

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Kieto kūno elektronikos katedra

Jevgenij Garankin

Polietileno naftalato pritaikymas jonizuojančiosios spinduliuotės detektavimui ir spektroskopijai

Polyethylene naphthalate application for ionizing detection and spectroscopy

Antrosios pakopos baigiamasis darbas

Fizikinių technologijų ir jų vadybos programa

Studentas

Jevgenij Garankin

Darbo vadovas

Dr. Artūras Plukis

Katedros vedėjas

Prof. Dr. (HP) Kęstutis Arlauskas

Recenzentas

Dr. Andrius Poškus

Vilnius, 2016

Turinys

Turinys.....	2
Įvadas.....	4
Darbo tikslas.....	5
Darbo uždaviniai.....	5
1. Literatūros apžvalga	6
1.1. Jonizuojančioji spinduliuotė.....	6
1.2. Jonizuojančiosios spinduliuotės sąveika su medžiaga.....	6
1.2.1. Elektringųjų dalelių sąveika su medžiaga	6
1.2.2. Gama kvantų sąveika su medžiaga.....	6
1.2.3. Neutronų sąveika su medžiaga	7
1.3. Blyksimieji jonizuojančiosios spinduliuotės detektoriai	7
1.3.1. Neorganiniai scintiliatoriai	10
1.3.2. Organiniai scintiliatoriai	12
1.3.3. Jonizuojančiosios spinduliuotės dalelių atskyrimas naudojant scintiliatorinį organinį detektorių.....	15
1.3.4. Jonizuojančiosios spinduliuotės detektoriaus parametrai.....	16
1.3.5. Šiluminių neutronų registravimas naudojant didelio neutronų pagavos skerspjūvio elementų priemaišas	17
2. Tyrimo metodika	19
2.1. Bandiniai.....	19
2.2. Eksperimento įranga ir metodika.....	22
2.3. Jonizuojančiosios spinduliuotės šaltiniai.....	26
2.4. SRIM modeliavimo programa	26
2.5. MCNP modeliavimo programa	26
3. Rezultatai ir aptarimas.....	28
3.1. Matavimo grandinės atsako tikrinimas žinomu šviesos signalu.....	28
3.2. PEN plėvelės atsako impulso tyrimas	28
3.3. Registravimo parametrų parinkimas.....	29
3.4. Polinominės signalo interpoliacijos kokybės tyrimas	34
3.5. ^{14}C β spektro matavimas naudojant PEN plėvelę.....	36
3.6. Šiluminių neutronų detektavimo modifikuota PEN plėvele tyrimas.....	37
3.7. LiBO_2 dengto pėdsakų detektoriaus rezultatų analizė.....	39
Išvados.....	41

Literatūros sąrašas	42
Santrauka	45
Summary.....	46
1. Priedas. Impulsų registravimo programa	47
PADĖKA	52

Įvadas

Jonizuojančiosios spinduliuotės aptikimui naudojami skirtingų tipų detektoriai: dujiniai, puslaidininkiniai ir scintiliatoriniai (blyksimieji), kurių tobulinimas aktyviai vyksta šiomis dienomis.

Blyksimojo detektoriaus veikimas paremtas jonizuojančiosios spinduliuotės dalelių detektoriaus veiklojoje medžiagoje sukurtų šviesos fotonų registravimu, naudojant fotoelektroninius daugintuvus arba kitus šviesos registracijos metodus. Tokius prietaisus ir atitinkamas modifikacijas galima naudoti visų tipų jonizuojančiosios spinduliuotės detekcijai ir spektrometrijai. Kuriamos naujos bei tobulinamos scintiliatorinės medžiagos. Praktikoje registravimui bei spektroskopijai yra naudojamos skirtingos agregatinės būsenos scintiliatorinės medžiagos. Vystomos technologijos galinčios nustatyti jonizuojančiosios dalelės energiją ir tipą (α , β ir kt.). Tokios technologijos leidžia atskirti ir stebėti daleles bendrame sraute. Svarbus pritaikymas yra neutronų spinduliuotės atskyriams γ fotonų sraute, kadangi pagrindinė šiuo metu naudojama medžiaga yra ^3He , kurio kaina yra didelė. Šiuo metu vyksta naujų scintiliatorinių medžiagų kūrimas bei esamų medžiagų modifikavimas, norint pagerinti dalelių atskyrimo kokybę bei spektrinį jautrį. Organiniai scintiliatoriai tinka neutroninės spinduliuotės registravimui, kadangi jų sudėtyje yra didelis vandenilio kiekis, kuris efektyviai sklaido neutronus ir sukuria atatrąkos protonus [1].

Šio darbo metu polietileno naftalato (PEN) scintiliatorinės savybės buvo pritaikytos jonizuojančiosios spinduliuotės dalelių detektavimui ir spektrų matavimui. Darbo metu buvo naudojamos grynos PEN plėvelės ir plėvelės dengtos LiBO_2 sluoksniu.

Darbo tikslas

Ištirti PEN plėvelės panaudojimo galimybes detektuojant jonizuojančiosios spinduliuotės daleles bei registruojant jų spektrą.

Darbo uždaviniai

1. Išmatuoti skirtingų jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinių spektrus;
2. Patikrinti grandinės atsaką žinomam signalui ir palyginti polietileno naftalato atsaką skirtingais registravimo metodais;
3. Parinkti optimalius registravimo sistemos parametrus dalelių atskyrimo kokybei gerinti;
4. Išmatuoti ir palyginti modifikuotos bei nemonifikuotos polietileno naftalato plėvelės atsako spektrus.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Jonizuojančioji spinduliuotė

Jonizuojančioji spinduliuotė – dalelių srautas, kuris gali sužadinti ir jonizuoti medžiagą.

Spinduliuotės tipai:

- Elektromagnetinė spinduliuotė: Rentgeno ir gama spinduliuotė, atsiranda atitinkamai pereinant elektronui arba branduoliui į žemesnę energinį lygmenį.
- Dalelių srautai: alfa dalelės (^4He branduoliai), beta dalelės (elektronai, pozitronai), protonai, neutronai, jonai.

1.2. Jonizuojančiosios spinduliuotės sąveika su medžiaga

1.2.1. Elektringųjų dalelių sąveika su medžiaga

Pagrindinis parametras aprašantis elektringų dalelių energijos nuostolius medžiagoje yra ilginė stabdymo geba (dalelės energijos praradimas vienetiniam atstumui). Elektringosios dalelės praranda energiją netampriųjų ir tampriųjų – Kuloninių susidūrimų metu. Netampriųjų susidūrimų metu elektringosios dalelės, sąveikaudamos su atomo elektriniu lauku, išlaisvina antrinius elektronus arba sužadina atomus, tai yra perkelia juos į aukštesnę energinę būseną. Antriniais, išlaisvinti elektronai medžiagoje praranda energiją tais pačiais būdais. Tampriųjų susidūrimų metu elektringoji dalelė pataiko į atomo branduolį ir pakeičia jo kinetinę energiją. Taip atsiranda atomų pozicijos pokytis gardelėje ir pažaidos medžiagoje. Tokių susidūrimų tikimybė yra labai maža.

1.2.2. Gama kvantų sąveika su medžiaga

Fotonai medžiagoje gali būti sugeriami arba sklaidomi, abiem atvejais medžiaga sugeria fotono energiją. Sklaidos mechanizmas vadinamas Komptono sklaida, o sugerties mechanizmai yra fotoefektas, elektrono ir pozitrono poros sukūrimas. Pagrindinis parametras, aprašantis srauto silpimą, yra sugerties koeficientas, kuris parodo, koks medžiagos storis reikalingas, kad fotonų srautas sumažėtų e kartų.

Komptono sklaida – fotono energijos sumažėjimas susiduriant su atomo elektronu. Po susidūrimo kvanto energija sumažėja ir pakinta judėjimo kryptis, elektronas yra sužadinas arba išmušamas iš atomo elektronų sluoksnio.

Fotoefektas – toks reiškinys, kai kvantas atiduoda visą energiją elektronui, kuris dėl energijos pertekliaus yra išlaisvinamas iš elektronų apvalkalo.

Porų kūrimas – tai toks reiškinys, kai fotonas patekęs į branduolio elektrinį lauką pavirsta elektrono ir pozitrono pora. Jis galimas tik tada, kai fotono energija didesnė už elektrono ir pozitrono rimties energiją (1,02 MeV). Elektronas medžiagoje praranda energiją dėl kuloninių sąveikų, o pozitronas anihiliuoja su medžiagos elektronais, dėl to atsiranda du fotonai [2].

1.2.3. Neutronų sąveika su medžiaga

Neutronų energijos nuostoliai medžiagoje yra panašūs į γ spinduliuotės nuostolius, neutronai medžiagoje gali būti sugeriami ir sklaidomi. Galimi energijos praradimo būdai:

- Elastinė sklaida – neutronas trenkia į branduolį ir palieka dalį energijos nesužadindamas branduolio;
- Neelastinė sklaida – neutronas trenkia į branduolį ir jį sužadina;
- Neutronų pagava – neutronas pagaunamas branduolyje ir išspinduliuojama kita jonizuojančiosios spinduliuotės dalelė, pavyzdžiui, (n,p) , (n,α) , (n,γ) reakcijos;
- Branduolinės reakcijos – neutronas pagaunamas, branduolio energinis būvis pasikeičia, todėl tampa galimas branduolio pasidalijimas.

Neutronai medžiagą jonizuoja per antrines elektringąsias daleles – jonus ir elektronus.

1.3. Blyksimieji jonizuojančiosios spinduliuotės detektoriai

Jonizuojančiosios spinduliuotės detektorius – prietaisas spinduliuotei aptikti ir jos energijai pakeisti elektriniu impulsu, kurį būtų galima matuoti. Impulsas atsiranda, kai spinduliuotė sąveikauja su darbine medžiaga. Veikimas:

- Jonizuojančioji spinduliuotė darbinėje medžiagoje sukuria laisvuosius krūvininkus (elektronus, jonus);
- Detektoriuje sukurtas elektrinis laukas veikia krūvininkus, kurie sukuria srovę grandinėje.

Taip veikia dujiniai ir puslaidininkiniai detektoriai. Scintiliatoriniai (blyksimieji) detektoriai veikia kitu principu:

- jonizuojančioji spinduliuotė scintiliatoriuje dėl liuminescencijos sukuria šviesos kvantus;
- šviesa pataiko į fotokatodą ir išmuša fotoelektronus;
- dėl elektrinio lauko, elektronai juda anodo link susidurdami su dinodais ir išmušdami daugiau elektronų;

Spinduliuotės sukurtas krūvis lygus srovės impulso integralui [2]:

$$Q = \int_0^t i(t) dt. \quad (1)$$

Scintiliatorinis (blyksimasis) detektorius – tai jonizuojančiosios spinduliuotės detektorius, kurio veikimas pagrįstas regimosios ar ultravioletinės šviesos registravimu, kurį sukelia jonizuojančioji spinduliuotė keliaudama per scintiliatorinį detektorių. Pagrindinis skirtumas nuo kitų detektorių tipų yra tas, kad impulsą kuriantys krūvininkai yra antriniai, juos sukuria šviesos blyksnis. Scintiliatoriniame detektoriuje nėra svarbi detektoriaus savitoji varža bei kiti parametrai, kurie yra labai svarbūs puslaidininkiniams detektoriams, kadangi krūvininkų formuojamas signalas yra už darbinės medžiagos ribų. Šiuo metu scintiliatoriniai detektoriai yra vieni iš labiausiai paplitusių jonizuojančiosios spinduliuotės detektavimo ir spektrometrijos būdų. Naudojami atskiri detektoriai ir kombinacinės detektorių sistemos.

Dalis energijos nuo visos dalelės prarastos energijos detektoriuje konvertuojama į šviesos blyksnį, santykis tarp visos prarastos energijos ir konvertuotos energijos vadinamas konversijos efektyvumu. Šis parametras yra vienas svarbiausių scintiliatoriniame detektoriuje. Kitas kartais naudojamas parametras – šviesos išėiga, kuri parodo sukurtų fotonų skaičių dalelės prarastos energijos vienetui $N_f/\hbar\omega$ ($\hbar\omega$ – vidutinė šviesos blyksnio fotonų energija 3 eV) arba vidutinę energiją, reikalingą sukurti vienam fotonui. Efektyviuose detektoriuose N_f siekia 0,1 – 0,3 fotonų. Šis dydis gali priklausyti nuo temperatūros, priemaišų, detektoriaus sudedamųjų dalių.

Scintiliatoriniai detektoriai turi spektrometrines savybes, tai yra šviesos blyksnio intensyvumas priklauso nuo energijos, kurią praranda dalelė judėdama per detektorių.

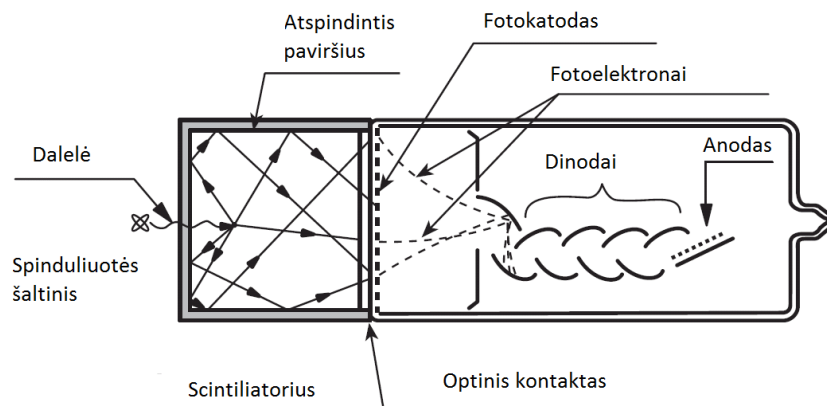
Medžiagos švytėjimas, kurį sukelia energijos sugertis medžiagoje, vadinamas liumeniscencija [2], o medžiagos, kurios pasižymi šia savybe, vadinamos liuminoformais. Šį efektą gali sukelti skirtingais būdais suteikta medžiagai energija, pavyzdžiui, kaitinimas ar elektringų dalelių poveikis. Liuminescencijos, vykstančios jonizuojančiosios spinduliuotės detektoriuje, vadinamos scintiliacijomis.

Scintiliatorinio detektoriaus privalumai:

1. Maža neveikos trukmė $10^{-7} - 10^{-9}$ s;
2. Gana didelis detektavimo efektyvumas, NaI(Tl) (natrio jodidas, aktyvuotas taliumu) detektorius detektuoja 20 – 40% pataikiusių į jį γ kvantų;
3. Matavimams reikalinga gana paprasta registravimo įranga;
4. Pasiiekiamas kelių procentų tikslumas matuojant kvantus ir daleles [2];
5. Galimos įvairios detektoriaus formos ir labai didelis tūris.

Scintiliatorinio detektoriaus trūkumai:

1. Energijos matavimo paklaidos yra eile didesnės nei puslaidininkinių detektorių;
2. Fotodaugintuvas labai jautrus įtampos svyravimams;
3. Kai kurie neorganiniai detektoriai yra labai jautrūs drėgmei, todėl juos reikia laikyti hermetinėse pakuotėse.



Pav. 1. Scintiliatorinio detektoriaus su fotodaugintuvu schema

Pagrindiniai scintiliatorinio detektoriaus elementai – detektorius ir su juo sujungtas fotoregistratorius, kuris šviesos blyksnį paverčia elektriniu impulsu (žr. 1 pav.). Registracijai dažnai naudojamas fotodaugintuvas. Šviesos kvantai, pataikę į fotokatodą, išmuša elektronus, kurie yra nukreipiami į dinodus. Dėl antrinės elektronų emisijos elektronų skaičius smarkiai padidėja, galiausiai jie surenkami ant anodo ir sukuriama elektrinis impulsas. Vietoje fotodaugintuvo galima naudoti vakuuminius bei puslaidininkinius fotoelementus.

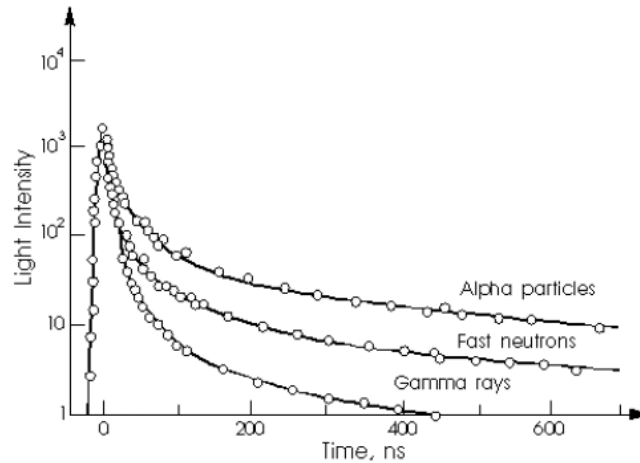
Tarp scintiliatoriaus ir fotokatodo yra įterpiamas optinis kontaktas, jis sumažina prarastų fotonų kiekį dėl lūžio rodiklio skirtumų. Kaip kontaktas gali būti naudojamas ir ilgas šviesolaidis. Toks panaudojimas naudingas, kai detektorius turi dirbti stipriame elektromagnetiniame lauke. Tuo atveju scintiliatorius gali būti lauke, o fotodaugintuvas gali būti iš jo iškeltas.

Optimaliam šviesos blyksnio registravimui blyksnio bangos ilgis ir fotokatodo spektrinis jautris turi sutapti, kad scintiliatoriaus skleidžiami fotonai būtų efektyviai konvertuojami, taip pat scintiliatorius turi būti skaidrus savo paties spinduliuotei. Fotonų, krentančių ant fotokatodo, skaičiui padidinti ir šviesos surinkimo vienodumui gerinti scintiliatoriaus paviršius padengiamas šviesą atspindinčiais paviršiais, pavyzdžiui, titano oksidu, arba naudojamas visiškasis vidaus atspindžio efektas.

Blyksnio intensyvumo kitimas laike apibrėžiamas formule:

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2)$$

čia τ – išspinduliavimo laikas [3]. Išspinduliavimo laiką lemia procesai, kurių metu dalelės energija paverčiama šviesos blyksniu. Dažnai dėl skirtingų procesų sumos, intensyvumo pokyčio formulė įgyja kelias komponentes su skirtingomis τ reikšmėmis. Lengvoms (elektronams) ir sunkioms dalelėms (protonams, α dalelėms) pataikant į scintiliatorių spinduliavimo intensyvumų komponentių santykiai gali skirtis. Ypatingai šis efektas išskiriamas organiniuose scintiliatoriuose. Dėl šio efekto registruojamos skirtingos impulso formos esant vienodam amplitudės impulso aukščiui.



Pav. 2. Scintiliacijos impulso formos priklausomybė nuo jonizuojančiosios spinduliuotės tipo stilbeno detektoriuje [4]

Impulso netiesiškumą aprašo Birkso taisyklė, kuri parodo šviesos išeigos priklausomybę nuo jonizuojančiosios dalelės jonizacijos tankio scintiliatoriuje [5]. Birkso formulė:

$$\frac{dL}{dx} = \frac{\frac{dE}{dx}}{1 + B \frac{dE}{dx}}, \quad (3)$$

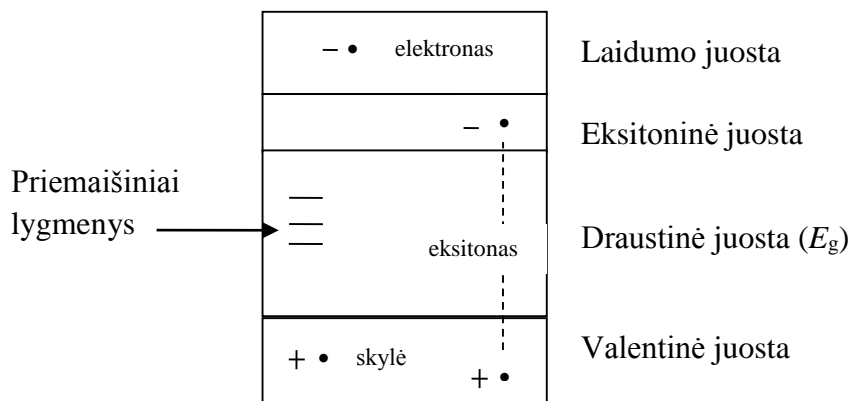
čia L šviesos išeiga, x – kelias, dE/dx – jonizacinis tankis, B – Birkso konstanta, priklausanti nuo scintiliacinės medžiagos.

1.3.1. Neorganiniai scintiliatoriai

Neorganiniai scintiliatoriai yra neorganinių druskų kristalai, praktikoje naudojami halogeniniai šarminių metalų junginiai. Šviesos išeigai didinti į tokius scintiliatorius įterpiamos specialios kitų elementų priemaišos – aktyvatoriai. Populiariausias neorganinis scintiliatorius yra NaI(Tl) – jame aktyvatoriaus vaidmenį atlieka talis.

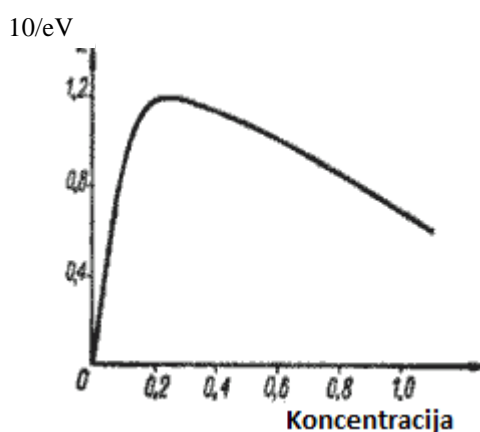
Šie scintiliatoriai pasižymi gana dideliais efektyvumais, pavyzdžiui, NaI(Tl) – 6%, o ZnS(Ag) siekia net 20%. Taip pat neorganiniai kristalai pasižymi ilgu išspinduliavimo laiku 10^{-6} s eilės, dideliu atominiu skaičiumi bei gana dideliu tankiu (ZnS(Ag) tankis 4.09 g/cm^3) [6]. Šios savybės daro detektorius įvairiapusiškai patrauklius tiriant γ spinduliuotę. Didelis kiekis scintiliatorių su geromis savybėmis yra naudojami miltelių pavidalu, kadangi nepavyksta išauginti didelio kristalo, pavyzdžiui, ZnS(Ag) naudojamas detektorių gamybai kaip plonas sluoksnis miltelių, paskleistų ant skaidraus paviršiaus. Plonasluoksnio detektoriaus pagalba galima detektuoti α daleles. Taip pat į miltelius įmaišius boro galima gauti šiluminių neutronų detektorių, kurio veikimas pagrįstas reakcija $^{10}_5\text{B}(n, \alpha)^7_3\text{Li}$. Dar vienas tokio detektoriaus privalumas yra tai, kad jis mažai jautrus γ spinduliuotei, tačiau jo išspinduliavimo laikas yra labai ilgas ir siekia net 10^{-3} s. Šiluminių neutronų detekcijai taip pat galima naudoti ličio turinčius scintiliatorius, tokius kaip LiI arba LiF.

Šviesos blyksnis scintiliatoriuje atsiranda dėl elektronų šuolių tarp lygmenų. Draustinės zonos viduje gali būti išsidėstę diskretiniai lygmenys dėl aktyvatoriaus (pavyzdžiui, talis natrio jodide) ir dėl gardelės netobulumo. Dėl spinduliuotės sužadavimo elektronai gauna energiją ir gali pereiti į eksitoninę arba į laidumo juostą. Elektronų grįžimas į valentinę juostą vyksta per pagavą priemaišiniuose lygmenyse, dėl to išspinduliuojami šviesos kvantai. Kadangi fotonų energija būna mažesnė už draustinės juostos tarpą, o priemaišinių lygmenų tankis yra mažas, kristalas tampa skaidrus savo paties spinduliuotei.



Pav. 3. Sužadinto kristalo juostinė schema

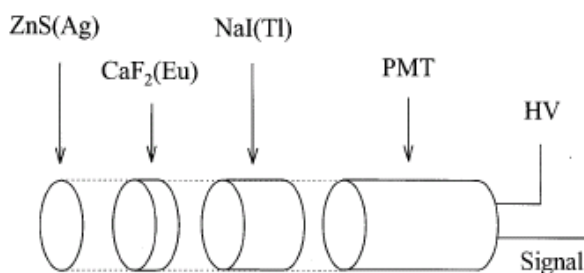
Šviesos išeiga priklauso nuo aktyvatoriaus koncentracijos scintiliatoriuje. Šviesos išeigos mažėjimas, esant didelei aktyvatoriaus koncentracijai, atsiranda dėl to, kad didėja tikimybė, kad priemaišiniai aktyvatoriaus lygmenys sugaus išspinduliuotą fotoną. Taip pat didėjant aktyvatoriaus koncentracijai, trumpėja išspinduliuavimo laikas.



Pav. 4. Šviesos išeigos priklausomybė nuo aktyvatoriaus koncentracijos [7]

Kadangi neorganinių scintiliatorių fluorescencijos laikas dažniausiai yra didelis – 10^{-6} – 10^{-3} s, identifikuojant daleles negalima naudoti impulso formos analizės. Pagrindinis metodas atskirti jonizuojančiosios spinduliuotės daleles yra paremtas ilgine dalelių stabdymo geba. Gaminant

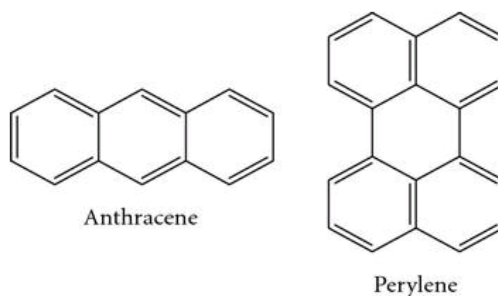
sluoksniuotus scintiliatorinius detektorius remiamasi savybe, kad kuo dalelė sunkesnė, tuo mažesnę kelią ji praeina medžiagoje.



Pav. 5. Tandeminis scintiliatorinis detektorius [6]

1.3.2. Organiniai scintiliatoriai

Organinių scintiliatorių klasei priklauso organiniai kristalai, skysti ir kieti scintiliatoriniai mišiniai su organiniais tirpikliais ir polimerais. Didžiausia šviesos išeiga gaunama naudojant antraceno $C_{14}H_{10}$ (žr. 6 pav.). Organiniai detektoriai pasižymi mažu tankiu, mažesne išeiga lyginant su neorganiniais ir mažu išspinduliavimo laiku, dėl to galima naudoti impulso formos analizę. Dauguma organinių scintiliatorinių detektorių yra sudaryti iš policiklinių aromatinių angliavandenių, tai yra cheminių junginių, sudarytų iš kondensuotų aromatinių žiedų.



Pav. 6. Policiklinių aromatinių žiedų pavyzdžiai: antracenas ir perilenas [8].

Skystų ir plastikinių scintiliatorių pagrindu kuriami detektoriai su dideliu paviršiaus plotu ir dideliu tūriu, taip pat galima gaminti reikiamos formos detektorius. Tokie detektoriai dažnai susideda iš kelių pagrindinių komponentų:

- skaidri plastmasė, pavyzdžiui, polistirenas, arba organinis tirpiklis, pavyzdžiui, toluenas;
- scintiliacinė priemaiša arba aktyvatorius, pavyzdžiui, stilbenas arba naftalenas;

- kartais yra įmaišomas spinduliuojamo šviesos spalvos pastūmėjas, kad paslinkti spektrą į tą sritį, kuriai jautrus fotodaugintuvas, pavyzdžiui, 1,4 – difeniloksazolinis – 2 – ilbenzenas (POPOP).

Vienas iš tokių detektorių atstovų yra sferos formos Borexino detektorius, jo darbinės medžiagos (1,2,4 – trimetilbenzeno ir 2,5 - difeniloksazolino mišinys) masė yra 4 tonos [9]. Šis detektorius skirtas neutrinų detekcijai.

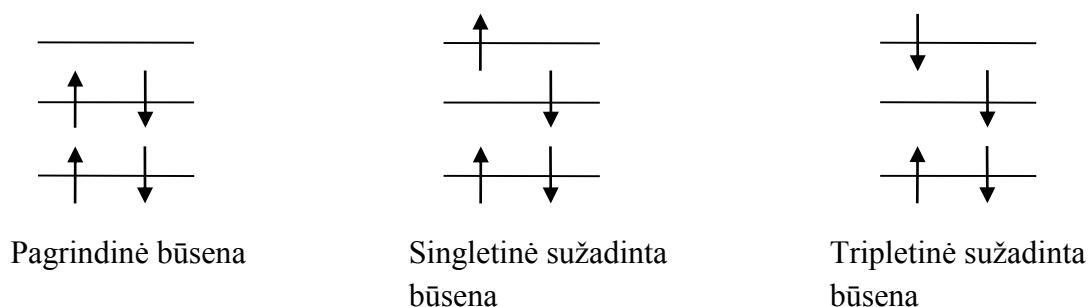
Taip pat kaip ir neorganiniame scintiliatoriuje šviesos išėiga priklauso nuo aktyvatoriaus koncentracijos. Norint detektuoti šiluminius neutronus naudojantis (n, α) arba kitomis reakcijomis, į skystus ir plastmasinius organinius scintiliatorius galima dėti priemaišas, pavyzdžiui, borą, litį arba kadmį. Greiti neutronai registruojami naudojant atatrąkos protonus, kurie atsiranda neutronams sąveikaujant su medžiaga. Galimybė registruoti neutronus naudojant organinį scintiliatorių yra labai perspektyvi, nes dujiniai detektoriai su ^3He dujomis brangsta.

Blyksnio atsiradimas organiniame scintiliatoriuje yra kitokios prigimties nei neorganiniame. Jis susijęs su elektroniniais molekulių sužadimais. Dažniausiai sužadinami π elektronai, nes jų sužadimui reikia mažiausiai energijos. Šių valentinių elektronų orbitalė yra silpniau lokalizuota nei σ ir mažiau veikia susidarant cheminiam ryšiui. Kiekvienas elektroninis molekulės lygmuo yra sudarytas iš daugybės vibracinių lygmenų. Tipinės vibracinių lygmenų vertės yra 0,1 eV, o elektronų lygmenų 2 eV [2].

Pirminės arba antrinės elektringosios dalelės sąveikauja su medžiaga prarasdamos energiją. Dėl to molekulės yra sužadinamos, jonizuojamos ir gali disocijuoti. Dėl energijos sugerties medžiagoje molekulės sužadinamos į įvairius elektroninius bei virpėjimo lygmenis. Po 10^{-12} s molekulės pereina į žemiausią virpėjimo lygmenį tame pačiame elektroniniame lygmenyje. Iš žemiausio virpėjimo lygmens molekulė peršoka į vieną iš pagrindinio elektroninio lygmens virpėjimo lygmenų, šuolio laikas priklauso nuo sužadimo energijos ($10^{-12} - 10^{-11}$ s). Šuolio metu išspinduliuojamas didelės energijos šviesos kvantas, kuris su didele tikimybe yra sugeriamas medžiagoje. Energijos perspinduliavimas vyksta iki tol, kol visos molekulės atsiduria pirmame sužadintame elektroniniame lygmenyje. Lygmens gyvavimo laikas yra apie 10^{-8} s, todėl visos molekulės iš aukštesnių lygmenų spėja atsirasti pirmajame. Iš pirmo sužadinto lygmens, žemiausio virpesinio lygmens molekulė peršoka į pagrindinio lygmens atsitiktinį virpėjimo lygmenį, todėl atsiradęs fotonas gali praeiti pro medžiagą ir būti užregistruotas fotodaugintuve. Visi šie šuoliai vyksta per sužadintas singletines būsenas.

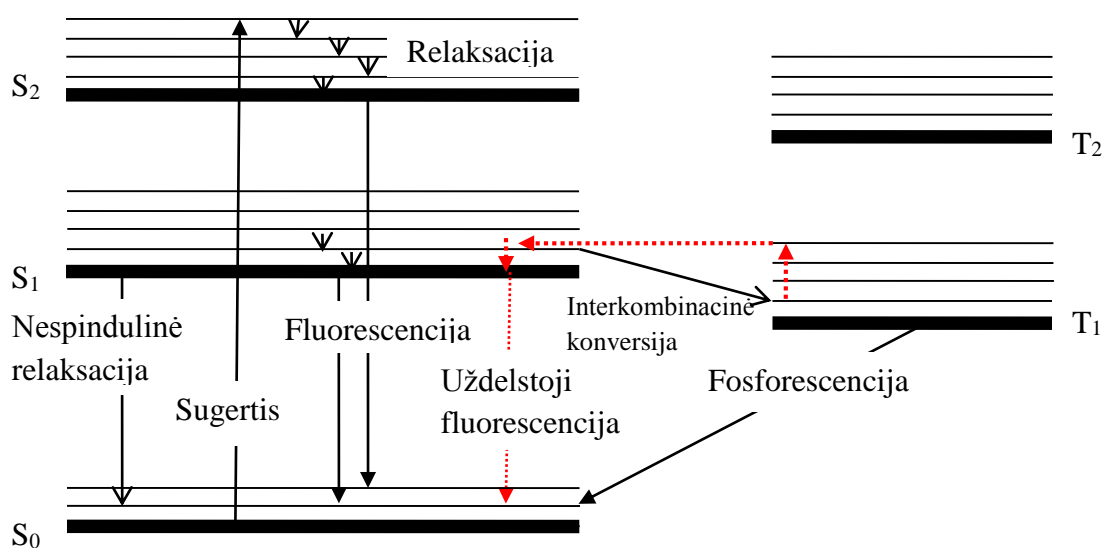
Pagal Paulio draudimo principą viename elektroniniame lygmenyje gali būti 2 elektronai su priešingais sukiniiais. Kai elektronas sužadinamas, dažniausiai jis peršoka į aukštesnį lygmenį nepakeisdamas sukinio, taip atsiranda singletinė sužadinta būsena. Yra tikimybė, kad įvyks interkombinacinė konversija, elektrono sukinyje apsivers ir molekulė pereis į tripletinę būseną. Taip

pat egzistuoja maža sukinių apsisvertimo tikimybė elektronui peršokant į aukštesnį, sužadintą lygmenį. Paulio draudimo principas draudžia iš tripletinės būsenos pereiti tiesiogiai į pagrindinę būseną, kadangi elektronų sukinių sutampa [10, 11].



Pav. 7. Pagrindinis ir sužadinti elektroniniai lygmenys

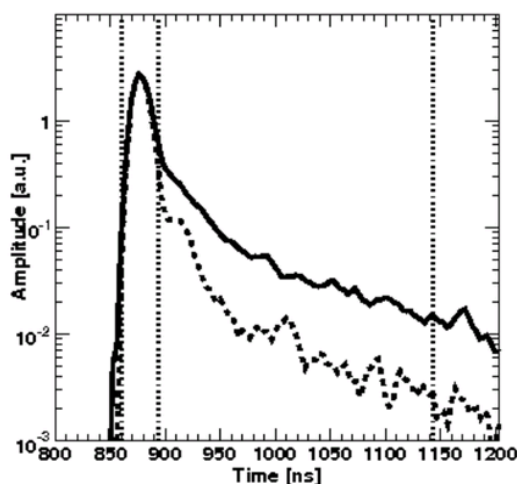
Nors šuoliai yra draudžiami, tačiau labai retai vyksta. Tiesioginis šuolis iš tripletinės būsenos į pagrindinę vadinamas fosforescencija. Kai kurių medžiagų fosforescencijos laikas užtrunka kelias valandas. Taip pat iš tripletinės į pagrindinę būseną molekulė gali pereiti per singletinę būseną, toks vyksmas vadinamas uždelstąja fluorescencija. Ji gali įvykti, kai elektronas grįžta į singletinį lygmenį arba vykstant triplet-tripletinei anichiliacijai. Dažniausiai uždelstąja fluorescencija pasižymi medžiagos, kurių žemiausias singletinis lygmuo yra netoli nuo žemiausio tripletinio lygmens. Dėl uždelstos fluorescencijos impulsas iš organinio scintiliatoriaus gali užsitęsti iki 10^{-6} s. Uždelstoji fluorescencija yra ryškesnė skystuose organiniuose scintiliatoriuose nei kietakūniuose. Manoma, kad taip yra todėl, kad skystuose scintiliatoriuose molekulės gali difunduoti ir ilgiau išsilaikyti tripletinėje būsenoje, o kietose jos yra surištos ir susidūrimo tikimybė būna didesnė [12]. Šuolius tarp lygmenų parodo Jablonskio diagrama (žr. 8 pav.).



Pav. 8. Jablonskio diagrama. Pavaizduoti šuoliai tarp lygmenų. Taškuota linija pavaizduota uždelstosios fluorescencijos atsiradimo schema.

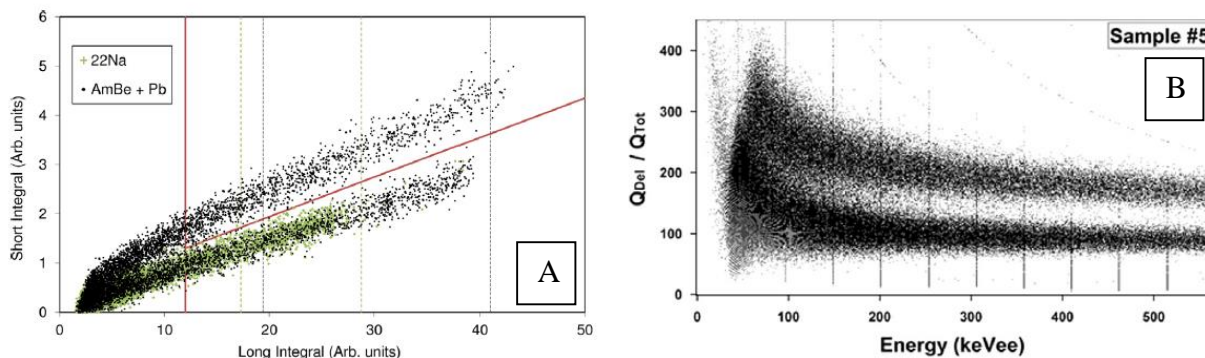
1.3.3. Jonizuojančiosios spinduliuotės dalelių atskyrimas naudojant scintiliatorinį organinį detektorių

Vienas iš populiariausių dalelių atskyrimo metodų yra lėtosios impulso komponentės integralo palyginimas su viso impulso integralu. Kaip buvo minėta anksčiau, dėl uždelstosios fluorescencijos impulsas turi bent dvi komponentes – greitąją ir lėtąją. Šio būdo esmė yra signalo integravimas pradedant nuo signalo pradžios, taip gaunamas pilnas signalo integralas ir integravimas praėjus laikui Δt nuo signalo maksimalios vertės. Pastūmus integravimo pradžią suintegruojama tik uždelstoji fluorescencija. Integravimo režiai pavaizduoti 9 pav.



Pav. 9. Impulso greitosios ir lėtosios komponentių integravimo režiai [13]

Atidedant viso impulso ir uždelstosios fluorescencijos integralus ant ašių gaunamos sritys, kurių polinkio kampas priklauso nuo jonizuojančiosios dalelės tipo.



Pav. 10. Neutronų ir gama spinduliuotės atskyrimas. A – impulso uodegos integralo priklausomybė nuo impulso integralo. Naudojamas americio – berilio neutronų šaltinis uždengtas švinu ir natrio gama šaltinis [14]; B – impulso uodegos integralo santykio su viso impulso integralu priklausomybė nuo energijos [15].

Grafikas, kuriame atidėta lėtosios impulso komponentės integralo priklausomybė nuo greitosios komponentės integralo, pavaizduotas 10 pav. A. Ryškiai išsiskiria sritys, kurios atsiranda dėl gama kvantų ir neutronų poveikio. Paveikluose sritys, esančios aukščiau, parodo sąveikas su neutronais. Palyginimui yra įdėta priklausomybė, kurią sukuria ^{22}Na gama spinduliuotė. Matome, kad ji visiškai sutampa su sritimi, kuri atsiranda dėl $^{241}\text{Am/Be}$ šaltinio gama poveikio.

1.3.4. Jonizuojančiosios spinduliuotės detektoriaus parametrai

Energinė skyra yra viena svarbiausių detektoriaus charakteristikų. Geriausia detektoriaus atsako funkcija yra Gauso funkcija $G(E, V)$. Ši funkcija aprašo tam tikro signalo integralo tikimybę pataikius pirminei jonizuojančiosios spinduliuotės dalelei. Energinė skyra yra funkcijos plotis ΔE išmatuotas pusės didžiausios vertės lygyje, dar kitaip vadinamas puspločiu (angl. *FWHM* – *full width at half maximum*). Kadangi detektoriaus amplitudė V turi būti proporcinga krintančios dalelės energijai, gauname

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta V}{V}, \quad (4)$$

iš čia gauname, kad daleles su panašiomis energijomis galima atskirti tik įvykdžius sąlygą

$$|V_1 - V_2| > \Delta V. \quad (5)$$

Viso prietaiso suminės energinės skyros kvadratas lygus detektoriaus skyros ir stiprinimo grandinės skyros kvadratų sumai.

Efektyvumą apibūdina užregistruotų ir pataikiusių į detektorių dalelių santykis. Efektyvumas priklauso nuo detektoriaus jautriosios medžiagos storio, kadangi detektorius turi baigtinius matmenis.

Skirtingų tipų jonizuojančiosios spinduliuotės dalelių atskyrimo kokybė matuojama vadinamuoju *FOM* (*figure of merit*) parametru. Kadangi vieno tipo dalelių energijų išsibarstymas yra normalinis, atskyrus daleles gaunamos dvi Gauso funkcijos smailės. Kuo geriau smailės atsiskiria, tuo *FOM* parametras yra didesnis. *FOM* parametras aprašomas formule [13]:

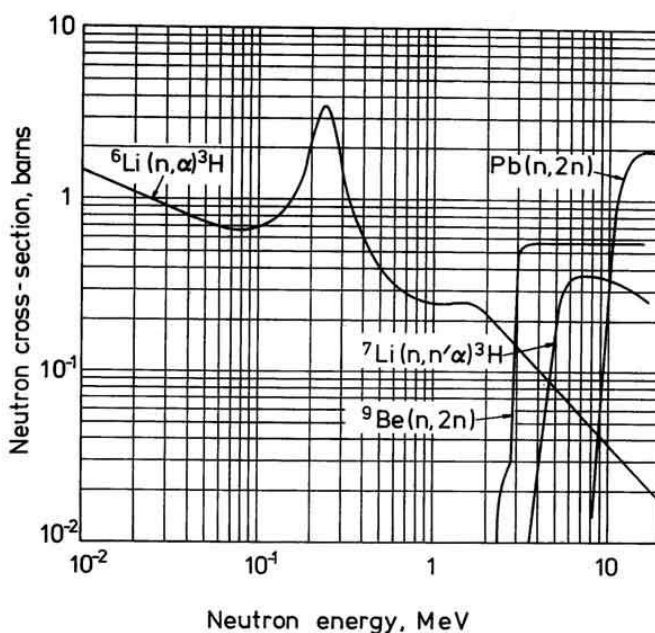
$$FOM = \frac{|X_\alpha - X_\beta|}{(W_\alpha + W_\beta)}, \quad (6)$$

čia X yra atitinkamų dalelių Gauso smailės padėtis ant abscisių ašies, W – Gauso smailės pusplotis. X yra išreiškiamas uždelstosios komponentės ir viso impulso santykiu. Šis dydis parodo, kokia molekulių sužadavimo dalis relaksuoja per uždelstosios fluorescencijos kanalą. Organiniuose scintiliatoriuose uždelstosios fluorescencijos dalis kinta priklausomai nuo pataikiusios dalelės dydžio.

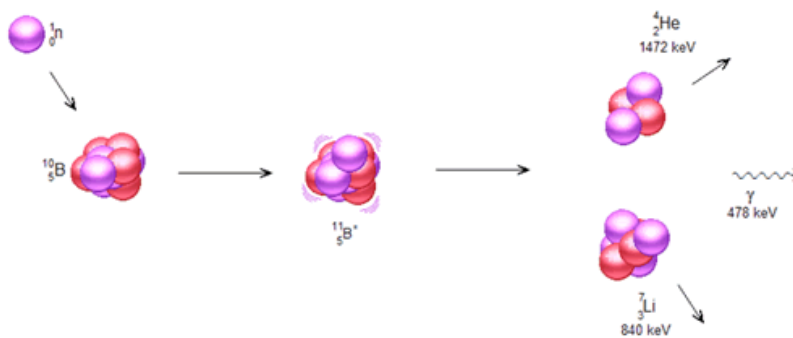
Naudojant mažos energijos impulsų diskriminavimą ir specialiai sukurtą skystos fazės organinį scintiliatorių gaunami geri rezultatai ($FOM_{n/\gamma} = 2,08$) atskiriant impulsus, kurie kuriami dėl sąveikos su neutronais, nuo impulsų, kurie gaunami dėl sąveikos su γ kvantais.

1.3.5. Šiluminių neutronų registravimas naudojant didelio neutronų pagavos skerspjūvio elementų priemaišas

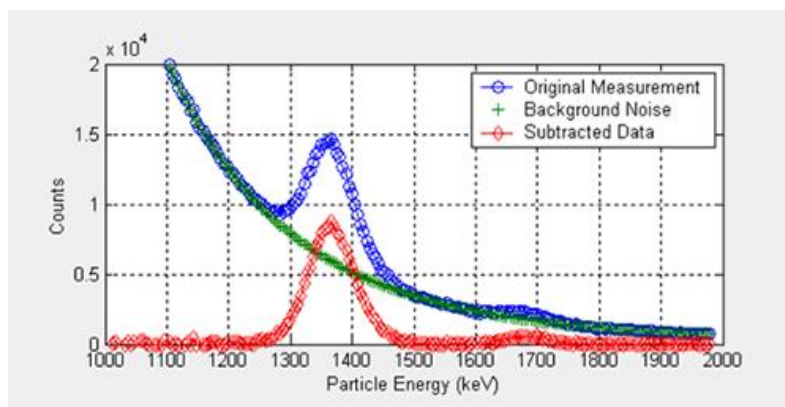
Šiluminių neutronų scintiliatoriniai detektoriai gaminami naudojant didelio šiluminių neutronų pagavos skerspjūvio medžiagas. Pagrindinės naudojamos medžiagos yra boras ir litis, tačiau naudojamos ir kitos, pavyzdžiui, kadmis. Šios medžiagos turi izotopus (pavyzdžiui, ^6Li), kurių pagavos skerspjūvis yra didesnis už kitų izotopų (pav. 11). Jie naudojami impulsų atskyrimui, kuriuos sukelia branduolinės reakcijos dėl sąveikos su šiluminiais neutronais, nuo impulsų, kurie atsiranda dėl neutronus lydinčios γ spinduliuotės ir greitų neutronų. Šiluminių neutronų registracija galima naudojant spektrinę analizę, kadangi po reakcijos išsiskirianti energija yra pastovi, galima stebėti pokyčius spektre.



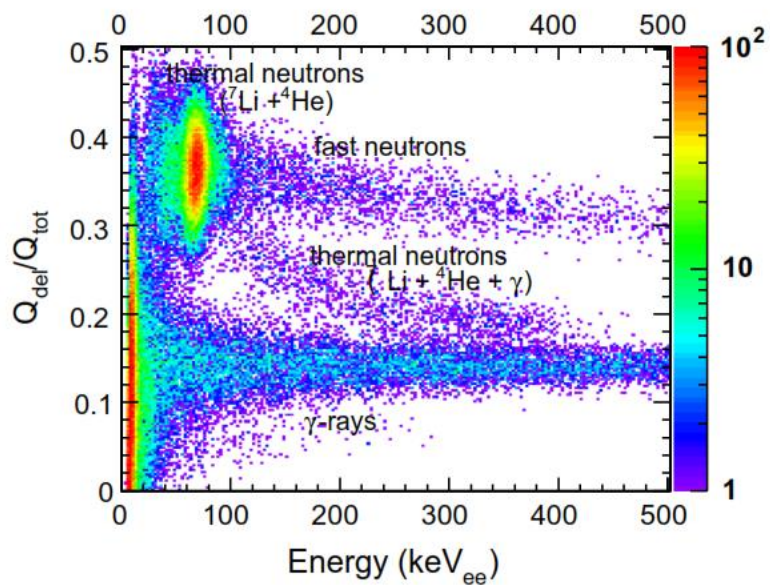
Pav. 11. ^6Li , ^9Be , ^7Li izotopų neutronų pagavos skerspjūvio pagavos priklausomybė nuo neutronų energijos [32]



Pav. 12. Šiluminių neutronų sąveikos su ^{10}B reakcijos schema [33]



Pav. 13. Šiluminių neutronų registravimo naudojant spektrinę analizę pavyzdys [33]



Pav. 14. Šiluminių neutronų registravimas organiniu scintiliatoriumi su boro priemaišomis naudojant uždelstosios fluorescencijos integralo palyginimą su viso impulso integralu [35]

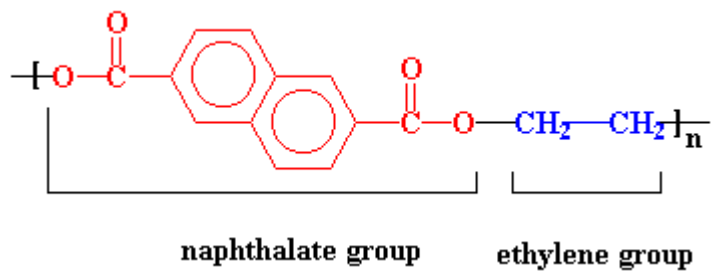
2. Tyrimo metodika

2.1. Bandiniai

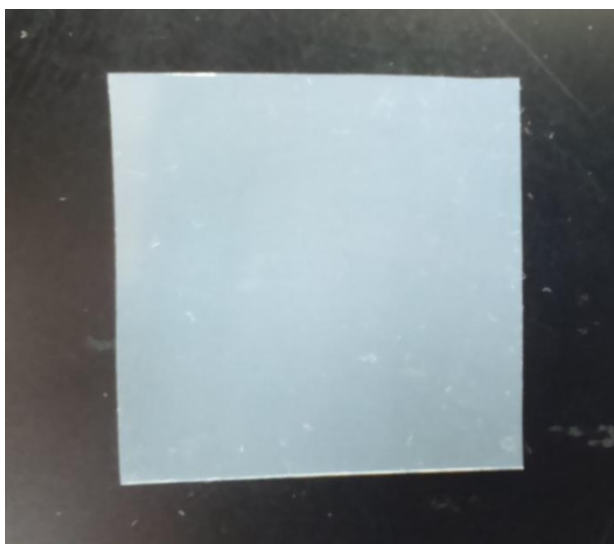
Polietileno naftalatas (Polyethylene 2,6-naphthalate - PEN) yra polimeras su geromis scintiliacinėmis savybėmis mėlynoje spektro dalyje. Taip pat PEN pasižymi geresniu už PET deguoniniu barjeru, medžiagos struktūroje yra 2 naftaleno žiedai. Dėl medžiagos savybių prieš fotono išspinduliavimą molekulės, kurių sužadinimo lygmuo yra aukštas, gali perduoti energiją per naftaleno žiedus [16]. Ši medžiaga turi labai didelį cheminį atsparumą ir yra sunkiai tirpinama. Darbe buvo naudojama PEN plėvelė, kurios storis yra 125 μm , medžiagos tankis – 1,36 g/cm^3 . Polimero stiklėjimo taškas yra 121 $^{\circ}\text{C}$, lydymosi temperatūra – 269 $^{\circ}\text{C}$. Ankstesniuose darbuose buvo naudotos kelių modifikacijų (t.y. Q51, Q83 ir Q65HA) biaksialinės plėvelės įsigytos iš Teijin DuPont Films. Šio darbo metu buvo naudota tik Q83 modifikacijos plėvelė, nes anksčiau buvo stebimi stabiliausi rezultatai. Polietileno naftalatas pasirinktas dėl to, kad pastarųjų metų tyrimai rodo, jog ši medžiaga gali būti labai perspektyvi detektorių gamyboje [17, 18]. Techninės plėvelių modifikacijos pateiktos lentelėje Nr. 1. Iš ankstesnių darbų yra aišku, kad kvantinis PEN plėvelės efektyvumas yra 25%. PEN fotoluminescencijos spektras pateiktas pav. 17. Bandinių fotoluminescencijos spektrai matuoti spektrometru AvaSpec-Mini, žaditimui naudota pirštukinė gyvsidabrio lempa ir šviesos filtras VFC-6.

Lentelė 1. Darbe naudotų PEN plėvelių specifikacijos. Lentelėje pateikti 25 μm Q51, 50 μm Q83 ir 125 μm Q65HA plėvelių duomenys [19, 20, 21].

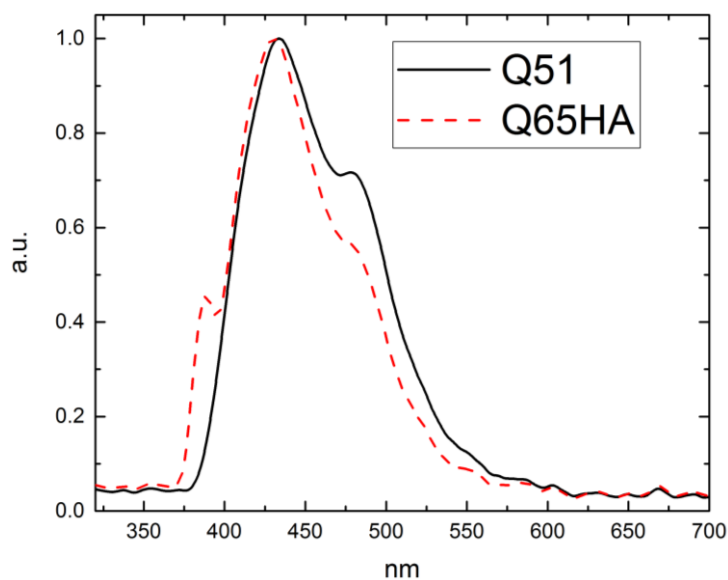
Pavadinimas	Lūžio rodiklis	360 nm šviesos pralaidumas, %	Visas šviesos pralaidumas, %	Miglotumas, %
Q51	Nx – 1,759 Ny – 1,757 Nz – 1,499	8	82	14
Q83	Nx – 1,759 Ny – 1,749 Nz – 1,505	11	84	12
Q65HA	Nx – 1,744 Ny – 1,763 Nz – 1,498	-	88	1,6



Pav. 15. Polietileno naftalato struktūra [22]



Pav. 16. Polietileno naftalato bandinių pavyzdys, 125 μm Q83 plėvelė



Pav. 17 Polietileno naftalato skirtingos modifikacijos plėvelių fotoluminescencijos spektrai

Buvo atliktas PEN plėvelės modifikavimas – ant plėvelės buvo užgarintas 500 nm storio ličio metaborato (LiBO_2) sluoksnis. Sluoksnis turėjo padėti registruoti šiluminius neutronus dėl vykstančių šiluminių neutronų reakcijų su sluoksnyje esančiais ^6Li ir ^{10}B . Ši konverterinė medžiaga pasirinkta

dėl didelės ličio ir boro koncentracijos, prieinamumo bei galimybės garinti medžiagą elektronu spinduliu. Natūraliame Li izotopinio ${}^6\text{Li}$ koncentracija yra 7,5%, natūraliame B izotopinio ${}^{10}\text{B}$ – 19,98%. Sluoksnio storis parinktas kaip optimalus, leidžiantis maksimizuoti reakcijų skaičių bei leidžiantis reakcijos produktams pasiekti plėvelės paviršių. Sluoksnis buvo dengiamas naudojant vakuuminę kamerą su elektronų pluošto garinimo sistema. Sluoksnio storis buvo sekamas kvarcinio rezonatoriaus pagalba.



Pav. 18. PEN plėvelės ir MAKROFOL dengimas LiB sluoksniu

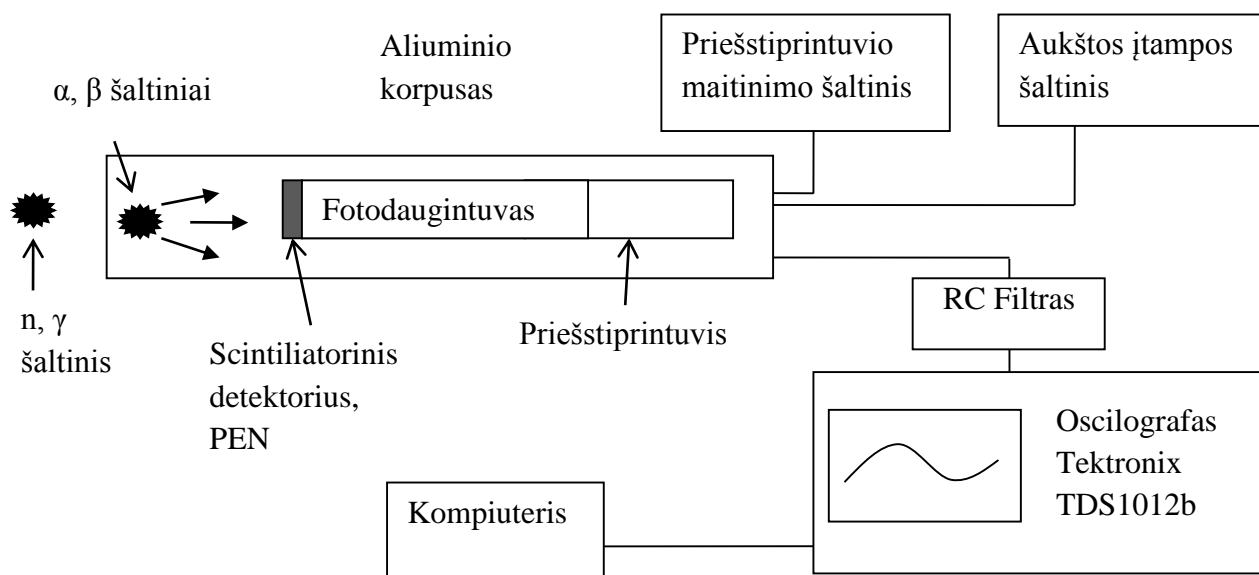
Ekspimentuose taip pat buvo naudojamas jonizuojančiosios spinduliuotės pėdsakų detektorius. Pėdsakų detektoriai (angl. *solid state nuclear track detector*) – tai polimerinės medžiagos, kurios yra nejautrios elektromagnetinei jonizuojančiajai spinduliuotei, bet labai jautrios jonizuojančiosios spinduliuotės elektrinųjų dalelių poveikiui. Detektorių forma gali būti pritaikyta eksperimento reikmėms. Jonizuojančiosios spinduliuotės dalelė sukuria pažaidas detektoriuje, pažaidos vėliau vizualizuojamos pasitelkiant cheminį arba elektrocheminį paviršiaus ėsdinimą. Analizuojant paviršių mikroskopu, galima spręsti apie dalelių kiekį, dydį ir energijas. Ekspimentuose buvo naudojami dengti LiBO_2 sluoksnių ir nedengti pėdsakų detektoriai.

Ekspimentuose naudotos šiluminių neutronų reakcijos:

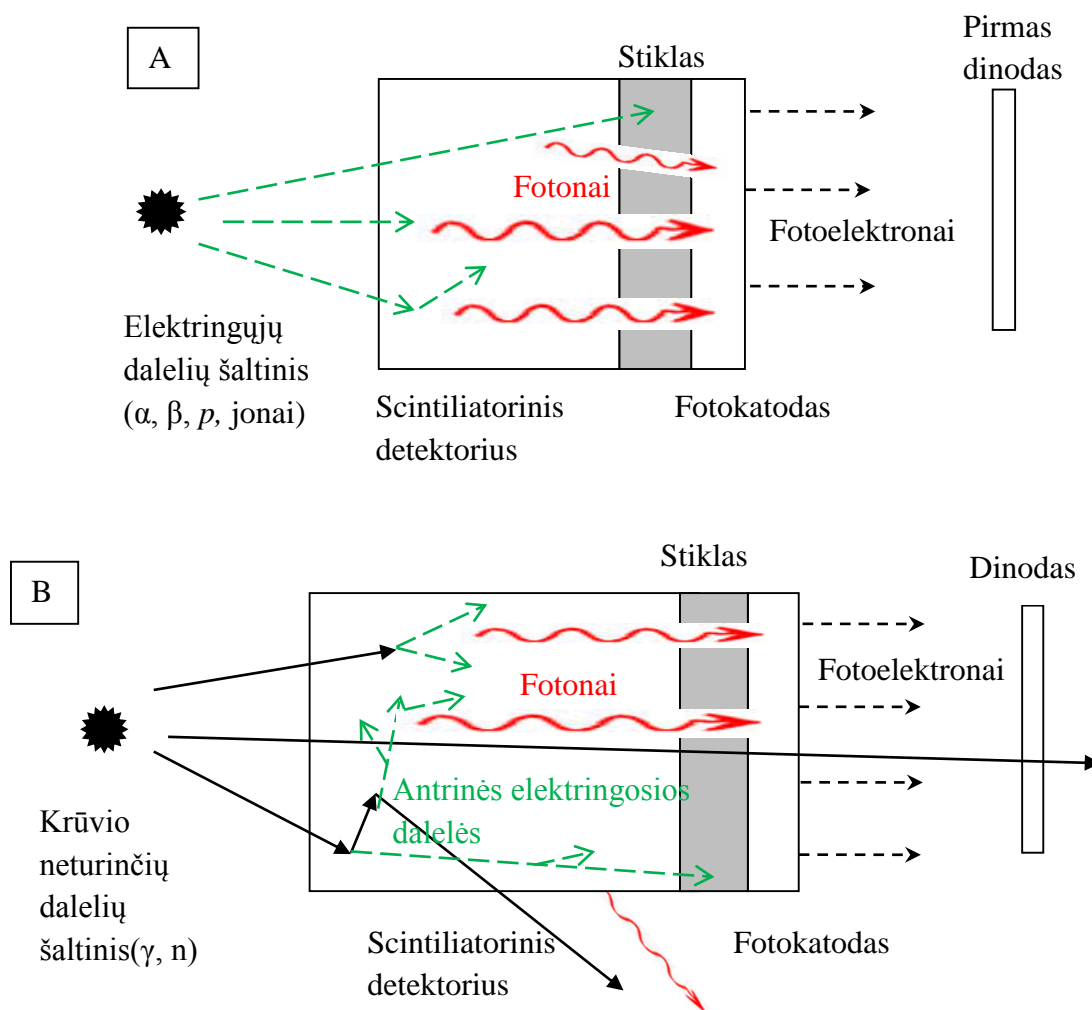


2.2. Eksperimento įranga ir metodika

19 pav. pavaizduota apibendrinta atliktų eksperimentų su jonizuojančiosios spinduliuotės šaltiniais, siekiant ištirti bandinių atsaką į spinduliuotę, schema su fotodaugintuviniu registravimu. Fotodaugintuvo maitinimui naudojamas stabilus Ortec 556 aukštos įtampos šaltinis. Eksperimentuose naudota 1100 V įtampa. Prieštirintuvo maitinimui buvo naudojamas ORTEC 4001C įtampos šaltinis (± 6 V). Oscilografas Tektronix TDS1012b buvo naudojamas nuskaityti impulsus iš stiprinimo grandinės, juos skaitmenizuojant ir perduodant į kompiuterį. Oscilografo impulsų skaitmenizavimo greitis – 1 Gs/s, impulso aukščio rezoliucija – 8 bitai [26].



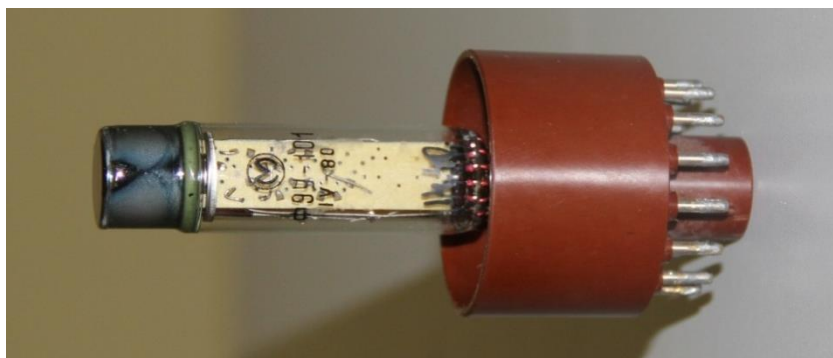
Pav. 19. Apibendrinta eksperimento schema



Pav. 20. Jonizuojančiosios spinduliuotės sąveika su detektoriumi. A – elektringųjų dalelių sąveika su detektoriumi; B – neutraliųjų dalelių sąveika su detektoriumi

Scintiliatoriniame detektoriuje elektringosios dalelės jonizuoja medžiagą ir sukelia šviesos blyksnį tiesiogiai. Neutralios dalelės detektoriuje išmuša antrines elektringasias daleles, kurios jonizuoja medžiagą ir šviesos blyksnis atsiranda dėl antrinių dalelių medžiagos jonizacijos.

Darbe buvo naudojamas fotodaugintuvas su pusiau skaidriu stibio-cezio fotokatodu ir elektrostatiniu fotoelektronų fokusavimu $\Phi\Theta\Upsilon - 101$. Fotodaugintuvas bei parametrai pateikti 21 pav. ir 2 lentelėje.

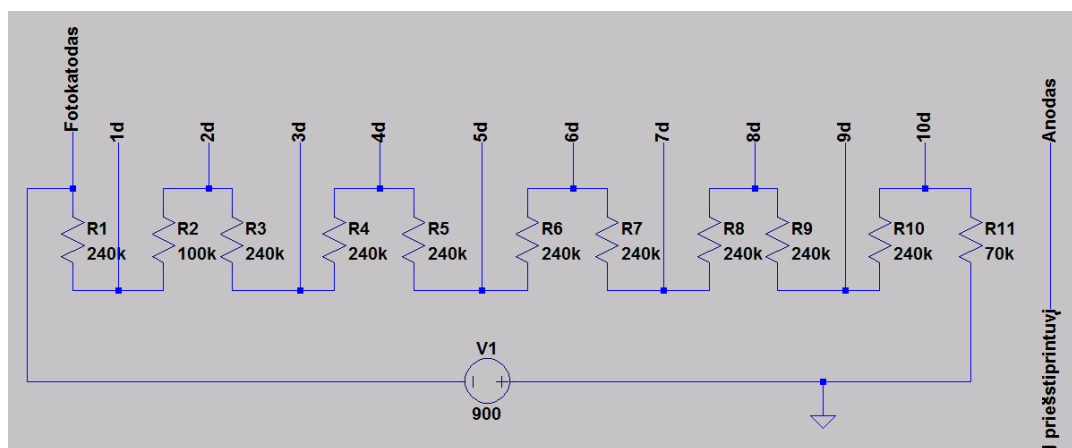


Pav. 21. Eksperimentuose naudotas fotodaugintuvas ФЭУ - 101

Lentelė 2. Fotodaugintuvo ФЭУ -101 specifikacijos [27]

Parametras	Vertė	Vienetai
Minimalus jautrumas šviesai	6.00E-05	A/lm
Maksimali įtampa	1500	V
Maksimali tamsinė srovė	5.00E-08	A
Spektrinio jautrio ribos	300 - 600	nm
Maksimalus spektrinis jautrumas	380 - 490	nm
Dinodų skaičius	10	
Darbinio paviršiaus diametras	10	mm

Fotodaugintuvui specialiai buvo surinktas varžinis įtampos daliklis. Jis buvo surinktas taip, kad fotodaugintuvas veiktų karšto katodo režimu, tai yra anodas atrištas nuo aukštos įtampos šaltinio. Tokios konstrukcijos jautrumas yra didesnis ir mažesnė elektrinės grandinės įtaka impulso formai palyginus su karšto anodo konstrukcija, kadangi nėra naudojamas aukštą įtampą izoliuojantis kondensatorius. Įtampos daliklio schema pavaizduota 22 pav.



Pav. 22. Fotodaugintuvo įtampos daliklio schema. 1d-10d pažymėti fotodaugintuvo dinodai.

Priešstiprintuvio grandinė buvo modeliuota programa LTspice IV. LTspice IV tai yra aukštos kokybės simulatorius, skirtas schemų surinkimui, signalų analizavimui, į jį įeina daugybė priedų ir modelių, palengvinančių schemų modeliavimą [28]. Į šią programą įeina visų puslaidininkinių elementų modeliai, kuriuos gamina Linear Technology. LTspice IV buvo pasirinkta dėl to, kad ji yra nemokama ir buvo naudojamos Linear Technology dalys. Programa buvo derinama priešstiprintuve naudojamo operacinio stiprintuvo LT1222 atgalinio ryšio grandinė. Taip pat buvo derinamas impulsų perdavimo grandinės dažnių filtras, kuris leido sumažinti elektrinius triukšmus ir pagerinti signalų įrašymą mažų impulsų srityje.

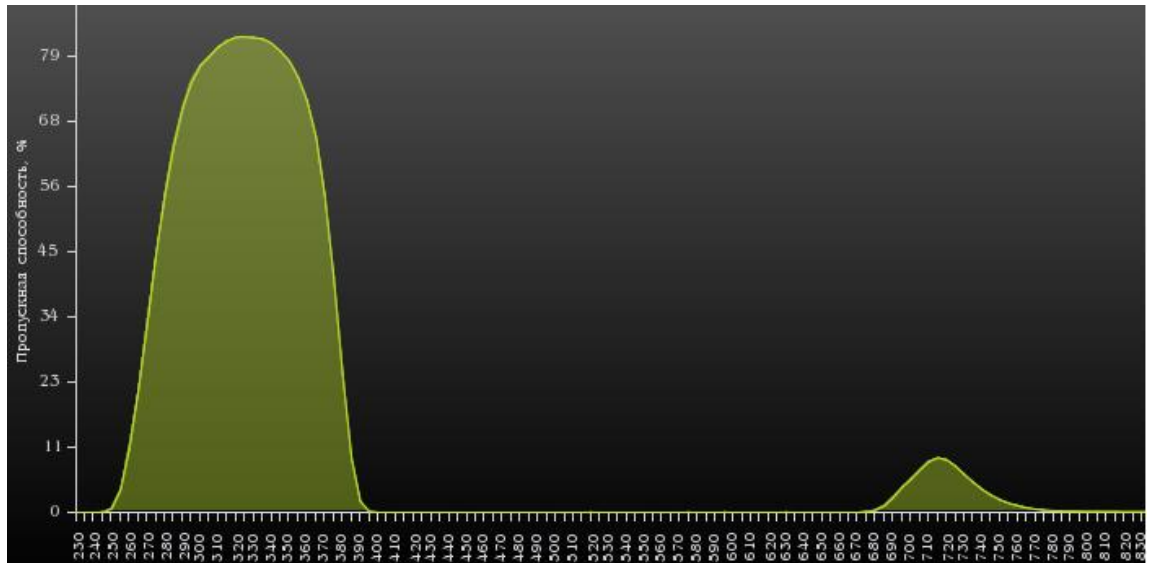
Duomenų iš oscilografo gavimui, pirminiam analizavimui ir impulsų integravimui buvo parašyta programa Python kalba. Python yra interaktyvi aukšto lygio atviro kodo kalba, kuri leidžia naudoti kelis programavimo stilius. Programos kodas pateiktas priede Nr. 1.

Programa atlieka šiuos veiksmus:

- užmezga bei palaiko dialogą su oscilografu;
- gauna duomenis;
- konvertuoja duomenis iš binarinio kodo į dešimtainių skaičių duomenų masyvą;
- atlieka impulso glotninimą;
- atlieka impulso interpoliaciją, kai impulso aukštis viršija registruojamą lygį;
 - Ši interpoliacija įvesta tam, kad apimti maksimalią impulsų aukščio skalę. Matuojant impulsus neutronų sraute energijų pasiskirstymas yra labai platus, todėl neįmanoma parinkti tinkamo impulsų aukščio žingsnio oscilografe. Funkcija atliekanti interpoliaciją patikrina, ar užregistruotas impulsas yra per aukštas, jei taip, atlieka interpoliaciją orientuodamasi į paskutinius svarbius taškus.
- randa impulso maksimumą ir susumuoja impulsą;
- įrašo duomenis į bylą;
- atvaizduoja paskutinį impulsą, kai baigia rinkti reikiamą duomenų kiekį.

Impulsas buvo sumuojamas tam tikruose kanalų intervaluose (gautas plotas po impulsu), kurie atitinka pasirinktą sumavimo laiką – 900 ns nuo impulso pradžios. Impulso kanalų suma (toliau vadinama impulso suma) yra proporcinga energijos kiekiui, kurį jonizuojančiosios spinduliuotės dalelė paliko detektoriuje. Visas impulso integralas toliau žymimas Q_T , uždelstosios fluorescencijos – Q_D . Dėl labai ilgo dialogo tarp kompiuterio ir oscilografo maksimalus impulsų įrašymo greitis yra 2 impulsai per sekundę.

Bandinių fotoluminescencijos spektrai buvo matuojami spektrometru AvaSpec-Mini, žadinimui naudota pirštukinė gyvsidabrio lempa ir šviesos filtras УФС-6.



Pav. 23. Šviesos filtro VFC-6 spektrinė pralaidumo charakteristika [29]

2.3. Jonizuojančiosios spinduliuotės šaltiniai

Eksperimente buvo naudojami skirtingi šaltiniai. α dalelių srautas buvo gautas iš ^{238}Pu šaltinio, dalelių energija – 5,45 MeV, aktyvumas – 3000 Bq (2013 m.). Beta dalelių srautui gauti buvo naudojamas $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ šaltinis, aktyvumas – $1,57 \times 10^4$ Bq (1989 m.). ^{14}C mažo aktyvumo beta šaltinis, aktyvumas 15 Bq (2015 m.). Neutronų spinduliuotės srautas buvo gautas iš plutonio – berilio šaltinio. Šaltinis sudarytas iš trijų šaltinių IBN – 11, kiekvienas iš jų kuria srautus lygius $2,06 \times 10^7$ n/s, $1,88 \times 10^7$ n/s ir $1,74 \times 10^7$ n/s. Neutronų dozės galia yra 300 $\mu\text{Sv/h}$, o lydinčiosios γ spinduliuotės dozės galia – 20 $\mu\text{Sv/h}$.

2.4. SRIM modeliavimo programa

SRIM (*Stopping and Range of Ions in Matter*) programa naudojama jonų sąveikos su medžiaga modeliavimui. Programos veikimas paremtas Monte Karlo metodu. Programa skirta plačiam panaudojimui, pavyzdžiui jonų stabdymo gebos skaičiavimui arba jonų pluošto terapijai modeliuoti. Susidūrimo tikimybės skaičiuojamos pasitelkiant atsitiktinius skaičius. Šis programų rinkinys skaičiuoja jonų iki 2 GeV/a.m.v. stabdymą ir siekį medžiagoje naudodamas kvantmechaninį susidūrimų apdorojimą [30].

2.5. MCNP modeliavimo programa

MCNP yra bendrosios paskirties, nuolatinės energijos, apibendrintos geometrijos, laiko priklausomybės, fotonų, elektronų, neutronų, Monte Karlo pernašos kodas. Jis gali būti naudojamas

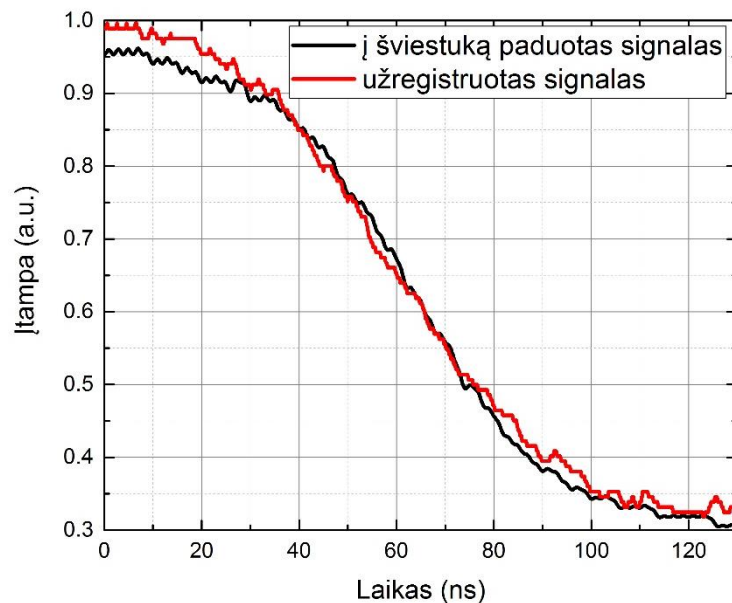
kelių rūšių pernašai: tik neutronams, tik fotonams, tik elektronams; suderinta su neutronų, fotonų ir elektronų pernaša, kur fotonai sukuriama neutronų sąveikos metu. Neutronų energijos sritis yra nuo 10^{-11} MeV iki 20 MeV visiems izotopams ir 150 MeV – kai kuriems izotopams [31].

Modeliuojant labai svarbu tiksliai apsirašyti pradinę eksperimento geometriją. Geometrija aprašoma celėmis, kuriose apibūdinamos paviršių ypatybės, vėliau aprašomas šaltinis. Taip pat labai svarbu tinkamai apsirašyti medžiagas, kadangi nuo to priklauso dalelės siekis. Galiausiai, reikia pasirinkti reikiamą dalelių skaičių, kadangi nuo jo priklausys statistika ir paklaidos. Šiame darbe modeliavimui buvo pasirinktas toks dalelių skaičius, kad statistiniai duomenys užtikrintų paklaidas, kurios neviršytų 2%.

3. Rezultatai ir aptarimas

3.1. Matavimo grandinės atsako tikrinimas žinomu šviesos signalu

Šio darbo metu buvo tikrinamas fotodaugintuvo registravimo ir stiprinimo grandinės atsakas į žinomą šviesos signalą. Tyrimo esmė – išsiaiškinti kokią įtaką matavimo stendo elektrinės grandinės turi matuojamo impulso formai. Eksperimento metu į puslaidininkinį GaN, 400 nm šviesos bangos ilgio šviestuką buvo paduodami stačiakampio formos 5 μ s ilgio impulsai su stačiais frontais. Šviestukas buvo patalpintas fotodaugintuvo matymo lauke. Į šviestuką paduodami impulsai buvo matuojami oscilografu ir lyginami su fotodaugintuvu užregistruotu signalu. Išmatuotos impulsų kinetikos pateiktos žemiau.



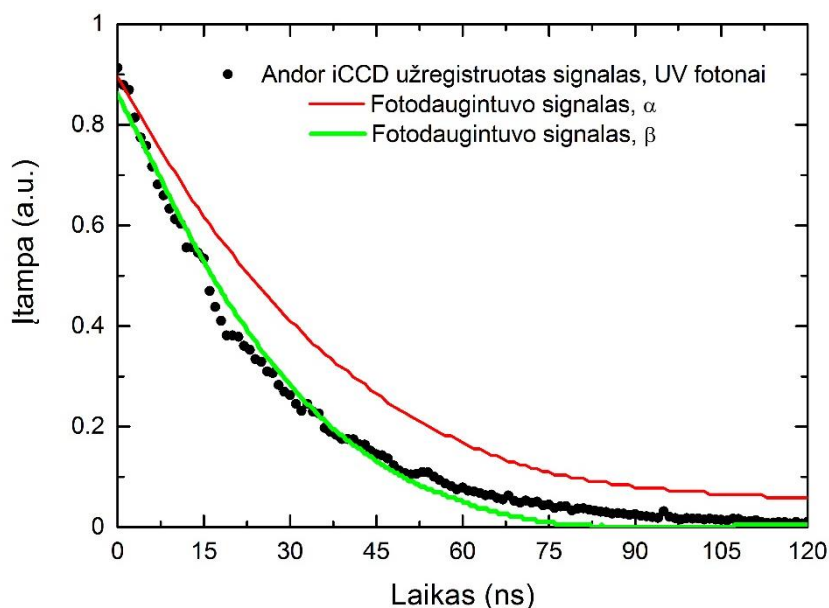
Pav. 24. Užregistruoto fotodaugintuvu (raudona linija) ir paduoto į puslaidininkinį šviestuką (juoda linija) impulsų gesimo kinetikos

Pateiktame grafike matome, kad impulsų gesimo kinetikos sutampa, tai reiškia, kad fotodaugintuvo ir stiprinimo grandinės elementai nedaro žymios įtakos fotodaugintuvu registruojamam šviesos impulsui. Kadangi registravimo grandinė nedaro įtakos registruojamam impulsui, užregistruojami impulsai yra tinkami impulso formos analizei ir dalelių atskyrimui.

3.2. PEN plėvelės atsako impulso tyrimas

PEN plėvelė buvo švitinama skirtingais jonizuojančiosios spinduliuotės šaltiniais: ultravioletinės šviesos šaltinis, $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ beta šaltinis ir ^{238}Pu alfa šaltinis. Darbo metu buvo registruojamos liuminescencijos dėl sąveikos su spinduliuote impulso kinetikos. Po sąveikos su UV šaltinių sinchronizuotas detektorius registravo liuminescencijos gesimo kinetiką, šie matavimai atlikti Vilniaus Universiteto fizikos fakultete. Liuminescencijos gesimo kinetika po sveikos su α ir β

dalelėmis buvo matuota naudojantis eksperimento schema pavaizduota pav. 19. Gesimo kinetikų palyginimas pateiktas žemiau.



Pav. 25. Liuminescencijos gesimo kinetikos. Taškais pažymėta liuminescencijos kinetika, registruota po PEN sąveikos su UV spinduliuote, matuota naudojant sinchronizuotą žadinimo - registravimo sistemą. Žalia linija atvaizduotas liuminescencijos gesimas po sąveikos su β dalelėmis, raudona – po sąveikos α dalelėmis.

Matome, kad taškuota linija, kuri reprezentuoja gesimo kinetika po sąveikos su UV spinduliuote, yra artima kinetikai išmatuotai po sąveikos su β dalelėmis. Iš grafiko galima spręsti, kad impulso formos rezultatai gaunami naudojant eksperimento schema pavaizduota pav. 19 yra nepaveikti stiprinimo grandinės ir sutampa su PEN plėvelės liuminescencijos gesimo parametrais. Rezultatai sutampa su informacija iš literatūros, scintiliatoriuose molekulių sužadinimo relaksacijos keliai po sąveikos su fotonais ir β dalelėmis sutampa.

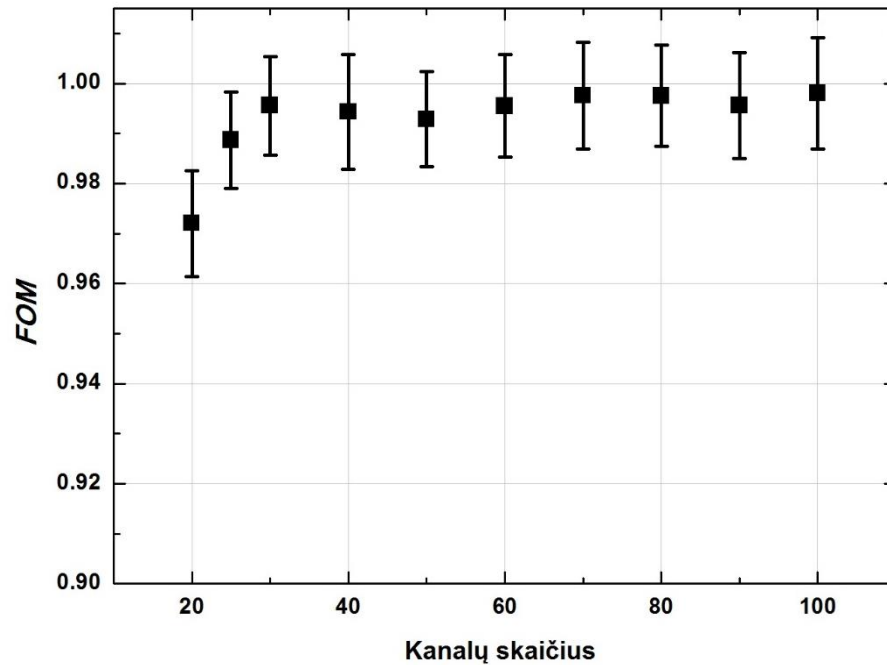
Iš grafiko taip pat matyti, kad liuminescencijos gesimo kinetika po sąveikos su α dalelėmis skiriasi nuo impulso po sąveikos su UV fotonais ar β dalelėmis. Skirtumas parodo, kad šioje medžiagoje egzistuoja kiti impulso relaksavimo keliai, tokie kaip triplet-tripletinė anihiliacija. Šios medžiagos savybės leidžia naudoti impulso formos analizę jonizuojančiosios spinduliuotės dalelių atskyrimui.

3.3. Registravimo parametrų parinkimas

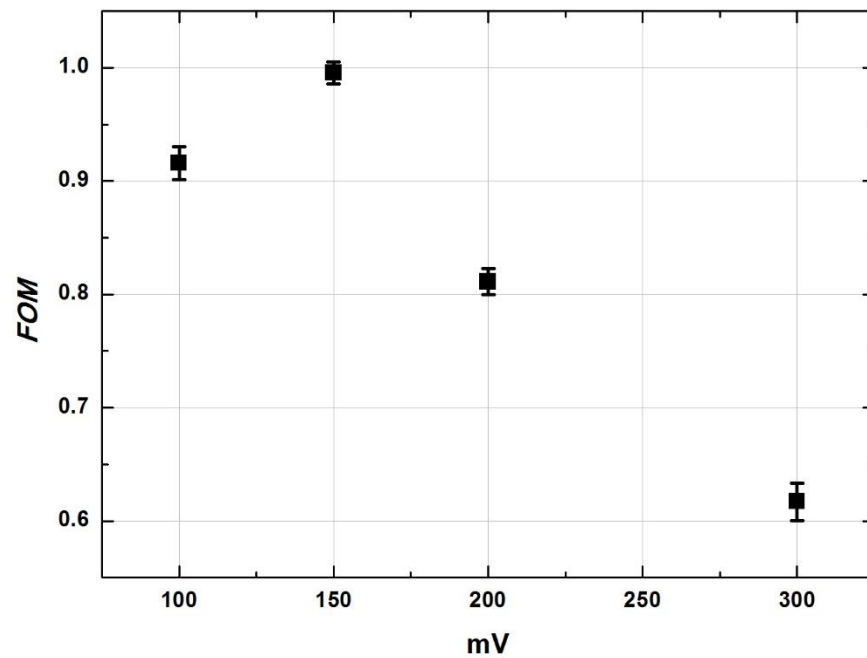
Šio darbo metu buvo keičiami oscilografo registravimo parametrai ir sekama, kaip keičiasi dalelių atskyrimo kokybės parametras *FOM*. Darbo metu buvo keičiami šie parametrai: uždelstosios fluorescencijos integravimo pradžios taškas, skaitmeninio oscilografo įtampos žingsnio padalos vertė, skaitmeninio oscilografo laiko padalos vertė, uždelstosios fluorescencijos integralo santykio su viso impulso integralu padalinimo kanalų skaičius. Šių parametrų paieška yra svarbus optimizavimo

uždavinys, kadangi naudojama gana paprasta registravimo įranga, kuri yra ribota impulsų registravimo prasme, tai yra turi griežtai nustatomus registravimo režius.

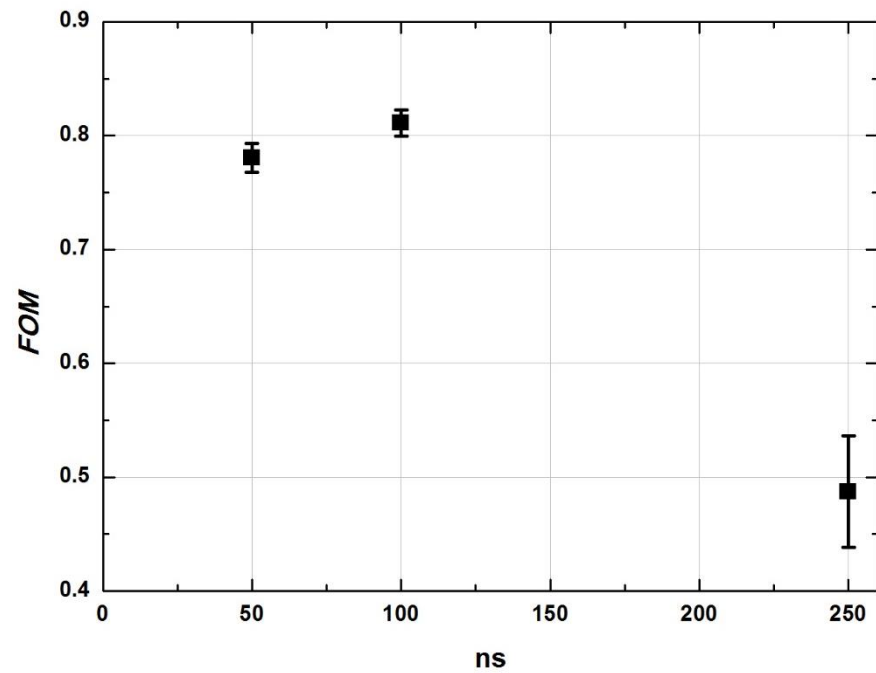
Žemiau pateiktos priklausomybės parodančios, kaip *FOM* parametras priklauso nuo kiekvieno iš keičiamų parametrų. Visi matavimai buvo atliekami tik su α ir β dalelėmis vienodomis žemo lygio diskriminavimo sąlygomis.



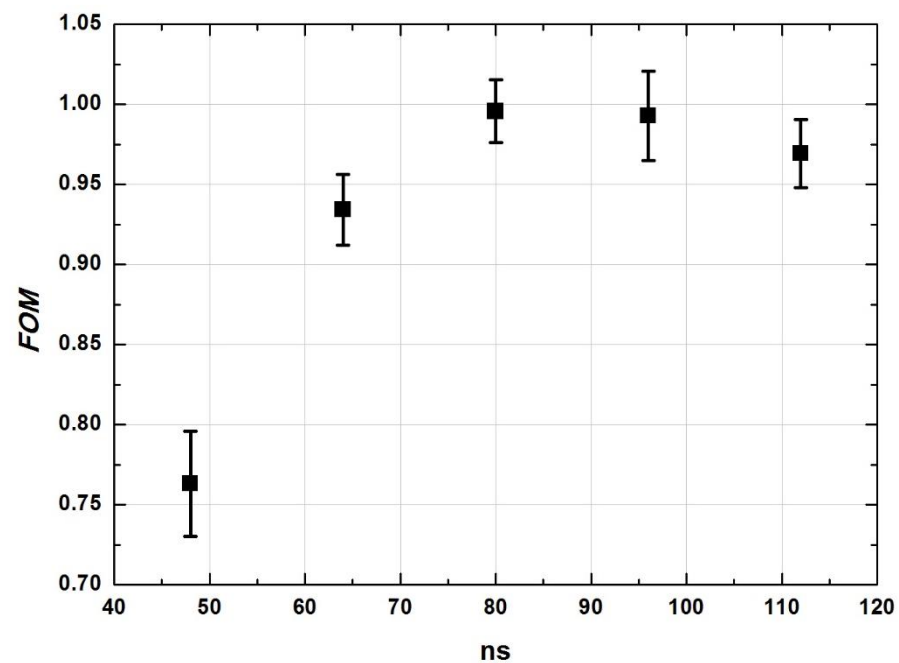
Pav. 26. *FOM* faktoriaus priklausomybė nuo uždelstosios fluorescencijos integralo santykio su viso impulso integralu (Q_D/Q_T) padalinimo kanalų skaičiaus



Pav. 27. *FOM* faktoriaus priklausomybė nuo skaitmeninio oscilografo įtampos žingsnio padalos vertės



Pav. 28. *FOM* faktoriaus priklausomybė nuo skaitmeninio oscilografo laiko skalės žingsnio vertės



Pav. 29. *FOM* faktoriaus priklausomybė nuo uždelstosios fluorescencijos intensyvumo integravimo pradžios. Laikas matuojamas nuo impulso maksimalios vertės.

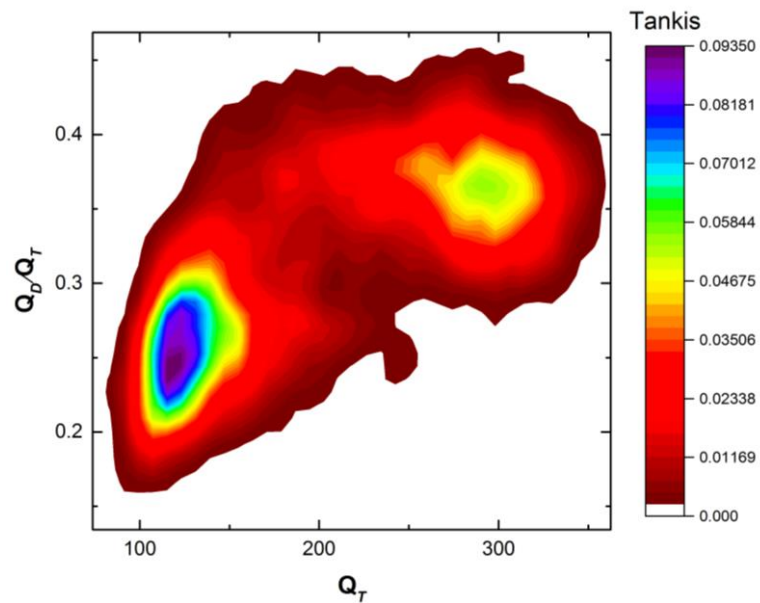
Remiantis atliktais matavimais nustatyta, kad dalelių atskyrimo kokybės vertinimo parametras *FOM* priklauso nuo šių matavimo parametų:

- uždelstosios fluorescencijos integravimo pradžios laiko pasirinkimo;
- oscilografo įtampos žingsnio pasirinkimo;
- oscilografo laiko žingsnio pasirinkimo.

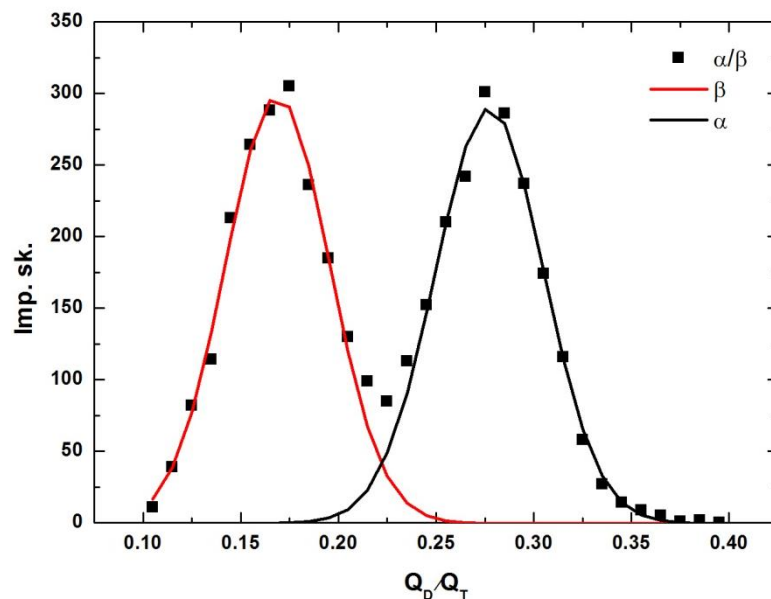
FOM nepriklauso nuo uždelstosios fluorescencijos integralo santykio su viso impulso integralu padalinimo kanalų skaičiaus, kai skaičius yra didesnis už 30. Remiantis gautais duomenimis nustatyta, kad geriausi rezultatai gaunami naudojant šiuos parametrus:

- oscilografo įtampos žingsnis – 150 mV/div;
- oscilografo laiko žingsnis – 100 ns/div;
- intervalas tarp uždelstosios fluorescencijos integravimo pradžios ir impulso maksimumo taško – 80 ns.

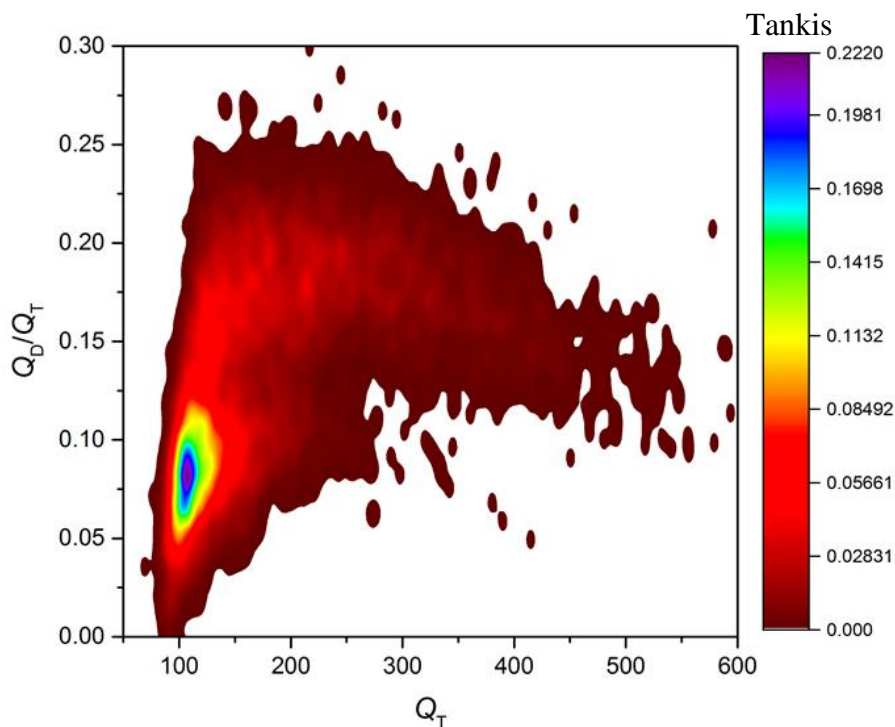
α/β ir n/γ atskyrimo matavimo rezultatai naudojantis gautais optimaliais parametrais pateikti toliau. Šių matavimų metu buvo registruojami impulsai, kurių amplitudė viršijo 500 mV.



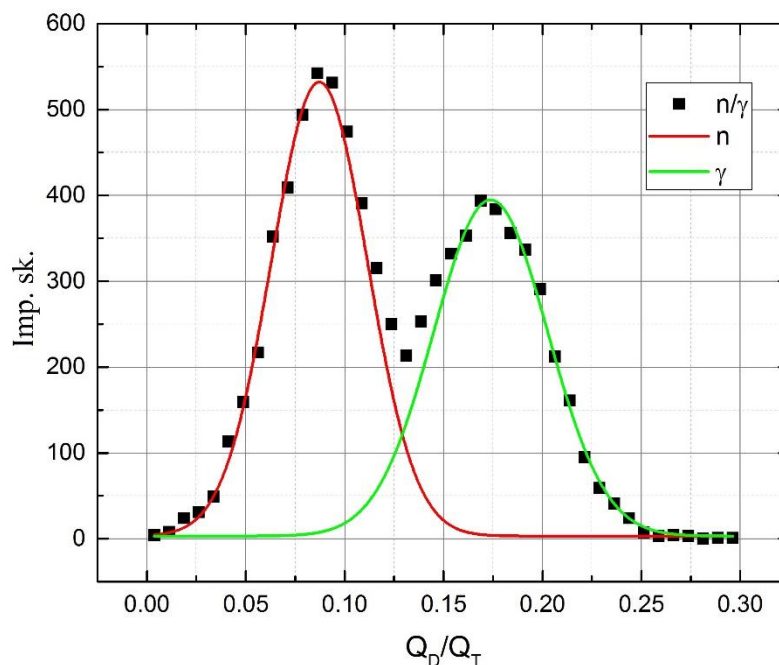
Pav. 30. α ir β dalelių uždelstosios fluorescencijos integralo santykio su viso impulso integralu (Q_D/Q_T) priklausomybės nuo viso impulso integralo (Q_T) naudojant 125 μm PEN plėvelę. Slėnis esantis žemiau atsiranda dėl β dalelių poveikio, slėnis esantis aukščiau – α . Q_T – visas impulso integralas, Q_D – uždelstosios fluorescencijos integralas.



Pav. 31. α ir β dalelių atskyrimo kokybė naudojant PEN plėvelę, $FOM = 0,996 \pm 0,020$



Pav. 32. γ kvantų ir neutronų uždelstosios fluorescencijos integralo santykio su viso impulso integralu (Q_D/Q_T) priklausomybės nuo viso impulso integralo (Q_T) naudojant 125 μm PEN plėvelę. Slėnis esantis žemiau atsiranda dėl γ dalelių poveikio, slėnis esantis aukščiau – n.



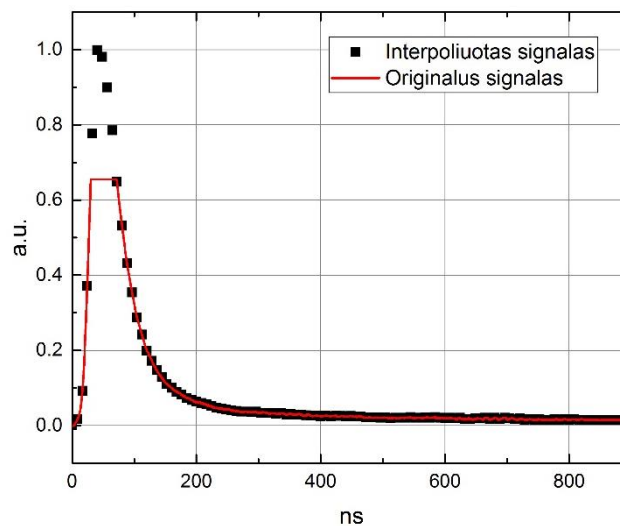
Pav. 33. Greitųjų neutronų ir γ kvantų atskyrimo kokybė naudojant PEN plėvelę, $FOM = 0,736 \pm 0,027$.

Naudojantis gautais optimaliais matavimo buvo išmatuoti dalelių α/β ir neutronų/ γ atskyrimo kokybės faktoriai. Pasiektas β ir α dalelių atskyrimo kokybės faktorius $FOM = 0,996 \pm 0,02$. Pasiektas neutronų ir gama spinduliuotės atskyrimo kokybės faktorius $FOM = 0,736 \pm 0,027$.

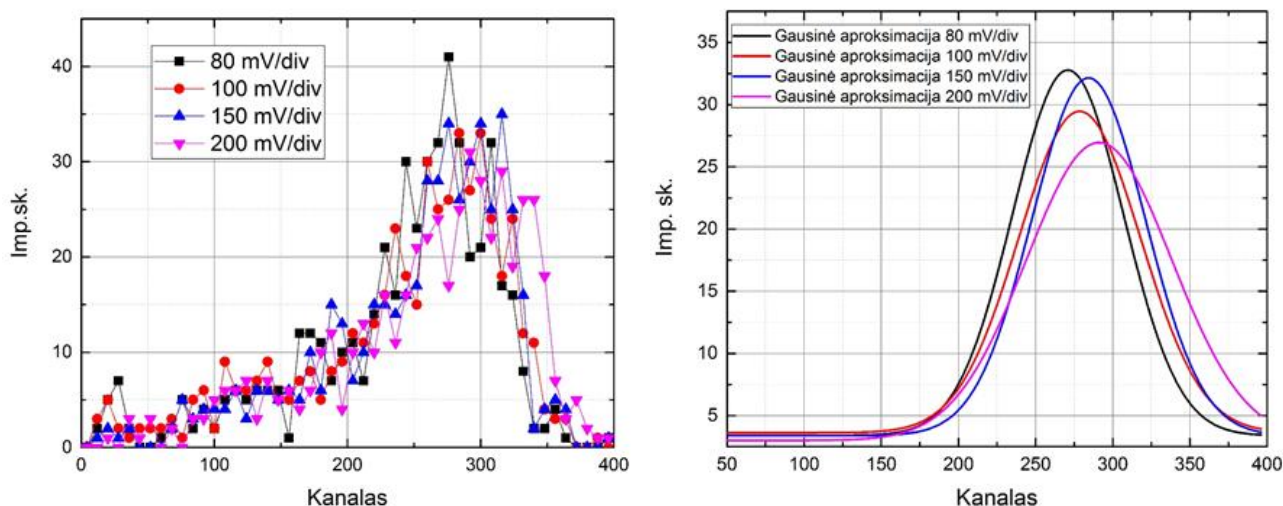
Remiantis rezultatais galima teigti, kad pasirinkta eksperimento schema ir PEN plėvelė gali būti naudojama didelės energijos dalelėms atskirti, pavyzdžiui, gamą spinduliuotę ir greituosius neutronus.

3.4. Polinominės signalo interpoliacijos kokybės tyrimas

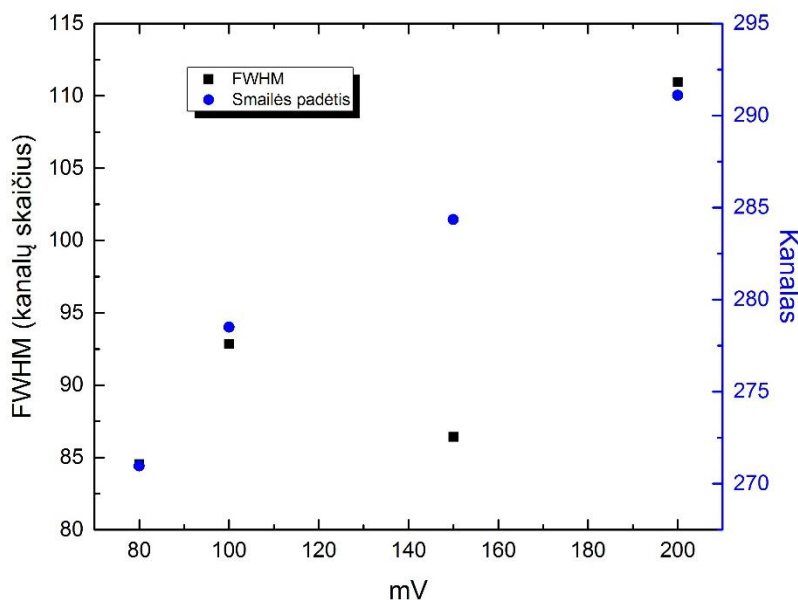
Tyrimo esmė buvo patikrinti kokią įtaką impulso integralui turi polinominė interpoliacija. Interpoliacijos įtakos vertinimui buvo pasirinkta eksperimentinė schema (pav. 19) su ^{238}Pu α dalelių šaltiniu. Šaltinis pasirinktas todėl, kad turi ryškią vienos energijos smailę. Registruoti PEN impulsai buvo integruojami naudojant skirtingas oscilografo įtampos žingsnio vertes. Buvo vertinamas užregistruotas α dalelių spektro pokytis naudojant interpoliaciją lyginant su atveju, kai oscilografo įtampos žingsnis yra pakankamai didelis ir interpoliacija nenaudojama. Pakankamas žingsnis šiame eksperimente buvo 200 mV, t.y. esant tokiam įtampos žingsniui visas impulsas telpa į oscilografo A/K keitiklio įtampos režius ir interpoliavimas nėra reikalingas. Impulso interpoliacijos pavyzdys ir rezultatai pateikti toliau.



Pav. 34. α dalelės sukulto signalo interpoliacijos pavyzdys



Pav. 35. Kairėje pavaizduoti ^{238}Pu α dalelių spektrai užregistruoti naudojant skirtingas oscilografo įtampos žingsnio vertes, nuo 80 iki 200 mV. Dešinėje pavaizduotos užregistruotų spektrų Gausinės aproksimacijos.



Pav. 36. α dalelių spektro smailės padėties ir pusplėčio (FWHM) priklausomybė nuo oscilografo įtampos žingsnio vertės

Iš pav. 36 grafiko matome, kad interpoliacija turi įtakos spektro smailės padėčiai spektre – kuo smulkesnis oscilografo žingsnis, tuo didesnis gaunamas smailės padėties nuokrypis. Smailės padėtis ir smailės pusplėčių parametrai gauti naudojantis Gausine smailės aproksimacija. Sumažinus įtampos žingsnį 2,5 karto nuo atraminės 200 mV iki 80 mV vertės smailės padėties nuokrypis sudarė 7%.

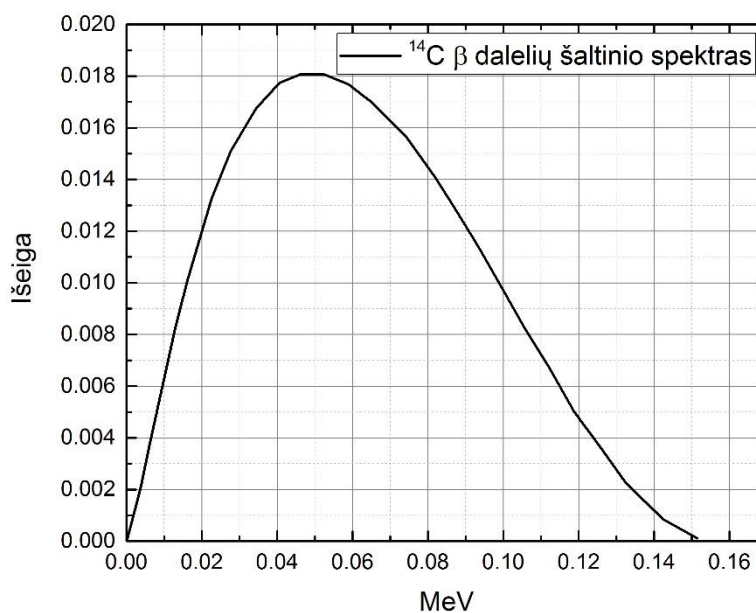
Gauta, kad pusplėčiui padaryta įtaka yra didesnė nei smailės padėčiai, smailės padėties santykis su smailės pusplėčiu pasikeitė 18%, pakeitus įtampos žingsnį 2,5 karto.

Palyginus atsirandančias spektro paklaidas su galimybe stipriai išplėsti registruojamų dalelių energijų spektrą, galima teigti, kad interpoliacija yra tinkama naudoti pasirinktos konfigūracijos eksperimentinėje schemoje. Šiuo atveju pasiekama nauda viršija nuostolius dėl paklaidų didelių energijų srityje, kadangi matuojant neutronų spektrus, žymiai didesnė sąveikų dalis sukelia žemo

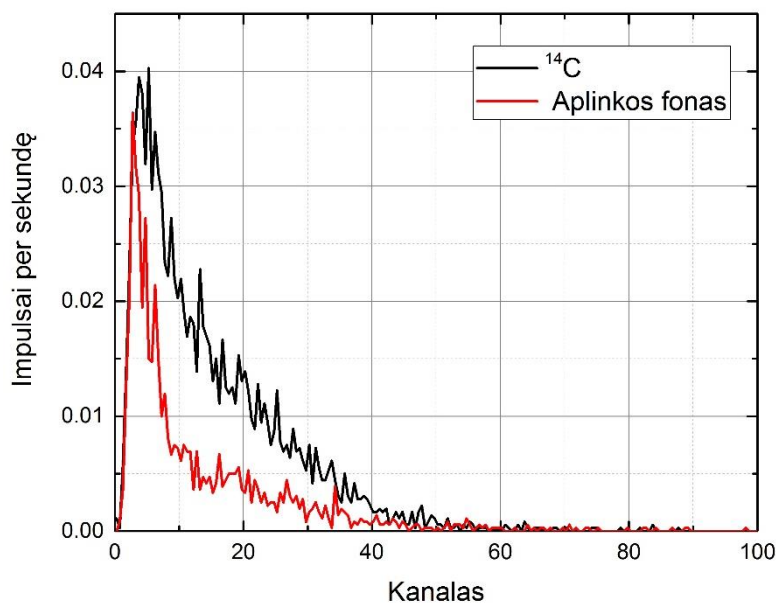
lygio impulsus. Taip yra todėl, kad PEN detektoriaus plėvelės storis dažniausiai yra nepakankamas, kad dalelė paliktų visą energiją detektoriuje.

3.5. ^{14}C β spektro matavimas naudojant PEN plėvelę

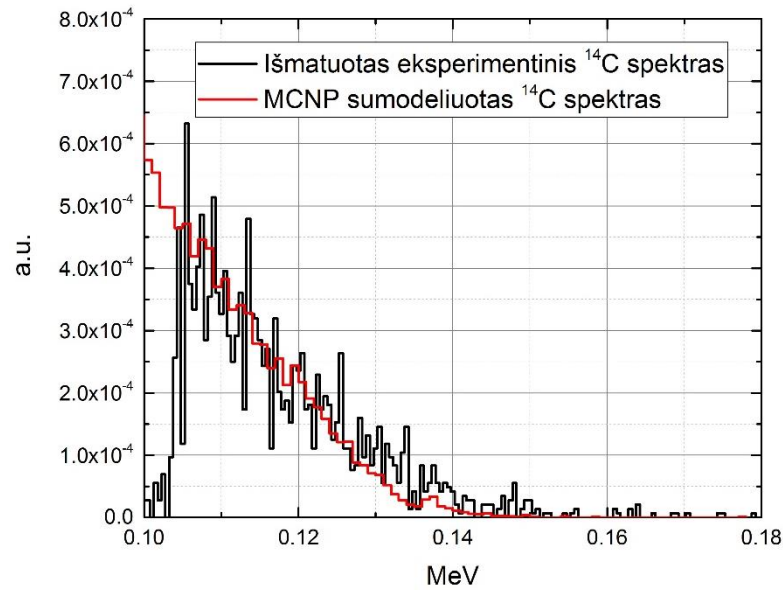
Šio darbo tikslas patikrinti PEN plėvelės galimybes matuoti mažo aktyvumo, mažos energijos šaltinių spektrus. Šiam eksperimentui buvo naudojamas mažo aktyvumo ^{14}C šaltinis (15 Bq). Spektro registravimo laikas 3600 s. Išmatuotas spektras buvo lyginamas su MCNP programos pagalba sumodeliuotais duomenimis. Naudojantis modeliuotu detektoriaus atsaku buvo atlikta energijų detektoriaus registruotų energijų kalibracija.



Pav. 37. MCNP modelyje naudoto ^{14}C β dalelių energijos pasiskirstymo spektras



Pav. 38. Užregistruotas ^{14}C ir foninis aplinkos spektrai naudojant PEN scintiliacinį detektorių

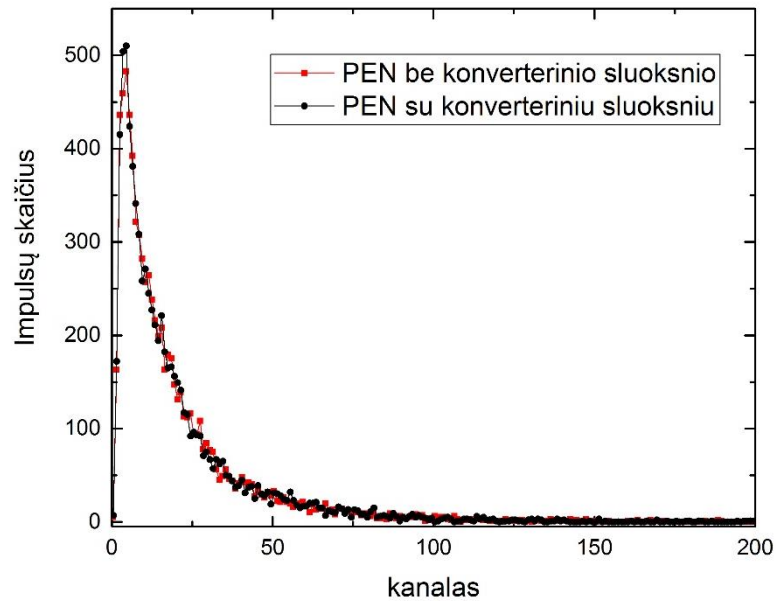


Pav. 39. Išmatuoto ^{14}C spektro su atimtu foniniu spektru palyginimas su MCNP sumodeliuotu PEN detektoriaus atsako spektru

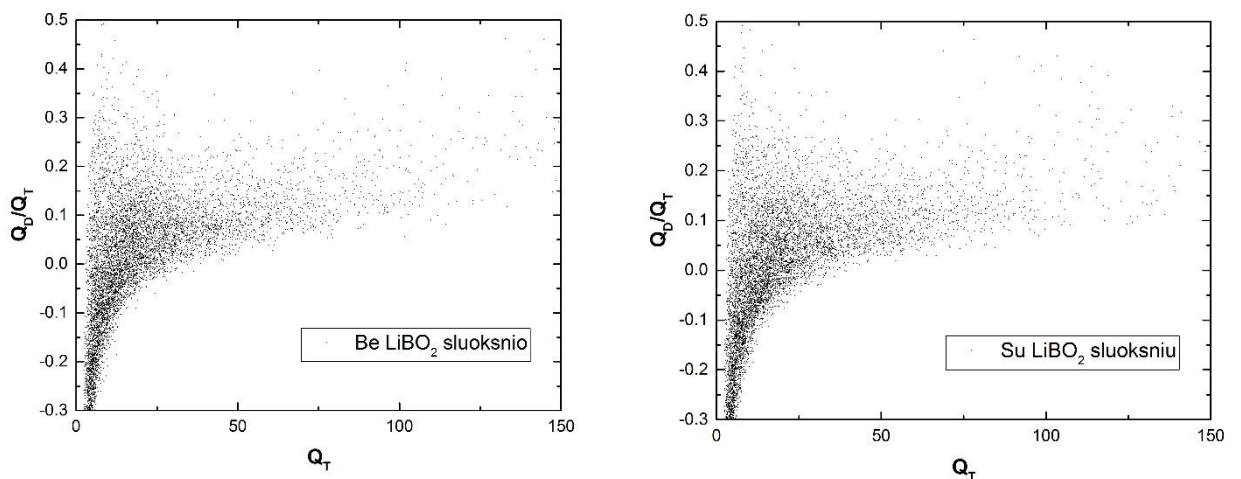
Iš grafikų matome, kad PEN plėvelė gali registruoti mažos energijos β daleles, išmatuotas spektras ryškiai išsiskiria iš aplinkos fono spektro. Kadangi buvo naudotas mažo aktyvumo šaltinis, galima teigti, kad metodika tinka matuoti mažo aktyvumo bandinius, pavyzdžiui, grafitą iš branduolinių reaktorių, kuriame yra dalijimosi ir aktyvacijos produktų. Palyginus eksperimentinį spektrą su modeliuotų detektoriaus atsaku gauta, kad naudojant pasirinktą eksperimento konfigūraciją minimali registruojama dalelių energija yra 100 keV. Norint registruoti mažesnės energijos daleles, reikia modifikuoti eksperimento metodiką ir mažinti šiluminių bei foninių triukšmų lygį.

3.6. Šiluminių neutronų detektavimo modifikuota PEN plėvele tyrimas

Šio darbo metu buvo registruojami neutronų srauto spektrai naudojant modifikuotą (su LiBO_2 500 nm sluoksniu) ir nmodifikuotą PEN plėveles. Užregistruoti spektrai buvo lyginami. Taip pat buvo lyginami uždelstiosios fluorescencijos integralų santykiai su viso impulso integralais, siekiant palyginti dengtos ir nedengtos plėvelių registruojamų dalelių tipų pasiskirstymus. Eksperimento esmė – patikrinti ar užgarintame sluoksnyje vykstančių reakcijų produktai, atsirandantys dėl ^6Li ir ^{10}B sąveikos su šiluminiais neutronais, gali būti užregistruoti naudojant PEN plėvelę ir turimą įrangą. Tikėtasi gauti skirtumus spektre arba impulsų formos analizėje. Matavimų metu buvo registruojami impulsai, kurių amplitudė viršijo 50 mV. Gauti rezultatai pateikti toliau.



Pav. 40. Užregistruoti neutronų ir lydinčiosios γ spinduliuotės spektrai naudojant modifikuotą ir nmodifikuotą PEN plėveles



Pav. 41. Neutronų ir γ dalelių uždelstosios fluorescencijos integralo santykio su viso impulso integralu (Q_D/Q_T) priklausomybės nuo viso impulso integralu (Q_T) naudojant 125 μm modifikuotą ir nmodifikuotą PEN plėvelę. Q_T – visas impulso integralas, Q_D – uždelstosios fluorescencijos integralas.

Iš pav. 40 matome, kad spektrai visiškai sutampa naudojant PEN plėvelę su ir be konvertuojančio LiBO_2 sluoksnio. Galima teigti, kad pritaikant spektrinę analizę duotajam eksperimentui, neįmanoma atskirti šiluminių neutronų sąveikos su konverteriu reakcijų.

Pav. 41 pateikti uždelstosios fluorescencijos integralų santykiai su pilnu impulso integralu naudojant abiejų tipų plėvelinius detektorius. Grafikuose nepastebimos taškų sutankėjimo zonos (tokios kaip pav. 30 arba pav. 14), kurios atsiranda esant pastovios energijos dalelių poveikiui.

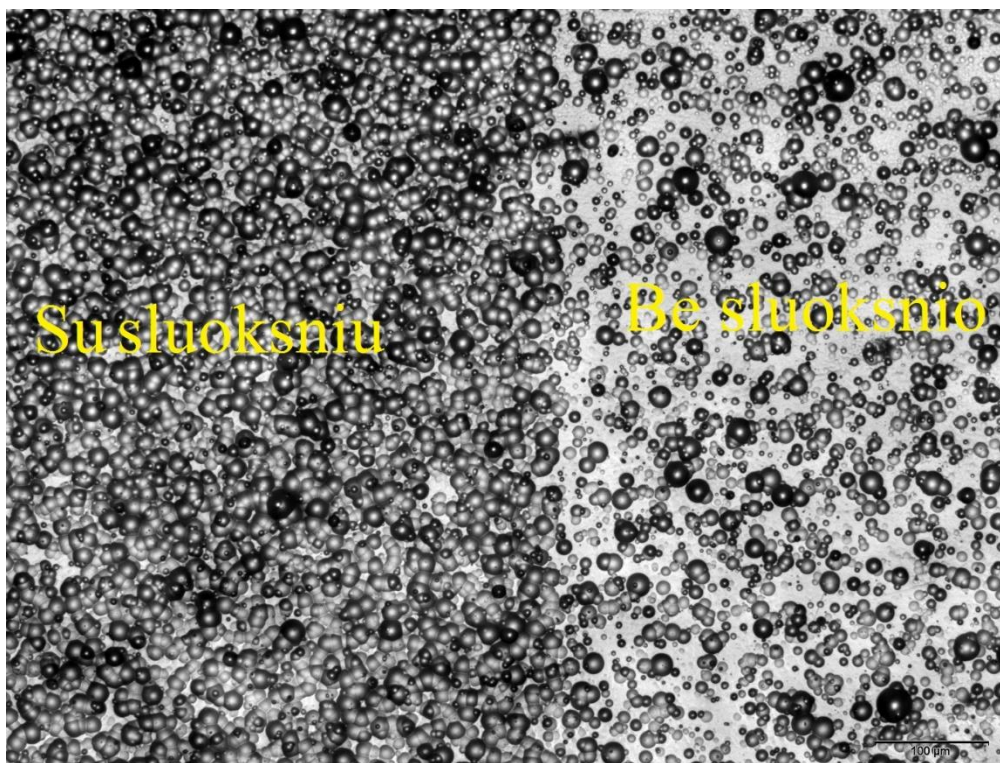
Remiantis gautais duomenimis galima teigti, kad naudojant pasirinktą detektavimo technologiją ir PEN plėveles su LiBO_2 danga, neįmanoma registruoti šiluminių neutronų sukeltų dalijimosi reakcijų.

3.7. LiBO_2 dengto pėdsakų detektoriaus rezultatų analizė

Šio darbo metu buvo tiriamas pėdsakų detektorius MAKROFOL su LiBO_2 danga ir be jos. Tyrimo esmė buvo patikrinti, ar konverterio sluoksnyje šiluminių neutronų sukeltų reakcijų produktai pasiekia detektoriaus paviršius. Detektoriai buvo patalpinti į neutronų srautą, ekspozicijos laikas – 7 paros. Po ekspozicijos detektoriai buvo chemiškai apdoroti – atliktas dviejų valandų trukmės ėsdinimas PEW tirpale (15% KOH, 40% etanolis, 45% vanduo) esant 70° temperatūrai. Po ėsdinimo paviršius buvo fotografuojamas skaitmeniniu optiniu mikroskopu. Dengtos ir nedengtos sričių nuotrauka pateikta pav. 43.



Pav. 42. Eksperimentuose naudotas MAKROFOL detektorius



Pav. 43. MAKROFOL detektoriaus nuotrauka po ekspozicijos neutronu sraute ir ryškinimo. Kairiau esanti dalis buvo dengta LiBO_2 sluoksniu dešinė – nedengta.

Nuotraukoje matome, kad kairiau esanti dalis, kuri prieš ekspoziciją buvo dengta konverteriniu sluoksniu, yra labiau pažeista nei dalis esanti dešinėje. Kiekvienas taškas reprezentuoja pažeidą, sukeltą jonizuojančiosios spinduliuotės dalele. Padidėjęs pažeidų kiekis rodo, kad dengtasis paviršius buvo labiau veikiamas elektringosiomis jonizuojančiosios spinduliuotės dalelėmis. Remiantis duomenimis, galima teigti, kad LiBO_2 sluoksnis gali daryti įtaką šiluminių neutronų registravimui, reakcijos produktai iš sluoksnio pasiekia detektoriaus paviršių. Toks detektoriaus modifikavimo būdas gali būti naudojamas siekiant detektuoti šiluminius neutronus.

Skyriuje 3.6 aptarti rezultatai parodė, kad konverterinis LiBO_2 sluoksnis nepadėjo registruojant šiluminius neutronus, manoma, kad taip yra todėl, kad signalai iš konverterinio sluoksnio registruojami tik detektoriaus paviršiuje ir tokių sąveikų yra mažai. Dėl mažo tokių impulsų skaičiaus jie neišsiskiria iš visame detektoriaus tūryje atsirandančių signalų. Siekiant padidinti konverterinio sluoksnio įtaką galima mažinti detektoriaus storį, taip mažinant sąveikų skaičių tūryje.

Ekspperimentai parodė, kad polietileno naftalato plėvelė gali būti pritaikyta skirtingų rūšių ir energijos jonizuojančiosios spinduliuotės detektavimui ir spektroskopijai. Tyrimų metu pastebėta, kad minimali registruojama β dalelių energija gali būti 100 keV registruojant mažo aktyvumo spinduliuotę, kas leidžia pritaikyti detektorius praktikoje, pavyzdžiui, matuojant mažo aktyvumo kietus ar dujinius bandinius. Maksimali energija ribojama detektoriaus storiumi ir oscilografo įtampos žingsnio dydžiu, maksimalios energijos ribos išplečiamos naudojant impulso interpoliacijos matematinį aparatą. PEN gali būti naudojama atskiriant didelės energijos daleles, bet esant mažoms energijos eksperimentinei metodikai nepakanka tikslumo ir dalelių atskirti negalima.

Išvados

1. Išmatavus skirtingų rūšių jonizuojančiosios spinduliuotės dalelių spektrus nustatyta, kad PEN plėvelė gali būti naudojama matuojant jonizuojančiąją spinduliuotę plačiame energijų spektre. Atliekant matavimus normaliosiomis sąlygomis pasiektas registruojamų elektronų energijos minimumas – 100 keV. Registruojant didelės energijos daleles, kurių sukeltas impulsas viršija registracijos rėžius, atsiranda paklaidos dėl interpoliacijos.
2. Atlikus grandinės atsako analizę nustatyta, kad eksperimentinio stendo registravimo bei stiprinimo grandinės neturi įtakos registruojamam PEN scintiliaciniam signalui.
3. Eksperimentiniam stendui parinkti optimalūs duomenų analizės parametrai, kurie leidžia maksimizuoti dalelių atskyrimo kokybės parametą. Atskiriant β ir α daleles gautas $FOM = 0,996 \pm 0,020$. Atskiriant neutronus ir γ fotonus gautas $FOM = 0,736 \pm 0,027$.
4. MAKROFOL detektorius parodė, kad reakcijos produktai pasiekia detektoriaus paviršių, tačiau PEN impulsų registracijos metu nepavyko užregistruoti spektrinių ar impulso formos skirtumų tarp modifikuotos ir nemodifikuotos PEN plėvelių. Dengta plonu LiBO_2 sluoksniu PEN plėvelė ir pasirinkta tyrimo metodika netinka šiluminių neutronų reakcijų registravimui.

Literatūros sąrašas

1. N. Zaitseva, A. Glenn, Pulse shape discrimination with lithium-containing organic scintillators, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A* **729**, 747 (2013)
<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2013.08.048>
2. A. Poškus, *Atomo fizika ir branuolio fizikos eksperimentiniai metodai* (Vilnius, Vilniaus universiteto leidykla, 2008)
3. И. М. Розман, С. Ф. Килин, Люминесценция пластмассовых сцинтилляторов, *УФН* **69**(11). 459-482 (1959),. <http://ufn.ru/ru/articles/1959/11/d/>
4. Y. Dazhu, Z. Yongjun, S. Mobius, Rapid Method For Alpha Counting With Extractive Scintillator And Pulse Decay Analysis, *J. Radional. Nucl. Chem.* **147**(1), 177-189 (1991),
10.1007/BF02039579
5. J. B. Birks, *The theory and practice of scintillation counting* (Pergamon Press, London, 1964)
6. T. L. White, W. H. Miller, A triple-crystal phoswich detector with digital pulse shape discrimination for alpha/beta/gamma spectroscopy. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **422** 144-147 (1999), [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)01090-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(98)01090-0).
7. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/students/scint/index.html> (2016 04 27)
8. <http://www.hindawi.com/journals/jnm/2009/436375/> (2016 04 27)
9. H.O. Black, M. Balata, Pulse-Shape discrimination with the Counting Test Facility, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **584**(1), 98-113 (2008),
<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2007.09.036>.
10. A. Undzėnas, *Organinių junginių fotonikos pagrindai*. (Vilnius, Vilniaus Universitetas, 1999)
11. E. C. C. Baly, A Theory of Absorbtion, Fluorescence, and Phosphorescence, *Astrophys. J.*, Vol. 42, 4-5, (1915)
12. C.J. Passo, G. T. Cook, *Handbook of enviroment, Liquid scintillation spectrometry, A Compilation of theory and methods* (Meriden, Pakard Instrument Company, 1994)
13. P. A. Soderstrom, J. Nyberg, R. Wolters, *Digital pulse-shape discrimination of fast neutrons and gamma rays*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **594**(1), 79 -89 (2008),
<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2008.06.004>
14. N. P. Hawkes, Analysis of the pulse shape mechanism in a plastic scintillator with efficient neutron/gamma pulse shape discrimination, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **729**, 522-526 (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2013.07.071>
15. P. Blanc, M. Hamel etc., Neutron/gamma pulse shape discrimination in plastic scintillators: Preparation and characterization of various compositions, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **750**, 1-11 (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2014.02.053>

16. I. Ouchi, I. Nakai, Features of Fluorescence Spectra of Polyethylene 2,6-Naphthalate Films. *J. Appl. Polymer Sci.* **105**(1), 114-121 (2007), DOI: 10.1002/app.26085
17. H. Nakamura, T. Yamada, etc., Optimized mounting of a polyethylene naphthalate scintillation material in a radiation detector, *App. Rad. and Isotopes* **80**, 84-87 (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.06.011>
18. H. Nakamura, Y. Shirakawa, Blended polyethylene terephthalate and polyethylene naphthalate polymers for scintillation base substrates. *Rad. Measurements* **59**, 172-175 (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.radmeas.2013.06.006>.
19. http://www.teijinupontfilms.jp/english/pdf/teonex_q65ha.pdf/ (2015 01 10)
20. http://www.teijinupontfilms.jp/english/pdf/teonex_q51.pdf/ (2015 01 10)
21. http://www.teijinupontfilms.jp/english/pdf/teonex_q83.pdf/ (2015 01 10)
22. <http://pslc.ws/macrog/pet.htm> (2015 05 30)
23. ScintiSafe 3 scintillation cocktail safety data sheet, Fisher Scientific (2012).
24. R.N. Nurmukhametov, L.V. Volkova, S.P. Kabanov, Fluorescence and absorption of polystyrene exposed to UV laser radiation., *Journal of Applied Spectroscopy* **73** (2006), UDC 535.37+541.14.
25. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Polystyrene_linear.svg (2015 05 30)
26. <http://www.tek.com/datasheet/tds1000b-series> (2016 04 01)
27. Умножитель Фотоэлектронный, ФЭУ-101, (МЗЛЗ ФЭУ, 1980)
28. <http://www.linear.com/designtools/software/> (2016 02 12)
29. <http://stanislav.mikov.name/scripts/ir/comparefilters> (2016 02 08)
30. <http://www.srim.org/> (2016 05 05)
31. X-5 Monte Carlo Team. MCNP – A general Monte Carlo N-particle transport code, version 5. Los Alamos National Laboratory, LA-UR-03-1987 (2003)
32. Tables of Physical and Chemical Constants, 2.1.2, Kaye and Laby Online, Version 1.1 (2008)
33. S. Centiner, Neutron depth profiling (NPD) studies at the Penn State University nuclear reactor, <http://www.engr.psu.edu/nbg/ConvNeutDepthProf.htm> (2016 05 16)
34. M. Saito, S. Nagata, Reducing structural change in aluminum coated polyethylene naphthalate foils during MeV proton irradiation, *Vacuum* **89**, 153-156 (2013), doi:10.1016/j.vacuum.2012.03.038
35. I.A. Pawelczak, Boron-loaded plastic scintillator with neutron- γ pulse shape discrimination capability, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **751**, 62-69 (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2014.03.027>

36. J. Garankin, Naujų organinių scintiliatorių panaudojimas jonizuojančiosios spinduliuotės dalelių identifikavimui, 2014

37. J. Garankin, Scintiliacinių savybių, svarbių jonizuojančiosios spinduliuotės registravimui, tyrimas aromatiniuose polimeruose, 2015

Santrauka

Jevgenij Garankin, Polietileno naftalato pritaikymas jonizuojančiosios spinduliuotės detektavimui ir spektroskopijai

Šio darbo tikslas – ištirti polietileno naftalato (PEN) plėvelės galimybes detektuojant jonizuojančiosios spinduliuotės daleles bei matuojant dalelių spektrus. Darbe aptariama jonizuojančiosios spinduliuotės sąveika su detektoriumi, scintiliacijos atsiradimas skirtinguose detektorių tipuose. Darbo eigoje buvo ieškomi optimalūs matavimo parametrai, kurie leidžia efektyviai atskirti jonizuojančiosios spinduliuotės dalelių tipus. Eksperimentinio stendo grandinių įtakos parametrai tikrinami naudojant žinomus signalus. Rezultatai parodė, kad PEN medžiaga gali būti naudojama kaip scintiliatorinis detektorius netgi registruojant mažo aktyvumo spinduliuotę, tačiau yra apribojimai mažų energijų srityje. Taip pat darbe aptariama galimybė naudoti PEN plėvelę padengtą medžiagomis, kurios turi didelį šiluminių neutronų pagavos skerspjūvį. Eksperimentai su modifikuota PEN plėvele parodė, kad pritaikyti metodai netinka registruoti šiluminius neutronus, kadangi neįmanoma išskirti reakcijų sukeltų impulsų.

Summary

Jevgenij Garankin, Polyethylene naphthalate application for ionizing detection and spectroscopy

The goal of this paper is to investigate possibilities of using polyethylene naphthalate (PEN) in ionizing radiation detection and spectrometry. In this study best values of data acquisition parameters for particles discrimination were investigated. Detection and gain electrical schemes were tested for pulse shape discrimination parameters. Results showed that PEN film could be used as a scintillating detector for ionizing radiation detection even if source activity is low. However, there are limitations in small energy area. PEN film was coated with LiBO_2 film for thermal neutron registration. Results showed that coated film and used experimental setup cannot detect thermal neutrons caused reactions because of too low sensitivity.

1. Priedas. Impulsų registravimo programa

```

import visa
import numpy as np
from struct import unpack
import pylab
import time
from scipy import polyval, polyfit
def fitinimas(yy, m):
    m = max (yy)
    yyy=yy
    j=0
    k=0
    xx= list (range (0, 2500))
    for i in range (0, len(yy)):
        if yy[i] >= m:
            j=j+1
    if j==0:
        j=1
    index = list(range(j))
    j=0
    for i in range (0, len(yy)):
        if yy[i] >= m:
            index[k]=i
            k=k+1
    k=0
    ##### nereikalingų ankstesnių taškų paieška
    #minimumas = min(min(e) for e in index if e)
    minimumas = min(index)-10
    if minimumas < 0:
        minimumas =0
    for i in range (0, minimumas):
        j=j+1

    index2 = list (range(j))
    j=0

    for i in range (0, minimumas):
        index2[k]=i
        k=k+1
    k=0
    ##### nereikalingų vėlesnių taškų paieška
    for i in range (max(index)+20, len(yy)):
        j=j+1

    index3 = list(range(j))
    j=0

    for i in range (max(index)+20, len(yy)):

```

```

        index3[k]=i
        k=k+1
    k=0
##### nereikalingų taškų eliminavimas
    k=0

    y=np.delete (yy, index3)
    x=np.delete (xx, index3)
    y1=np.delete (y, index)
    x1=np.delete (x, index)
    y=np.delete (y1, index2)
    x=np.delete (x1, index2)
##### interpoliavimas
    #print len(y), len(x)

    p30 = np.poly1d(np.polyfit(x, y, 5))

    xp = np.linspace(x[0], x[len(x)-1], x[len(x)-1]-x[0])
    y2=p30(xp);
    k=0

    for i in range (int(x[0])%2500, int(x[len(x)-1])%2500):
        yyy[i-2]=y2[k]
        k=k+1

    return (yyy)

rm = visa.ResourceManager()
scope = rm.open_resource('USB::0x0699::0x0366::C120106::INSTR')

scope.write('DATA:SOU CH1')
scope.write('DATA:WIDTH 1')
scope.write('DATA:ENC RPB')

pradzia=time.clock()
ymult = float(scope.ask('WFMPRE:YMULT?'))
yzero = float(scope.ask('WFMPRE:YZERO?'))
yoff = float(scope.ask('WFMPRE:YOFF?'))
xincr = float(scope.ask('WFMPRE:XINCR?'))
scope.write('ACQ:STOPA SEQ')

while '1' in scope.ask('BUSY?'):
    time.sleep(0.0001)
if '0' in scope.ask('ACQ:STATE?'):
    scope.write('ACQ:STATE 1')
myFile = open('a.txt', 'w')
f = open ('aa.txt', 'w')
spek = open ('spek.txt', 'w')
s=0
i=0
m=0

```



```

vidurkis = float()
spektras= 0.0
uodega= 0.0
skirtumas=float()
eilute = []
laikas =[]
grafikas =[0]*10000
myFile.closed
impulsu_sk = 20000
skaiciavimo_laikas = 1000

for x in range (0, impulsu_sk):
    while '1' in scope.ask('ACQ:STATE?'):
        time.sleep(0.0001)

        scope.write('CURVE?')
        spektras = 0.0
        uodega=0.0
        uodega2=0.0
        uodega3=0.0
        uodega4=0.0
        uodega5=0.0
        start=0
        mid=0
        mid2=0
        mid3=0
        mid4=0
        mid5=0
        end=0
        eilute =[]
        count =0

        data = scope.read_raw()
        headerlen = 2 + int(data[1])
        header = data[:headerlen]
        ADC_wave = data[headerlen:-1]
        ADC_wave = np.array(unpack('%sB' % len(ADC_wave),ADC_wave))
        Volts = (ADC_wave - yoff) * ymult + yzero
        Time = np.arange(0, xincr * len(Volts), xincr)

        scope.write('ACQ:STATE 1')

        for i in range (0, 5):
            eilute.insert(i,0)
        for i in range (5, 2495):
            da= Volts[i-5: i+5]
            eilute.insert(i, np.average(da))
        for i in range (2495, 2500):
            eilute.insert(i,0)

        nap=np.array(eilute)

```

```

m = max(eilute)

print x
for i in range (0, len(eilute)): #maksimumo taškų skaičiaus
nustatymas
    if eilute[i]== m:
        count =count+1
V2=eilute
if count > 15: # patikrinimas nukirtimo sąlygos
    V2=fitinimas(Volts, m)
    Volts=V2
mks = np.argmax(Volts)
start = mks - 300
end = mks + 2500
mid = mks + 120
mid2 = mks + 160
mid3= mks + 200
mid4= mks + 240
mid5= mks + 280
if start < 0:
    start = 0
if mid > 2500:
    mid = 2500
if end > 2500:
    end = 2500
if mid2 > 2500:
    mid2 = 2500
if mid3 > 2500:
    mid3 = 2500
if mid4 > 2500:
    mid4 = 2500
if mid5 > 2500:
    mid5 = 2500
for i in range (start, end):
    spektras = spektras + Volts[i]
for i in range (mid, end):
    uodega = uodega+ Volts[i]
for i in range (mid2, end):
    uodega2 = uodega2+ Volts[i]
for i in range (mid3, end):
    uodega3 = uodega3+ Volts[i]
for i in range (mid4, end):
    uodega4 = uodega4+ Volts[i]
for i in range (mid5, end):
    uodega5 = uodega5+ Volts[i]
spek.write('%s\t' %spektras)
spek.write('%s\t'%uodega)
spek.write('%s\t'%uodega2)
spek.write('%s\t'%uodega3)
spek.write('%s\t'%uodega4)
spek.write('%s\n'%uodega5)

```

```
    if x % 100 == 0:
        spek.flush()
        print time.clock()- pradzia
    if time.clock()- pradzia > skaiciavimo_laikas:
        break
laik = time.clock()- pradzia
spek.write('%f\n' % laik)
myFile.close()
f.close()
spek.close()
print time.clock()- pradzia
pylab.plot(Time, Volts, 'g.', Time, V2, 'r-',)
pylab.plot(Time, nap)
pylab.show()
```

PADĖKA

Nuoširdžiai dėkoju VMTI FTMC BTS vedėjui prof., habil. dr. Vidmantui Remeikiui už galimybę atlikti magistro baigiamąjį darbą FTMC bei darbo vadovui dr. Artūriui Plukiui už puikų vadovavimą ir idėjas. Taip pat esu dėkingas visiems BTS darbuotojams už diskusijas, palaikymą, pozityvią darbo aplinką.

Dėkoju Vilniaus Universiteto Taikomųjų Mokslų Instituto puslaidininkinės optoelektronikos skyriaus vedėjui dr. Karoliui Kazlauskui už laiką ir pagalbą matuojant fotoluminescencijos kinetikas.