Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana
Šubičeva ulica 1
1000 Ljubljana

Institut Jožef Štefan
Jamova cesta 39
1000 Ljubljana

# MERITEV SPEKTRA ANIHILACIJSKIH ŽARKOV GAMA S SILICIJEVO FOTOPOMNOŽEVALKO IN KRISTALOM LYSO

Raziskovalna naloga s področja fizike

**Maks Lah**

**Gašper Piskar**

Šolski mentor:
Grega Celcar, prof. fiz.
Gimnazija Jožeta Plečnika
Ljubljana

Zunanja mentorja:
izr. prof. dr. Rok Pestotnik
Institut Jožef Štefan
Ljubljana
dr. Andrej Seljak
Institut Jožef Štefan
Ljubljana

Ljubljana, marec 2025

LAH Maks, PISKAR Gašper: Meritev spektrov anihilacijskih žarkov gama s silicijevo fotopomnoževalko in kristalom LYSO.

Izjava o avtorstvu

Podpisana Maks Lah in Gašper Piskar, dijaka 3. letnika Gimnazije Jožeta Plečnika Ljubljana, izjavljava, da je raziskovalna naloga z naslovom:

**Meritev spektrov anihilacijskih žarkov gama s silicijevo fotopomnoževalko in kristalom LYSO**

rezultat najinega raziskovalnega dela, da so rezultati korektno navedeni in da pri pisanju niso bile kršene avtorske pravice in intelektualne lastnine drugih.

Maks Lah

_____

Gašper Piskar

_____

Mentorji:

- Grega Celcar, univ. dipl. fiz., profesor fizike na Gimnaziji Jožeta Plečnika Ljubljana
- izr. prof. dr. Rok Pestotnik, Inštitut Jožef Stefan, Odsek za fiziko delcev
- dr. Andrej Seljak, Inštitut Jožef Stefan, Odsek za fiziko delcev

# Povzetek

V tej raziskovalni nalogi sva merila spekter gama žarkov natrija 22 s silicijevo fotopomnoževalko in kristalom LYSO.

Merila sva pogostost različnih načinov pretvorbe gama žarka v vidno svetlobo v kristalu LYSO.

Scintilacijski detektor je naprava, ki se uporablja za zaznavanje in merjenje ionizirajočega sevanja, kot so gama žarki in rentgenski žarki, zaznajo tudi alfa in beta žarke. Scintilacijski detektor deluje v štirih korakih: absorpcija, svetlobni blisk(scintilacija), pretvorba v električni signal in obdelava signala.

Scintilatorje se največkrat uporablja v medicini najpogosteje pri pozitronski emisijski tomografiji (PET) za slikanje notranjih organov, jedrski fiziki, raznovrstni industriji (npr. letalstvo) ter pri okolju in varnosti.

# Kazalo vsebine

KAZALO SLIK ..... 3
UVOD ..... 4
NAMEN IN CILJI ..... 5
TEORETIČNI DEL ..... 6
EKPERIMENTALNI DEL ..... 8
REZULTATI ..... 13
SKLEP ..... 15
ZAHVALA ..... 16
LITERATURA ..... 17

## KAZALO SLIK

Slika 1: Eksperimentalna postavitev dveh detektorjev in izvora. ..... 5
Slika 2: Zavit kristal LYSO s SiPM. ..... 6
Slika 3: Shema scintilacijskega detektorja ..... 7
Slika 4:Kristal LYSO s SiPM pritrjenim na vezje. ..... 7
Slika 5: Radioaktivni izvor $^{22}$Na. ..... 8
Slika 6: Osciloskop ..... 8
Slika 8: Prikaz izdelane škatlice za detektor. Leva slika prikazuje spodnji del škatlice z odprtino, kamor smo dali kristal LYSO s SiPM. Desna slika prikazuje škatlico od strani. ..... 9
Slika 9: Prikaz L stojala s privito škatlico. ..... 10
Slika 10: Prikaz vezave dveh detektorjev. Na kartonastem papirju so označeni koti s koraki po 2,5° od 0° do 50° ..... 11

# UVOD

Pri izvedbi raziskovalne naloge naju je motiviralo spoznavanje novih pojmov iz sveta znanosti in nadgradnji znanja iz fizike. Za nalogo so naju navdušila spletna izobraževanje o fiziki delcev, ki so jih pripravili v CERN-u. Ker sva oba navdušena nad fiziko in medicino, sva se odločila, da bi počela nekaj na področju medicinske fizike, a so najine želje po raziskovanju presegle zmožnosti gimnazijskega programa na naši šoli.

S pomočjo mentorja smo navezali stik z Inštitutom Jožef Štefan . Povezala sva se z Odsekom za eksperimentalno fiziko osnovnih delcev – F9.

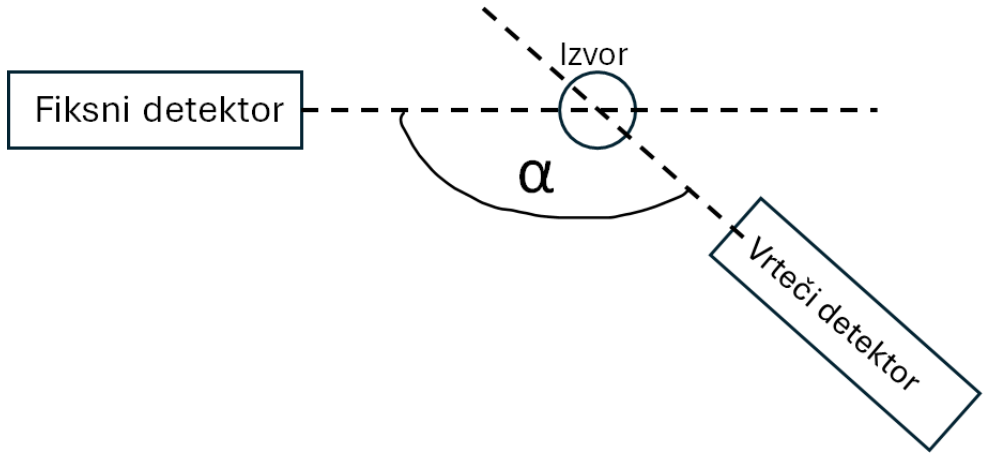
Raziskovalna naloga in posledično udeležba na tekmovanjih za naju predstavlja izziv in motivacijo za nadaljevanje naloge oz. raziskovalnega dela. Želiva si, da bo najina naloga navdih za najino izobraževanje in nadaljnje raziskovalne naloge na tem področju.

# NAMEN IN CILJI

Namen raziskovalne naloge je bil izmeriti korelacijo med kotom in številom istočasno zaznanih anihilacijskih gama žarkov v dveh detektorjih (slika 1). Kot α predstavlja kot med teoretično ravno linijo, ki poteka skozi fiksni detektor in izvor, ter detektorjem, ki ga vrtimo po ravnini. Ta korelacija bi nam povedala, kako je verjetnost detekcije dveh ali več delcev odvisna od kota med njima.

Tako smo si postavili 3 hipoteze:

1. Kot med detektorjema bo vplival na število zaznanih koincidenčnih dogodkov.,
2. Svetloba vpliva na korektnost rezultatov.,
3. Posledica pravilnega kontakta med LYSO in SiPM je boljši signal.




*Slika 1: Eksperimentalna postavitev dveh detektorjev in izvora.*

Vendar smo zaradi težav s kristalom z lutecijem-itrij-silicijevim ortosilikatom (LYSO) in silicijevo fotopomnoževalko (SiPM) opustili ta namen in smo izmerili spekter anihilacijskih gama žarkov samo na enem detektorju.

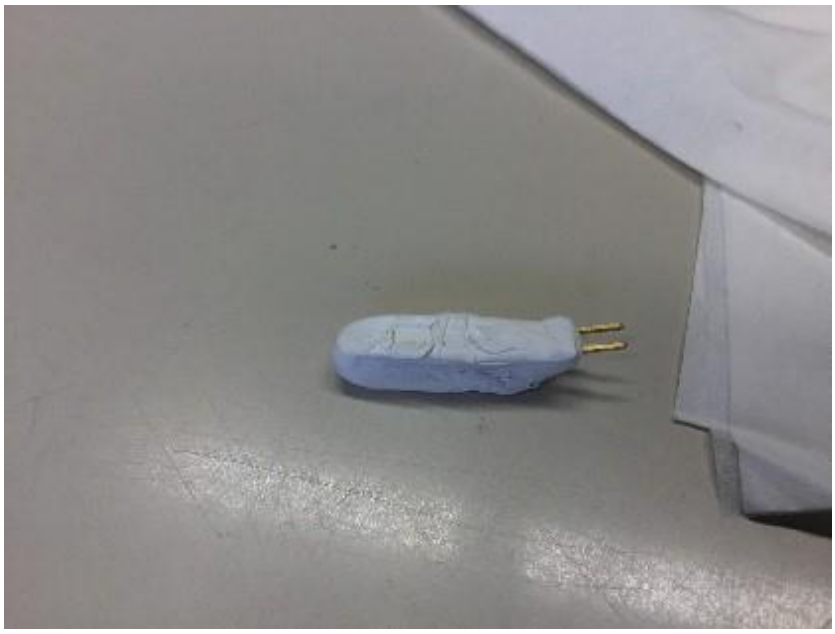
Na podlagi časovne stiske in težav s prvotnim načrtom sva si zato postavila naslednje cilje:

- preučiti scintilacijske detektorje, SiPM in kristal LYSO
- raziskati gama žarke, fotoefekt, anihilacijo, Comptonovo sipanje
- pripraviti ohišje za vezje in detektor
- pridobiti radioaktivni izvor
- narediti spekter anihilacijskih žarkov gama

# TEORETIČNI DEL

Pri najinem delu sva uporabljala sledeče materiale in naprave.

LYSO kristal (s kemijsko formulo: $Lu_{2(1-x)}Y_{2x}SiO_5(Ca)$) je kratica za lutecij-itrij-silicijev oksiortosilikat (slika 2), ki je enkrat dopiran s kalcijem. Dopiranje je postopek vnosa nečistoč (v izredno majhnih količinah) v čiste oziroma prave polprevodnike, da bi spremenili njihove električne lastnosti. Snov, ki jo vnašamo, imenujemo dopant [1]. LYSO nudi kratek razpolovni čas in nudi višjo anihilacijo gama žarkov.

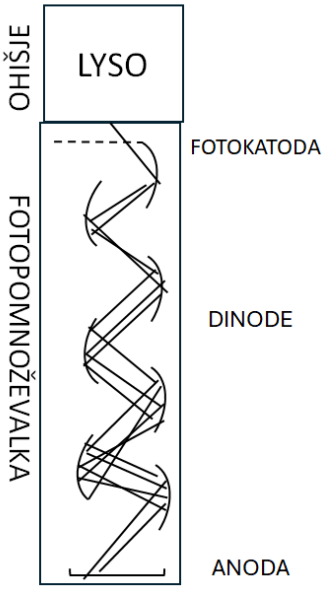


*Slika 2:* Zavit kristal LYSO s SiPM.

Scintilacija je blisk svetlobe, ki se odda, ko snov zadane radioaktivno snov. Scintilacija deluje v treh korakih:

- **absorpcija energije**: ionizirajoči delec (v najinem primeru gama žarek) zadane atom v scintilacijskem materialu in ga vzbudi v višje energijsko stanje.
- **povratek v osnovno stanje**: vzbujeni atom se vrne v osnovno energijsko stanje, ter pri tem odda presežek energije v obliki svetlobnih fotonov.
- **detekcija svetlobe**: nastalo svetlobo zazna SiPM, ki jo pretvori v električni signal za nadaljnjo analizo. [2]

LYSO kristal je bil postavljen v ohišje kot prikazuje shema v sliki 3. Prikazan scintilacijski spektrometer. V njem najdemo poleg ohišja še fotopomnoževalko. V fotopomnoževalki sta pa fotokatoda in anoda, med njima pa elektrode imenovane dinode. Katoda je negativno nabita, prva dinoda pa nanjo pozitivno. Tako se med obema ustvari električno polje, ki izbite elektrone pospešuje [3, 4].

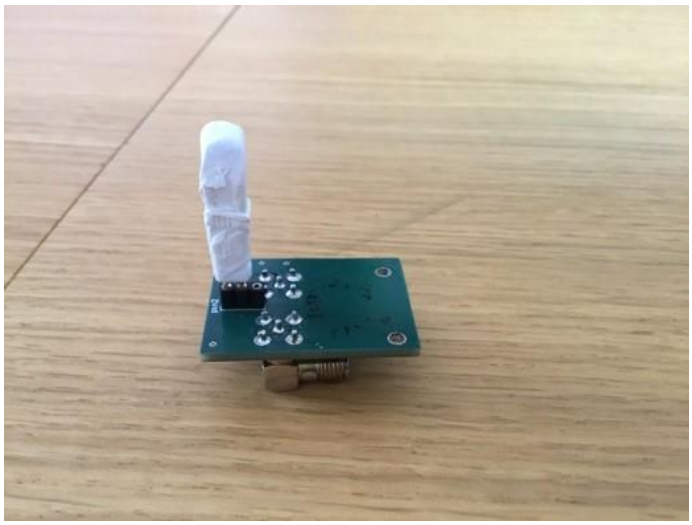



*Slika 3: Shema scintilacijskega detektorja*

Scintilacijski spektrometer je naprava, ki se uporablja za zaznavanje in merjenje ionizirajočega sevanja, kot so alfa, beta in gama žarki. V našem primeru smo imeli izvor, ki je seval gama žarke. Scintilacijski spektrometer deluje v štirih korakih [4]:

- **absorpcija sevanja**: vstop ionizirajočega delca v LYSO kristal ionizirajoči delec preide skozi scintilator in vzbudi atome ali molekule v materialu (v najinem primeru kristal LYSO).
- **svetlobni blisk (scintilacija)**: vzbujeni atomi se spustijo v nižje energijsko stanje in pri tem oddajo fotone v spektru od 200 nm do 800 nm [5].
- **pretvorba svetlobe v električni signal s pomočjo fotocelice**: svetlobo zazna silicijeva fotopomnoževalka. Svetloba vpade na fotokatodo in pri tem izbije elektrone. Zaradi električnega polja med katodo in prvo dinodo ta izbiti elektron pridobi dovolj energije, da iz prve dinode izbije dva elektrona. Med prvo in drugo dinodo je prav tako električno polje, ki oba elektrona pospešita do takšne energije, da iz druge dinode izbije več elektronov. Ta proces se ponavlja dokler vsi elektroni na koncu ne trčijo v anodo [3]. Tako naprava ojači signal.
- **obdelava signala**: električni impulzi se analizirajo, da se zazna delec in določi energija zaznanih delcev [5]

V našem primeru smo kristal LYSO s SiPM pritrdili na vezje (slika 4).



*Slika 4:Kristal LYSO s SiPM pritrjenim na vezje.*

V samem scintilatorju se lahko pojavi fotoefekt, Comptonovo sipanje in tvorba parov. Pri najinem kristalu LYSO nastopi fotoefekt pri energijah okrog 600 keV. Fotoefekt je pojav, kjer foton, če ima dovolj energije, iz fotokatode izbije elektron (opisano že zgoraj).

Comptonovo sipanje [3] oziroma Comptonov rob nastopi pri energijah 400 keV. Pri Comptonovem sipanju gre za neelastično sipanje na skoraj prostem elektronu.

Kadar pa ima žarek gama dovolj energije (1,0 MeV) se pa lahko v bližini jedra spremeni par elektron-pozitron [6].

# EKPERIMENTALNI DEL

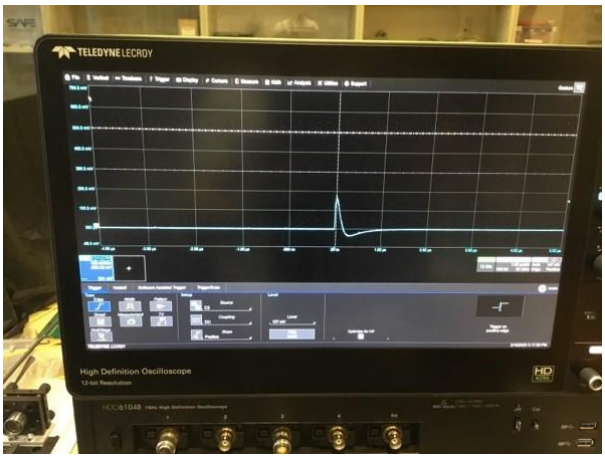
Pri delu smo uporabili:

- SiPM, velikosti 2mm x 2mm
- Vezje vzorca 3,53 cm x 2,74 cm, debelina 0,178 cm
- Kristal LYSO, velikosti 2,16 cm x 0,517 cm
- Škatlica, mere 27mm x 27mm x 28mm , narejena iz PLA plastike
- Pokrivalo škatlice, 2,716 cm x 2,716 cm, debelina 0,516 cm
- Radioaktivni izvor izotopa natrija – $^{22}$Na (slika 5)
- Teflonski trak 12 m x 12 mm x 0,1 mm
- Optična lepljiva mast, prosojnost > 80 %/cm
- Osciloskop, ki ima 12-bitno ločljivost (slika 6)

V laboratoriju smo upoštevali vsa navodila za varno delo z elektriko in radioaktivnim izvorom.

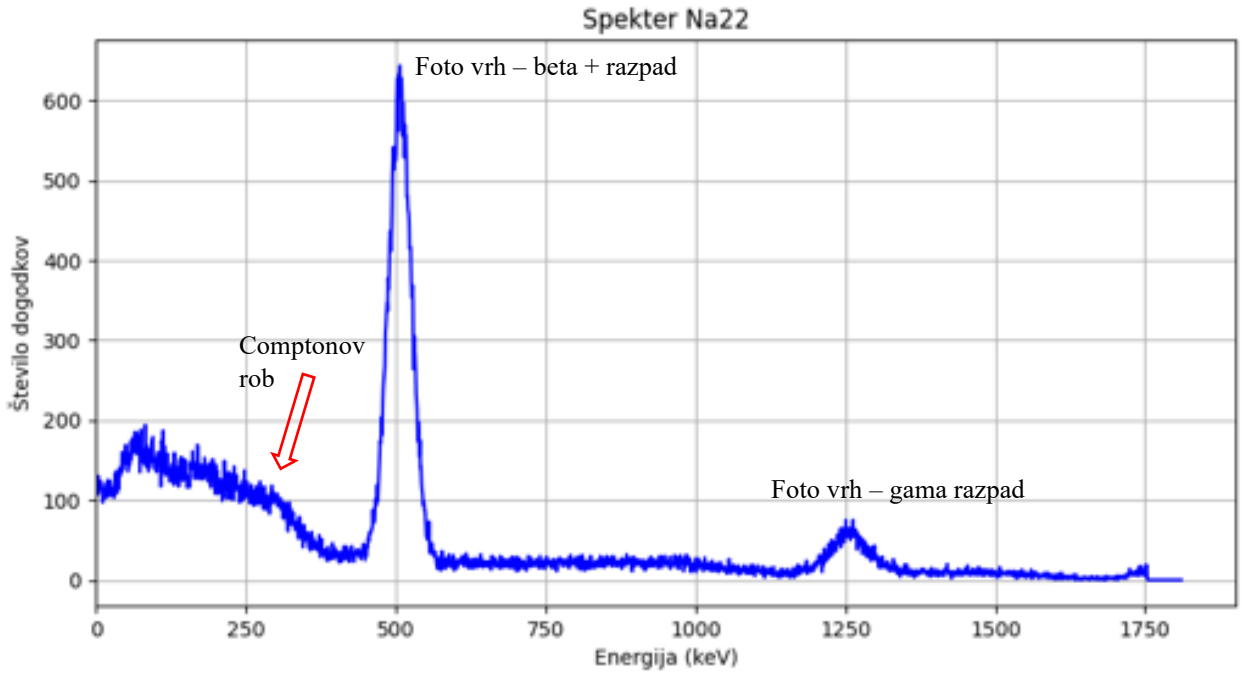



*Slika 5: Radioaktivni izvor $^{22}$Na.*



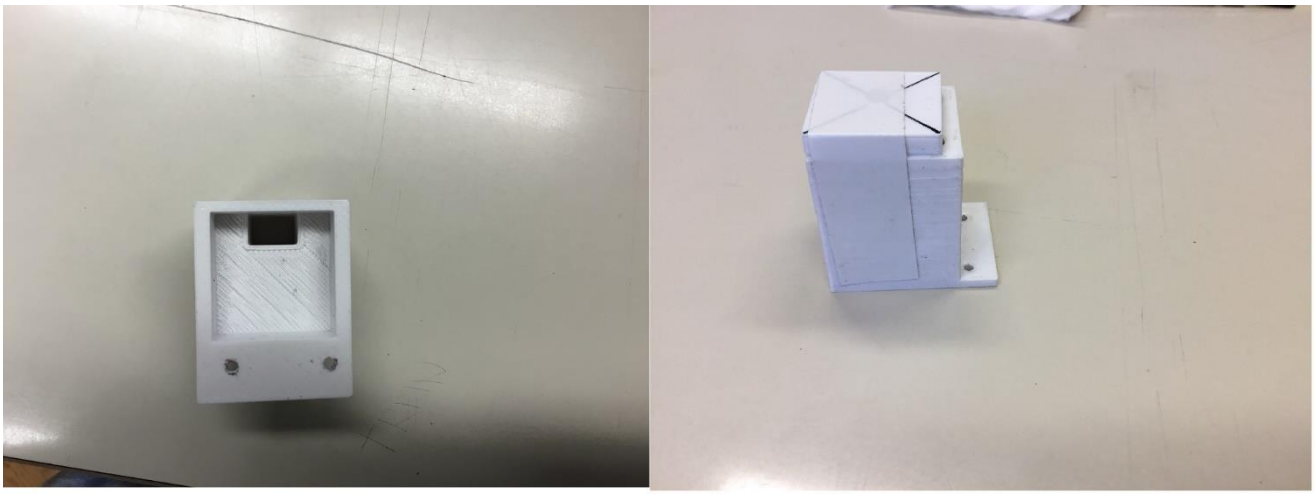

*Slika 6: Osciloskop*

Na začetku sva izmerila spektra anihilacijskih gama žarkov za radioaktivna izvora natrija, $^{22}$Na (slika 7).



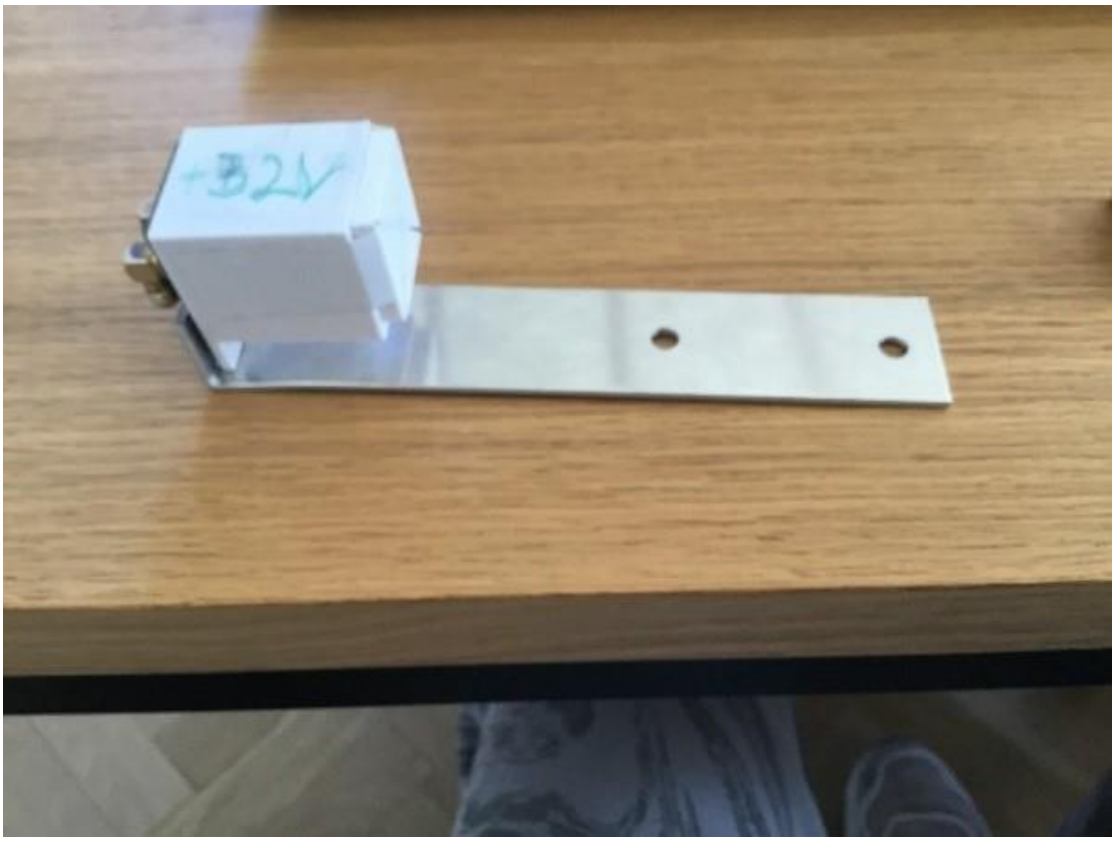

*Slika 7: Spekter radioaktivnega izvora $^{22}Na$.*

Ko sva dobila spekter najinega radioaktivnega izvora, sva naredila škatlici s pomočjo 3D tiskalnika, v katero smo vstavili vezje s kristalom LYSO in SiPM. Ta škatlica (slika 8) bi služila kot zaščita na eni strani in temen (zaprt) prostor na drugi strani. Temen prostor pa potrebujem za meritve anihilacijskih gama žarkov.



*Slika 8: Prikaz izdelane škatlice za detektor. Leva slika prikazuje spodnji del škatlice z odprtino, kamor smo dali kristal LYSO s SiPM. Desna slika prikazuje škatlico od strani.*

Ko je bila škatlica narejena sva naredila dve L stojali. Na to stojalo sva prvila škatlico s kristalom in SiPM (slika 9). Enak postopek sva naredila tudi za drugi detektor.




*Slika 9: Prikaz L stojala s privito škatlico.*

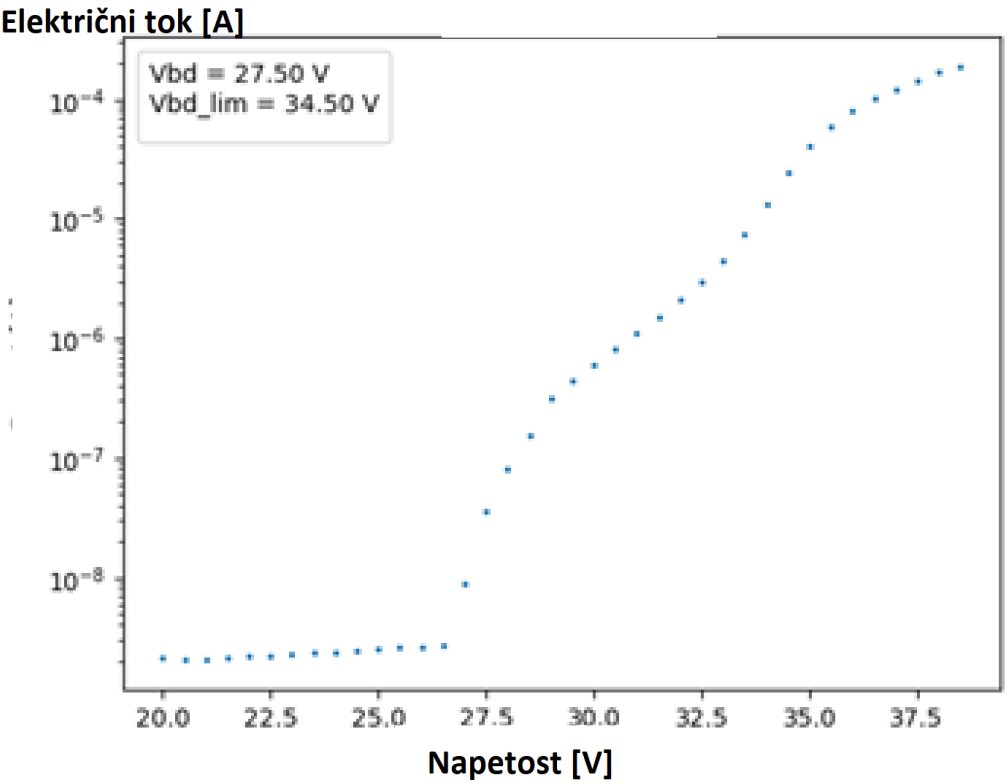
Na vsakem L stojalu sva naredila po 2 luknjici na razdalji 5 cm in 10 cm od kristala. Tam bi privili radioaktivni izvor natrija, $^{22}$Na. Zatem sva na kartonu narisala kote od 0° do 50° s koraki po 2,5° na razdalji 5 cm in 10 cm (slika 10).




*Slika 10: Prikaz vezave dveh detektorjev. Na kartonastem papirju so označeni koti s koraki po 2,5° od 0° do 50°*

Preden smo kristal s SiPM začeli testirati smo morali ugotoviti v katero smer je pravilno orientiran. Kristal je polprevodnik, kar pomeni, da bo električni tok tekel le v eni smeri. To smo naredili, s tem da smo spustili napetost 1 V in izmerili električni tok. Če je bil tok previsok, potem je bil kristal narobe obrnjen. To smo morali narediti tudi za drugi detektor.

S pomočjo osciloskopa smo iskali signal. Ugotovili smo, da je prebojna napetost nekje pri 27,50 V in zgornja meja napetosti nekje pri 34,0 V (slika 11). Najboljši signal za merjenje kotne korelacije smo dobili pri 32 V.




*Slika 11: Prikaz območja prebojne napetosti in zgornje meje.*

A pri enem od detektorjev se je pojavila težava, saj je bil signal zelo slab. Menili smo da je bil samo slab kontakt med LYSO in SiPM, zato smo ju večkrat na novo dali skupaj, a neuspešno. Zamenjali smo tudi SiPM, vendar se je težava ponavljala. Za tem smo se skupno odločili, da zaradi časovne stiske ne moremo pridi do ugotovitve kaj je narobe.

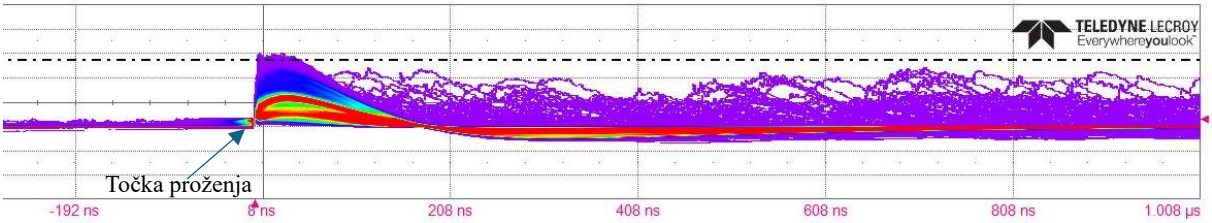
Če se težava ne bi pojavila, bi oba detektorja povezali z električno napetostjo, ki bi bila 32 V. Obe L stojali na katerih bi bila detektorji, bi privili skupaj, tako da bi bila razdalja od radioaktivnega izvora Na22 in detektorja 5cm in 10cm na obeh straneh. Oba detektorja bi zatem dali na kartonasto podlago z označenimi koti (slika in pokrili s črno plastično vrečko, da bi zagotovili temo). Potem bi iskala koincidenčne dogodke. Ti koincidenčni dogodki bi v najinem primeru bili, ko bi žarek gama istočasno zadel oba detektorja. Pri tem bi pa naju zanimalo pri katerem kotu bi dobila največ teh dogodkov.

# REZULTATI

V najini raziskavi smo deloma izpolnili cilje, saj smo dobili lep spekter anihilacijskih žarkov gama za radioaktivni element natrija.

Zaradi tehnične težave nisva mogla narediti vseh meritev v tej raziskovalni nalogi. Da bi ugotovili napako smo spremenili tudi pogoje in zamenjali detektor.

Pridobljeni grafi na osciloskopu nam povedo število zaznanih dogodkov glede na pretečene mili volte. Prek teh podatkov lahko ugotovimo vrsto dogodkov, ki so bili zaznani (npr. fotoefekt ali Comptonovo sipanje ). Prek teh spektrov lahko tudi ugotovimo ali naš senzor deluje normalno ali je poškodovan.




*Graf 1: Graf zaznanih signalov na delujočem detektorju*

Graf prikazuje zaznane dogodke/signale na delujočem detektorju. Graf je prikazan v barvnem spektru od vijolične proti redeči barvi, pri čemer vijolična barva predstavlja manjše število zaznanih signalov in rdeča večje število zaznanih dogodkov. Opazimo lahko, da je pred točko proženja se zgodilo zelo malo število dogodkov in na grafu je tudi vidno zelo veliko število posameznih dogodkov, kar nam lahko pove, da je detektor pravilno deloval.




*Graf 2: Graf spektra anihilacijskih žarkov gama*

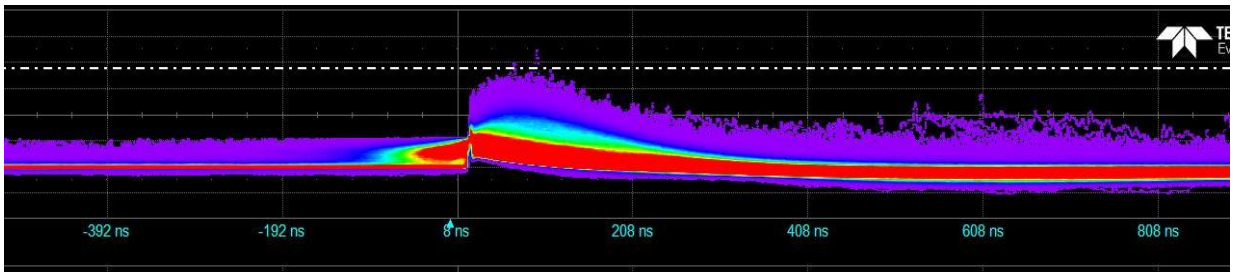
Ta graf je nastal iz prečnega prereza prejšnjega grafa zaznanih signalov in prikazuje spekter anihilacijskih žarkov gama.

Na x-osi so milivolti(mV) ter na y-osi je število dogodkov.

A – Compotonov rob, je posledica Comptonovega sipanja, ki je viden na grafu, dobili smo ga pri okoli 90mV in pojavil se je, ko se je zgodilo približno 400 dogodkov.

B – 1. foto vrh, ki je posledica beta+ razpada, smo dobili pri okoli 130mV ter ob pojavu 800 dogodkov.

C – 2. foto vrh, ki je posledica gama razpada. Gama razpad je razpad, kjer elektroni prehajajo iz višjega energijskega stanja v nižje pri čemer oddajajo fotone. Pomembno je, da v tem kemijskem elementu število protonov, nevtronov in elektronov ne spreminja, pri beta plus razpadu pa se.




*Graf 3: Graf zaznanih signalov na nedelujočem detektorju*

Graf nam prikazuje zaznane dogodke/signale na nedelujočem detektorju. Ta graf je isto kot prejšnji prikazan v barvnem spektru. Kot je vidno iz grafa, se je veliko število zaznanih signalov zgodilo že pred točko proženja, vidimo tudi, da graf prehaja od rdeče barve proti vijolični, kar se pri delujočem detektorju ni dogajalo, to nam pove, da se je zgodila neka napaka v času merjenja. Možno je, da je bil to vdor svetlobe ali umazanije, lahko pa je tudi bila kriva SiPM ali kristal LYSO. Do točnih odgovorov žal nisva mogla pridi zaradi časovne stiske.




*Graf 4: Graf spektra anihilacijskih žarkov gama na nedelujočem detektorju*

Graf zaznanih signalov smo nato še pretvorili v graf spektra, ki pa je bil popačen in nam ni povedal nič.

# SKLEP

V najinem raziskovalnem delu sva prišla do naslednjih sklepov. Potrdila sva 2. hipotezo, da svetloba popači signal. 1. in 3. hipoteza nama ni uspelo potrditi ne ovreči. Kotne korelacije žal nisva mogla izmeriti zaradi tehnične okvare enega iz med detektorjev, zaradi tega sva posledično ovrgla tudi 3. hipotezo.

Zaradi neuspelih eksperimentov, časovne stiske in brez rešitve za tehnično napako imava namen še v naprej sodelovati z Inštitutom Jožef Štefan.

Dijaki smo vajeni, da se vse hipoteze in cilji, ki si jih zadamo v raziskovalnih nalogah, vedno izidejo. Najina raziskovalna naloga je bila iz tega vidika vse prej kot uspešna. Vseeno pa je ta raziskovalna naloga nekakšna realna slika znanstvenega sveta okrog nas. Da pridemo do uspeha je potrebno izvesti ogromno poskusov. Včasih je potrebno le priviti do konca kakšen vijak, da se vidi končni rezultat. Včasih minejo leta ali celo desetletja, da se hipoteze in cilji zedinijo.

# ZAHVALA

Raziskovalna naloga je bila pripravljena za srečanje mladih raziskovalcev v ljubljanski regiji. Večino slikovnega, teoretičnega in eksperimentalnega dela naloge sva izvedla samostojno, a brez pomoči, napotkov in izkušenj mentorjev bi bila izdelava raziskovalne naloge zaradi zahtevnosti nekaterih eksperimentalnih tehnik težavna.

Posebna zahvala gre mentorjem, izr. prof. dr. Roku Pestotniku, Andreju Seljaku in prof. Gregi Celcarju, ki so nama podrobno predstavili teoretično ozadje raziskovalnega dela ter delila protokole za varno delo v laboratoriju. Vedno so bili pripravljeni odgovoriti na najina vprašanja.

Meritve spektrov anihilacijskih žarkov gama sva izvedla na Institutu Jožef Stefan na oddelku za Fiziko osnovnih delcev. Zahvaljujeva se vsem na Odseku za fiziko delcev – F9 za podporo in pomoč pri eksperimentalnem delu. Zahvaljujeva se tudi zaposlenim na odseku F9 za strokovno pomoč pri izvajanju eksperimentov in uporabi laboratorijske opreme.

Posebna zahvala tudi ravnateljici Gimnazije Jožeta Plečnika Ljubljana, gospe Lidiji Žigon, za odobritev raziskovanja in podporo pri obšolskem raziskovalnem delu, ter drugim profesorjem na šoli.

Najina zahvala gre tudi sošolcem iz 3. A razreda ter razredničarki Antoniji Špegel Razbornik, profesorici matematike, ki so naju podpirali pri raziskovanju.

# LITERATURA

[1] Luxium Solutions, (n.d.*). LYSO Scintillation Material Lu1.8Y.2SiO5: Ce.* LYSO Scintillation Crystals | Crystals , https://luxiumsolutions.com/radiation-detection-scintillators/crystal-scintillators/lyso-scintillation-crystals

[2] Harvey A. Ziessman, Janis P. O'Malley and James H. Thrall, 2014. *Scintillation and Semiconductor Detectors.* Scintillation - an overview | ScienceDirect Topics , https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/scintillation

[3] J. Strnad, *Fizika 3. del: Posebna teorija relativnosti, kvantna fizika, atomi,* DMFA Založništvo, Ljubljana, 2009

[4] Acerbi, F., Gundacker, S., (2019, 5.11.). *Scintillation - an overview | ScienceDirect Topics,* https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/scintillation

[5] Acerbi, F., Gundacker, S. (2019, 5.11.). *Understanding and simulating SiPMs.* ScienceDirekt. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900218317704

[6] J. Strnad, *Fizika 4. del: Molekule. Kristali. Jedra. Delci.* DMFA Založništvo, Ljubljana, 2005