe, a također se sve više koristi i u industriji. Učenici nakon ovog nastavnog sata trebaju razviti ideju o korisnosti kao i o štetnosti radioaktivnog zračenja za čovjeka.

## NASTAVNA PRIPREMA IZ FIZIKE

### OBRAZOVNI ISHODI (OČEKIVANA UČENIČKA POSTIGNUĆA)

Učenici će nakon sata moći:

- opisati pojavu radioaktivnosti i objasniti ionizirajuće djelovanje radioaktivnog zračenja
- navesti vrste radioaktivnog raspada i njihova osnovna svojstva
- razlikovati  $\gamma$  emisiju od  $\alpha$  i  $\beta$  radioaktivnog raspada
- opisati  $\alpha$  raspad
- opisati  $\beta^+$  i  $\beta^-$  raspad
- opisati  $\gamma$  emisiju
- navesti i primijeniti zakone očuvanja naboja i masenog broja kod radioaktivnih raspada
- opisati glavne izvore i načine zaštite od štetnih utjecaja radioaktivnog zračenja

Učenici će na satu razvijati:

- sposobnosti prosuđivanja, razmišljanja i samostalnog djelovanja
- sposobnost promatranja i zaključivanja na temelju opaženog
- sposobnost rada u grupama
- sposobnost verbalnog i pismenog izražavanja

### ODGOJNI ISHODI

Učenici će tijekom sata usvajati sljedeće vrijednosti:

- formiranje vlastitog mišljenja na temelju činjenica
- uvažavanje tuđeg mišljenja i načina razmišljanja
- tolerancija i demokratičnost

## TIJEK NASTAVNOG SATA

### 1) Uvodni dio: otvaranje problema, prikupljanje ideja, upoznavanje pojave

**UVODNI PROBLEM:** *Jeste li ikada u filmovima, računalnim igricama, na vijestima vidjeli znak na slici 5.1? Što vam taj znak govori?*



Slika 5.1: Znak za opasnost od radioaktivnosti [20].

Učenici iznose svoja iskustva gdje su se i kada susreli s navedenim znakom. Potiče se razredna rasprava o tome što nam taj znak govori. Bitno je usmjeriti raspravu na ideju da znak na slici 5.1 predstavlja znak za opasnost od radioaktivnosti.

*Znak na slici predstavlja opasnost od radioaktivnog zračenja. Zna li koje su posljedice radioaktivnog zračenja na čovjeka?*

Učenici iznose svoje ideje. Ako je potrebno treba usmjeriti učenike da se prisjete o učincima velikih doza radioaktivnog zračenja iz Hirošime i Nagasakija, što su učili na satovima povijesti.

*Zna li neke izvore radioaktivnih zračenja?*

Razrednu raspravu treba usmjeriti na to da učenici dođu do zaključka da osim prirodnih izvora radioaktivnog zračenja koji potječu sa Zemlje (kao što je na primjer plin radon) ili koji nastaju kao posljedica djelovanja kozmičkih zraka, postoje i umjetni izvori radioaktivnih zračenja. Izvori radioaktivnih elemenata mogu biti pokusne nuklearne eksplozije, nuklearne elektrane, industrija i drugi.



*Može li ipak radioaktivno zračenje biti i korisno?*

Od učenika očekujemo da se prisjete primjene radioaktivnog zračenja u medicini (PET, liječenje raka...).

**DEMONSTRACIJSKI POKUS a):** Uključimo Geiger Müllerov brojač dok su izvori radioaktivnog zračenja spremljeni u olovne spremnike.



Slika 5.2: Geiger Müllerov brojač.

*Što predstavlja svaki "klik" Geiger Müllerovog brojača?*

*Zašto Geiger Müllerov brojač registrira radioaktivno zračenje iako nemamo izvora radioaktivnog zračenja?*

*Otkuda potječe zračenje koje Geiger Müllerov brojač očitava?*

Učenici iznose svoje ideje i odgovaraju na navedena pitanja. Bitno je s učenicima raspraviti da svaki "klik" predstavlja detektiranu česticu i da zračenje koje Geiger Müllerov brojač očitava potječe od prirodnog plina radona i kozmičkog zračenja. Treba kod učenika razviti ideju da je radioaktivno zračenja uvijek prisutne oko nas.

**DEMONSTRACIJSKI POKUS b):** Zatim u blizinu Geiger Müllerovog brojača stavimo radioaktivni preparat (mrežice za plinsku rasvjetu).

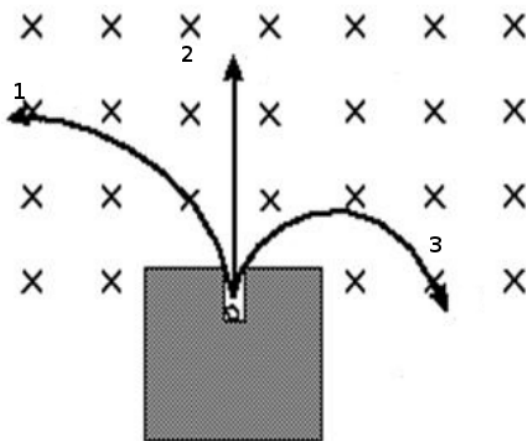
*Što sada primjećujete? Koliki je broj "klikova" sad u odnosu kada nismo imali mrežicu za plinsku rasvjetu u blizini brojača?*

*Zašto se broj "klikova" povećao?*

*Što predstavlja mrežica za plinsku rasvjetu?*

Broj "klikova" se povećao u odnosu na slučaj a) kada nismo imali plinsku mrežicu. To znači da sada Geiger Müllerov brojač detektira više radioaktivnih čestica. Plinska mrežica predstavlja izvor radioaktivnog zračenja.

Radioaktivnost su otkrili H. Becquerel, Pierre i Marie Curie. H. Becquerel je 1896. godine kristal uranove soli postavio na fotografsku ploču i uzorak izložio Sunčevom zračenju te se na ploči pojavio obris kristala. Kada je ponovio pokus u Parizu je bio oblačan dan, ali na njegovo iznenađenje iako foto-ploča nije bila izložena Sunčevom zračenju na njoj se stvorio obris kristala uranove soli i to izraženiji nego za vrijeme izlaganja Suncu. To zračenje koje emitiraju neki elementi i djeluje na fotografsku ploču je Marie Curie nazvala radioaktivno zračenje po elementu radiju koji ostavlja puno veći trag od kristala soli urana. Zatim su 1903. godine Marie i Pierre Curie proučavali što se događa s emitiranim zračenjem iz radioaktivnih tvari kada tvar stave u magnetno polje. Ono što su primijetili je da postoje tri tipa zraka koje emitiraju radioaktivne tvari. Zamislimo da je magnetsko polje postavljeno "u papir" i radioaktivna tvar emitira tri snopa čestica kao što prikazuje slika 5.3.



Slika 5.3: Radioaktivna tvar u magnetskom polju.

*S obzirom na način otklanjanja u magnetskom polju, što možete reći o naboju navedenih emitiranih čestica?*

Od učenika se očekuje da zaključe da su lijevi i desni snop čestica nabijeni suprotnom vrstom naboja, a da je središnji snop čestica neutralan.

*Biste li mogli na temelju dane slike odrediti kojom vrstom naboja je nabijena pojedina čestica?*

Od učenika se očekuje da se prisjete da na nabijenu česticu u magnetskom polju djeluje Lorentzova sila i da na temelju smjera zakretanja čestice mogu odrediti njen naboj.

*O čemu ovisi Lorentzova sila?*

$$F = qvB\sin(\theta)$$

*Kako će se gibati nabijene čestice u magnetskom polju pod utjecajem Lorentzove sile?*

Ako je smjer brzine okomit na linije magnetskog polja, Lorentzova sila će djelovati okomito na smjer brzine, te će imati ulogu centripetalne sile. Čestice će se gibati po kružnoj putanji.

*Na koji način možemo odrediti smjer Lorentzove sile?*

Smjer sile možemo odrediti pomoću pravila desne ruke. Za pozitivno nabijenu česticu, postavimo palac u smjeru brzine  $\mathbf{v}$ , ispružimo prste u smjeru polja  $\mathbf{B}$  i tada okomito iz dlana na pozitivnu česticu djeluje sila  $F_L$ . Ako je naboj negativan, tada je smjer sile suprotan.

*Odredite naboj svake pojedine čestice na temelju njegovog gibanja u magnetskom polju.*

Čestica 1 je nabijena pozitivno, čestica 2 je neutralna, a čestica 3 je nabijena negativno.

Česticu na koju magnetsko polje ne djeluje (čestica 2) nazivamo  $\gamma$  čestica, a česticu koja je nabijena negativno (čestica 3)  $\beta^-$  čestica. Pozitivno nabijenu česticu (čestica 1) nazivamo  $\alpha$  čestica, a kasnije ćemo vidjeti da postoji još jedna vrsta ra-

dioaktivnog zračenja koja je pozitivno nabijena.  $\alpha$  i  $\beta$  čestice nastaju radioaktivnim raspadima jezgre, dok  $\gamma$  zračenje nije tipičan oblik radioaktivnog raspada jer pri toj vrsti zračenja ne dolazi do raspada jezgre već pobuđena jezgra emitira višak energije u obliku  $\gamma$  čestice i pri tome prelazi u stanje niže energije.

## 2) Središnji dio: konstrukcija modela - fizikalni i matematički opis pojave

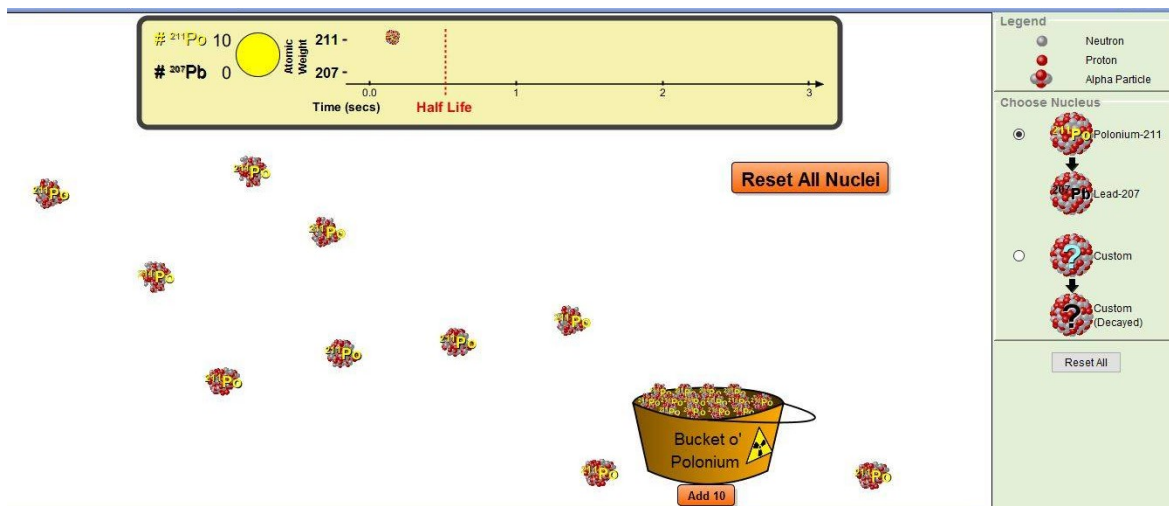
### ISTRAŽIVAČKO PITANJE 1: Što se događa s jezgrom pri $\alpha$ , $\beta$ i $\gamma$ raspadu?

Na ovo istraživačko pitanje učenici će odgovarati uz pomoć simulacija popraćenih radnim listićima. Simulacije pod nazivom  $\alpha$  raspad i  $\beta$  raspad mogu se pronaći na Phet-ovim stranicama te su besplatne i javno dostupne (stranica za simulaciju  $\alpha$  raspad se nalazi u literaturi pod [22], a stranica za simulaciju  $\beta^-$  raspada u literaturi pod [23]). Ako smo u mogućnosti posuditi računalnu učionicu za sat fizike, učenici bi simulacije izvodili u grupama po dvoje. Nakon obrađenog svakog radnog listića nužno je prodiskutirati s učenicima kroz razrednu raspravu što su primijetili, što su zapisali, naglasiti i ponoviti ono bitno.

### RADNI LISTIĆ 1: $\alpha$ raspad

Na stranici: [http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/veliki\\_periodni.html](http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/veliki_periodni.html) je dan periodni sustav elemenata. Klikom na pojedini element možete dobiti detaljnije informacije o odabranom kemijskom elementu. Periodni sustav elemenata sa dane stranice će vam koristiti pri rješavanju svih daljnjih radnih listića.

Pokrenite simulaciju  $\alpha$  raspad. U izborniku s desne strane su navedene oznake za proton (crveno), neutron (bijelo) i  $\alpha$  česticu (slika 5.4).



Slika 5.4: Simulacija  $\alpha$  raspada [22].

1) Na temelju oznaka u izborniku s desne strane napišite od čega se sastoji  $\alpha$  čestica.

---

( $\alpha$  čestica se sastoji od dva protona i dva neutrona)

2) Koliki je ukupan naboj  $\alpha$  čestice?

---

( $Q = +2e$ )

3) Koliki je atomski (protonski broj  $Z$ )  $\alpha$  čestice?

---

( $Z = 2$ )

4) Koliki je maseni broj ( $A$ )  $\alpha$  čestice? Što to znači?

---

( $A = 4$ , što znači da  $\alpha$  čestica osim dva protona sadrži i dva neutrona )

5) Na temelju danog periodnog sustava elemenata, pronađite kojem elementu odgovara  $\alpha$  čestica?

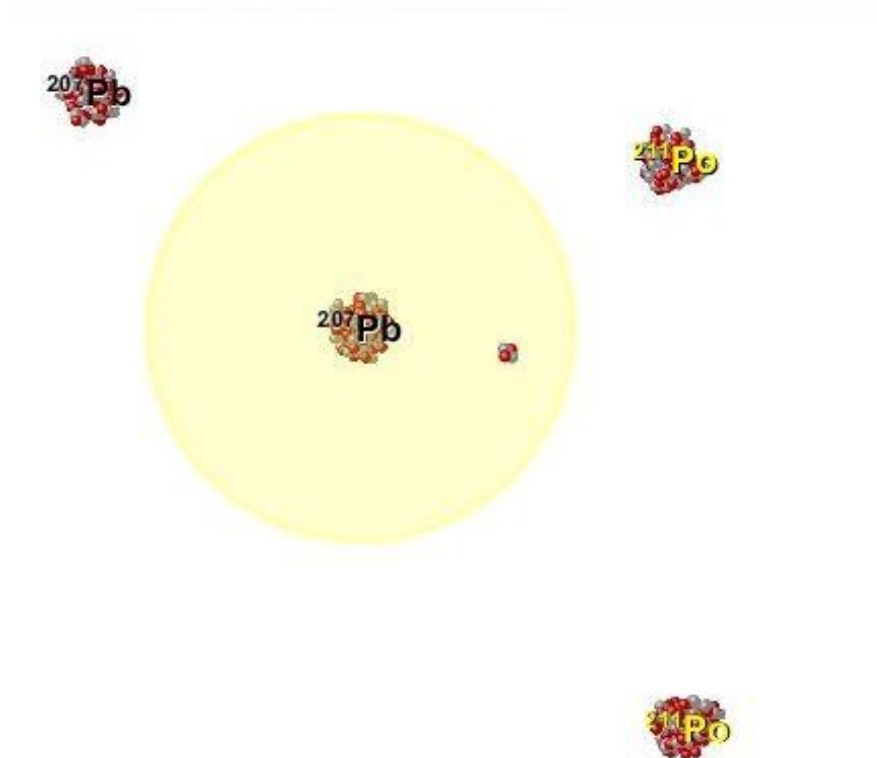
---

( $\alpha$  čestica odgovara jezgri Helija ( ${}^4_2\text{He}$ ))

6) Pokrenite simulaciju i promotrite što se događa pri  $\alpha$  raspadu elementa  $^{211}\text{Po}$ .

---

(Kemijski element  $^{211}\text{Po}$  se raspada na  $^{207}\text{Pb}$  i pri tome emitira  $\alpha$  česticu)

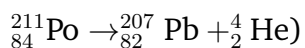


Slika 5.5: Simulacija  $\alpha$  raspada [22].

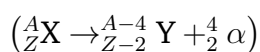
7) Pronađite u periodnom sustavu elemenata atomske brojeve polonija  $^{211}\text{Po}$  i olova  $^{207}\text{Pb}$ . Na temelju masenih i atomskih brojeva elemenata prije  $\alpha$  raspada i nakon  $\alpha$  raspada simbolički prikažite dani proces.

---

( $A(\text{Po})=211$ ,  $Z(\text{Po})=84$ ,  $A(\text{Pb})=207$ ,  $Z(\text{Pb})=82$ .)



8) Na temelju jednadžbe napisane u koraku 7) napišite općeniti izraz za proces  $\alpha$  raspada.



## Pitanja za razrednu raspravu:

Što ste zaključili na temelju simulacije, što je  $\alpha$  čestica? Od čega se sastoji  $\alpha$  čestica?

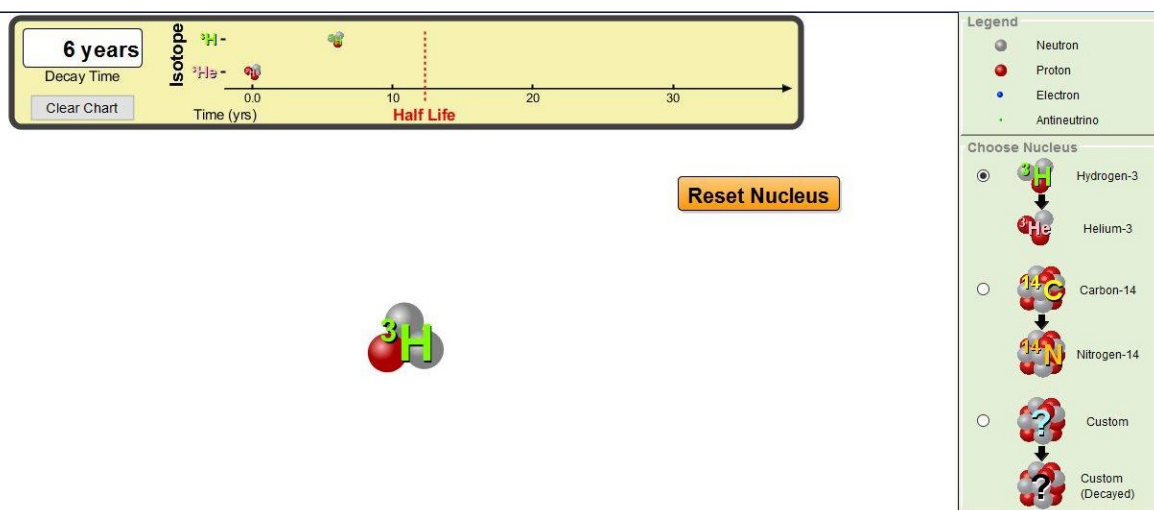
Što se događa s jezgrom pri  $\alpha$  raspadu? Kakav je maseni i protonski broj novonastale jezgre u odnosu na početnu jezgru koja se raspada  $\alpha$  raspadom?

Koliki je maseni i protonski broj svih produkata prije i nakon reakcije? Jesu li maseni i protonski broj pri  $\alpha$  raspadu očuvani?

## RADNI LISTIĆ 2: $\beta$ raspad

### a) $\beta^-$ raspad

Pokrenite simulaciju  $\beta$  raspad. U izborniku s desne strane su navedene oznake za proton (crveno), neutron (bijelo), elektron (plavo) i antineutrino (zeleno) (slika 5.6).



Slika 5.6: Simulacija  $\beta$  raspada [23].

1) U izborniku odaberite jezgru vodika  $^3\text{H}$ . Od koliko se protona i neutrona sastoji prikazana jezgra?

\_\_\_\_\_

(Od dva neutrona i jednog protona.)

2) Koliki je ukupan naboj jezgre  $^3\text{H}$  ?

\_\_\_\_\_

( $Q = +1e$ )

3) Koliki je atomski (protonski broj  $Z$ )  ${}^3\text{H}$  elementa?

---

( $Z = 1$ )

4) Koliki je maseni broj ( $A$ )  ${}^3\text{H}$  elementa?

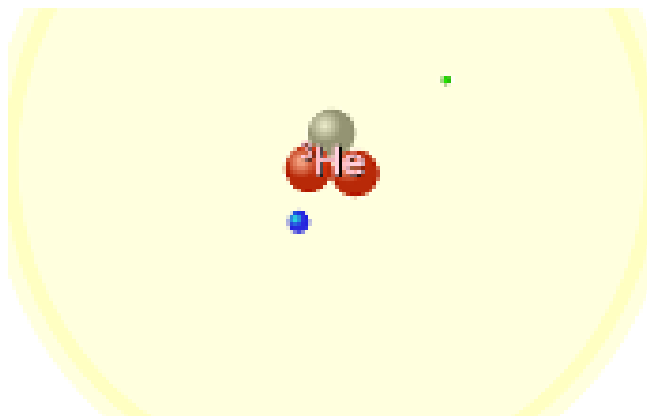
---

( $A = 3$ )

5) Pokrenite simulaciju i promotrite što se događa s jezgrom vodika  ${}^3\text{H}$  pri  $\beta^-$  raspadu?

---

(Jezgra vodika prelazi u  ${}^3_2\text{He}$  i pri tome emitira jedan elektron i jedan antineutrino (slika 5.7))



Slika 5.7: Simulacija  $\beta^-$  raspada [23].

6) Koliki je broj neutrona jezgre  ${}^3\text{H}$  u odnosu na novonastalu jezgru  ${}^3\text{He}$ ?

---

(Jezgra vodika prije  $\beta^-$  raspada ima jedan neutron više od novonastale jezgre helija)

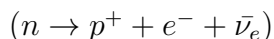
7) Što se dogodilo s tim neutronom?

---

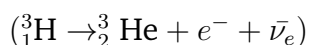
(Prilikom  $\beta^-$  raspada jedan neutron se pretvorio u proton, elektron i antineutrino)



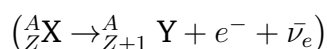
8) Možete li napisati jednadžbu koja opisuje tu pretvorbu?



9) Na temelju masenih i atomskih brojeva elementa vodika prije  $\beta^-$  raspada i elementa helija nakon  $\beta$  raspada simbolički prikažite dani proces.



10) Na temelju jednadžbe napisane u koraku 9) napišite općeniti izraz za proces  $\beta^-$  raspada.



### Pitanja za razrednu raspravu:

Što se događa s jezgrom pri  $\beta^-$  raspadu?

Što je antineutrino?

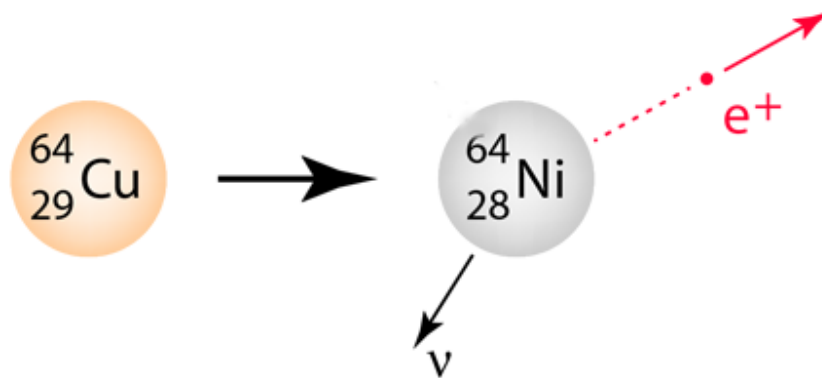
Bitno je s učenicima prodiskutirati da svaka čestica u prirodi ima svoju antičesticu koja se razlikuje od čestice samo po predznaku naboja, a sva druga svojstva su ista. Izuzetci su samo one čestice koje imaju sva jednaka svojstva te su same sebi antičestica (npr. foton). Antineutrino je antičestica neutrinu. I neutrino i antineutrino imaju naboj jednak nuli. Također treba naglasiti da neutrino i antineutrino imaju masu, oni nisu bezmasene čestice.

Koliki je maseni i protonski broj svih produkata prije i nakon reakcije? Jesu li maseni i protonski broj pri  $\beta^-$  raspadu očuvani?

Što je s nabojem prije i nakon reakcije? Je li naboj pri  $\beta^-$  raspadu očuvan?

**b)  $\beta^+$  raspad**

Promotrite sliku 5.8.



Slika 5.8: Prikaz  $\beta^+$  raspada.

1) Na temelju dane slike opišite što se događa s jezgrom Bakra pri  $\beta^+$  raspadu.

---

(Jezgra bakra prelazi u jezgru nikla i pri tome emitira pozitron i elektronski neutrino)

2) Na slici su dani maseni i atomski brojevi jezgara prije i nakon  $\beta^+$  raspada. Kolika je razlika u masenom broju tih dvaju jezgara?

---

(Nema razlike u masenim brojevima)

3) Kolika je razlika u atomskim brojevima jezgara prije i nakon  $\beta^+$  raspada? Što vam to govori?

---

( $Z(\text{Co}) - Z(\text{Ni}) = 1$ , što znači da kobalt (jezgra koju smo imali prije  $\beta^+$  raspada) ima jedan proton više od nikla)

4) Ako su maseni brojevi ovih dvaju elemenata jednaki, a broj protona se promijenio, kakav je odnos broja neutrona ovih elemenata?

---

(Budući da je maseni broj A jednak zbroju protona i neutrona unutar jezgre, na temelju masenog i protonskog broja možemo odrediti broj neutrona svakog elementa.)

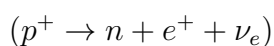
Nikal ima jedan neutron više nego kobalt)

5) Možete li sada na temelju broja protona i neutrona dva navedena elementa zaključiti što se dogodilo s jednim protonom unutar jezgre kobalta pri  $\beta^+$  raspadu?

---

(Jedan proton iz jezgre nikla se pri  $\beta^+$  raspadu pretvorio u neutron, pozitron i elektronski neutrino)

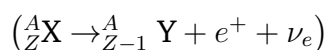
6) Možete li napisati jednadžbu koja opisuje tu pretvorbu?



7) Na temelju masenih i atomskih brojeva elementa prije i nakon  $\beta^+$  raspada simbolički prikazite dani proces.



8) Na temelju jednadžbe napisane u koraku 7) napišite općeniti izraz za proces  $\beta^+$  raspada.



### Pitanja za razrednu raspravu:

Što se događa s jezgrom pri  $\beta^+$  raspadu?

Što je neutrino?

Zašto pri  $\beta^+$  raspadu od protona uz neutron i pozitron nastaje i neutrino?

Koliki je maseni i protonski broj svih produkata prije i nakon reakcije? Jesu li maseni i protonski broj pri  $\beta^+$  raspadu očuvani?

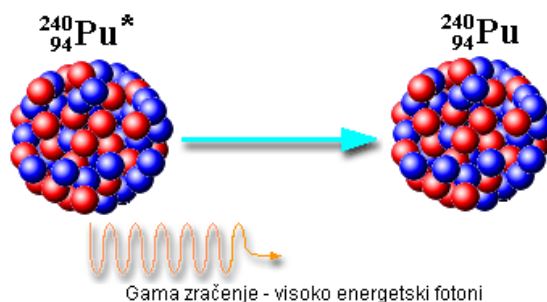
Je li naboj pri  $\beta^+$  raspadu očuvan?

Koja je razlika između  $\beta^-$  i  $\beta^+$  raspada?

### RADNI LISTIĆ 3: $\gamma$ raspad ili $\gamma$ emisija

Promotrite sliku 5.9.

#### Gama raspad



Slika 5.9: Prikaz  $\gamma$  emisije.

1) U periodnom sustavu elemenata pronađite naziv elementa Pu.

---

(Pu- plutonij)

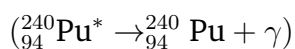
2) Na temelju dane slike opišite što se događa s jezgrom plutonija pri  $\gamma$  raspadu. Mijenja li se plutoniju maseni ili atomski broj pri  $\gamma$  raspadu?

---

(Ne, maseni i atomski broj ostaju ne promijenjeni.)

3) Na slici 5.9 jezgra plutonija je u početnom trenutku u pobuđenom stanju, stanju više energije. To stanje označavamo \* kod naziva elementa. Možete li na temelju slike napisati jednadžbu koja opisuje proces  $\gamma$  raspada?

---



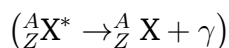
4) Možete li na temelju napisane jednadžbe zaključiti zašto se  $\gamma$  raspad često naziva  $\gamma$  emisijom?

---

(Jer to nije klasičan raspad kao što je  $\alpha$  i  $\beta$  raspad, tj. pri  $\gamma$  raspadu ne dolazi do promijene atomskog ili masenog broja (ne nastaje novi element). Pri  $\gamma$  raspadu dolazi do emisije viška energije u obliku  $\gamma$  zračenja kako bi dana jezgra prešla iz stanja više energije u stanje niže energije. Zbog toga se  $\gamma$  raspad često naziva i  $\gamma$  emisija.

5) Na temelju jednadžbe napisane u koraku 3) napišite općeniti izraz za proces  $\gamma$  emisije.

---



**Pitanja za razrednu raspravu:**

Što se događa s jezgrom pri  $\gamma$  raspadu?

Zašto se  $\gamma$  raspad često naziva i gama emisijom?

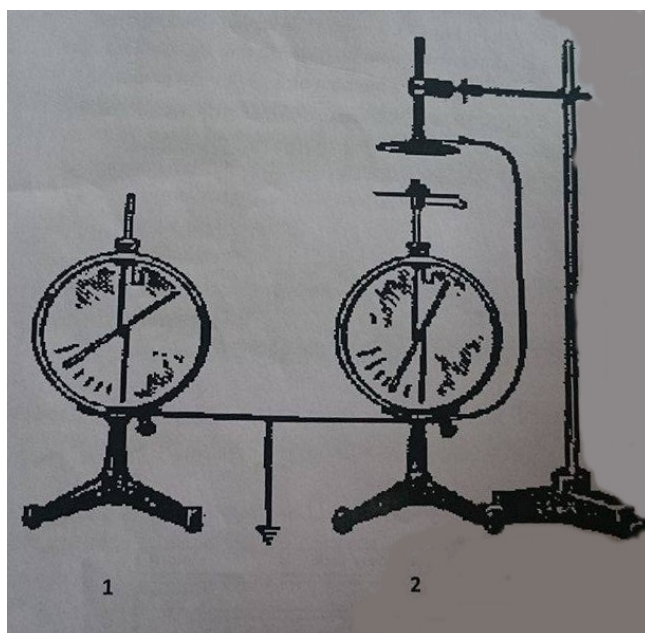
Koliki je maseni i protonski broj svih produkata prije i nakon reakcije? Jesu li maseni i protonski broj pri  $\gamma$  raspadu očuvani?

Je li naboj pri  $\gamma$  raspadu očuvan?

### 3) Završni dio : primjena modela - korištenje novostečenog znanja u novim situacijama, provjera ostvarenosti obrazovnih ishoda

U uvodnom dijelu sata smo već spomenuli da je radioaktivno zračenje opasno za živi organizam. No, zašto je takvo zračenje opasno? Na to pitanje ćemo odgovoriti pomoću pokusa.

**APLIKACIJSKI POKUS 1:** Dva elektroskopa postavimo kao na slici 5.10. Prvi elektroskop je referentni, dok će drugi pokazivati brzinu ionizacije. Pločica na drugom elektroskopu i pločica iznad nje čine pločasti kondenzator spojen s elektroskopom. Oba elektroskopa nabijemo negativno tako da im se kazaljke otklone za približno jednake kutove.



Slika 5.10: Eksperimentalni postav za demonstracijski pokus [21].

*Što predviđate da će se dogoditi s elektroskopom 1, a što s elektroskopom 2 kada između ploča kondenzatora postavimo radioaktivni preparat (mrežice za plinsku rasvjetu)?*

Učenici iznose svoje pretpostavke te ih zapisuju u bilježnice. Zatim izvodimo navedeni pokus.

*Što ste opazili? Zapišite što se dogodilo s elektroskopom 1, a što s elektroskopom 2.*

Bitno je da učenici uoče da se nakon nekog vremena elektroskop 2 izbio, a da je ot-

klon kazaljke na elektroskopu 1 ostao isti.

*Kako to možete objasniti? Što se u ovom pokusu ioniziralo?*

Postavljanjem potpitanja i usmjerenom razrednom raspravom učenici trebaju doći do zaključka kako radioaktivno zračenje iz plinske mrežice ( $\alpha$  čestice) ima veliku kinetičku energiju te lako izbacuje elektrone iz elektronskog omotača molekula zraka koje se nalaze između pločica kondenzatora. Tim procesom dolazi do ionizacije zraka između ploča kondenzatora, te sada pozitivno ionizirani zrak privlači elektrone iz elektroskopa te se na taj način elektroskop 2 izbija.

*Zašto nam je bio potreban elektroskop 1?*

Radi kontrole varijabli. Bitno je uočiti da na izbijanje elektroskopa 2 utječe radioaktivni preparat, a ne vlaga u zraku ili slične pojave.

Prolazeći kroz tvari, radioaktivno zračenje ionizira njene atome. Ovim pokusom želimo učenicima pokazati da je radioaktivno zračenje oblik ionizirajućeg zračenja, kao što je i kozmičko i rendgensko zračenje. Svaka fizička promjena u organizmu čovjeka potencijalno može biti štetna. Ioni koji nastaju pri izlaganju tijela radioaktivnim zračenjem narušavaju biokemijske procese u stanicama. To može dovesti do raznih poremećaja u funkcioniranju i dijeljenju samih stanica, te naposljetku do ozbiljnih bolesti, poput raka.

*Kako se možemo zaštititi od radioaktivnog zračenja?*

Učenici iznose svoje ideje. Bitno je s učenicima raspraviti kako nije svako zračenje jednako prodorno i jednako štetno. Na primjer, gama zračenje ima jako veliki domet i prolazi kroz ljudsko tkivo. Može ga se reducirati pomoću debelog sloja olova.

*Jeste li primijetili u kakvim spremnicima se čuvaju radioaktivni preparati koje smo danas koristili na satu?*

Plinske mrežice se čuvaju u olovnim spremnicima. Međutim, zračenje iz plinske mrežice nije toliko opasno te se stoga i koristi u edukacijske svrhe. Kako bismo pokazali učenicima što nas već može zaštititi od zračenja iz plinske mrežice, ponavljamo pokus iz uvodnog dijela sata.

**APLIKACIJSKI POKUS 2:** Opet u blizinu Geiger Mullerovog brojač stavimo radioaktivni preparat (mrežice za plinsku rasvjetu). Upalimo Geiger Mullerov brojač i pustimo učenike da se prisjete koliko čestica detektira brojač. Zatim, između Geiger Mullerovog brojača i radioaktivnog preparata postavimo komad bijelog papira.

*Što sada primjećujete? Koliki je broj "klikova" sad u odnosu kada između mrežicu za plinsku rasvjetu i brojača nije bilo papira?*

*Zašto se sada broj "klikova" smanjio?*

Kada postavimo papir između mrežice za plinsku rasvjetu i brojača broj "klikova" se smanji na gotovo jednak broj kao i kada nemamo izvora zračenja. Plinska mrežica uglavnom zrači  $\alpha$  čestice. Bijeli papir očito dovoljno dobro zaustavlja zračenje iz plinske mrežice, odnosno  $\alpha$  zračenje. Za razliku od  $\alpha$  zračenja,  $\beta$  zračenje ne može zaustaviti papir.  $\beta$  čestice može zaustaviti metalna pločica debljine nekoliko milimetara.

Za sami kraj sata, učenici će odgovarati na dva konceptualna pitanja s karticama vezana uz vrste radioaktivnih raspada i dva zadatka koje će rješavati u paru vezana uz zakone očuvanja. Kod konceptualnih pitanja s karticama učenici podižu kartice s odgovorima. Proziva se nekoliko učenika da obrazlože zašto su se odlučili baš za taj odgovor. Nakon toga, učenicima se daje nešto vremena za razmišljanje te ponovno odgovaraju na isto pitanje. Ako i nakon drugog puta učenici imaju podijeljena mišljenja, slijedi razredna rasprava.

1. Pri  $\beta^-$  raspadu nekog radioaktivnog elementa  ${}^A_ZX$ :

- a) maseni broj A se poveća za 1
- b) maseni broj A se smanji za 1
- c) protonski broj Z se poveća za 1
- d) protonski broj Z se smanji za 1
- e) ne mijenja se ni protonski ni maseni broj elementa

TOČAN ODGOVOR: c) protonski broj Z se poveća za 1

Prilikom  $\beta^-$  raspada jedan se neutron u jezgri pretvara u proton, te elektron i anti-neutrino



2. Neki radioaktivni element  ${}^A_ZX^*$  se nalazi u pobuđenom stanju. Kako bi došao u stanje niže energije element emitira  $\gamma$  zračenje te se pri tome elementu:

- a) maseni broj A poveća za 1
- b) maseni broj A smanji za 1
- c) protonski broj Z poveća za 1
- d) protonski broj Z smanji za 1
- e) ne mijenja ni protonski ni maseni broj

TOČAN ODGOVOR: e) ne mijenja se ni protonski ni maseni broj elementa

Prilikom  $\gamma$  emisije ne nastaje novi element, već jezgra iz stanja više energije prelazi u stanje niže energije i pri tome emitira  $\gamma$  zračenje

3. Godine 1999. stvorena je “superteška” jezgra rednog broja  $Z=118$  i masenog broja  $A=293$ . Koliko neutrona ima ta jezgra?

TOČAN ODGOVOR:  $A = Z+N \rightarrow N = A-Z = 175$

4. Koristeći se periodnim sustavom elemenata napišite reakcije navedenih raspada:

- a)  ${}^{24}_{11}\text{Na}$  , raspada se  $\beta^-$  raspadom
- b)  ${}^{22}_{11}\text{Na}$  , raspada se  $\beta^+$  raspadom
- c)  ${}^{238}_{92}\text{U}$  , raspada se  $\alpha$  raspadom

TOČAN ODGOVOR:

- a)  ${}^{24}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{24}_{12}\text{Mg} + e^- + \bar{\nu}_e$
- b)  ${}^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{22}_{10}\text{Ne} + e^+ + \nu_e$
- c)  ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$

## Bibliography

- [1] Becquerel, A. H. On radioactivity, a new property of matter, Nobel Lecture, December 11, 1903., [https://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1903/becquerel-lecture.pdf](https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1903/becquerel-lecture.pdf), 17.08.2017.
- [2] Hertz, H. Üeber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die electriche Entladung, Annalen der Physik und Chemie 1887. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/andp.18872670827/abstract>, 28.08.2017.
- [3] Hallwachs, W. Über den Einfluss des Lichtes auf electrostatisch geladene Körper, Annalen der Physik und Chemie 1888. [http://grundpraktikum.physik.uni-saarland.de/scripts/Hallwachs\\_1.pdf](http://grundpraktikum.physik.uni-saarland.de/scripts/Hallwachs_1.pdf), 28.08.2017.
- [4] Lenard, On cathode rays, Nobel Lecture, May 28, 1906., [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1905/lenard-lecture.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1905/lenard-lecture.pdf), 17.08.2017.
- [5] Leo, W. R. Techniques for nuclear and particle physics experiments: A how-to approach. Berlin: Springer; 1994.
- [6] An Introduction to the Silicon Photomultiplier, <https://www.sensl.com/downloads/ds/TN-IntrotoSPMTech.pdf>, 17.05.2017.
- [7] Shematski prikaz principa rada PET-a, <https://www.boundless.com/physics/textbooks/boundless-physics-textbook/nuclear-physics-and-radioactivity-30/applications-of-nuclear-physics-192/emission-topography-724-11268/>, 21.08.2017.
- [8] Princip rada PET-a, <http://depts.washington.edu/imreslab/education/PhysicsofPET.pdf>, 21.07.2017.
- [9] Zecotek Lutetium Fine Silicate (LFS) Scintillation crystals, <http://zecotek.com/zecotek-lfs-scintillation-crystals/>, 17.05.2017.
- [10] M. Makek, D. Bosnar, V. Gačić, L. Pavelić, P. Šenjug, P. Žugec, Performance of Scintillation Pixel Detectors with MPPC Read-out and Digital Signal Processing, Acta Physica Polonica B, September, 2017.

- [11] Slika MPPC mreže, <https://www.hamamatsu.com/us/en/product/category/3100/4004/4114/S13361-3050AE-04/index.html>, 17.05.2017.
- [12] V1743 digitalizator pulsa, <http://www.caen.it/csite/CaenProd.jsp?idmod=801&parent=11>, 20.06.2017.
- [13] Shematski prikaz raspada  $^{22}\text{Na}$ , <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/replotdec.jsp>, 21.06.2017.
- [14] Rudolf Krsnik, *Suvremene ideje u metodici nastave fizike*, Zagreb: Školska knjiga; 2008.
- [15] Maja Planinić, *Prezentacija i bilješke iz kolegija Metodika nastave fizike 1*, Prirodoslovno - Matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, ak.godina 2016/2017.
- [16] Nada Brković, *Fizika 4, udžbenik za 4. razred gimnazije*, Zagreb: Luk d.o.o; 2001.
- [17] Jakov Labor, *Fizika 4, udžbenik za 4. razred gimnazije*, Zagreb: Alfa d.d.; 2014.
- [18] Vladimir Paar, *Fizika 4, udžbenik za 4. razred gimnazije*, Zagreb: Školska knjiga; 2008.
- [19] Nada Brković, *Zbirka zadataka iz fizike*, Zagreb: Luk d.o.o; 2001.
- [20] Znak za opasnost od radioaktivnosti, <http://radiologijazabolesnike.blogspot.hr/2016/03/utjecaj-zracenja-na-organizam.html>, 21.07.2017.
- [21] Slika eksperimentalnog postava za demonstracijski pokus, [http://www.phy.pmf.unizg.hr/~ana/praktikum/3\\_3.pdf](http://www.phy.pmf.unizg.hr/~ana/praktikum/3_3.pdf), 21.07.2017.
- [22] Simulacija  $\alpha$  raspada, <https://phet.colorado.edu/bs/simulation/legacy/alpha-decay>, 21.07.2017.
- [23] Simulacija  $\beta^-$  raspada, <https://phet.colorado.edu/bs/simulation/legacy/beta-decay>, 21.07.2017.
- [24] Hake, R. R. *Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses*, Department of Physics, Indiana University; 1997.