



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



***Vremenska spektroskopija
nuklearnih reakcija kosmičkih miona***

- diplomski rad -

Mentor:

dr Dušan Mrđa

Kandidat:

Aleksandra Dimitrijevska

Novi Sad, 2010.

S A D R Ž A J

UVOD	1
<i>Glava I</i> STANDARDNI MODEL	2
<i>Glava II</i> KOSMIČKO ZRAČENjE	5
2.1. Primarno kosmičko zračenje	7
2.2. Sekundarno kosmičko zračenje u atmosferi	11
<i>Glava III</i> MIONI	17
3.1. Osobine miona	22
3.2. Interakcija miona sa materijom	23
3.3. Interakcija miona sa atmosferom	28
3.4. Interakcija miona sa detektorima	29
<i>Glava IV</i> DETEKATORSKI SISTEM	33
4.1. Scintilacioni detektori	35
4.2. Poluprovodnički detektori	38
4.3. Fon kod detektora	40
<i>Glava V</i> OPIS EKSPERIMENTA	41
5.1. HP Ge detektor	41
5.2. Plastični scintilator	43
5.3. Nuklearna elektronika	43
5.4. Princip rada	45
5.5. Obrada podataka	47
<i>Glava VI</i> REZULTATI I DISKUSIJA	48
6.1. Koincidentni spektri	49
6.2. Energijska kalibracija	55
6.3. Linija 68.7 keV	57
6.4. Linija 511 keV	69
6.5. Linija 595.9 keV	74
6.6. Linija 691 keV	81
ZAKLjUČAK	85
LITERATURA	86
DODATAK	87

Uvod

U ovom radu opisani su principi γ spektroskopije primjenjeni na nuklearne reakcije kosmičkih miona. Proučavanje interakcije kosmičkih zraka, a posebno najprodornije mionske komponente, sa detektorima omogućava usavršavanje niskofonskih eksperimenata. Izučavanje vremenske zavisnosti mionima indukovanih reakcija je od posebnog značaja za niskofonske eksperimente jer su mioni osnovni izvor fona. Niskofonski eksperimenti se koriste za proučavanje retkih nuklearnih procesa (npr. dvostruki beta raspad, potraga za wimp-ovima...) Interakcija i fluks kosmičkih miona su značajni za neutrinsku astrofiziku zbog sličnog načina nastajanja miona i neutrina.

Teorijski deo rada prikazan je u prve četri glave. Počev od osnova čestica i interakcija, istorijskog razvoja shvatanja prirode kosmičkog zračenja, dolazimo do pravilnog tumačenja karakteristika miona. U ovom delu opisana je i interakcija miona sa materijom, kao i način nastanka fona u spektrima. Ukratko je objašnjena svrha veta sistema detektora, koji je korišćen u ovom radu ali u koincidentnom režimu.

Peta glava posvećena je eksperimentalnoj postavci detektorskog sistema koji se nalazi u površinskoj laboratoriji Departmana za fiziku u Novom Sadu (scintilacioni i germanijumski detektor rade u koincidentnom režimu). Objasnjen je princip rada multiparametarskog MPA-3 sistema, kao i primena programa MPA-NT za vremensku spektroskopiju. Važna osobina ovog sistema je mogućnost prikupljanja dvodimenzionalnih koincidentnih spektara.

U poslednjoj glavi prikazani su rezultati posmatranih nuklearnih reakcija indukovanih kosmičkim mionima, kao i njihova vremenska zavisnost. Eksperimentalni deo rada posvećen je analizi koincidentnih spektara germanijumskog detektora, koji su dobijeni iz dvodimenzionog spektra germanijumskog detektora i tac pretvarača odabirom različitih regiona i projekcijom na osu germanijumskog detektora. Adekvatnim izborom regiona moguće je utvrditi koincidentni vremenski interval koji odgovara maksimalnom intenzitetu odgovarajuće γ linije indukovane mionima i anihilacione linije.

U zaključku dat je prikaz vrednosti koincidentnih vremenskih intervala za koje se dobijaju maksimalni intenziteti posmatranih linija u spektru germanijumskog detektora.

I Standardni model

Mišljenje i znanje o tome koje čestice su elementarne se menjalo tokom vremena. Sve je počelo od grčkog filozofa *Demokrita* ($\Delta\mu\kappa\rho\tau\omega$) koji je misaoim eksperimentom došao do zaključka da postoji najmanja nedeljiva čestica – jedinica građe materije, koju je on nazvao *atom* ($\alpha\tau\epsilon\mu\nu\omega$ – nedeljiv ili nevidljiv). Skoro 2400 godina kasnije ideja o *atomu* je ostala ali još uvek nije sigurno šta taj *atom* predstavlja. Do sada je detektovano oko 200 elementarnih čestica za koje se u nekom periodu vremena mislilo da su i fundamentalne. Dakle, postalo je neophodno definisati razliku između elementarnih i fundamentalnih čestica: *elementarne* čestice postale su složene tj. one imaju unutrašnju strukturu i sastoje se iz *fundamentalnih* koje čine osnovnu građu materije. Prva otkrivena elementarna čestica (za koju se ispostavilo da je i fundamentalana) je *elektron* (1874. godine *G. J. Stoney* je teorijski postulirao, a 1891. predložio ime – elektron, dok je *J. J. Thomson* 1897. eksperimentalno potvrdio postojanje ove čestice). Dok *foton* predstavlja prvu otkrivenu česticu koja prenosi interakciju (1900. godine postulirao ju je *M. Planck*, a 1905. *A. Einstein* je demonstrirao fizičko postojanje fotona, dok je *J. Stark* 1909. godine pokazao da se foton ponaša i kao čestica – ima i energiju i impuls). Dalje su otkrivane i druge čestice: *proton* (*E. Rutherford* 1919. godine), *neutron* (*E. Rutherford* 1920. godine je postavio hipotezu o postojanju neutrona, dok ga je *J. Chadwick* 1932. godine eksperimentalno otkrio), *pozitron* – prva antičestica (postulirao *P. Dirac* 1928. godine, a *C. D. Anderson* je 1932. eksperimentalno otkrio)... Tako da je broj "elementarnih" čestica postao velik i slika o fizici je postala komplikovana, što se može ilustrovati događajem kada je jednom prilikom student pitao *E. Fermi*-ja o imenu neke čestice on je odgovorio: „*Mladiću, da mogu da upamtim sve te nazine čestica, bio bih botaničar.*“

Sa ciljem da pronađu veze između svih tih čestica fizičari su došli do modela kvarka (1964. godine nezavisno ovaj model su predložili *M. Gell-Mann* i *G. Zweig*) po kojem se svi hadroni sastoje od fundamentalnih čestica – *kvarkova*. Ova teorija je imala dva nedostatka: nemogućnost da se eksperimentalno uoči slobodan kvak i neslaganje sa *Pauli*-jevim principom isključenja. Teorije ujedinjenja elektromagnetne i slabe interakcije (*S. L. Glashow* 1960.) kao i *Higgs*-ovog mehanizma (*S. Weinberg* 1967. i *A. Salam* 1968.) dovele su do formulisanja *Standardnog Modela*.

Materija je izgrađena od 12 elementarnih **fermiona** (čestice sa spinom $\frac{1}{2}$, važi *Pauli*-ev princip isključenja) i njihovih antičestica (čestice iste mase i spina ali suprotnog nakelektrisanja):

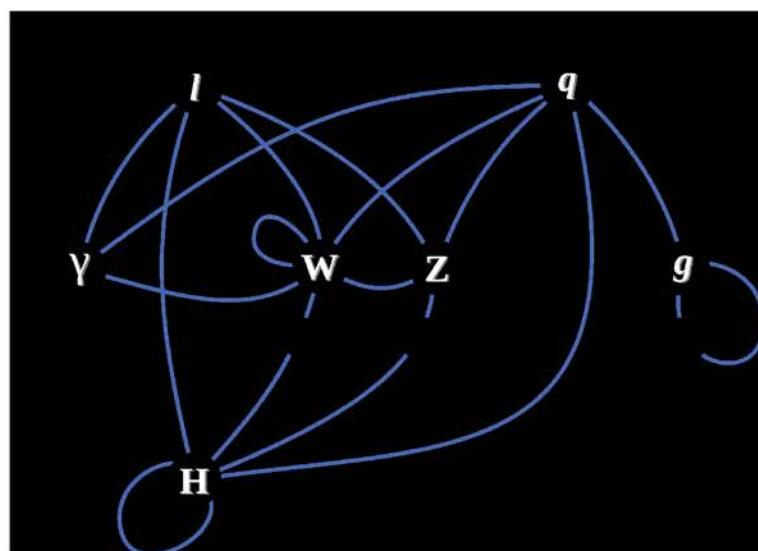
- *leptoni* – nakelektrisani (elektron, mion, tau-lepton) i neutralni (elektronski, mionski i tau neutrino, koji su stabilne čestice bez mase i razlikuju se od svojih antičestica),
- *kvarkovi* – imaju svoj aromat i svaki aromat ima 3 stepena slobode (boja), u prirodi ne postoje slobodni kvarkovi.

Fermioni su razvrstani u tri generacije, od kojih se svaka sastoji od jednog leptona i jednog kvarka (ova simetrija predstavlja najvažniju osobinu Standardnog modela). Čestice I generacije imaju najmanju masu, stabilne su i grade materiju, dok su leptoni II i III generacije nestabilni i raspadaju se na leptone I generacije. Kvarkovi grade *hadrone*, bezbojna kombinacija hadrona može nastati na dva načina: *mezoni* koji su sagrađeni od para kvark – antikvark i *barioni* koji sadrže tri kvarka različitih boja (proton - *uud*, neutron - *ddu*...).

Drugu vrstu čestica čine kalibracioni **bozoni** (čestice sa celobrojnim spinom) koji predstavljaju prenosioce *interakcije*. Postoje četri fundamentalne interakcije:

- *gravitaciona* – deluje na sva tela koja imaju masu, ali je malog intenziteta tako da se za čestice čije su mase manje od *Planck-ove* ($10^{19} \text{ GeV}/c^2$) može zanemariti, uvek je privlačna, čestice koje prenose gravitacionu interakciju su *gravitonii*;
- *elektromagnetna* – deluje između nanelektrisanih tela, jačina je proporcionalna konstanti fine strukture $1/137$, nanelektrisani leptoni i kvarkovi interaguju na ovaj način, prenosilac ove interakcije je *foton*;
- *jaka* – ima najveći intenzitet a najmanji domet u odnosu na ostale interakcije, deluje između nukleona u jezgru i kvarkova u hadronu, konstanta interakcije je reda veličine 1, prenosoci su *gluoni* kojih ima 8;
- *slaba* – odgovorna za raspade čestica, postoji tri vrste raspada (leptonski, semileptonski i hardonski), njen intenzitet raste sa porastom energije i smanjenjem rastojanja između čestica koje interaguju, procesi koji se dešavaju pod dejstvom slabe interakcije su spori (u odnosu na elektromagnetnu i jaku), slaba kao i gravitaciona je univerzalna interakcija, prenosoci su W^\pm i Z^0 bozoni

Masa je u Standardnom modelu uvedena preko *Higgs-ovog polja* koje u teoriji interaguje sa (drugim) česticama i daje im masu. *Higgs-ovo polje* zahteva postojanje nove čestice *Higgs-ovog bozona* (ne predstavlja prenosilaca interakcije ni česticu materije) koji još uvek nije otkriven, ali se za njim intenzivno traga u eksperimentima na LHC akceleratoru u CERN-u.



Slika 1.1 – Standardni model – čestice i interakcije [40]

Tabela 1.1 – Standardni model¹

ČESTICA	INTERAKCIJA	MASA [MeV/c ²]	NAELEKTRI- SANJE [e]	SPIN [ħ]	JAČINA	DOMET	Da li je eksperi- mentalno potvrđena?
BOZONI							
graviton	gravitaciona	0	0	2	10^{-38}	∞	ne
foton γ	elektromagnetna	0	0	1	10^{-2}	∞	da
gluon g	jaka	0	0	1	1	10^{-13}	da, indirektno
W^+	slaba	80 398(25)	1	1	10^{-13}	10^{-16}	da
W^-	slaba	80 398(25)	-1	1	10^{-13}	10^{-16}	da
Z^0	slaba	91 187.6(21)	0	1	10^{-13}	10^{-16}	da
Higgs bozon H^0, H^\pm	slaba	>79 300	0	0	?	?	ne
ČESTICA		MASA [MeV/c ²]	NAELEKTRISANJE [e]	SPIN [ħ]	Da li je eksperimentalno potvrđena?		
FERMIONI							
Leptoni							
elektron e^-		0.510998910(13)		-1		1/2	da
elektronski neutrino ν_e		<0.000002		0		1/2	da
mion μ^-		105.658367(4)		-1		1/2	da
mionski neutrino ν_μ		<0.19		0		1/2	da
tau τ^-		1 776.84(17)		-1		1/2	da
tau neutrino ν_τ		<18.2		0		1/2	da
Kvarkovi²							
up u		1.5 – 3.3		2/3		1/2	da, indirektno
down d		3.5 – 6.0		-1/3		1/2	da, indirektno
charm c		1160 – 1340		2/3		1/2	da, indirektno
strange s		70 – 130		-1/3		1/2	da, indirektno
top t		170200 – 172400		2/3		1/2	da, indirektno
bottom b		4130 – 4370		-1/3		1/2	da, indirektno

¹ Vrednosti u tabeli preuzeti su iz [44] i [43].² Vrednost mase kvarka nalazi se u datom intervalu.

II Kosmičko zračenje

Početkom XX veka fizičari su posmatrali procese ionizacije i električne provodljivosti kroz gasove. Elektroskopi (i elektrometri) su korišćeni za dokazivanje postojanja naelektrisanja (tj. za određivanje naelektrisanosti), pa pošto je bilo poznato da se prirodna radioaktivnost (*H. Bequerel* 1896.) sastoji od α , β i γ zračenja, elektroskopi su modifikovani tako da mogu da mere ionizujuće γ zračenje (naelektrisani elektroskop se spontano razelektriše u prisustvu radioaktivnih materijala, pa je kao mera zračenja korišćen stepen razelektrisavanja). Gotovo istovremeno *C. T. R. Wilson*, *H. F. K. Geitel* i *J. P. L. J. Elster* su 1900. godine shvatili da se elektroskopi spontano razelektrišu (isprazne) i u odsustvu radioaktivnih materijala – to zračenje dobilo je ime *tamna struja* [22]. Tada je važilo mišljenje da se izvor nepoznatog zračenja nalazi u Zemlji, tj. da potiče od radioaktivnih elemenata na površini Zemlje. *T. Wulf* je 1910. godine merio pražnjenje elektrometra na različitim visinama i zaključio je da je na vrhu *Eiffel*-ovog tornja veće zračenje, ali ove rezultate naučni svet nije prihvatio.



Slika 2.1 – Fotografija V. Hess-a kada je izvršen eksperiment sa balonom [42]

Sa ciljem da odredi izvor nepoznatog zračenja, austrijski fizičar *V. F. Hess* je rano ujutru 7. avgusta 1912. godine izvršio eksperiment u kojem su tri elektrometra bila u balonu i mereno je njihovo pražnjenje na visini i od 5.3 km. Rezultati su pokazali da je intenzitet zračenja neznatno opao na visini oko 1 km. Sa daljim povećanjem visine na oko 2 km intenzitet zračenja ima sličnu vrednost kao i na površini Zemlje, međutim na većim visinama – oko 5 km intenzitet je znatno veći. U radu koji je objavljen 1. novembra iste godine *V. F. Hess* zaključuje da „*se eksperimentalni podaci najbolje mogu objasniti pod prepostavkom da prodorno zračenje u atmosferu ulazi odozgo*“. Ovaj događaj, kako ga je *Harwit* opisao 1981. godine, predstavlja početak proučavanja kosmičkih zraka. *V. F. Hess* je 1936. godine dobio Nobelovu nagradu za fiziku za otkriće kosmičkih zraka. [21]

W. Kolhörster je 1913/14. godine u svojim eksperimentima sa balonom potvrdio ne Zemljino poreklo zračenja do visina od 6.3 km. Pokazano je da intenzitet zračenja ne zavisi od toga da li je dan ili noć, čak je bilo i merenja za vreme pomračenja Sunca koja su dala iste rezultate – zaključak: mala je verovatnoća da je Sunce značajan izvor zračenja. Ovom intezivnom zračenju *R. A. Millikan* 1925. godine dao je ime – ***kosmičko zračenje***.

Istraživanja su dalje preusmerena na prirodu kosmičkog zračenja. *R. A. Millikan* je pokazao da je atmosfera, u suštini, samo apsorber – ne proizvodi kosmičko zračenje (kosmičko zračenje sa apsorbuje u vodi u istoj količini kao i u vazduhu). On je postavio hipotezu da se

kosmičko zračenje sastoji od γ zračenja većeg intenziteta, od onog iz prirodne radioaktivnosti, zbog elastičnog rasejanja na elektronima u atomu. Međutim, merenjem je dobijeno da intenzitet kosmičkog zračenja nije isti na ekvatoru i na polovima (1928. *J. Clay*), kao uzrok je navedeno magnetno polje Zemlje, što za posledicu ima da kosmičko zračenje mora da se sastoji od nanelektrisanih čestica. Daljim razvojem fizike omogućeno je direktno detektovanje kosmičkih zraka *Geiger-Müller*-ovim brojačem, pa je otkriveno da su nanelektrisane čestice kosmičkog zračenja veoma brze i imaju veliku energiju. *B. Rossi* je 1934. godine uočio koincidentne događaje kosmičkih zraka na dva detektora na velikoj međusobnoj udaljenosti. Dakle, detektovane su čestice koje nastaju u lavinama ili pljuskovima izazvanim interakcijom kosmičkog zračenja sa atmosferom (*P. Auger* 1938. godine). Na ovaj način otkriveno je mnoštvo novih čestica. Prvi teorijski rad u kojem je određena verovatnoća za rasejanje pozitrona na elektronima (*Bhabha* rasejanje) publikovali su 1937. godine *H. J. Bhabha* i *W. Heitler*. Oni su objasnili formiranje pljuskova kosmičkih zraka kao kaskadno nastajanje γ zraka i elektron-pozitron parova (što je iskorišćeno kao eksperimentalna potvrda *Einstein*-ove teorije relativiteta). Vanatmosfersko posmatranje kosmičkih zraka započeto je 50-ih godina prošlog veka, kada je dobijena slika sastava i energijskog spektra kosmičkih zraka.

Današnja istraživanja kosmičkih zraka mogu se podeliti na više oblasti:

- u fizici elementarnih čestica – kao pandan akceleratorskoj fizici, mada energije koje imaju kosmički zraci se ne mogu dostići u akceleratorima
- u geofizici – gde se ispituje uticaj magnetnog polja Zemlje, Sunca i Sunčeve aktivnosti na kosmičko zračenje
- u astrofizici – koja ispituje poreklo, sastav i prostiranje kosmičkih zraka
- može se dodati i biofizički aspekt koji se bavi biološkim efektima kosmičkih zraka

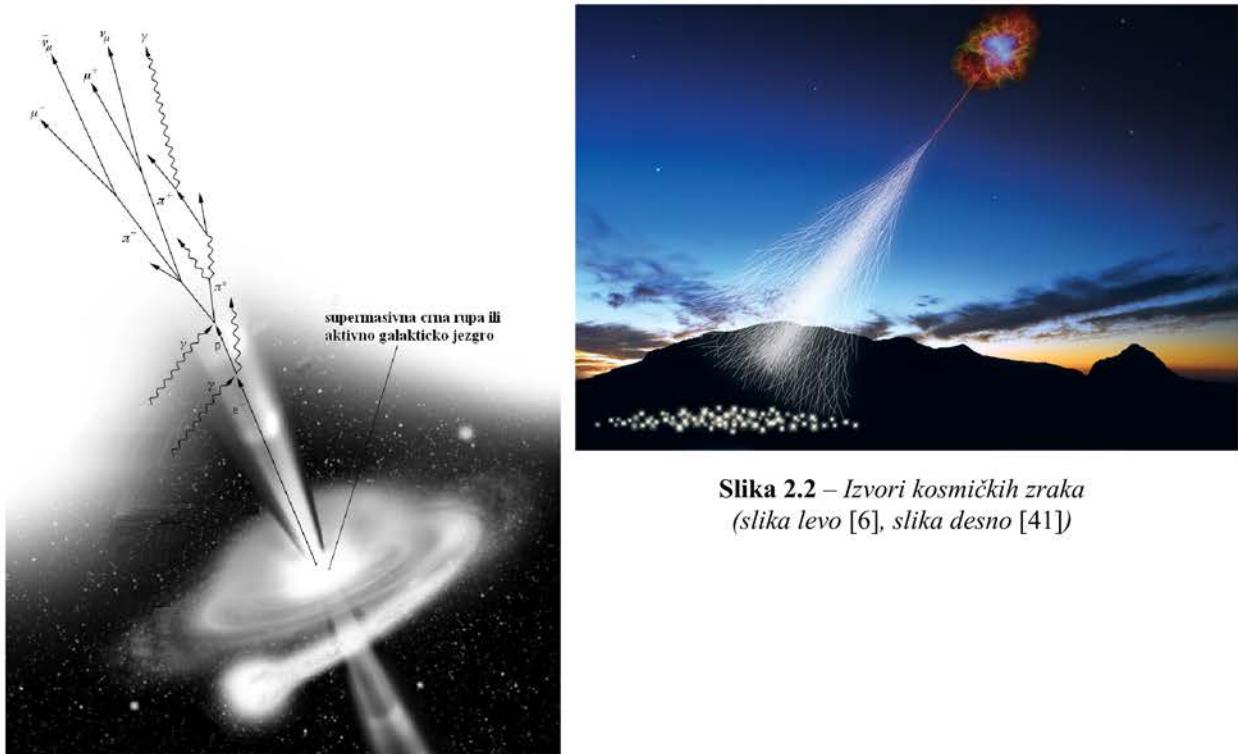
Kosmički zraci su čestice visoke energije koje se kreću brzinama bliskim brzini svetlosti, poreklom su iz svemira i dolaze do Zemlje sa svih strana. Energija kosmičkih zraka može dostići i vrednost od 10^{20} eV. Kosmičko zračenje je jedno od glavnih komponenata Vasiona, što proizilazi iz činjenice da je gustina energije kosmičkih zraka 1 eV/cm^3 što je istog reda veličine kao i gustina energije elektromagnetnog zračenja u međuzvezdanoj sredini i termičkog kretanja međuzvezdanog gasa. Postoje dve osnovne vrste kosmičkog zračenja: *primarno* – zračenje u Vasioni i *sekundarno* – zračenje koje je nastalo kao posledica interakcije primarnog zračenja sa međuzvezdanom materijom (ili česticama u Zemljinoj atmosferi).

2.1. Primarno kosmičko zračenje

Primarni kosmički zraci se sastoje od stabilnih nanelektrisanih čestica i jezgara koja su neki astrofizički objekti ubrzali do velikih energija. Ove čestice moraju biti stabilne (sa periodom života većim od 10^6 godina) da bi mogle da pređu ogromna rastojanja kroz Vasionu. Zbog činjenice da je način ubrzavanja verovatno elektromagnetnom interakcijom, one moraju biti nanelektrisane. Njihova energija je u intervalu od 10^9 do 10^{20} eV (akceleratorima čestice se mogu ubrzati do energije $7 \cdot 10^{12}$ eV). Strogo gledano, "primarne" čestice su elektroni, protoni, jezgra helijuma, ugljenika, kiseonika, gvožđa i drugih elemenata koja se sitnetišu u zvezdama; dok u "sekundarne" čestice spadaju jezgra litijuma, berilijuma, bora i ostalih elemenata koja nisu finalni produkti nukleosinteze u zvezdama, antiprotoni i pozitroni su uglavnom sekundarne čestice.

Kosmički zraci su poreklom izvan Sunčevog sistema, osim onih koji nastaju iz Sunčevih erupcija. Posmatranjem je utvrđena izotropnost kosmičkog zračenja energija preko 10 GeV koje dolazi do Zemljine atmosfere. Pretpostavlja se da to nije zbog ravnomerne raspodele izvora kosmičkih zraka, već zbog toga što galaktička magnetna polja primoravaju nanelektrisani deo kosmičkih zraka da se kreće po spiralnim putanjama. Veća energija nanelektrisane čestice prouzrokuje veći poluprečnik krivine. Putanje nanelektrisanih čestica sa energijama manjim od 10^{15} eV su toliko zakrivljene da su one zarobljene u našoj galaksiji. Sunce je jak izvor magnetnog polja, tako da solarni vetar (plazma od nanelektrisanih čestica – protona i elektrona koje su velikom brzinom izbačene sa površine Sunca) usporava i ima tendenciju da izbaci nanelektrisane čestice kosmičkog zračenja sa energijama manjim od 1 GeV iz unutrašnjosti Sunčevog sistema. Aktivnost Sunca (solarni ciklus traje oko 11 godina) tako utiče na kosmičke zrake energija manjih od 10 GeV. Magnetno polje Zemlje ima uticaj na zrake još manjih energija (ispod 1 GeV), tako da čestice teže prodiru kroz atmosferu oko ekvatora nego kod polova (intenzitet kosmičkog zračenja zavisi od položaja i trenutka posmatranja).

Iako su kosmički zraci otkriveni pre skoro jednog veka, njihovo poreklo i dalje nije potpuno proučeno. Dobri **kandidati za izvore kosmičkih zraka** su *aktivna galaktička jezgra, kvazari, pulsari, eksplozije supernovih...* Magnetno polje se prožima kroz međuzvezdani prostor i onemogućava otkrivanje izvora kosmičkih zraka, tj. nanelektrisane čestice skreću u magnetnom polju – taj deo kosmičkih zraka se kreće po haotičnim putanjama. Tako da za utvrđivanje izvora ovih zraka od pomoći su samo neutralne komponente kosmičkih zraka (γ -zraci, neutrini i antineutrini) koje se kreću po pravoj liniji kroz prostor i stoga direktno upućuju na njihove izvore. Na ovaj način određeni su izvori: Sunce i supernove (neutrini) i Rak maglina i aktivna galaktička jezgra (γ -zraci). Može se dogoditi da nanelektrisana čestica (energije veće od 10^{19} eV) dođe do Zemljine atmosfere skoro direktno od izvora, što se takođe može iskoristiti u svrhu otkrivanja izvora kosmičkih zraka, međutim detektovanje ovako visoko-energijske čestice je malo verovatno.

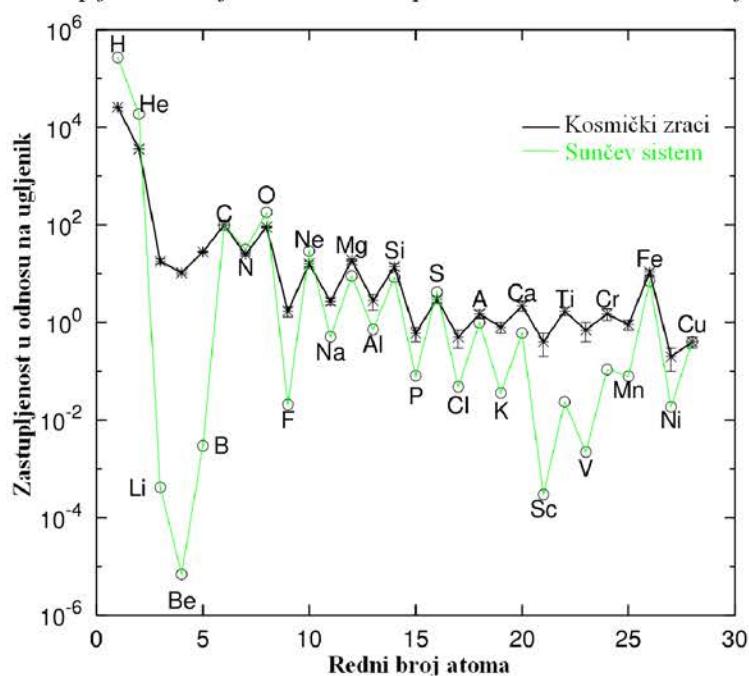


Slika 2.2 – Izvori kosmičkih zraka
(slika levo [6], slika desno [41])

Kosmički zraci predstavljaju uzorak materije izvan Sunčevog sistema zbog čega je važno odrediti njihov sastav, na taj način dobijaju se informacije o hemijskoj evoluciji Univerzuma. **Primarni kosmički zraci se sastoje od:**

- *NAELEKTRISANIH ČESTICA:* oko 98 % atomskih jezgara (86 % protona, 11 % jezgra helijuma, 1 % jezgra težih elemenata do urana) i 2 % elektrona. Hemijski sastav kosmičkih zraka je jako sličan sastavu Sunčevog sistema (slika 2.3): parna jezgra imaju veću zastupljenost od

Zastupljenost hemijskih elemenata u primarnom kosmičkom zračenju

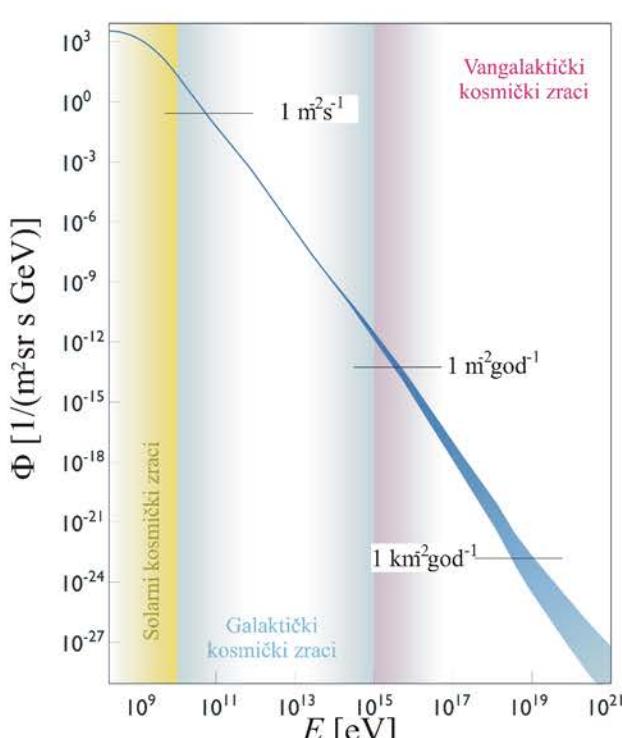


Slika 2.3 – Zastupljenost hemijskih elemenata u primarnim kosmičkim zracima [8]

neparnih (jezgra sa parnim brojem protona i neutrona su stabilnija od onih sa neparnim brojem protona i/ili neutrona, pa se zato oni češće proizvode termonuklearnim reakcijama u zvezdama). Vrednosti pikova za normiranu zastupljenost ugljenika, azota, kisonika i gvožđa su slične što ukazuje da su mnoga jezgra kosmičkih zraka poreklom sa zvezda. Razlike u zastupljenosti elemenata u kosmičkim zracima i Sunčevom sistemu mogu se uočiti za: litijum, berilijum i bor su oko 10^5 puta obilniji u kosmičkim zracima, i odnos $^3\text{He}/^4\text{He}$ je oko 300 puta veći, kao i rasprostranjenost težih jezgara – što se objašnjava činjenicom da su kosmički zraci prošli kroz materiju na svom putu od nastanka do Zemljine atmosfere, tako da su ovi elementi nastali interakcijom kosmičkih zraka sa međuzvezdanom materijom, pa se može odrediti koliko dugo su kosmički zraci putovali do Zemlje – oko 10^6 – 10^7 godina. Do sada, antijezgra nisu pronađena u primarnom kosmičkom zračenju, pozitroni i antiprotoni (nastaju u sudarima sa međuzvezdanim gasom i prašinom, tako da su to u suštini sekundarne čestice) čine samo 0.01 % kosmičkih zraka – što dokazuje asimetriju materije i antimaterije u našoj galaksiji (a verovatno i u celom univerzumu).

- **NEUTRALNIH ČESTICA:** *neutroni, neutrini, antineutrini i fotoni*, čine mali deo kosmičkih zraka (manje od 1 %). Neutrini koji dolaze do Zemljine atmosfere su najvećim delom sunčevi elektronski neutrini, iako magnetno polje na njih nema uticaj, ne koriste se za određivanje izvora kosmičkog zračenja zbog toga što slabo interaguju sa materijom. Fotoni u kosmičkom zračenju imaju širok energijski opseg (γ zraci su fotoni sa energijom većom od 511 keV), zahvaljujući njima postoje dokazi o izvorima kosmičkih zraka.
- **ČESTICA PRAŠINE** – uzorci međuzvezdane prašine, jako malih dimenzija, detektovani su uglavnom silikati i organska jedinjenja (jedinjenja zasnovana na ugljeniku). Po nekim autorima ove čestice ne spadaju u kosmičko zračenje.

Kosmički zraci imaju veliki opseg energije, generalno intenzitet opada sa porastom energije ($\Phi \propto E^{-\gamma}$), **zavisnost fluksa od energije primarnih kosmičkih zraka** prikazana je na slici 2.4. Na slici se mogu uočiti nekoliko karakterističnih regiona:



Slika 2.4 – Zavisnosti fluksa od energije primarnih kosmičkih zraka [40]

- 1) $E < 10$ GeV aktivnost Sunca i solarni vетар како утичу накосмиčке зраке ових енергија, флукс зависи од датума посматрана (фазе соларног циклуса);
- 2) 10^9 eV $< E < 10^{15}$ eV флукс опада са енергијом по степеној функцији са излоžицем $\gamma = 2.68$;
- 3) $E \approx 10^{15}$ eV излоžиласа степене функције се благо менја (постоји прекид), овај део спектра представља "knee", тачан положај овог прекида зависи од експерименталних података. Прави разлог постојања овог прекида је још увек непознат, постоје две врсте хипотеза: не постоји прекид функције – већ се овај прекид јавља због другачије интеракције примарнихкосмиčких зрака са честичама атмосфере или прекид постоји због промене начина убрзавањакосмиčких зрака који постаје мање ефикасан на овим енергijама;

- 4) 10^{15} eV $< E < 10^{19}$ eV fluks brže opada sa povećanjem energije, $\gamma = 3.15$, iako je promena izložioca neznatna postoji dovoljan broj kosmičkih zraka na ovim energijama da se njegova vrednost precizno odredi;
- 5) $E \approx 10^{19}$ eV ponovo se menja nagib stepene funkcije, ovaj deo spektra predstavlja "ankle";
- 6) $E > 10^{19}$ eV fluks opada sa energijom po stepenoj funkciji međutim tačna vrednost izložioca ($\gamma > 3$) nije određena zbog malog broja podataka – fluks je oko 1 čestica po km^2 godišnje (do sada je detektovano svega nekoliko čestica sa energijama većim od 10^{20} eV), smatra se da su kosmički zraci sa ovim energijama nastali van naše galaksije, tako da su i mehanizmi njihovog ubrzavanja još uvek nepoznati.

Na osnovu energije i sastava, primarni **kosmički zraci** se mogu podeliti na **četri osnovna tipa** [2], [39]:

SOLARNI KOSMIČKI ZRACI - $10^1 - 10^9$ eV ili solarne enegetske čestice, potiču iz eruptivnih pojava na Suncu (eksplozije u hromosferi – flerovi i koronarna izbacivanja mase), prvi put su detektovani 1942. godine. Sastoje se od protona, elektrona i teških jona, tj. njihov sastav je sličan Suncu i najbrže čestice dostižu brzinu oko $0.8c$. Tokom neke snažne eksplozije na Suncu, fluks solarnih kosmičkih zraka se može povećati i nekoliko stotina puta, što traje od nekoliko minuta do nekoliko dana, dakle, fluks solarnih kosmičkih zraka je veoma promenljiv. Povećanje fluksa solarnih kosmičkih zraka obično znači smanjenje fluksa galaktičkih kosmičkih zraka.

ANOMALNI KOSMIČKI ZRACI - 10^6 eV potiču iz neutralnih atoma međuzvezdane materije koji se jonizuju UV zračenjem Sunca, nastaju u heliosferi tj. njenoj gornjoj granici – heliopauzi, detektovani su 1973. godine. Kada se jonizuju na njih utiče solarni vетар, kao i magnetsko polje Sunca, koje ih ubrzava i vraća u unutrašnjost Sunčevog sistema. Smatra se da anomalni kosmički zraci reprezentuju lokalnu međuzvezdanu materiju. U svom sastavu imaju velike količine helijuma, kiseonika, neon-a i drugih hemijskih elemenata sa visokim ionizacionim potencijalom. Služe za proučavanje kretanja energetskih čestica unutar Sunčevog sistema, za određivanje osobina heliosfere, kao i za izučavanje prirode međuzvezdane materije.

GALAKTIČKI KOSMIČKI ZRACI - $10^9 - 10^{15}$ eV potiču daleko izvan Sunčevog sistema, ali uglavnom iz naše galaksije – Mlečni put, sastoje se u najvišoj meri od protona, 7 – 10 % jezgra helijuma i oko 1 % jezgra težih elemenata (litijum, berilijum, bor,... nastali kao rezultat interakcije sa međuzvezdanom materijom). Zbog galaktičkog magnetskog polja oni su zarobljeni unutar galaksije. Na fluks ovih zraka utiče Sunčeva aktivnost (solarni ciklus), ali je on mnogo stabilniji od fluksa solarnih kosmičkih zraka. Pošto u sastav galaktičkih kosmičkih zraka ulaze i neka radioaktivna jezgra, oni se mogu koristiti za određivanje njihove starosti (3 – 10 miliona godina) kao i određivanje količine materijala koji prolazi kroz Sunčev sistem.

VANGALAKTIČKI KOSMIČKI ZRACI (UHECR³) - $10^{15} - 10^{20}$ eV ove visoko-energijske čestice imaju jako mali fluks – na jediničnu površinu Zemlje stigne 1 čestica godišnje, što je jedan od razloga njihovog, još uvek nepoznatog, porekla. O njihovom sastavu, takođe, postoje samo teorijski radovi: uglavnom protoni sa malim udelom težih jezgara. Imaju dovoljnu energiju da izbegnu dejstvo magnetskog polja spiralnih galaksija. Teorijski je određena gornja granica za energiju ovih zraka $5 \cdot 10^{19}$ eV, međutim ona se ne poklapa sa posmatranjima – detektovane su čestice veće energije ($3 \cdot 10^{20}$ eV detektovana 1991. godine – verovatno proton koji se kretao brzinom blisko c) što je u suprotnosti sa specijalnom teorijom relativnosti. Predložena su neka rešenja ovih kontradiktornosti: detektovana energija je unutar eksperimentalne greške ili su podaci pogrešno protumačeni, ovi zraci nisu vangalaktičkog porekla ili su slabo interagujući. Razrešenje ove misterije se očekuje.

3 Ultra-high energetic cosmic ray – kosmički zraci ultra visoke energije

2.1. Sekundarno kosmičko zračenje u atmosferi

Sekundarno kosmičko zračenje nastaje pri interakciji primarnog kosmičkog zraka sa drugim česticama materije (ili međuzvezdane materije ili atmosfere). U sekundarne čestice kosmičkih zraka spadaju: jezgra lakših elemenata, mezoni, barioni, hiperoni, leptoni, γ -zraci...

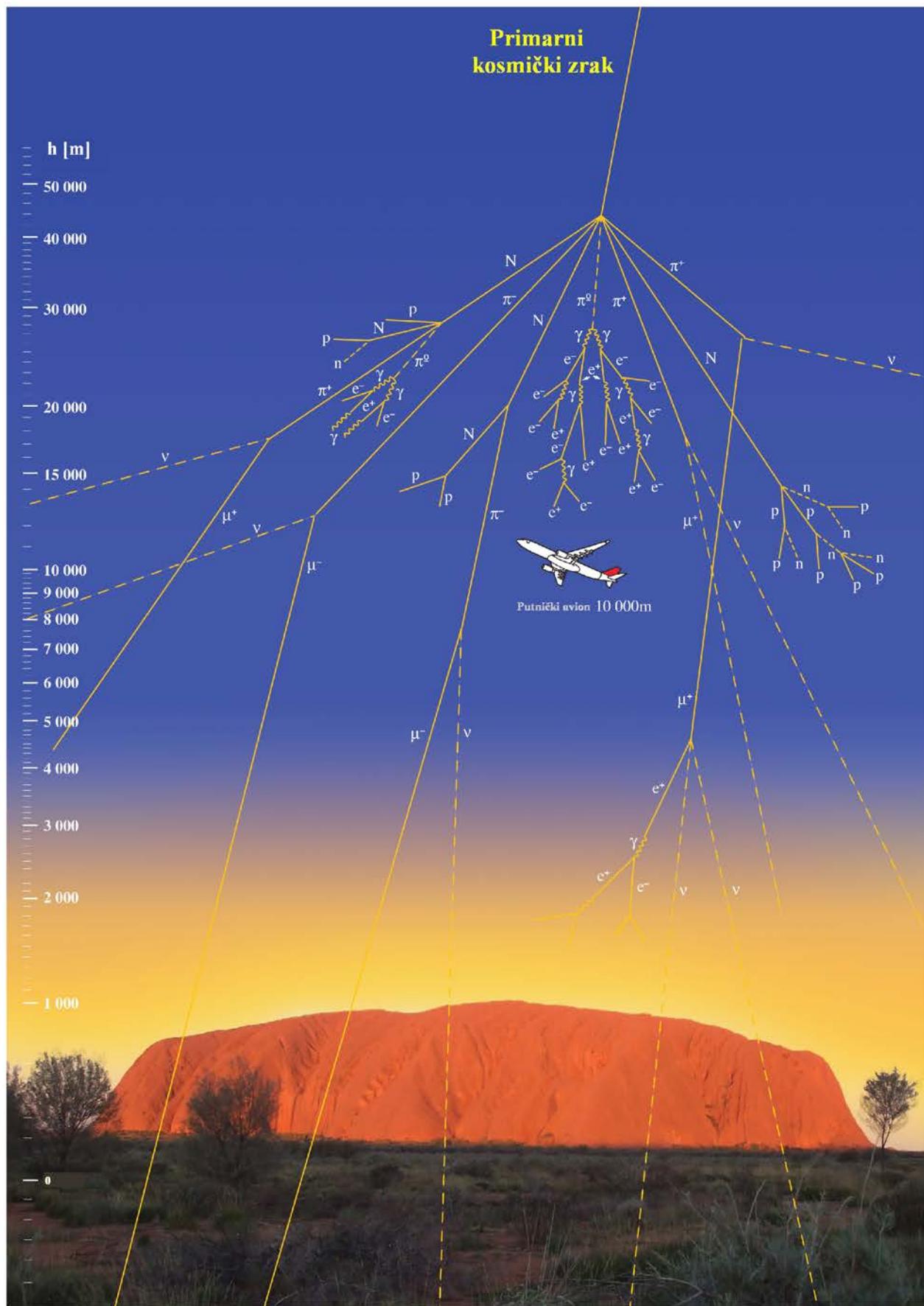
Kada se teška jezgra iz kosmičkih zraka (pre svega ugljenik i kiseonik) sudare sa međuzvezdanom materijom, ona se cepaju na lakša jezgra (spalacija) kao što su litijum, berilijum i bor – čime se objašnjava mnogo veća zastupljenost ovih elemenata u kosmičkim zracima nego u Vasioni. U sekundarne kosmičke zrake spadaju i jezgra skandijuma, titana, vanadijuma i mangana koja nastaju cepanjem jezgara gvožđa i nikla, kao primarnih kosmičkih zraka, pri interakciji sa međuzvezdanom materijom.

Svake sekunde oko 1000 čestica primarnog kosmičkog zračenja pogodi svaki kvadratni metar površine Zemljine atmosfere. Najveći deo ovih čestica ima energiju između $10^7 - 10^{10}$ eV i najčešće je to proton (verovatnoča je oko 85 %). Primarni kosmički zraci se kreću kroz međuzvezdanu materiju gustine 10^{-23} g/cm³, dok je gustina atmosfere 10^{-3} g/cm³ (na nivou mora gde je ona najveća), pa kada primarni zraci naiđu na atmosferu Zemlje, gustina okoline se poveća za 20 redova veličine, tako da je vrlo verovatno da će se oni sudsariti sa nekom česticom vazduha. Čestice se sudsaraju pod dejstvom ili jake ili elektromagnetne interakcije. Ovi procesi su potpuno slučajni i statistički, zbog čega se često za formiranje sekundarnih čestica u atmosferi koriste Monte Carlo simulacije.

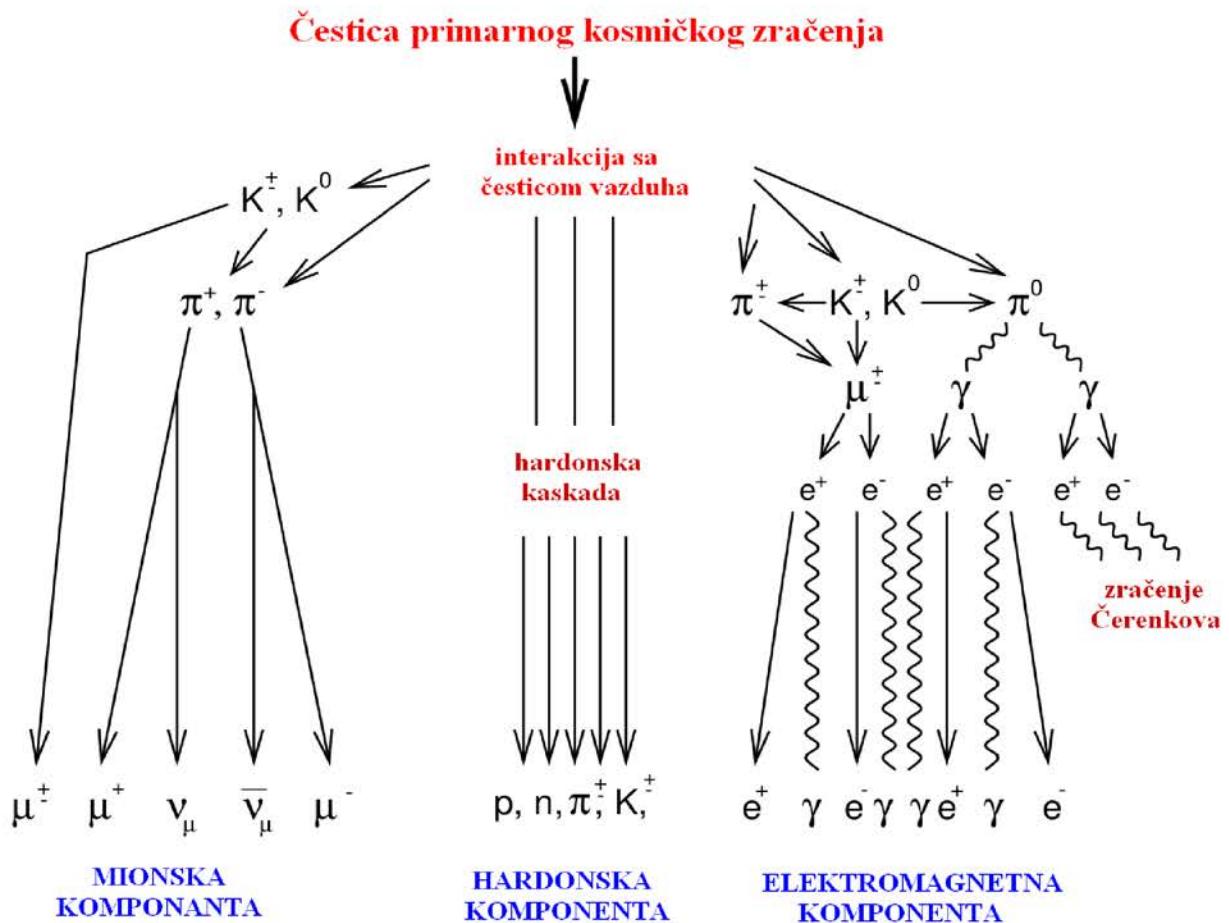
Pošto se atmosfera ponaša kao apsorber, koristi se pojam *dubine u atmosferi* umesto visine, ova veličina se odnosi na masu gasa koji se nalazi iznad posmatrane tačke po jedinici površine. Tako je nivo mora na 1033 g/cm² ili 10.33 mwe (mwe – metri vodenog ekvivalenta), dok 0.7 g/cm² odgovara nadmorskoj visini od oko 71 km (standardna atmosfera).⁴

Interakcija čestica primarnih kosmičkih zraka sa atmosferom može se opisati kaskadnim jednačinama, ako se uzme da molekul u atmosferi ima prosečno relativnu atomski masu $A \approx 14.5$, presek za ovu interakciju (neelastično rasejanje) je $\sigma_N \approx 290$ mbarn (što odgovara nukleonu sa energijom oko 1 TeV koji interaguje sa česticom u atmosferi), dobija se da je srednja dužina interakcije oko 90 g/cm² (za hadrone), tj. oko 36.66 g/cm² (za fotone i elektrone). Dakle, interakcija primarnog kosmičkog hadrona sa atmosferom događa se na oko 90 g/cm² od vrha atmosfere, tačnije atmosfera je dovoljna za oko 27 interakcija fotona i elektrona, ili 11 interakcija hadrona sa česticama u njoj, što praktično znači da nijedna čestica primarnog kosmičkog zračenja ne dolazi do nivoa mora (kada bi proton primarnog kosmičkog zračenja stigao do nivoa mora imao bi manje od 0.001 dela svoje početne energije). Već na nadmorskim visinama od oko 15 do 20 km primarni kosmički zraci interaguju sa jezgrima iz atmosfere i započinju stvaranje sekundarnih kosmičkih zraka. Pošto sve ove čestice imaju velike energije, kreću se brzinama bliskim brzini svetlosti, tako da relativistički efekti utiču na dužinu slobodnog puta, tj. srednji život čestica je produžen zbog dilatacije vremena, što za posledicu ima povećanje prodornosti čestica. Transformacija primarnog kosmičkog zraka kroz atmosferu prikazana je na slikama 2.5 i 2.6.

⁴ Brojne vrednosti su preuzete sa stranice http://cosmic.lbl.gov/SKliewer/Cosmic_Rays/Interaction.htm



Slika 2.5 – Nastanak sekundarnih kosmičkih zraka u atmosferi [45]



Slika 2.6 – Komponente sekundarnih kosmičkih zraka

Ako je primarni kosmički zrak proton veoma velike energije, pri interakciji sa atmosferom razvija se kaskada ili pljusak čestica, broj čestica se eksponencijalno povećava sve dok energija novonastale čestice ne padne na oko 80 MeV (pri svakom sudaru proton gubi oko polovine svoje energije, kada se energija gubi ionizacijom). Za proton, sa energijom manjom od 1 GeV, kaskadno nastaju uglavnom protoni i neutroni, a ako je energija protona veća od 1 GeV broj nastalih piona je veći.

Najveći deo čestica proizveden u prvoj interakciji su pioni (nastaju u stratosferi), sve tri vrste piona nastaju sa približno jednakom verovatnoćom. Kaoni i parovi barion-antibarion takođe nastaju, ali u manjem broju, ako je energija dovoljna (verovatnoća da nastane kaon je samo 10 % u odnosu na verovatnoću da nastane pion). Ove čestice, na svom putu kroz atmosferu, i dalje interaguju, dok one koje su nestabilne (pioni i kaoni) se raspadaju. [19]

Neutralni pioni π^0 (srednji život $\tau = 8.4 \cdot 10^{-17}$ s), čiji je sastav $(u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$, se skoro odmah raspadaju na dva γ kvanta:

$$\begin{aligned}\pi^0 &\rightarrow \gamma + \gamma & 98.8 \% \\ \pi^0 &\rightarrow e^+ + e^- + \gamma & 1.2 \% \end{aligned}$$

Novonastali γ zraci mogu da proizvedu elektron – pozitron parove, koji emituju zakočno zračenje, koje ponovo može da proizvede par elektron – pozitron... ovi procesi se ponavljaju sve dok foton ima energiju veću od 1.02 MeV. Na ovaj način gradi se *elektromagnetna (meka) komponenta* sekundarnog kosmičkog zračenja, koju atmosfera lako apsorbuje.

Naelektrisani pioni π^\pm ($\tau = 2.6 \cdot 10^{-8}$ s), koji su sastavljeni od $\pi^+ : u\bar{d}$ i $\pi^- : d\bar{u}$, sa srednjom dužinom interakcije oko 120 g/cm^2 u vazduhu se spontano raspadaju na:

$$\begin{array}{ll} \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu & 99.99 \% \\ \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu & 99.99 \% \end{array}$$

Verovatnoća, da li će nanelektrisani pion interagovati ili se raspasti, je funkcija energije (interakcija preovladava za pione sa energijom većom od 100 GeV), pošto nastali nanelektrisani pioni imaju energiju oko 1 GeV oni stvaraju mione (sa energijom oko 80 % energije piona) i neutrina.

Kaoni K^\pm spadaju u čudne mezone (sastoje se od para kvark - antikvark $u\bar{s}$ tj. $s\bar{u}$), sa srednjim životom $\tau = 1.2 \cdot 10^{-8}$ s raspadaju se na više kanala, neki od njih su:

$$\begin{array}{ll} K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu & 63.55 \% \\ K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu & 63.55 \% \\ K^- \rightarrow \pi^- + \pi^0 & 20.66 \% \\ K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0 & 20.66 \% \end{array}$$

Dakle, raspadanjem kaona povećava se broj miona.

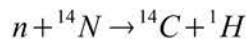
Mioni sa srednjim životom $\tau = 2.20 \cdot 10^{-6}$ s mogu da se raspadnu na elektrone i neutrina ili mogu da prođu do nivoa mora pa i kroz zemlju (zbog dilatacije vremena):

$$\begin{array}{ll} \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu & \approx 100 \% \\ \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu & \approx 100 \% \end{array}$$

Raspadom mioni doprinose mekoj komponenti zračenja (ako je energija miona manja od 1 GeV). Gubici energije miona koji prolaze kroz atmosferu na ionizaciju je mala (oko 1.8 GeV), tako da oni čine oko 80 % svih nanelektrisanih čestica koji stignu do nivoa mora (ako im je energija veća od 3 GeV). Zbog velike prodorne moći (srednja dužina interakcije je oko 260 g/cm^2) mioni spadaju u *tvrdu komponentu* sekundarnog kosmičkog zračenja.

Postoji jako mali broj mezona i bariona koji prolazi kroz atmosferu i stigne do nivoa mora – oni čine *hardonsku komponentu* sekundarnih kosmičkih zraka.

U sekundarne kosmičke zrake spadaju i neki radioaktivni izotopi, na primer zahvat neutrona na azotu:

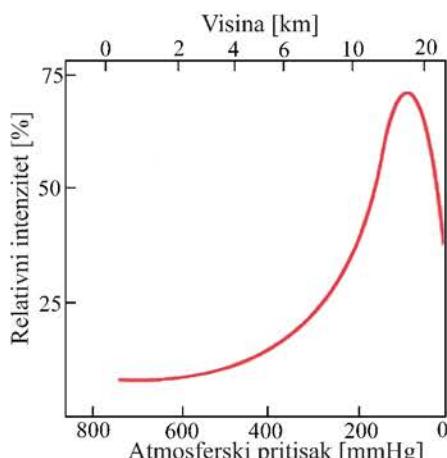


izotopi ugljenika formiraju ugljen-dioksid koji dalje apsorbuju organske materije, iz odnosa broja atoma ${}^{14}C$ i ${}^{12}C$ može se odrediti starost materijala.

Dakle, sekundarni kosmički zraci u atmosferi mogu se razložiti na tri komponente:

- **meka (elektromagnetna) komponenta** – sastoji se od elektrona, pozitrona i fotona, procesi bitni za razvoj ove komponente su Compton-ovo rasejanje, fotoefekat i stvaranje parova.
- **tvrdna (mionska) komponenta** – čine je mioni i ovo je najprodornija komponenta, mioni se uglavnom stvaraju raspadima piona i kaona iz hardonske komponente. Pri prolasku kroz atmosferu mioni gube svoju energiju ionizacijom (intrerakcija nastalih miona sa jezgrima iz atmosfere se može zanemariti). Vreme života miona je povećano zbog dilatacije vremena, što za posledicu ima duboko prodiranje miona ispod površine Zemlje (koliko god im energija dozvoljava). Mioni takođe mogu nastati raspadom šarm i dno hadrona. Pošto šarm mezoni imaju kratak period života, mioni koji nastanju njihovim raspadanjem su *promptni*.

- **hardonska komponenta** – se sastoji od protona, neutrona i drugih bariona i mezona, koji nastaju jakom interakcijom primarne čestice sa atmosferom. Novonastali hadroni mogu ili da ponovo interaguju sa česticom atmosfere ili da se raspadnu. Mionska i elektromagnetna komponenta koje potiču od hadrona se raspadaju na leptone.



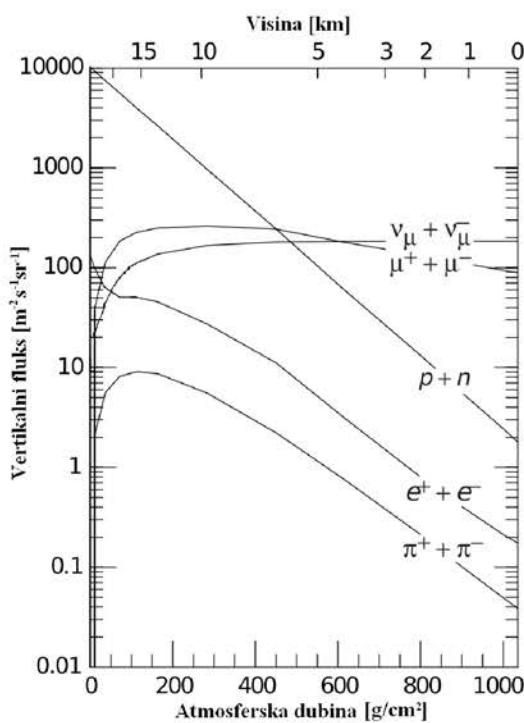
Slika 2.7 – Pdotzter-ov maksimum [38]

Broj nastalih čestica se u početku povećava, dostiže maksimum i smanjuje. Te sekundarne čestice se kreću skoro u istom pravcu kao i primarna čestica. Svaka od ovih sekundarnih čestica može ponovo interagovati sa jezgrima u atmosferi stvarajući nove kaskade, takođe, broj čestica se povećava i raspadanjem nestabilnih čestica. Ovaj proces se ponavlja sve dok novonastale čestice imaju dovoljno energije za stvaranje novih čestica, ako je ta energija manja od datog praga onda će se ona dalje smanjivati radijativnim procesima ili ionizacijom. Stoga, neke od čestica se mogu zaustaviti u atmosferi predajući svu svoju energiju ionizacionim elektronima. Za svaku komponentu postoji određena atmosferska dubina na kojoj je broj čestica maksimalan. Postojanje maksimalnog fluksa čestica prvi je uočio Pdotzter 1936. godine, koji je na oko 150 g/cm^2 , tj. visini oko 15 km.

Elektromagnetna i hardonska komponenta menjaju i svoju širinu pri prolasku kroz atmosferu. Širina se povećava sa porastom atmosferske dubine (tj. smanjuje sa povećanjem nadmorske visine). Razlog ovakve zavisnosti je *Coloumb-ovo rasejanje*. Ako je primarna čestica imala energiju 10^{15} eV na Zemlji sekundarne čestice će zauzeti površinu oko 100 m^2 , a za 10^{18} eV površina je oko 1 km^2 .

Fluks sekundarnih kosmičkih zraka pri prolasku kroz atmosferu prikazan je na slici 2.8. Sa slike se mogu uočiti sledeće osobine sekundarnih kosmičkih zraka u atmosferi ([24], [27]):

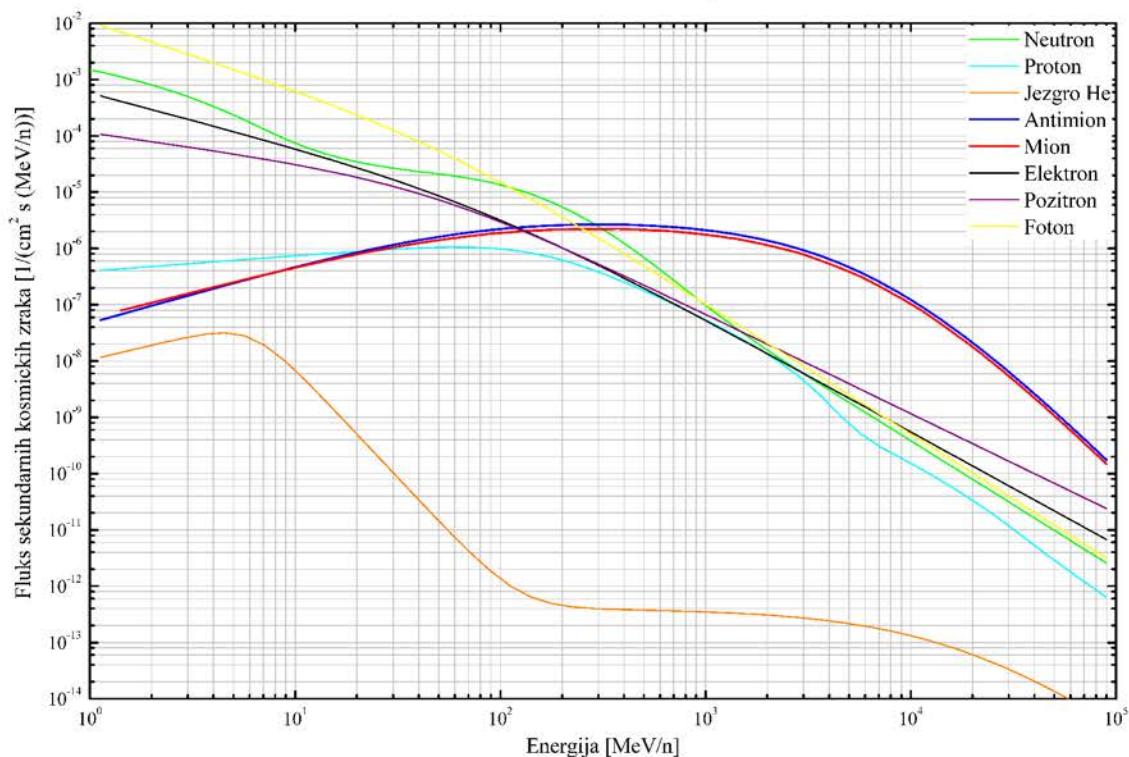
- fluks fotona na energijama iznad kritične je sličan fluksu elektrona
- protoni i pioni apsorbuju se eksponencijalno sa dubinom u atmosferi (atenuaciona dubina je od 120 g/cm^2 do 130 g/cm^2), protoni proizvode sekundarne čestice brzinom koja je proporcionalna njihovom fluksu, na nivou mora imati oko 0.08 piona po protonu
- fluks neutrona je nešto veći od fluksa protona, zbog duže putanje neutrona (ne gube energiju ionizacijom)
- odnos elektrona i protona je približno konstantan do dubine oko 700 g/cm^2 , kada broj elektrona počinje da raste – zbog dodatnih elektrona nastalih raspadom miona
- fluks miona se skoro i ne menja
- primarni nukleoni (protoni i neutroni) su dominantni do oko 9 km u atmosferi, na manjim nadmorskim visinama dominantni su mioni
- zbog malog preseka za interakciju neutrini se ne apsorbuju u atmosferi, dolazi do povećanja njihovog fluksa jer se stvaraju raspadom mezona



Slika 2.8 – Fluks čestica kosmičkih zraka u atmosferi [43]

Na slici 2.9 prikazana je zavisnost fluksa sekundarnih kosmičkih zraka od energije na nadmorskoj visini od 80 m, za područje Novog Sada, dobijena programom EXPACS⁵.

Fluks sekundarnih kosmičkih zraka određen PARMA modelom



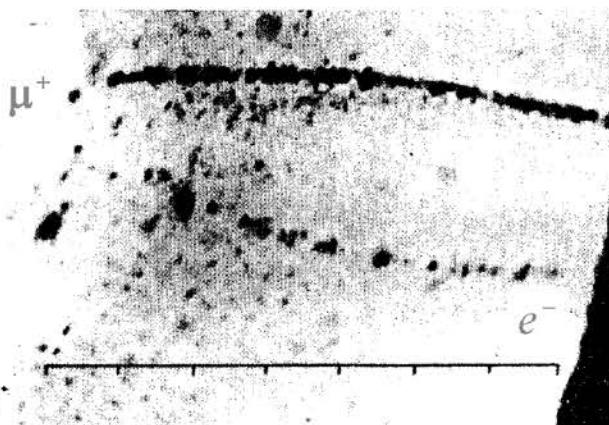
Slika 2.9 – Spektar sekundarnih kosmičkih zraka u atmosferi

⁵ EXcel-based Program for calculating Atmospheric Cosmic-ray Spectrum, ovaj program se može preuzeti sa adresi <http://phits.jaea.go.jp/expacs/>

III Mioni

Do 1933. godine i eksperimentalno i teorijski znalo se za postojanje elektrona, fotona, protona, neutrona i pozitrona, dok je neutrino bio samo teorijski postuliran. U to vreme bilo je nekoliko nerešenih problema koje je teorija pokušala da razreši i time predvidela postojanje dodatnih čestica koje su eksperimentalni fizičari tražili, i našli zajedno sa drugim česticama koje ni eksperimentalni ni teorijski fizičari nisu očekivali. Jedini izvor novih čestica bili su kosmički zraci. Dakle, sve što je eksperimentalnim fizičarima preostalo je da postave maglene komore i fotografске emulzije i čekaju. Tokom perioda od 1933. do 1936. godine prijavljeno je više neobičnih nalaza u kosmičkim zracima, čak je dovedena u pitanje i kvantna teorija na visokim energijama (tj. interakcija visoko energijskih čestica sa materijom). Od prvih tragova miona u detektorima, pa do shvatanja njegove prirode, proteklo je oko 15-ak godina, pa i danas, mion se uporno odupire naporu više generacija fizičara da u potpunosti odgovori njegove osobine.

P. Kunze, 1932. godine na Univerzitetu u Rostoku, posmatrao je kosmičke zrake u Wilson-ovoj maglenoj komori sa magnetnim poljem jačine 1.8 T i pronašao pozitivno i negativno nanelektrisane čestice energija do 10^{10} eV. U maju naredne godine objavio je rad⁶ u kojem je analizirao fotografije tragova čestica, pri čemu je skrenuo pažnju na fotografiju sa dva traga koja je prikazana na slici 3.1. Komentar uz fotografiju glasi: „Donji trag potiče od elektrona energije oko 37 MeV, dok je gornji trag ostavila pozitivna čestica sa manjim prečnikom krivine i mnogo većom sposobnosti ionizacije okoline. Priroda gornje čestice je nepoznata, ona jonizuje preveliko za proton a previše za pozitron. Ove dve čestice verovatno potiču iz pljuska čestica koji je posledica nuklearne eksplozije.“ Međutim, pošto je čestica ostala neidentifikovana, ovo otkriće je zaboravljen.



Slika 3.1 – Fotografija miona u radu P. Kunze iz 1933. godine [37]

⁶ P. Kunze *Untersuchung der Ultrastrahlung in der Wilsonkammer* Zeitschrift für Physik A **83**(1) 1933.

U Japanu *H. Yukawa* je razvijao teoriju sa ciljem da objasni nuklearne sile (jaka interakcija) koje deluju između nukleona u jezgru. Po analogiji sa elektromagnetnom interakcijom, *Yukawa* je postulirao da nuklearnu silu prenose čestice čija bi masa bila oko 200 puta veća od mase elektrona (*teški kvanti*, za razliku od fotona koji su laki kvanti). Svoju teoriju prvi put je predstavio 1933. godine na skupu *Physico-Mathematical Society* u Sendaju. [4] Početkom 1935. godine objavljen je i rad na englesnom jeziku⁷, u kojem *Yukawa* sumnja u tačnost svoje teorije jer takva čestica eksperimentalno nije pronađena (takođe, naglašava da bi za detektovanje takve čestice bile potrebne velike energije kakve su se u to vreme mogle dobiti samo u kosmičkom zračenju). Nažalost, ovaj rad nije bio zapažen u Japanu, tako da i u Evropi i Americi nije izazvao interesovanje (iako je kopija časopisa *Proceedings* tamo poslata).

Nakon otkrića pozitrona 1932. godine, *C. D. Anderson* nastavio je sa posmatranjem kosmičkih zraka zajedno sa *S. H. Neddermeyer* (njegov prvi doktorant). Među tragovima čestica bilo je i nekih neobičnih, za koje su smatrali da potiču od elektrona i pozitrona koji se zbog svoje velike energije drugačije ponašaju pri prolasku kroz materiju. Sa ciljem da bolje prouče ove pojave, 1935. godine, postavljaju *Wilson*-ovu maglenu komoru na vrhu Pikes (Stenovite planine) sa magnetnim poljem jačine 7.9 T. [4] Rad⁸ sa fotografijama kosmičkih zraka na nadmorskoj visini od 4300 m i na nivou mora, u kojem je pokazano da postoji čestica koja je manje mase od protiona, ali mnogo prodornija od elektrona, objavljen je 1936. godine. Kada je decembra te godine *Anderson* primio Nobelovu nagradu (za otkriće pozitrona), na kraju govora spomenuo je postojanje zagonetnih čestica sa velikom prodornom moći, koja predstavljaju zanimljiv materijal za dalje istraživanje.

Yukawa je nakon objavljinjanja teorije o nuklearnim silama, posebno obratio pažnju na teorijske i eksperimentalne rade o kosmičkim zracima. Tako da je početkom 1937. godine pisao uredniku časopisa *Nature* sa ciljem da ukaže da je nepoznata čestica sa velikom prodornošću, u suštini teški kvant, međutim njegovo pismo je odbijeno (jer nije bilo uverljivih eksperimentalnih dokaza koji bi podržali njegovu teoriju). [4]

Prva potvrda o stvarnom postajanju čestice prikazana je u drugom radu *Anderson-a* i *Neddermeyer-a*⁹ objavljenom početkom 1937. godine, u kojem su posmatrani gubici energije čestica pri prolasku kroz platinu, i zaključeno je da postoji podela čestica na dve grupe: neprodorne (elektroni i pozitroni) i prodorne (koje gube jako malo od svoje početne energije). U prodorne čestice ubrajaju i česticu čija je masa između masa elektrona i protiona. Na kraju rada ukazuju da je eksperimentalno pokazano postojanje ovakve čestice i u radu *J. C. Street* i *E. C. Stevenson*¹⁰, u kojem je dokazano da to ne može biti ni elektron ni proton, već neka nova čestica.

Konačno, sredinom 1937. godine, *J. R. Oppenheimer* i *R. Serber*¹¹ a nešto kasnije i *C. G. Stueckelberg*¹² ukazuju da je nova prodorna čestica iz kosmičkog zračenja – *Yukawa*-ina čestica, koju je *Yukawa* teorijski predvideo dve godine ranije.

7 *H. Yukawa On the Interaction of Elementary Particles* Proceedings of the Physico-Mathematical Society, Japan **17**(48) 1935.

8 *C. D. Andreson, S. H. Neddermeyer Cloud Chamber Observations of Cosmic Rays at 4300 Meters Elevation and Near Sea-Level* Physical Review Letters **50**(263) 1936.

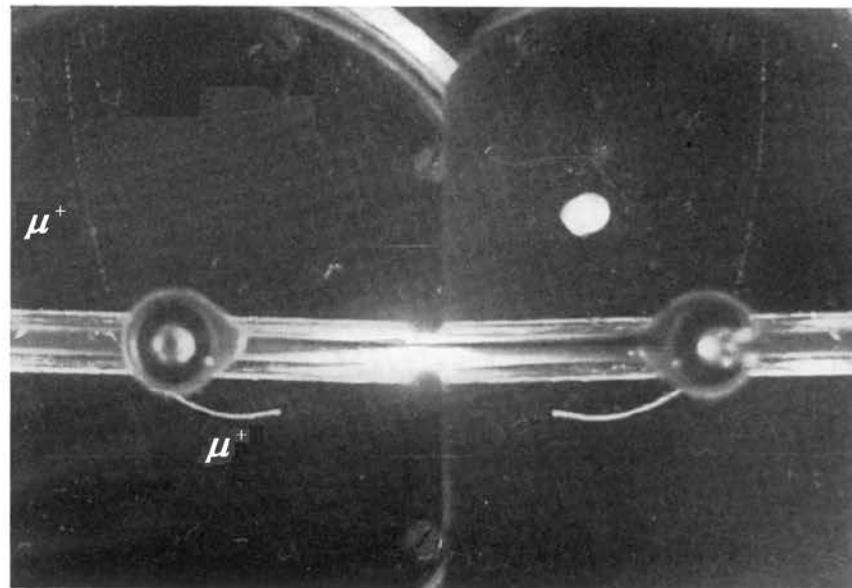
9 *C. D. Andreson, S. H. Neddermeyer Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles* Physical Review Letters **51**(884) 1937.

10 *J. C. Street, E. C. Stevenson Penetrating Corpuscular Component of the Cosmic Radiation* Physical Review Letters **51**(1005) 1937.

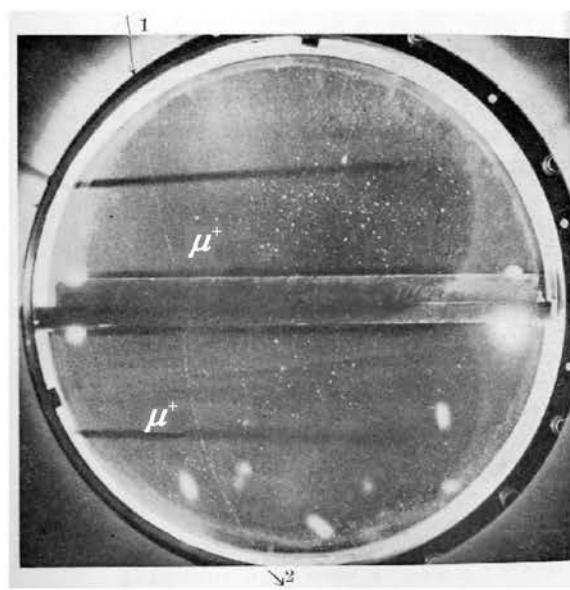
11 *J. R. Oppenheimer, R. Serber Noto on Nature of Cosmic-Ray Particles* Physical Review Letters **51**(1113) 1937.

12 *C. G. Stueckelberg On the Existence of Heavy Electrons* Physical Review Letters **52**(41) 1937.

Prvu kvantitativnu procenu mase dala je grupa japanskih fizičara, *Y. Nishina, M. Takeuchi i T. Ichimiya*, međutim njihov rad¹³ je zbog dužine bio vraćen autorima, tako da je kasnije objavljen. Oni su procenili da je masa nove čestice u intervalu od 1/7 do 1/10 mase protona (220 ± 40 masa elektrona). U međuvremenu krajem 1937. godine (mesec dana pre konačnog objavlјivanja rada japanskih fizičara), *Street i Stevenson* su objavili rad¹⁴ u kojem procenjuju masu na oko 130 masa elektrona. Ovi radovi išli su u prilog pretpostavci da je čestica iz kosmičkog zračenja Yukawa-ina čestica (razlika u masama teorijske i eksperimentalne čestice nije bila velika).



Slika 3.2 – Fotografija pozitivno nanelektrisane čestice sa energijom oko 240 MeV u Wilson-ovoj maglenoj komori. Trag je nakon gubitka energije vidljiviji i ima dužinu 1.5 cm. Ova čestica ne može biti ni elektron (trag bi bio oko 3 m), ni proton (trag bi bio 0.02 cm). [1]



Slika 3.3 – Fotografija na kojoj je trag nove čestice kosmičkog zračenja u Wilson-ovoj komori. Masa čestice je u intervalu od 1/7 do 1/10 mase protona. [18]

13 Y. Nishina, M. Takeuchi, T. Ichimiya *On the Nature of the Cosmic-Ray Particles* Physical Review Letters **52**(1198) 1937.

14 J. C. Street E. C. Stevenson *New Evidence for the Existence of a Particle of Mass Intermediate Between the Proton and Electron* Physical Review Letters **52**(1003) 1937.

Anderson i Neddermeyer su prvobitno ovu česticu nazvali **mezoton**, od grčke reči $\mu\acute{\epsilon}\sigma\omega\zeta$ što znači između, u sredini. U to vreme je *R. Millikan* bio upravnik *Caltech*. On je bio odsutan kada su *Anderson* i *Neddermeyer* predložili ime sa kojim se nije složio, pa je korigovao na **mezotron**, da liči na "elektron", "neutron". Iako se *Anderson* nije slagao (po njegovom mišljenju nastavak **-tron** više odgovara instrumentu, npr. ciklotron, sinhotron), poslao je pismo časopisu *Nature* da ubace slovo **r.** [16] *Bhabha* je 1939. godine u pismu časopisu *Nature* predložio da se nova čestica nazove **mezon**, jer deo „**tr**“ u neutron i elektron pripada kao koren reči, dok je u reči mezotron taj deo suvišan i nepotreban. [36]

Sa daljim razvojem teorije nuklearnih sila i eksperimentalnih rezultata o osobinama mezona došlo je do sve većeg mimoilaženja teorije i eksperimenta (neslaganje u periodu života, nepostojanje neutralnog mezona, različiti spin....). Postavljalo se pitanje da li je mezon isto što i teški kvant. Zbog Drugog Svetskog Rata odgovor je kasnio, ali eksperimentom italijanskih fizičara *M. Conversi*, *E. Pancini* i *O. Piccioni*¹⁵ misterija je počela da se razrešava. Oni su eksperimentalno posmatrali raspad pozitivnih i negativnih mezona iz kosmičkog zračenja u materijalima različitih elemenata, dokazali su da negativni mezoni ne interaguju jakom interakcijom sa jezgrima atoma i da po osobinama više odgovaraju elektronima. Zatim su *E. Fermi*, *E. Teller* i *V. F. Weisskopf*¹⁶ odredili da postoji neslaganje od 10^{12} između teorije i eksperimenta u vremenu potrebnom da *Yukawa*-ina čestica bude zahvaćena jezgrom jakom interakcijom. U ovom radu uvedena je oznaka μ za mezon. Konačno, otkrićem piona eksperimentalno je potvrđena *Yukawa*-ina teorija. *C. M. G. Lattes*, *G. P. S. Occhialini* i *C. F. Powell*¹⁷ su fotografskom emulzijom detektovali dve vrste mezona, teži mezon se raspada na lakši i neutralnu česticu, zbog čega su prvom mezonu dali ime π (sa masom oko 264 puta većom od mase elektrona), dok je drugi već poznati *Anderson*-ov μ -mezon, koji se raspada na elektron.



Slika 3.4 – Fotografija raspada pion – mion – elektron [3]

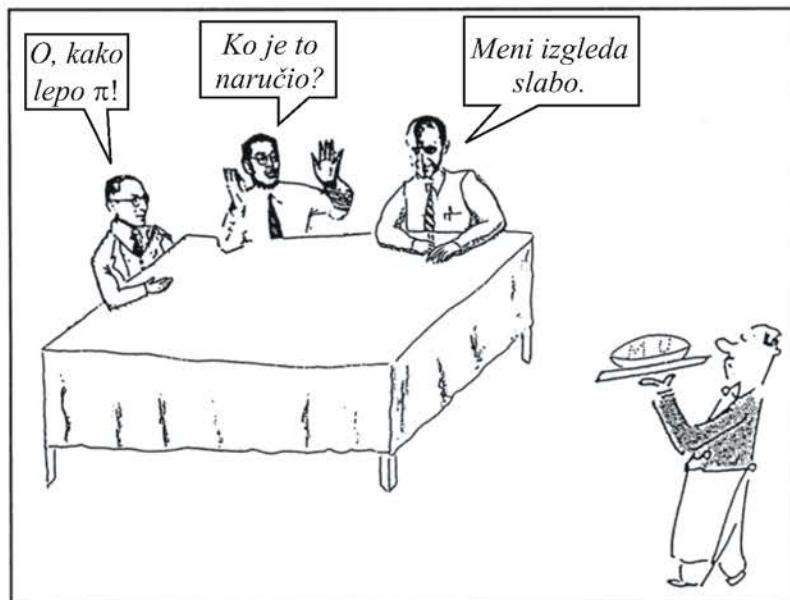
Otkrićem prave *Yukawa*-ine čestice nastao je novi problem: svrha μ -mezona. Zbog svojih sličnih osobina sa elektronom, μ -mezon je stavljen u grupu leptona (iako niko nije očekivao još fundamentalnih leptona), pa mu je i ime poslednji put promenjeno u **mion**. Dalji napredak fizike miona vezan je i za akceleratore, a ne samo kosmičke zrake. Eksperimenti sa akceleratorima omogućili su dobijanje tačnih vrednosti karakteristika miona. Upoznavanje sa osobinama miona stvorilo je više pitanja nego odgovora.

15 M. Conversi, E. Pancini, O. Piccioni *On the Disintegration of Negative Mesons* Physical Review Letters **71**(209) 1947.

16 E. Fermi, E. Teller, V. F. Weisskopf *The Decay of Negative Mesotrons in Matter* Physical Review Letters **71**(314) 1947.

17 C. M. G. Lattes, G. P. S. Occhialini, C. F. Powell *Observation on the Tracks of Slow Mesons in Photographic Emulsions* Nature **160**(453) 1947.

Za mion, nakon otkrića piona, nije bilo mesta u fizici tog doba, tako da su fizičari imali problema sa pronalaženjem svrhe miona, što je ilustrovano slikom 3.5.



Slika 3.5 - Nakon otkrića piona, nije bilo poznato mesto miona u fizici čestica, pa je Lee napravio datu karikaturu. [14]

Rabi, Yukawa i Fermi sede za stolom u restoranu, dok im konobar donosi μ oni razgovaraju:

Yukawa: "O, kako lepo π !"

Fermi: "Meni izgleda slabo."

Rabi: "Ko je to naručio?"

3.1. Osobine miona

Mioni, po standardnom modelu, spadaju u drugu generaciju nanelektrisanih leptona, sa masom oko 207 puta većom od mase elektrona i odgovarajućom antičesticom μ^+ (ekvivalentnost miona i antimiona je utvrđena do 10^4). Gornja granica za poluprečnik miona je $r_\mu \leq 10^{-19}$ m i spada u tačkaste čestice. Osnovne karakteristike miona date su u tabeli 3.1.

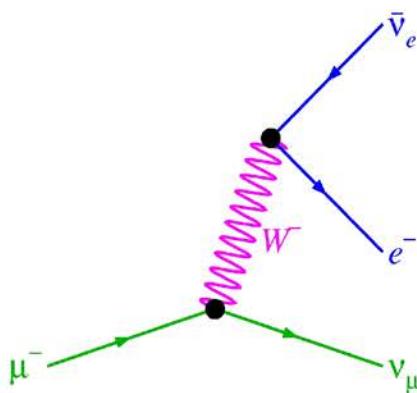
Tabela 3.1 – Osnovne karakteristike miona μ^-

Masa	105.658367(4) MeV/c ²
Srednji život	$2.197034(21) \cdot 10^{-6}$ s
Nanelektrisanje	-e
Spin	1/2

Mion je nastabilna čestica, na drugom mestu po vremenu života fundamentalnih čestica (iza neutrona). Šema raspada miona i antimiona je:

$$\begin{array}{lll} \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu & \approx 100\% & \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu & \approx 100\% \\ \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + \gamma & (1.4 \pm 0.4)\% & \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu + \gamma & (1.4 \pm 0.4)\% \\ \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + e^+ + e^- & (3.4 \pm 0.4) \cdot 10^{-3}\% & \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu + e^- + e^+ & (3.4 \pm 0.4) \cdot 10^{-3}\% \end{array}$$

Dominantan kanal raspada je i najprostiji mogući (*Michel*¹⁸-ov raspad) i spada u grupu leptonskih slabih raspada (sve čestice koje učestvuju u procesu su leptoni). Mion se raspada na elektron, elektronski antineutrino i mionski neutrino (antimion se raspada na konjugovane čestice). Feynman-ov dijagram raspada miona prikazan je na slici 3.6.



Slika 3.6 - Feynman-ov dijagram raspada miona

Mioni mogu da formiraju *mionski atom*, kada se jedan od elektrona zameni mionom u atomu. Mionski vodonik je mnogo manji, zbog veće mase miona u odnosu na elektron. Antimioni sa elektronom formiraju *mionium* – atom u kojem antimion ima ulogu jezgra. Ovaj kratkoživeći atom se ponaša kao vodonik, i koristi se za proučavanje elektromagnetne interakcije jer par antimion – elektron predstavlja dve fundamentalne čestice bez unutrašnje strukture između kojih deluje samo elektromagnetna interakcija.

18 Nazvan po *Louis Michel*, francuskom fizičaru.

3.2. Interakcija miona sa materijom

Mioni podležu elektromagnetnoj i slaboj interakciji. I mion i antimion na druge nanelektrisane čestice deluju **elektromagnetskom interakcjom**. U slučaju sporih miona i antimiona može nastati nekoliko vezanih stanja: *mionium* ($\mu^+ e^-$), *mionski vodonik* ($\mu^- p$), *mionski atom* rednog broja Z ($\mu^- Z$) i mion može da veže dva atoma i formira molekul. U ovim sistemima javlja se i raspad miona, a kod mionskih atoma moguća je i slaba interakcija. Pri formiranju mionskih atoma, kada se jedan elektron iz omotača zameni mionom, emituje se mionsko x -zračenje zbog mnogo veće mase miona. U eksperimentima rasejanja snopova miona energija od nekoliko MeV-a na jezgrima, dobijeni su rezultati slični rasejanju elektrona. Dakle, prolaz miona kroz materiju je sličan prolazu elektrona, ali su radijativni procesi smanjeni zbog mnogo veće mase miona. **Slaba interakcija** je odgovorna za *raspad miona i antimiona*, kao i za *zahvat jezgra na negativnom mionu* sa nižih orbita mionskih atoma (procesi su ekvivalentni β -raspadu između jezgra). Ovaj zahvat smanjuje srednji život miona koji su zaustavljeni u materijalu teških elemenata.

Uopšteno, pri prolazu nanelektrisane čestice kroz materiju moguće je da čestica izgubi deo energije ili da se promeni pravac kretanja. Ovi efekti se javljaju kao posledica neelastičnog i elastičnog rasejanja na elektronima iz omotača ili na jezgru:

- pri **neelastičnom rasejanju na elektronima** iz atomskog omotača može doći do *jonizacije* ili *ekscitacije* atoma (presek za ove reakcije je $10^{-21} - 10^{-20} \text{ m}^2$)
- pri **neelastičnom rasejanju na jezgru** atoma može doći do *nuklearnih ekscitacija* ili *transformacija jezgra* (u ovom slučaju upadna nanelektrisana čestica može biti apsorbovana), ili emitovanja *zakočnog zračenja* (za luke nanelektrisane čestice) ili *zračenja Čerenkova* (za brze nanelektrisane čestice) ili *stvaranje para* elektron - pozitron
- pri **elastičnom rasejanju na jezgru** upadna nanelektrisana čestica izgubi malo energije jer je obično masa jezgra mnogo veća od mase upadne čestice.

Procesi kojima nanelektrisana čestica gubi energiju zavise od energije čestice. *Kritična energija* predstavlja energiju na kojoj su gubici zračenjem i ionizacijom izjednačeni. Vrednost ove energije zavisi od tipa upadne čestice i od sredine kroz koju se ta čestica kreće. Ako je energija upadne nanelektrisane čestice manja od kritične energije, dominantan proces kojim čestica gubi energiju je ionizacija ili ekscitacija, za energije veće od kritične za gubitak su odgovorni radijacioni procesi.

Gubici energije na zračenje su posledica elektromagnetne interakcije upadne nanelektrisane čestice sa jezgom atoma sredine kroz koju se ta čestica kreće. Tada su mogući procesi: proizvodnje parova, zakočnog zračenja ili fotonuklearne interakcije. Kao rezultat ovih gubitaka nastaju sekundarne čestice (uglavnom fotoni, elektroni i pozitroni). Za mion (sa energijom u intervalu od 500 GeV do 10000 GeV) najznačajniji proces je proizvodnja para elektron – pozitron.

Energijski gubici na *zakočno zračenje* su proporcionalni energiji upadne čestice, a obrnuto proporcionalni kvadratu njene mase [28]:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{zz} = 4\alpha N r_e^2 \frac{Z^2}{A} \left(\frac{m_e}{m_\mu}\right)^2 E \left(\ln \frac{12E}{5m_\mu c^2 Z^{1/3}} - \frac{1}{3} \right) \quad \text{za } E < 4.3 \text{ TeV} \quad (1)$$

gde je: z – nanelektrisanje upadne čestice (za mion $z = 1$), Z i A – redni i atomski broj sredine, m_e – masa elektrona, r_e – poluprečnik elektrona ($r_e = 2.817940325(28) \text{ fm}$), α – konstanta fine strukture, N – broj atoma sredine u jedinici zapremine, m_μ – masa mirovanja miona. Zakočno zračenje miona je veoma redak proces (zbog velike mase miona), ali u jednoj interakciji mion može da izgubi veliki deo svoje energije. Fotoni koji nastaju interakcijom miona sa *Coloumb-*ovim poljem jezgra imaju veliku energiju, i oni mogu da proizvedu elektromagnetne pljuskove (kaskade) elektrona, pozitrona i fotona (čak i do 10^5 čestica).

Virtuelnim fotonom, koji nastaje neelastičnim rasejanjem u *Coloumb-*ovom polju jezgra, može nastati *par elektron – pozitron*, energijski gubici na ovaj proces su takođe proporcionalni energiji upadne čestice [28]:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{pp} = \frac{Nm_e}{\pi Am_\mu} (\alpha Z r_e)^2 E \left(19.3 \ln \frac{E}{m_\mu c^2} - 53.7 \right) \quad \text{za } E < 30 \text{ GeV} \quad (2)$$

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{pp} \propto 1.6 \cdot 10^{-6} \cdot E \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1} \quad \text{za } 0.5 \text{ TeV} < E < 10 \text{ TeV} \quad (3)$$

Presek za nastajanje para opada sa kvadratom ili kubom brzine upadne čestice, zbog čega se energijski gubici mogu smatrati kontinualnim.

Gubici energije na *fotonuklearne interakcije* su zanemarljivi za mione sa energijama manjim od nekoliko stotina GeV, zbog malog preseka za ovaj proces [28]:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{ni} \propto 7.3 \cdot 10^{-7} \cdot E \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1} \quad (4)$$

Gubitak energije na zračenje jako osciluje zbog velike razmene energije, tako da određivanje srednje energije gubitaka upravo iz ovog razloga nema smisla.

Energijski gubici pri prolazu teške nanelektrisane čestice kroz materiju na *jonizaciju* (*Coloumb-*ovu interakciju sa elektronima) dati su *Bethe – Bloch*-ovom formulom [7]:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_j = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left(\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right) \quad (5)$$

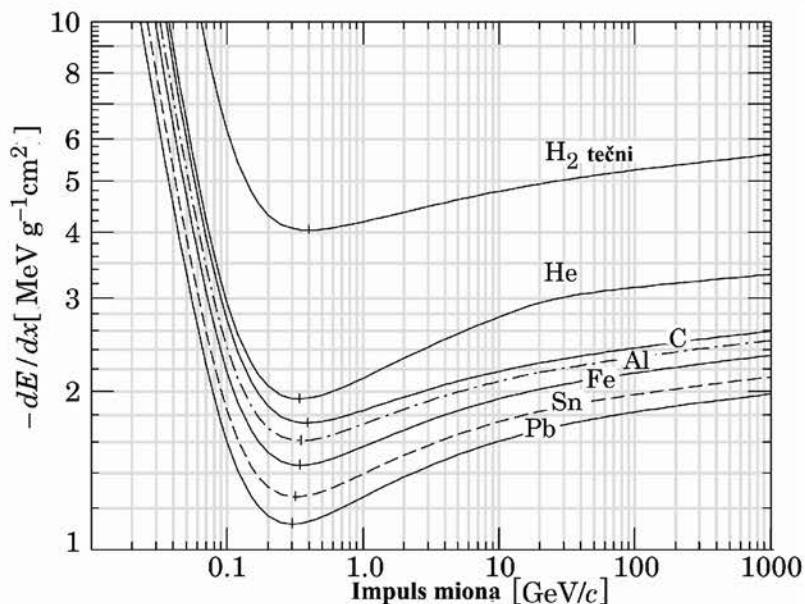
gde je: N_A – *Avogadro*-ov broj ($N_A = 6.0221415(10) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$), $\beta = v/c$, I – srednji ionizacioni potencijal (može se odrediti formulom $I = 16 \cdot Z^{0.9} \text{ eV}$ za $Z > 1$) i δ – parametar koji opisuje polarizaciju materijane sredine duž putanje upadne nanelektrisane čestice zbog njenog električnog polja (ovaj parametar se naziva i faktor gustine, postaje značajan pri velikim brzinama upadne čestice, a zavisi i od gustine materije kroz koju čestica prolazi). Ova formula, za materijale iz sredine Periodnog sistema, kvantitativno određuje srednji gubitak energije sa tačnošću od nekoliko procenata. Stvarna vrednost gubitaka zavisi od statističkih procesa sudara i rasejanja. Može se zaključiti da sporije čestice gube više energije po jedinci puta. Za nerelativističke upadne čestice (dominantan faktor u formuli je $1/\beta^2$) postoji minimum *Bethe – Bloch*-ove funkcije koji je skoro isti za čestice sa istim nanelektrisanjem (tj. tada čestice imaju minimalni ionizacioni potencijal oko $1.8 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}$).

Obično se koristi specifični gubitak energije u materijalu gustine ρ , tada on ne zavisi od medijuma kroz koji nanelektrisana čestica prolazi:

$$\frac{dE}{d(\rho x)} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dx} \quad (6)$$

Pri neelastičnom rasejanju visoko energijskih miona na elektronima atomskog omotača, energijski spektar oslobođenih elektrona je veoma širok. Na primer mion energije 10 GeV može da predstavi elektronu maksimalnu kinetičku energiju oko 4.8 GeV, tako da elektron može da stvara nove čestice (uglavnom zakočnim zračenjem).

Srednji gubitak energije miona u nekim materijalima dat je na slici 3.7.



Slika 3.7– Srednji gubitak energije u tečnom vodoniku, helijumu, ugljeniku, aluminiju, gvožđu, kalaju i olovu (gubici na zračenje su zanemareni) [43]

Pri prolazu nanelektrisane čestice kroz neku sredinu njena putanja nije pravolinjjska već je iskrivljena zbog Coulomb-ove interakcije sa jezgrom.

Ukupni gubitak energije pri prolasku nanelektrisane čestice kroz materiju je:

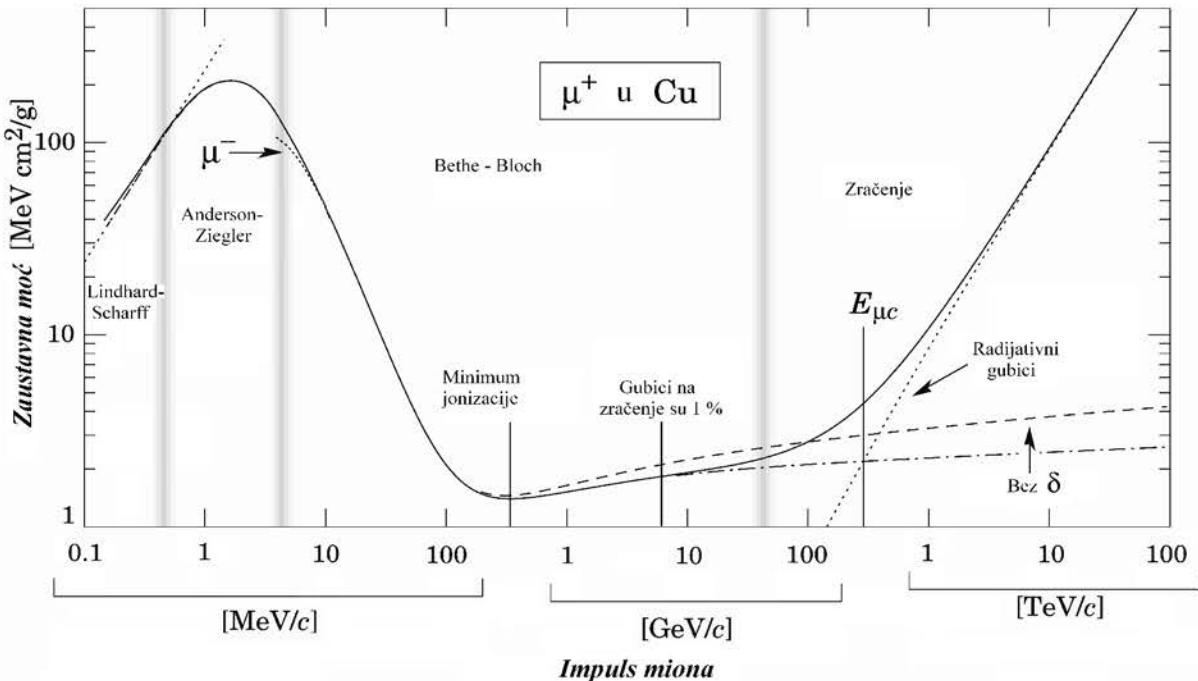
$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{uk}} = -\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{zz}} - \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{pp}} - \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ni}} - \left(\frac{dE}{dx}\right)_j \quad (7)$$

Za mione, energija od 10 MeV do 100 TeV, ukupni srednji gubitak energije je dat formulom [5]:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right) = \mathbf{a}(E) + \mathbf{b}(E) \cdot E \quad (8)$$

gde su: $\mathbf{a}(E)$ - srednji gubici energije na ionizaciju i $\mathbf{b}(E)$ - srednji gubici energije na zračenje. Oba parametra se blago menjaju sa energijom miona¹⁹. Na slici 3.8 prikazana je zavisnost srednjeg gubitka energije od energije miona.

¹⁹ Vrednosti ovih parametara za različite sredine i energije miona se mogu naći na adresi <http://pdg.lbl.gov/2009/AtomicNuclearProperties/>



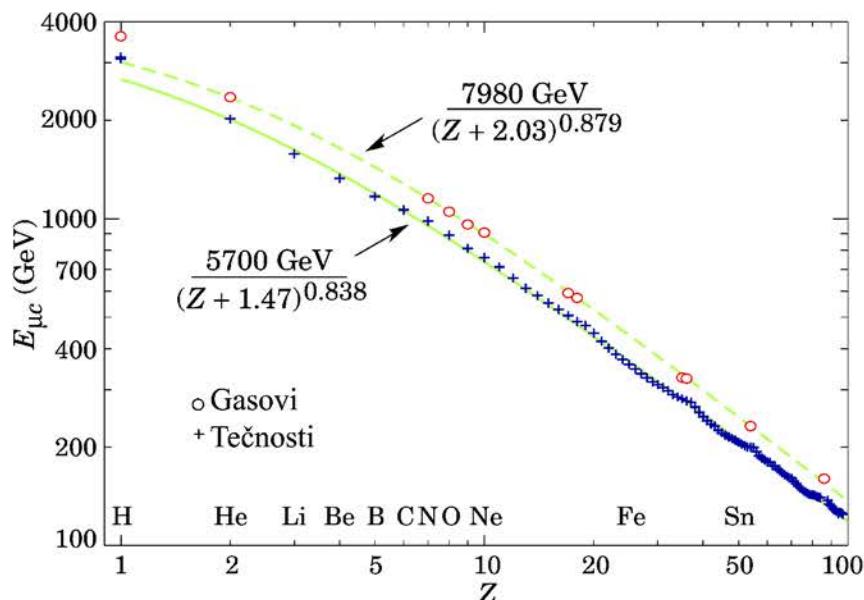
Slika 3.8 – Srednji gubitak energije antimiona u bakru u funkciji od energije antimiona. [5]

Za male energije miona gubici su proporcionalni brzini miona (prikazano isprekidanom linijom na slici 3.8), kada je $\beta \approx 0.001 - 0.01$ dominantni su nejonizacioni gubici nastali uzmakom jezgra (oblast Lindhard-Scharff). Andersen-Ziegler-ova oblast predstavlja gubitke kada je zanemareno kretanje elektrona u atomu.

Kritična energija miona se može odrediti formulom:

$$E_{\mu c} = \frac{a(E_{\mu c})}{b(E_{\mu c})} \quad (9)$$

Na slici 3.9 prikazana je zavisonst kritične energije miona od rednog broja atoma. Podaci za tečnosti i gasove su fitovani empirijskim funkcijama i daju samo približne vrednosti kritične energije miona.



Slika 3.9 – Kritična energija miona za različite hemijske elemente [43]

Kosmički mioni velikih energija mogu da prođu kroz veliki sloj zemlje. Mion energije 100 GeV ima domet 40000 g/cm^2 , što odgovara dubini od 160 m u kamenu. Eksperimentalna zavisnost atenuacije miona u apsorberima može se opisati funkcijom [24]:

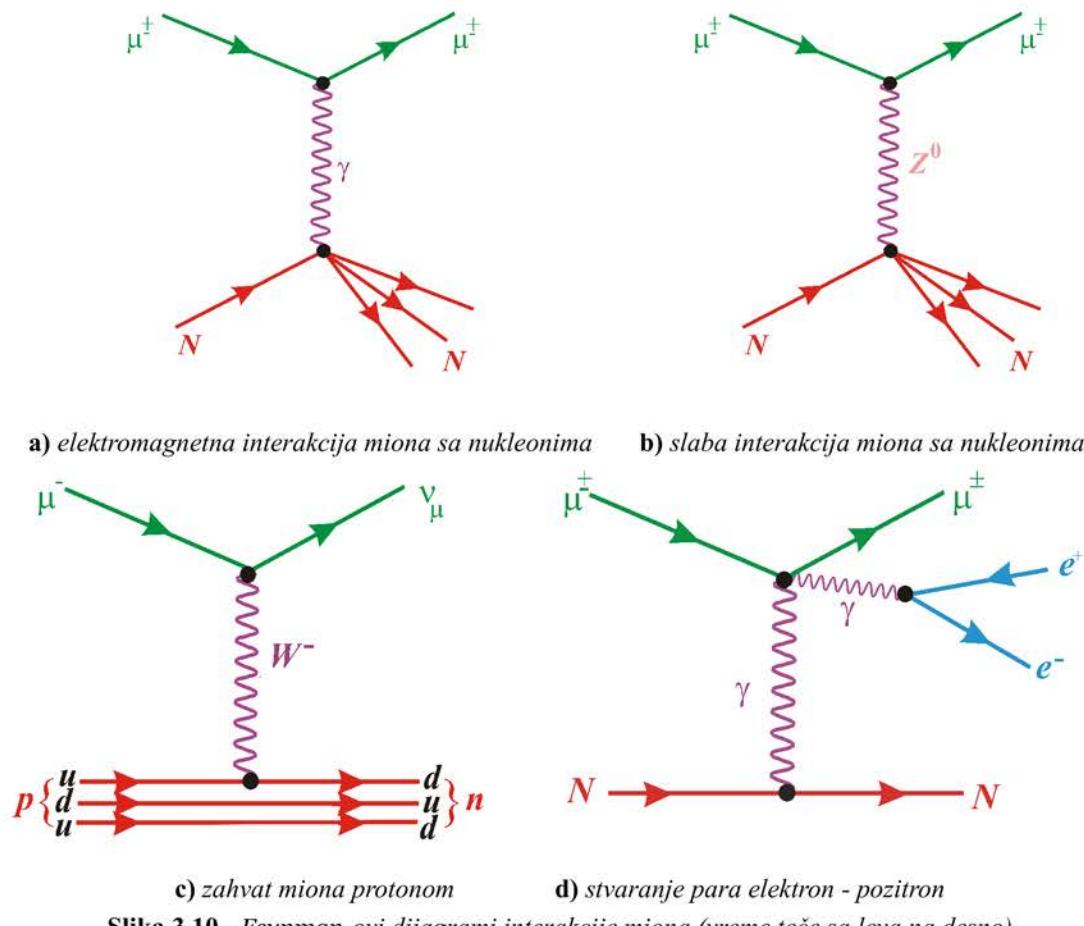
$$I = I_0 \cdot 10^{-1.32 \cdot \log d - 0.26 \cdot \log^2 d} \quad (10)$$

gde je: I – intenzitet miona ispod apsorbera, I_0 – intenzitet miona iznad apsorbera, d je određeno formulom $d = 1 + m/10$, m – debljina apsorbera u mwe. Ova jednačina opisuje fluks miona sa tačnošću od 5 % za debljine apsorbera do 100 mwe, i 10 % za debljine do 1000 mwe. Merenje atenuacije u debelim apsorberima Pb i Fe je pokazalo dobro slaganje sa jednačinom.

Kada se mioni zaustave u nekoj sredini, atomska jezgra privlače mion, pa pošto je masa miona mnogo veća od mase elektrona – mion lako dolazi na mesto elektrona u atomskom omotaču i brzo (od 10^{-13} do 10^{-14} s) prelazi na $1s$ – nivo (pri prelazima na niža energijska stanja emituje se mionsko x -zračenje). Tada su moguća dva procesa:

- ✓ zahvat protonom iz jezgra $\mu^\pm + p \rightarrow n + \nu_\mu$ ($\mu^\pm + N(Z, A) \rightarrow N(Z-1, A) + \nu_\mu$)
- ✓ raspad miona $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$

Verovatnoća zahvata zavisi od rednog broja atoma sredine (proporcionalan je četvrtom stepenu Z). Dakle, raspad je verovatniji u sredinama sa malim rednim brojem. Verovatnoća raspada jednaka je sa verovatnoćom zahvata za atom ugljenika ($Z = 6$). Nakon zahvata miona protonom, jezgro je u pobuđenom stanju, tako da otpušta neutron (broj otpuštenih neutrona zavisi od masenog broja jezgra). Proces zahvata miona protonom iz jezgra postaje značajan izvor neutrona u materijalima sa visokim rednim brojem.



Slika 3.10 - Feynman-ovi dijagrami interakcije miona (vreme teče sa leva na desno)

3.3. Interakcija miona sa atmosferom

Mioni nastaju raspadom nanelektrisanih piona na nadmorskoj visini od 15 km. Oni imaju približno isti pravac kao pioni i u proseku dobijaju 80 % njihove energije. Mioni mogu nastati i poluleptonskim raspadima šarm mezona (mezoni koji sadrže c kvark), koji imaju kratko vreme života (oko 10^{-12} s) i raspadaju se odmah nakon nastajanja, na ovaj način nastaju mioni velikih energija. Kritična energija miona u vazduhu je oko 1.11 TeV. [5] Mioni sa energijom većom od kritične, gube energiju zračenjem (stvaranje parova, zakočno zračenje ili fotonuklearna interakcija), dok je za mione sa manjom energijom od kritične dominantan proces ionizacija ili ekscitacija. Pri kretanju kroz atmosferu, svoju energiju gube uglavnom ionizacijom, i to oko 1.8 MeV po 1 g/cm^2 , što je oko 2 GeV pre nego što stignu do površine Zemlje (dubina atmosfere je oko 1030 g/cm^2). Na primer, mion energije 3 GeV ima srednji slobodan put oko 20 km, tako da on prolazi kroz atmosferu bez da se raspade ili izgubi svu svoju energiju. Na visini od 10 km (dubina od 270 g/cm^2) formirano je oko 90 % miona od ukupnog broja koji nastaje u atmosferi. Verovatnoća da će mion stići do površine Zemlje vertikalno prolazeći kroz atmosferu sa visine od 10 km je [27]:

$$P = e^{-10000/(c \cdot \tau_{LS})} \quad (11)$$

gde je: c – brzina svetlosti, τ_{LS} – srednje vreme života miona u laboratorijskom sistemu $\tau_{LS} = 2.2 \cdot 10^{-6 \cdot E/m_\mu} \text{ s}$ (E – energija miona u MeV, m_μ – masa miona u MeV).

Energijski spektar miona, na mestu njihovog nastanaka, je isti kao i spektar piona, dalje se njihov spektar prolaskom kroz atmosferu modifikuje. Ispod 1 GeV enegrijski spektar je ravan, sa povećanjem energije počinje da raste i spektar miona intervalu energija od 10 do 100 GeV je odraz spektra piona, na većim energijama spektar miona brže opada jer pioni na ovim energijama interaguju sa jezgrima iz atmosfere pre nego što se raspade. Pri kretanju kroz atmosferu, ako su izgubili dovoljno energije, mioni se raspade, pri čemu elektron odnosi oko 1/3 kinetičke energije miona dok ostatak dobijaju neutrini. Maksimalna kinetička energija koju mogu dobiti elektroni raspadom miona koji miruje je oko 50 MeV, srednja energija elektrona je 40 MeV. [27]

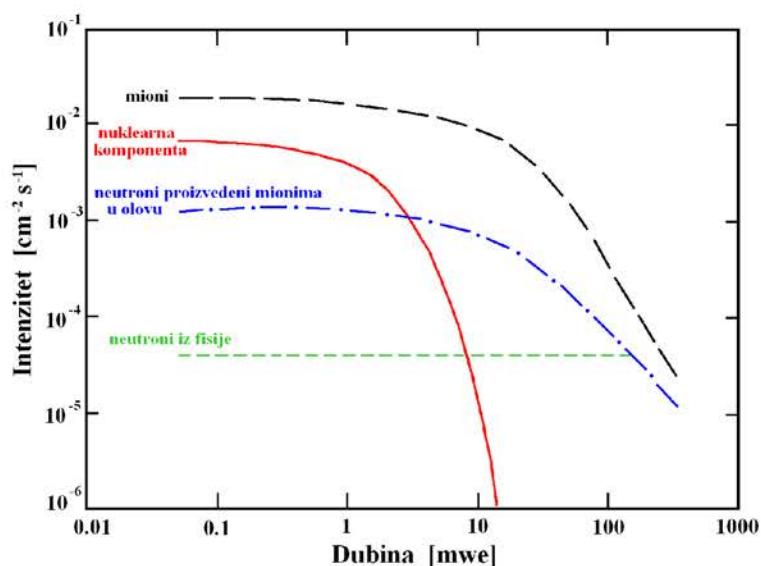
Srednja energija miona na površini Zemlje je oko 4 GeV, što znači da je na mestu nastanka miona njihova srednja energija oko 6 GeV. Srednji fluks miona na površini Zemlje je oko 1 mion svakog minuta na svaki cm^2 površine (tj. 20 % miona sa energijama 1 GeV i 80 % sa energijama 10 GeV prođe kroz atmosferu), što čini oko 80 % svih nanelektrisanih sekundarnih kosmičkih zraka koji dođu do površine Zemlje. Fluks miona na površini Zemlje tako zavisi od geografske širine, veći je na većim geografskim širinama, a manji blizu ekvatora, zbog magnetnog polja Zemlje. Fluks se menja i u zavisnosti od aktivnosti Sunca. Intenzitet miona zavisi i od ugla pod kojim se mion posmatra i proporcionalan je $\cos^2\theta$.

Osim miona, na površini Zemlje sekundarne kosmičke zrake čine i druge čestice. Neutroni čine trećinu svih jezgra koji stignu do nivoa mora. Broj protona, nakon prolaska kroz atmosferu se smanji, broj protona od 200 MeV smanji se 2000 puta, dok se broj protona energija 10 GeV smanji čak 5000 puta. Pored protona i miona, elektroni, pozitroni i fotoni čine deo fluksa sekundarnih kosmičkih zraka na površini Zemlje (deo elektrona i pozitrona potiče iz raspada miona i antimiona). Neutralni deo fluksa čine elektronski i mionski neutrino koji nastaju raspadima mezona i miona. Dakle, fluks sekundarnih kosmičkih zraka na nivou mora²⁰ je: *mioni* 1.91, *neutroni* 0.65, *elektroni* 0.46, *prononi* 0.017 i *pioni* $1.3 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

²⁰ Gaiser, 1990.

3.4. Interakcija miona sa detektorima

Na slici 3.11 prikazan je fluks miona i sekundarnih neutrona (hardonska komponenta sekundarnih kosmičkih zraka koja se sastoji 97 % od neutrona) na malim dubinama (do dubine od 100 mwe). Takođe je prikazan fluks tercijarnih neutrona koji su nastali interakcijom miona sa atomima olova u štitu detektora. U materijalima sa velikim atomskim brojem, povećana je produkcija neutrona zahvatom miona, fotonuklearnim rekcijama i prirodnom fisijom. Tercijarni neutroni su dominantni kod masivnih detektorskih štitova od olova već pri dubini od samo nekoliko mwe. [11]



Slika 3.11 – Fluks miona, neutrona i tercijarnih neutrona nastalih u detektorskom štitu od olova [11]

Dakle, mioni su dominantne čestice na svim dubinama. Atenuaciona dužina sekundarnih neutrona je oko 200 g/cm^2 , tako da njihov intenzitet brzo opada. Na slici 3.11 se uočava zavisnost broja mionima indukovanih neutrona od Z , a prikazani su i intenziteti neutrona nastalih zahvatom miona u olovu i steni. [10]

Pri elektromagnetnoj interakciji miona (uglavnom pri jonizaciji) u detektoru ostaje veliki deo energije – oko 1 do 6 MeV po g/cm^2 za germanijumske detektore. [11] Glavni procesi kojima kosmički mioni prouzrokuju fon kod detektora su elektromagnetne interakcije u štitu detektora. Pri prolasku, mioni izbacuju elektrone iz atomskog omotača (δ -elektroni) koji zakočnim zračenjem pokreću elektromagnetne pljuskove čestice. Pri zahvatu miona protonom, atomski broj jezgra se poveća za jedan, jezgro emituje γ zrake i brze neutrone čime ponovo postiže ravnotežno stanje.

Mionom indukovani fon u spektru germanijumskih detektora karakteriše dominanta anihilaciona linija (511 keV) i kontinuum do oko 200 keV. [20]

Pri interkciji miona sa germanijumskim detektorom, u spektru indukovanih mionima se mogu razlikovati sledeći regioni (počev od najmanje energije):

- ✗ karakteristični x -zraci, nastali interakcijom miona sa atomima iz štita detektora
- ✗ kontinuum zakočnog zračenja indukovani interakcijom miona sa materijalima bliskim kristalima germanijuma
- ✗ izrazita anihilaciona linija

*P. Vojtyla*²¹ je Monte Carlo simulacijum u programu GEANT odredio spektar mionima indukovanih fona u germanijumskim detektorima. Ovi proračuni dali su uvid u procese koji prouzrokuju fon u spektrima germanijumskih detektora. Određeni su relativni doprinosi različitih mehanizama interakcije miona, i njihove vrednosti su date u tabeli 3.2. [24], [27]

Tabela 3.2 – Vrednosti relativnih doprinosa mionima indukovanih procesa koji stvaraju fon kod germanijumskih detektora

Mehanizam interakcije	Kontinuum (50 – 2700 keV) [%]	Linija 511 keV [%]
Direktno	2.5	
δ -elektroni	81.2	72.8
Proizvodnja para	10.0	17.2
Raspad miona	4.0	7.1
Zakočno zračenje	2.3	2.9

Za mione sa energijom manjom od 700 MeV fonu najviše doprinosi raspad miona. Doprinos δ -elektronima postaje dominantan na energijama miona od 1.7 GeV. Iznad 70 GeV dominira proces proizvodnje para elektron – pozitron. Anihilaciona linija potiče od rekombinacije pozitrona nastalih elektromagnetnim pljuskovima i elekrona, tako da intenzitet ove linije zavisi i od zaštitnih slojeva detektora. Intenzitetu anihilacione linije doprinose i zaustavljeni antimioni koji se raspadaju na pozitron i dva neutrina (doprinos je od 10 do 30 %, u zavisnosti od sredine).

Pri interakciji neutrona sa germanijumom može doći do zahvata termalnih neutrona (n,γ) ili neelastičnog rasejanja brzih neutrona (n,n'). Kod zahvata termalnih neutrona mogu se razlikovati reakcije koje dovode do kratkoživećih metastabilnih stanja jezgra ili do pobuđenih stanja jezgra sa dužim srednjim životom (duži od 1 dana). Neelastičnim rasejanjem brzih neutrona jezgra se pobuđuju, što prouzrokuje emisiju jednog ili više fotona pri čemu se jezgro vraća u osnovno stanje. Neutroni interagiraju sa svim izotopima germanijuma. Linije koje nastaju u spektru fona date su u tabeli 3.3. Koje konkretnе linije će se javiti u spektru zavisi od štita i od materijala unutar štita. [10], [17],[24], [27]

21 P. Vojtyla *A computer simulation of the cosmic-muon background induction in a Ge γ -spectrometer using GEANT Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **100**(87-96) 1995.

Tabela 3.3 – Neutronima indukovane linije u germanijumskom detektoru
[9], [10], [13], [17], [24], [27]

Energija [keV]	Izotop ²²	Poluživot [s]	Proces
10.37	^{68, 71} Ge	$9.8 \cdot 10^5, 2.3 \cdot 10^7$	⁷⁰ Ge(n, γ) ⁷¹ Ge, ⁷⁰ Ge(n,3n) ⁶⁸ Ge
13.26	^{73m} Ge	0.5	⁷² Ge(n, γ) ^{73m} Ge, ⁷⁴ Ge(n,2n) ^{73m} Ge
23.5	^{71m} Ge	promptna	⁷⁰ Ge(n, γ) ^{71m} Ge, ⁷² Ge(n,2n) ^{71m} Ge
53.4	^{73m} Ge	0.5	⁷² Ge(n, γ) ^{73m} Ge, ⁷⁴ Ge(n,2n) ^{73m} Ge
66.7 ²³	^{73m} Ge	0.5	⁷² Ge(n, γ) ^{73m} Ge, ⁷⁴ Ge(n,2n) ^{73m} Ge
68.7 ^a	^{73*} Ge	promptna	⁷³ Ge(n,n') ⁷³ Ge
139.7	^{75m} Ge	47.7	⁷⁴ Ge(n, γ) ^{75m} Ge, ⁷⁶ Ge(n,2n) ^{75m} Ge
159.7	^{77m} Ge	52.9	⁷⁶ Ge(n, γ) ^{77m} Ge
174.9	^{71m} Ge	$73 \cdot 10^{-9}$	⁷⁰ Ge(n, γ) ^{71m} Ge, ⁷² Ge(n,2n) ^{71m} Ge
198.4 ²⁴	^{71m} Ge	$21.9 \cdot 10^{-3}$	⁷⁰ Ge(n, γ) ^{71m} Ge, ⁷² Ge(n,2n) ^{71m} Ge
500.2	⁷³ Ge	promptna	⁷² Ge(n, γ) ⁷³ Ge
562.9 ^a	^{76*} Ge	promptna	⁷⁶ Ge(n,n') ⁷⁶ Ge
595.9 ^a	^{74*} Ge	promptna	⁷³ Ge(n, γ) ⁷⁴ Ge, ⁷⁴ Ge(n,n') ⁷⁴ Ge
691.0 ^{a 25}	^{72*} Ge	promptna	⁷² Ge(n,n') ⁷² Ge
833.95 ^a	^{72*} Ge	promptna	⁷² Ge(n,n') ⁷² Ge
868.1	⁷³ Ge	promptna	⁷² Ge(n, γ) ⁷³ Ge
1039.5 ^a	⁷⁰ Ge	promptna	⁷⁰ Ge(n,n') ⁷⁰ Ge
1204.1 ^a	⁷⁴ Ge	promptna	⁷⁴ Ge(n,n') ⁷⁴ Ge

Oznaka ^a u koloni energija ukazuje na asimimetričnost linije (sa desne strane) zbog uzmaka jezgra germanijuma nakon neelastičnog rasejanja brzih neutrona.

Najintezivnije linije na 139.7 keV i 198.4 keV, mogu dostići vrednost od 200 odbroja dnevno za germanijumske detektore od 1 kg. Asimimetrične linije na 595.9 keV i 691 keV mogu dostići integralni intenzitet do 500 odbroja dnevno (za germanijumske detektore od 1 kg). [9]

²² Oznaka *m* u izotopu predstavlja različito izomerno stanje jednog izotopa (izomeri istog izotopa se razlikuju po periodu poluživota). Razlika u izomerima postoji zato što se protoni i neutroni u jezgru mogu grupisati na više načina.

²³ Ova linija može da nastane kao suma pikova energija 13.26 keV i 53.4 keV i samostalno (pošto sve linije nastaju u germanijumskom detektoru verovatnoća za sumiranje je 100 %).

²⁴ Ova linija može da nastane kao suma pikova energija 23.5 keV i 174 keV i samostalno (pošto sve linije nastaju u germanijumskom detektoru verovatnoća za sumiranje je 100 %).

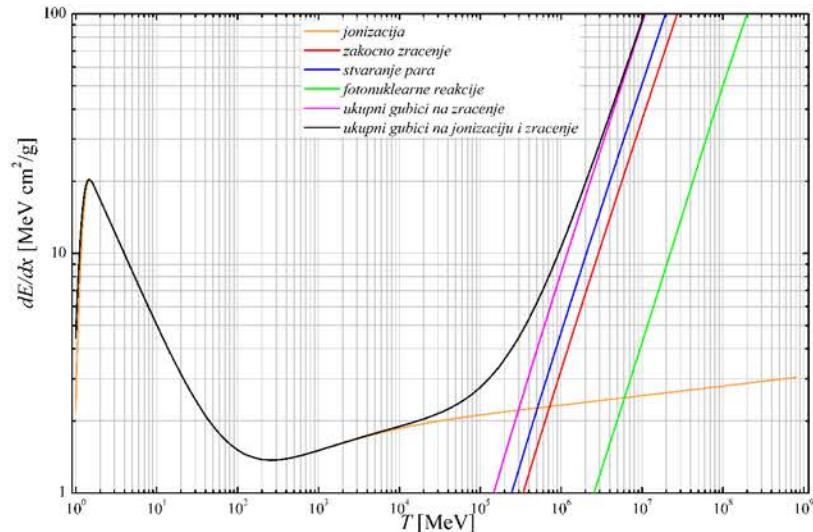
²⁵ Linija je nastala pri prelazu $0^+ - 0^+$ (intererna konverzija, pošto su prelazi između električnih monopola strogo zabranjeni). Asimetrija ove linije se javlja zbog nepotpune transformacije energije uzmaka jezgra koja se odvija u germanijumu (tj. energija deekscitovanog fotona se sabira sa energijom jonizujućeg uzmaknutog jezgra u detektoru).

Pri neelastičnom rasejanju brzih neutrona na jezgru germanijuma, dolazi do uzmaka jezgra sa kinetičkom energijom koja je kontinualno raspodeljena od nulte do maksimalne [24]:

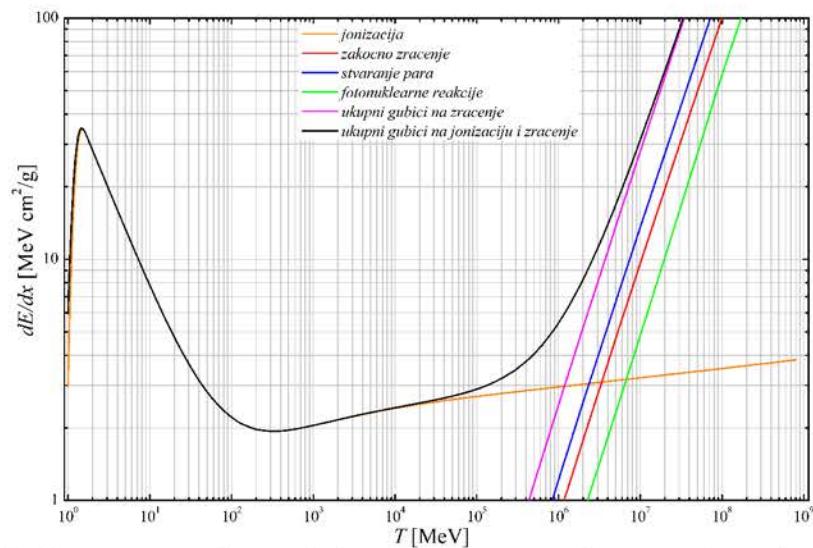
$$\frac{E_{\max}}{E_n} = 1 - \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2 \quad (12)$$

gde je: E_n – energija neutrona pre rasejanja, a A – maseni broj jezgra. Vrh ovako nastale linije je proširen zbog uzmaka jezgra i zato što kosmički neutroni (nastali evaporacijom visokopobuđenih jezgara) imaju kontinualnu raspodelu energije sa maksimumom na oko 0.6 MeV koja se proteže do nekoliko MeV. Nakon rasejanja, jezgro je u pobuđenom stanju zbog čega se deekscituje emitovanjem fotona. Dakle, linije koje nastaju neelastičnim rasejanjem brzih neutrona su proširene, imaju blaži nagib na višoj energiji. Nagib linije na nižoj energiji (pre vrha) odgovara deekscitaciji jezgra, dok je nagib na višim energijama (posle vrha) okarakterisan uzmakom jezgra – energija uzmaka jezgra deponuje se u detektoru pre nego što se nanelektrisanje nastalo deekscitacijom prikupi električnim poljem. Pikovi izomernih stanja nisu prošireni jer se deekscituju sa dovoljnim kašnjenjem u odnosu na deponovanje energije uzmaka jezgra. [17],[24]

Na slikama 3.12 i 3.13 prikazani su srednji energijski gubici pri prolazu miona kroz germanijum i polistiren u funkciji od energije miona. [5]



Slika 3.12 – Grafik zavisnosti srednjeg gubitka energije miona u germaniju od kinetičke energije miona



Slika 3.13 – Grafik zavisnosti srednjeg gubitka energije miona u polistirenenu od kinetičke energije miona

IV Detektorski sistem

Šta će fizičar uraditi kada bi bio zamoljen da prouči duhove i telepatiju? Mogu se pretpostaviti njegovi postupci:

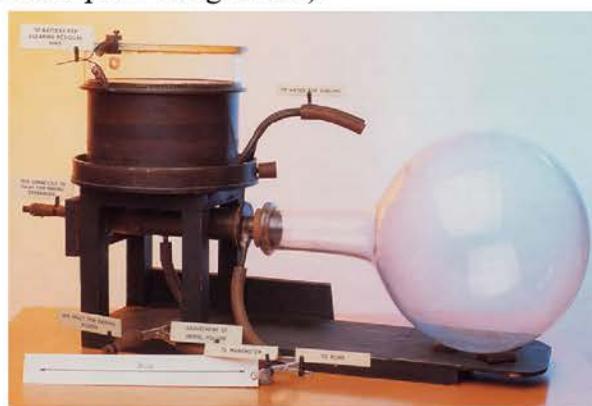
- ✓ verovatno će ove pojave potražiti u literaturi
- ✓ pokušaće da konstruiše neki instrument kojim bi dokazao postojanje ovih pojava

Prvi korak je prilično nepouzdan pa rezultati mogu biti daleko od istine. Dok je drugi korak od suštinske važnosti. Bez instrumenta za detekciju, koji omogućava kvantifikovanje posmatrane pojave, otkriće duhova neće biti prihvaćeno od strane *Physical Review Letters*²⁶. Dakle, **detektori** su omogućili napredak i razvoj nuklearne fizike i fizike čestica.²⁷

U suštini, prvi instrumenti za detekciju zračenja bile su *fotografske emulzije* (ploče), pomoću kojih je *W. C. Röntgen* 1895. godine otkrio x-zrake. *Spintariskop* – prvi scintilacioni detektor koji je 1903. godine *W. Crookes* konstruisao, detektovao je scintilacije α -čestica na cink-sulfidu. Najveći pomak u razvoju detektora čestica bila je *maglena komora*. Prvi detektor tragova koji je vizualizovao apstraktan mikrosvet konstruisao je *S. T. R. Wilson* 1912. godine sasvim slučajno. Ovaj škotski fizičar, zaiteresovan za meteorologiju, 1893. godine posmatrao je formacije oblaka na planini Ben Nevis, pa je konstruisanjem komore za veštačke oblake otkrio i njenu dodatnu primenu – detekciju čestica. Naime, pri prolazu čestica kroz prezasićenu paru neke tečnosti, one postaju centri za kondenzaciju i nastaje trag čestice sastavljen od sitnih kapi koje su se formirale oko jona koje je ta čestica ostavila za sobom. *Wilson* je za ovo otkriće 1927. godine podelio *Nobelovu nagradu* sa *A. H. Compton* (za otkriće *Compton-ovog efekta*).



Slika 4.1 – Crookes-ovi originalni spintraiskop [35]



Slika 4.2 – Wilson-ova maglena komora [34]

26 <http://publish.aps.org>

27 Odlomak iz knjige [8]

Dalji razvoj detektora promenio je svoj tok. Zapravo promjenjen je način dobijanja informacija nakon detekcije čestice – sa optičkih merenja prešlo se na elektronske. Tako dobijene informacije o čestici bile su preciznije. U međuvremenu, detektori su našli primenu i u medicini, biologiji, arheologiji i mnogim drugim naukama.

Detektori predstavljaju uređaje koji identikuju čestice ili zračenje. Pored toga što pokazuju da li postoji zračenje ili čestica, detektorski sistemi daju informaciju o osobinama čestice na osnovu njene interakcije. Detektor treba da utvrdi:

- ✗ postojanje čestice (da li je prošla kroz detektor)
- ✗ osnovne osobine čestice (masa, naelektrisanje) – mogu se dobiti iz zakrivljenosti putanje ili vremena prolaska kroz detektor...
- ✗ spektrometrija – određivanje deponovane energije čestice u detektoru
- ✗ vremensku zavisnost događaja u detektoru
- ✗ i rekonstruiše putanje čestica

Osnovne karakteristike detektora su: efikasnost, energijska rezolucija, vremenska rezolucija, efikasna zapremina, osetljivost.

Različiti materijali u detektorskem sistemu omogućavaju identifikaciju čestice na osnovu njihove interakcije, tj. različite čestice se zaustavljaju u drugačijim materijalima:



Slika 4.3 – Tragovi čestica u detektorima [33]

- ako je energija deponovana samo u elektromagnetnom kalorimetru bez vidljivog traga (u detektoru tragova), radi se o neutralnoj čestici, a ako se tu i zaustavila, reč je o *fotonu*
- ako je energija deponovana u elektromagnetnom kalorimetru sa trgom, u pitanju je nanelektrisana čestica, a ako se čestica zaustavlja u njemu, na osnovu skretanja u magnetnom polju može se utvrditi da li je *elektron* ili *pozitron*
- ako je energija deponovana u hadronskom kalorimetru, radi se o čestici koja proizvodi kvarkove, na osnovu skretanja u magnetnom polju utvrđuje se njeno nanelektrisanje ako postoji vidljiv trag u detektoru, za neutralne hadrone nema traga, čestica je *hadron*
- ako postoji vidljiv trag čestice, a energija nije deponovana, reč je o *mionima* koji slabo interaguju sa materijom
- *neutrini* jako slabo interaguju, pa se za njihovu detekciju, u ovom slučaju koristi zakon održanja energije

U zavisnosti od vrste čestice i informacije koja je potrebna o čestici koristi se drugačija vrsta detektora:

- *nanelektrisane čestice*: gasni detektori (jonizaciona komora, *Geiger-Müller*-ov brojač, multižičana komora), scintilacioni detektori, poluprovodnički detektori, Čerenkovljev detektor...
 - *neutralne čestice*:
 - ~ *fotoni* – scintilacioni detektori, germanijumski poluprovodnički detektor
 - ~ *neutroni* – tečni scintilatori
 - ~ *neutrini* – Čerenkovljev detektor, nuklearne reakcije (zakoni održanja energije)
- Detaljnije će biti objašnjeni scintilacioni i poluprovodnički detektor.

4.1. Scintilacioni detektori

Scintilacioni detektori su jedni od najstarijih i najviše koriščenih detektora čestica. Prvi scintilacioni detektor je atmosfera – detektuje brze elektrone (polarna svetlost). U početku svetlost je posmatrana golinom okom (smatra se da prilagođeno oko može da uoči oko 15 fotona kao jedan bljesak svetlosti, ako su oni emitovani u desetini sekunde i ako se njihova talasna dužina poklapa sa maksimumom osetljivosti oka [7]), tako da su zbog male vidljivosti ovi detektori neko vreme bili zaboravljeni. 1948. godine otkriveno je da kristali natrijum-jodida, koji su dobri scintilatori, mogu da narastu do velikih dimenzija, pa su ovi kristali u kombinaciji sa fotomultiplikatorima naišli na veliku primenu. Prvi elektronski scintilacioni detektor razvili su *S. Curran i W. Baker* za vreme II Svetskog Rata u okviru Menhatan projekta.²⁸

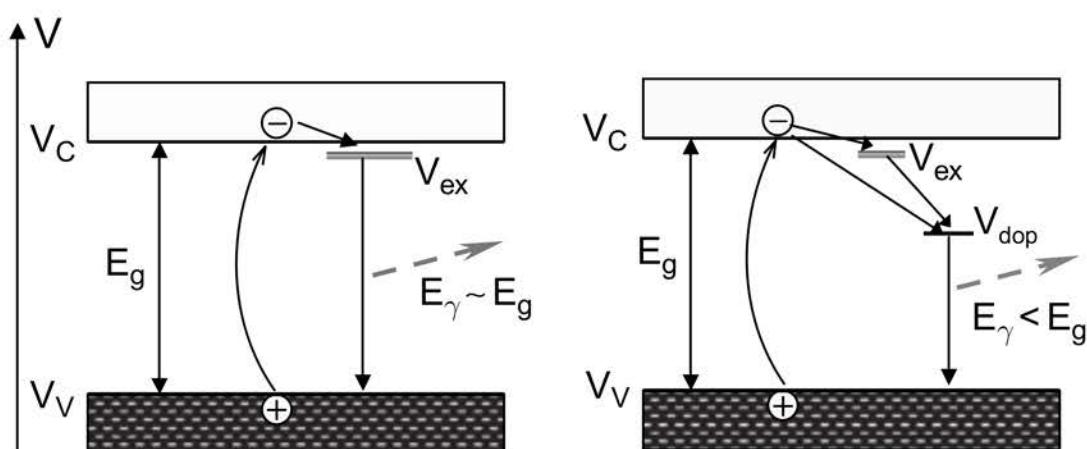
Scintilatori predstavljaju materijale koji deo deponovane energije, nastale nakon prolaska nanelektrisane čestice ili zračenja, emituju u vidljivom delu spektra (ova pojava se naziva luminescencija). Scintilacije se, prema vremenu nakon kojeg nastaju, mogu podeliti na: *fluorescenciju* (svetlost se emituje vrlo brzo nakon prolaska nanelektrisane čestice 10^{-9} – 10^{-6} s) i *fosforescenciju* (vreme emisije je duže, veće od 10^{-6} s, jer pobuđeni atomi ili molekuli ostaju u metastabilnom stanju, emitovana svetlost je veće talasne dužine u poređenju sa fluorescencijom). [23] Za detekciju čestica koristi se samo fluorescencija. Intenzitet svetlosti koju scintilator emituje opada eksponencijalno sa vremenom. Jedan od problema je bila činjenica da je talasna dužina apsorbovane svetlosti jednak talasnoj dužini emitovane, što je rešeno pronalaskom materijala koji su transparentni za sopstvenu svetlost.

Scintilatori mogu biti:

- ◆ **organski scintilatori:** aromatična jedinjenja ugljovodonika sa benzenom. Pri pobuđivanju molekula u više elektronsko stanje, deo energije se troši na prelaze između rotacionih i vibracionih nivoa (vibraciona energija se troši pri sudarima sa drugim molekulima), tako da je emitovana energija fotona manja od deponovane, tj. svetlost je veće talasne dužine (tako da scintilator ne mora da bude transparentan za sopstveno zračenje). Emitovana svetlost pripada obično plavom i zelenom delu spektra.
 - **kristali** – najpoznatiji su: antracen, stilben, naftalin, imaju kratko vreme gorenja (oko ns), ali lošu energijsku rezoluciju, tako da se praktično ne koriste u fizici visokih energija;
 - **tečnosti** – scintilacioni materijali rastvoreni u organskim tečnostima, razlikuju se po načinu apsorpcije energije (energiju prvo apsorbuje rastvarač, koja se zatim prenosi na rastvorenju supstancu), mogu se praviti scintilatori raznih oblika i zapremine;
 - **plastici** – su rastvori organskih scintilatora u čvrstoj prozirnoj plastici, najrasprostaranjeniji je terfenil u polistirenu. Mehanizam apsorpcije energije je isti kao kod tečnih scintilatora. Karakteriše ih kratko vreme gorenja (2-3 ns) i visok svetlosni odziv (oko 1 foton na 100 eV deponovane energije). Imaju veliku primenu jer su fleksibilni i lako se oblikuju (cilindri, šipke, vlakna, tanki filmovi, ploče...).

²⁸ Njihov rad je objavljen četiri godine kasnije, tek 1948. godine, tako da se zasluge za ovo otkriće često pripisuju drugima. [32]

- **neorgnaski kristali** – monokristali alkalnih halogenida sa nekim primesama ($NaI(Tl)$). Primeši ili aktivatori se dodaju u malom procentu (oko 0.1 %) da bi stvorili luminescentne centre kako bi kristali postali transparentni za emitovanu svetlost. Kretanje nanelektrisane čestice (ili zračenja) kroz kristal (ako ima dovoljno energije) može da eksituje elektron iz valentne u provodnu zonu, ostavljajući šupljinu u provodnoj zoni; a ako energija nije dovoljna elektron ne stiže do provodne zone već formira vezano stanje sa šupljinom – eksiton (nalazi se nešto ispod provodne zone). Eksiton mogu slobodno da se kreću kroz kristal i posle nekog vremena mogu da se deeksituju sudarom ili rekombinuju emitovanjem fotona. Verovatnoća za rekombinaciju eksitona i emisiju fotona na sobnoj temperaturi je mala (postaje značajna tek na niskim temperaturama), zato se kristal dopira aktivacionim centrima koji stvaraju energijske nivoe u zabranjenoj zoni tako da se verovatnoća za emitovanje fotona (scintilacija) povećava (slika 4.4).

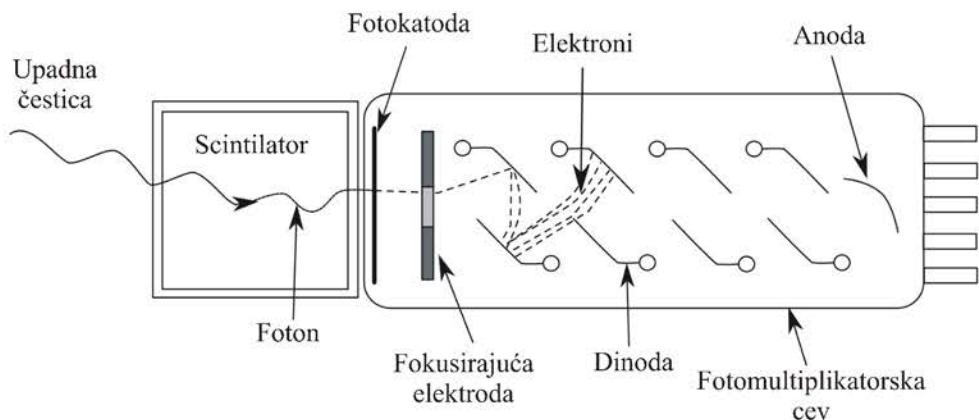


Slika 4.4 – Energijski nivoi u čistom i dopiranom kristalu
 $(V_c$ – provodna zona, V_v – valentna zona, V_{dop} – dopiran nivo,
 V_{ex} – nivo na kojem se formira eksiton, E_g – širina zabranjene zone,
 E_γ – energija emitovanog fotona) [7]

Emitovani foton ima manju energiju (veću talasnu dužinu) kod kristala sa aktivacionim centrima nego kod nedopiranih kristala. Maksimalni intenzitet emitovane i apsorbovane svetlosti za čist kristal NaI je na 303 nm, dok dopirani kristal $NaI(Tl)$ ima maksimum na 410 nm. Dodatkom aktivatora kristal postaje transparentan za scintilacije. Neorganski kristali se odlikuju velikom gustinom, dobrom enegrijskom rezolucijom i velikim svetlosnim prinosom, ali i dužim vremenom gorenja. Najveća mana je što su higroskopni.

- **gasoviti scintilatori** – uglavnom plemeniti gasovi (ksenon, kripton, argon i helijum) i azot. Scintilacije nastaju deeksitacijom pobuđenih atoma formiranih prolaskom nanelektrisane čestice. Vreme gorenja je kratko (oko 1 ns). Emitovana svetlost je obično u ultraljubičastom delu spektra, međutim fotomultiplikatori nisu efikasni za ovo zračenje, pa se zidovi detektoru premazuju supstancom koja pomera talasnu dužinu emitovane svetlosti u plavo – zeleni deo. Ovi scintilatori se koriste za detekciju teških nanelektrisanih čestica.
- **stakla** – najčešće su to silikati litijuma ili bora koji se aktiviraju cerijumom. Koriste se prvenstveno za detekciju neutrona, ali i β i γ zraka. Otporni su na spoljašnje uslove, vreme gorenja je oko desetak ns.

Scintilacioni detektor se sastoji od scintilatora, fotomultiplikatora, pojačavača i drugih elektronskih uređaja koji se koriste za obradu izlaznog signala.



Slika 4.5 – Šematski prikaz scintilacionog detektora [40]

Intenzitet svetlosti koju scintilator emituje opada eksponencijalno sa vremenom. Fotomultiplikator je elektronska cev koja pojačava svetlosne signale iz scintilatora i prevodi ih u električne. Scintilacije dolaze do fotokatode iz koje izlaze elektroni koji se dalje ubrzavaju i umnožavaju sistemom dinoda, tako da do anode dođe mnogo veći broj elektrona odnosno izlazni signal je pojačan. Izlazni signal se dalje dovodi na sistem elektronskih uređaja koji ga analiziraju. Visina signala je proporcionalna deponovanoj energiji u scintilatoru. Scintilacioni detektori se koriste za detektovanje elektrona, γ zraka i neutrona, dok nisu pogodni za detekciju teških nanelektrisanih čestica.

Prednosti scintilacionih detektora:

- ✓ visoka efikasnost pri konverziji deponovene energije u emitovanu svetlost (konverziona efikasnost)
- ✓ proporcionalnost luminescentnog zračenja i deponovane energije
- ✓ transparentnost materijala za sopstveno zračenje
- ✓ talasna dužina emitovane svetlosti mora da odgovara maksimumu spektralne osetljivosti fotomultiplikatora
- ✓ kratko vreme trajanja svetlosnog impulsa nakon detekcije čestice ili zračenja (vreme gorenja)

4.2. Poluprovodnički detektori

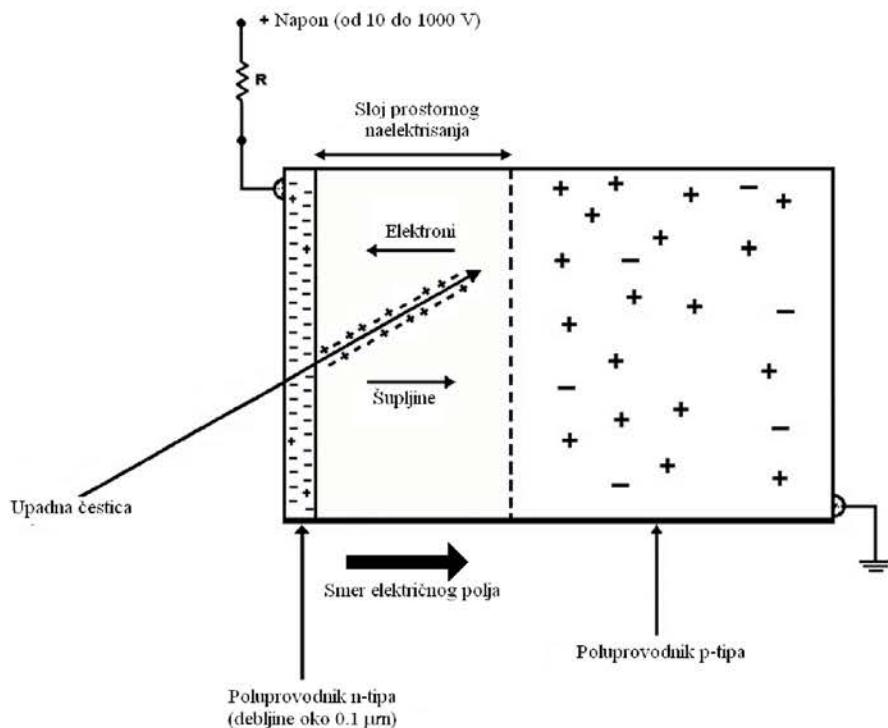
Scintilacioni detektori su pokrenuli revoluciju u detekciji zračenja i čestica. Otkriće da poluprovodnički kristali (dijamant, cink-sulfid, srebro-hlorid...) menjaju svoje karakteristike (npr. provodljivost) pri prolazu nanelektrisane čestice koja je jonizovala okolinu, dovelo je do ideje da se ova osobina poluprovodnika može iskoristiti za detekciju čestica. Prvi takav detektor (sa germanijumom) konstruisao je K. G. McKay 1949. godine. [31] Poluprovodnički detektori su bili prvi koji su imali visoku energijsku rezoluciju, tako da su ubrzo našli primenu za detekciju nanelektrisanih čestica i γ zračenja.

Poluprovodnici su materijali čija je širina zabranjene zone reda veličine oko 1 eV. Inače širina zabranjene zone kod izolatora je veća od 3 eV, dok se kod provodnika valentna i provodna zona preklapaju. U poluprovodnike spadaju elementi IV grupe Periodnog sistema (silicijum, germanijum, sivi kalaj) i jedinjenja elemenata III i V grupe Periodnog sistema (galijum-arsenid, indijum-fosfid...) Na apsolutnoj nuli svi elektroni poluprovodnika su vezani kovalentnim vezama i popunjavaju valentnu zonu (na niskim temperaturama poluprovodnik se ponaša kao izolator). Sa povećanjem temperature, termalna energija elektrona raste, pa neki elektroni dobijaju dovoljno energije da se oslobole kovalentne veze i da pređu u provodnu zonu, dok u valentnoj zoni ostaje šupljina. Kod poluprovodnika provođenje struje vrše elektroni krećući se kroz provodnu zonu i šupljine koje se kreću kroz valentnu zonu, što znatno poboljšava njihove provodne osobine. Na 300 K samo 1 u 10^9 atoma germanijuma je ionizovan, što ukazuje na malu provodljivost. Par elektron – šupljina može nastati i pod uticajem spoljašnjeg ionizujućeg zračenja, ili jakog električnog polja...

Električne osobine poluprovodnika menjaju se promenom koncentracije slobodnih nosilaca nanelektrisanja, što se postiže zamenom nekih atoma čistog poluprovodnika atomima drugih elemenata, tako se dobijaju *primesni poluprovodnici*. Ako su primese atomi V grupe Periodnog sistema, dobijaju se poluprovodnici n-tipa, kod kojih je peti elektron slobodan od hemijskih veza. Da bi ovaj elektron prešao u provodni zonu potrebno mu je jako malo energije (0.01 eV u germanijumu, 0.05 eV u silicijumu), što znači da se u zabranjenoj zoni formira *donorski nivo* koji je blizu provodne zone. Tako da se već na temperaturama oko 200 K može smatrati da su svi atomi primesa ostali bez petog elektrona, čime je provodljivost znatno poboljšana. Ukoliko su primese atomi III grupe Periodnog sistema, nastaju poluprovodnici p-tipa, kod kojih se *akceptorski nivo* formira nešto iznad vrha valentne zone.

Spajanjem dva poluprovodnika, p- i n-tipa, dobija se pn spoj (dioda). Zbog razlike u koncentraciji slobodnih nosilaca nanelektrisanja, elektroni iz n dela prelaze u p deo, dok se šupljine kreću u suprotnom smeru. Rekombinacijom elektrona i šupljina stvara se sloj prostornog nanelektrisanja koji se formira u oblasti između ova dva tipa poluprovodnika, n deo postaje pozitivno nanelektrisan, dok p deo negativno. Formiranje električnog polja sprečava dalju difuziju elektrona i šupljina, odnosno stvara se kontaktni potencijal (reda veličine oko 1 V). Razdvajanje nanelektrisanja je bolje ako se poveća sloj prostornog nanelektrisanja, što se postiže inverznom polarizacijom pn spoja (na p deo se doveđe negativan potencijal, a na n pozitivan), tada se može smatrati da kroz njega ne prolazi struja (saturaciona struja je rada veličine nA ili pA). Sada, pri prolazu neke čestice kroz sloj prostornog nanelektrisanja, nastaju elektroni i šupljine koji se usmeravaju na odgovarajuće elektrode, pa se promenom napona može odrediti energija upadne čestice.

Poluprovodnički detektor prikazan je na slici 4.6:



Slika 4.6 – Šematski prikaz poluprovodničkog detektora [30]

Najveća prednost poluprovodničkih detektora je mala energija za stvaranje para elektron – šupljina (oko 3 eV), što je oko 10 puta manje nego kod gasnih detektora. Dakle, ista čestica će stvoriti za red veličine više parova pri kretanju kroz poluprovodnički detektor, u odnosu na gasni. Samim tim je mnogo bolje definisan i nastali impuls. Još jedna prednost u odnosu na gasne detektore je mnogo veća gustina poluprovodničkih detektora, tako da su veći i gubici energije upadne čestice. Za nanelektrisane čestice efikasnost ovih detektora može biti i 100 %. Od poluprovodničkih detektora najviše se koriste:

- ▶ *silicijumski detektori* – koriste se u detekciji nanelektrisanih čestica, mogu da rade na sobnoj temperaturi, nedostatak je što su malih dimenzija
- ▶ *germanijumski detektori* – koriste se za detekciju γ – zraka (veći atomski broj i presek za fotoefekat je oko 60 puta veći u odnosu na silicijum), imaju veliku efikasnost, nedostatak je što radi na niskim temperaturama (oko 77 K). Oko 1980. godine razvijene su metode za dobijanje kristala germanijuma velike čistoće (koncentracija nečistoća je oko 10^{10} atoma/cm³), njihovom primenom dobijeni su HP Ge (*High-Purity Germanium crystals*) detektori kojima je hlađenje potrebno samo za vreme rada.

4.3. Fon kod detektora

Za spektrometriju niskih aktivnosti bitno je identifikovati izvore fona i njihov uticaj na detektor. Osnovni *izvori fona* su: radioaktivna kontaminacija okoline oko detektora, radionečistoće u detektoru i materijalu štita, radon i njegovi potomci, kosmičko zračenje, neutroni nastali prirodnim fisionim reakcijama. [11] Količina radionečistoća pri konstrukciji detektora je presudna za određivanje stepena poboljšanja koje se može postići za redukciju ostalih komponenti. Uticaj kosmičkih zraka varira u zavisnosti od nadmorske visine mesta detekcije, pa se za spektrometriju niskih aktivnosti uglavnom koriste podzemne laboratorije.

Za niskofonske eksperimente značajni su samo mioni i neutroni. Elektroni, fotoni, kao i protoni apsorbuju se štitom od olova oko detektora ili plafonskim slojevima iznad zaštite detektora. Sa zaštitom od 10 cm Pb više od 99 % spoljašnjeg sekundarnog zračenja je apsorbovano, ali ono će se nadoknaditi novim zračenjem proizvedenim u štitu. [24] Međutim, protoni i nanelektrisani pioni doprinose nastajanju kosmogenih radionuklida u prvih nekoliko desetina g/cm^2 materijala. [11]

Smanjivanje fona može se postići na nekoliko načina [24], [27]:

- ✗ **debelim pokrovnim slojem** – apsorbuje se veći deo kosmičkih protona i smanjuje fluks miona za 10 do 15 % (tipična betonska tavanica je debljine oko 0.50 mwe), spadaju podzemne laboratorije koje se nalaze duboko ispod površine zemlje.
- ✗ **zaštitnim detektorima (aktivna zaštita)** – glavni detektor se okružuje nizom zaštitnih detektora čija je svrha da detektuju čestice iz spoljašnje okoline (99 % detekcije za kosmičke mione), kada čestica prođe kroz glavni i zaštitni detektor ona pripada fonu, dok čestice iz uzorka prolaze samo kroz glavni detektor. Glavni i zaštitni detektor (koji se naziva i veto ili antikosmički detektor) su vezani antikoincidentno, tj. kada čestica prođe kroz oba detektora taj signal se ne registruje. Ovu tehniku je izumeo W. F. Libby 1947. godine dok je razvijao radiokarbonsku metodu datiranja (za koju je 1960. godine dobio Nobelovu nagradu za hemiju). Efikasnost zaštitnih detektora je 100 % za kosmičke mione i protone.

Spektar fona kod germanijumskih detektora u laboratorijama na površini potiče od [27]:

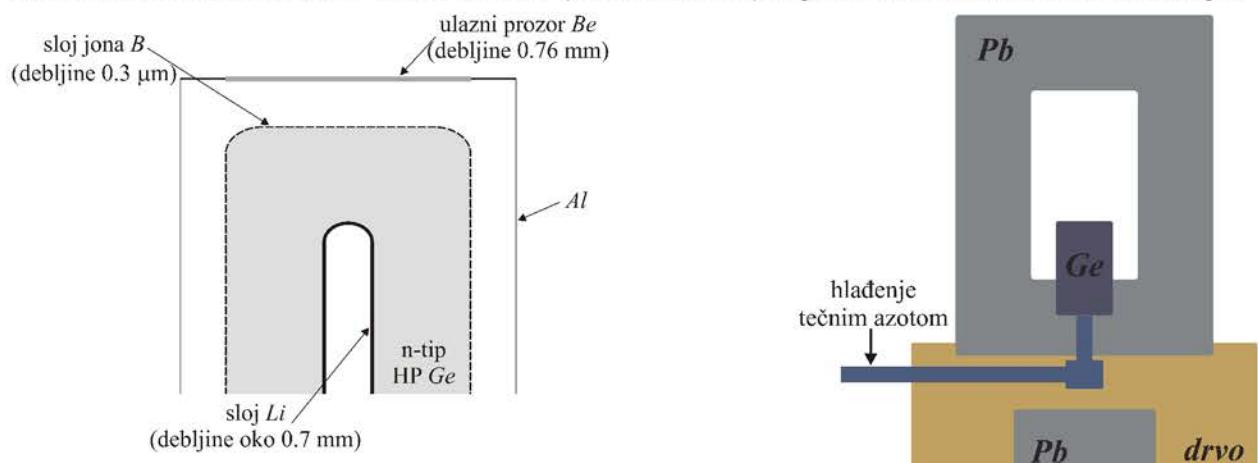
- neutrona koji interaguju sa atomima germanijuma,
- miona i protona koji prouzrokuju nastajanje pozitrona koji pri rekombinaciji sa elektronima stvaraju anihilacioni vrh na 511 keV,
- miona i protona koji prouzrokuju nastajanje sekundarnih elektrona i fotona koji stvaraju kontinuum.

V Opis eksperimenta

Ovaj eksperiment postavljen je na prizemlju Departmana za fiziku, Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu, na nadmorskoj visini od 80 m, iznad detektorskog sistema je pokrovni sloj od 15 cm betona. Detektorski sistem se sastoji od poluprovodničkog HP Ge i plastičnog scintilacionog detektor-a.

5.1. HP Ge detektor

Poluprovodnički detektor je HP Ge (High – Purity Germanium), model CFG-LLB-GMX-HJ, proizvođača ORTEC (SAD), relativne efikasnosti 32.4 %, zapremine kristala 155 cm³. Ulagani prozor GMX HP Ge detektora, debljine 0.8 mm, se izrađuje od berilijuma čistoće 99.8 %. Na slici 5.1 prikazan je poprečni presek koaksijalnog HP Ge detektora. Oko detektora postavljena je olovna zaštita debljine 12 cm (štit ima oblik cilindra visine 56 cm, sa unutrašnjim prečnikom od 17 cm i spoljašnjim prečnikom od 41 cm, njegova ukupna masa je 708 kg). Energijska kalibracija detektora izvršena je standardnim izvorima ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{60}Co i ^{137}Cs . [26] Na slici 5.2 prikazan je GMX HP Ge detektor sa olovnom zaštitom, prikazano je i pet scintilacionih detektor-a oko olovne zaštite (aktivna zaštita) koji nisu bili aktivni tokom merenja.



Slika 5.1 – Šema HP Ge detektora

a) bez zaštite

b) u štitu od olova



Slika 5.2 – Fotografija HP Ge detektor u laboratoriji sa olovnom zaštitom i vetro scintilacionim detektorima oko njega

U tabeli 5.1 prikazan je izotopski sastav germanijuma koji ima 5 stabilnih izotopa. U koloni za period poluraspada dato je više vrednosti ukoliko postoji više izomera istog izotopa.

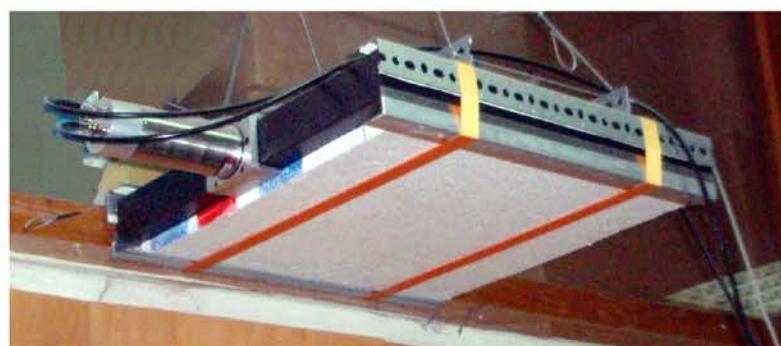
Tabela 5.1 – Zasupljenost izotopa germanijuma u prirodi [40]

^{32}Ge	$A = 72.64(1)$ g/mol	$\rho = 5323 \text{ kg/m}^3$
Izotop	Zastupljenost u prirodi [%]	Period poluraspada
^{65}Ge	-	30.9(5) s
^{66}Ge	-	2.26(5) h
^{67}Ge	-	18.9(3) min, 13.7(9) μs , 110.9(14) ns
^{68}Ge	-	270.95(16) d
^{69}Ge	-	39.05(10) h, 5.1(2) μs , 2.81(5) μs
^{70}Ge	20.38(18)	stabilan
^{71}Ge	-	11.43 (3) d, 20.40(17) ms
^{72}Ge	27.31(26)	stabilan, 444.2(8) ns
^{73}Ge	7.76(8)	stabilan, 2.92(3) μs , 499(11)ms
^{74}Ge	36.72(15)	stabilan
^{75}Ge	-	82.78(4)min, 47.7(5) s, 216(5) ns
^{76}Ge	7.83(7)	stabilan
^{77}Ge	-	11.300(10) h, 52.9(6) s
^{78}Ge	-	88.00(10) min

Zbog relativno dugug života izomera germanijuma, linije indukovane neutronima karakterišu se zakasnelim impulsima (signali koji nisu istovremeni sa kosmičkim mionima). [17]

5.2. Plastični scintilator

Plastični scintilacioni detektor je tipa R500 x 50 N 500/2-E2-P-X, proizvođača SCIONIX (Holandija). Scintilacioni materijal je *polistiren* $[C_6H_5CHCH_2]_n$ (sa efektivnim rednim brojem $Z_{ef}=5.28$, efektivni maseni broj je $A_{ef}=11.146$ g/mol a gustina $\rho=1.06$ g/cm³) koji je obložen refleksionim slojem preko kojeg se nalazi neprozirni sloj vinil-folije. [12], [17], [43] Dimenzije scintilacionog detektora su 50 cm × 50 cm × 5 cm, dakle njegova masa je 12.9 kg (slika 5.3). Scintilacioni detektor povezan je na fotomultiplikator. Kosmičko zračenje u detektoru generiše impulse od 3 do 5 V. [17] Energijska kalibracija detektora je izvršena standardnim izvorima ^{22}Na , ^{60}Co i ^{137}Cs . Zbog malog rednog broja, verovatnoća za fotoefekat u detektoru se može zanemariti, tako da se energija detektovanih fotona dobija analizom Compton-ovske ivice. Eksperimentalna vrednost deponovane energije vertikalne mionske komponente na nivou mora je $E_{\mu d}^{\text{exp}}=10.28(18)$ MeV, dakle, srednja energija miona je oko $E_{\mu}^{\text{exp}}=1.56(17)$ GeV. [12]



Slika 5.3 – Fotografija scintilacionog detektora u laboratoriji

5.3. Nuklearna elektronika

Nakon prolaska čestice kroz detektor, proizvodi se električni signal, koji se dalje transformiše u elektronskim kolima, da bi se dobio signal koji se može koristiti. Osnovne komponente detektorskog sistema su [15]:

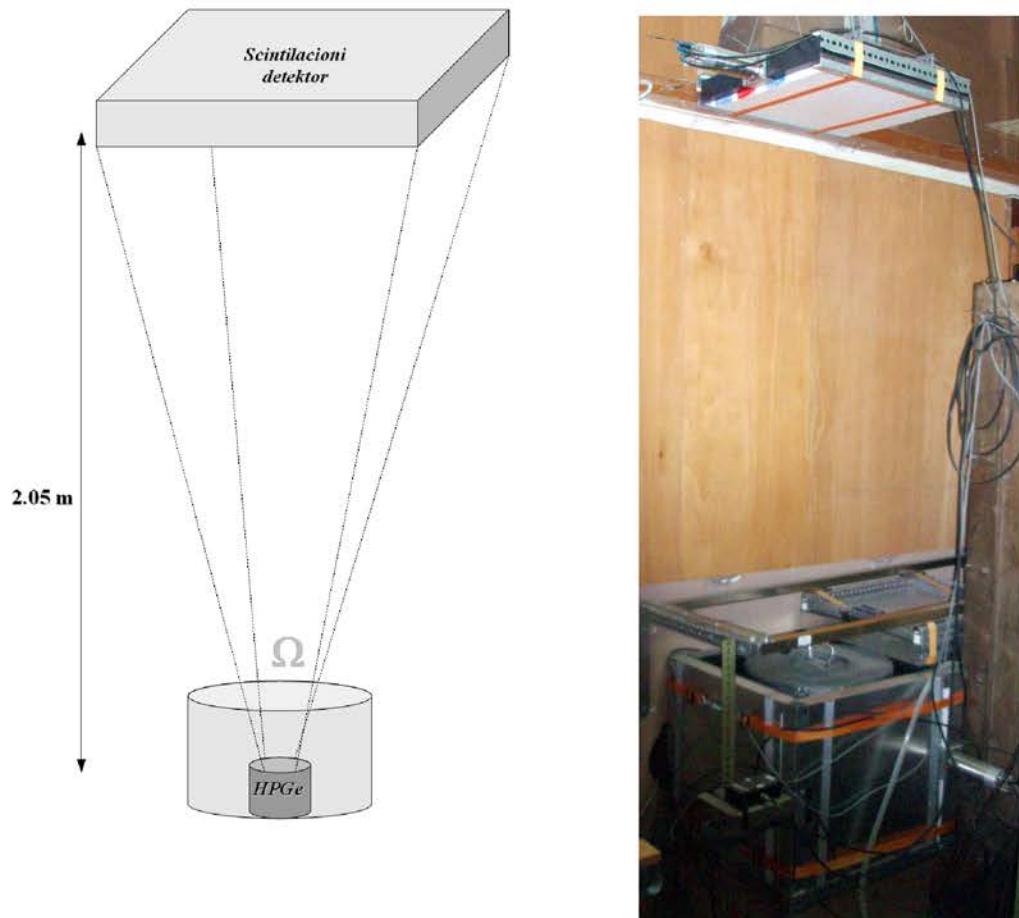
- ◆ **Prepojačavač (PAMP)** – je uređaj čija je osnovna funkcija da pojača slab signal iz detektora i da taj signal prenese do sledećeg elektronskog uređaja. Obično su postavljeni odmah iza detektora (da se jačina signala ne bi smanjila pri prolasku kroz kablove pre pojačavanja). Postoje tri vrste predpojačavača: strujni, naponski i osetljivi na nanelektrisanje. Izlazni signal obično nije mnogo pojačan, ali je prilagođen tako da se može dalje transportovati bez gubitaka. Dakle, predpojačavač služi za usklađivanje impedansi detektora sa ostalim komponentama elektronskog sistema.

- ◆ *Pojačavač (AMP)* – ima dve svrhe, da pojača signal iz predpojačavača i da ga preoblikuje u formu pogodnu za dalju obradu, tako da pri ovim transformacijama, informacija polaznog signala bude sačuvana. Potrebne osobine pojačavača su linearnost i stabilnost.
- ◆ *Pojačavač brzih signala (TFA)* – oblikuje signal sa brzim vremenom porasta (10 – 100 ns) tako da smanji gubitke i šum.
- ◆ *Diskriminator* – razdvaja električne signale koji potiču od različitih izvora, tj. diskriminator je uređaj koji šalje standardizovani impuls kada god detektorski signal zadovolji dati kriterijum (kada signal ima veći napon od graničnog). U ovom eksperimentu korišćen je diskriminator sa konstantnim odnosom (**CFD**) – razdvaja analogne signale na osnovu vremena porasta.
- ◆ *Analogno – digitalni pretvarač (ADC)* – je elektronski uređaj koji analogni signal pretvara u digitalni.
- ◆ *Skaler* – je uređaj koji registruje (broji) pojedinačne signale, ovu informaciju mogu prikazati na ekran ili je sačuvati. Za ispravan rad skalera signali moraju biti pravilnog obilika, tj. pre skalera signal treba da prođe kroz diskriminator ili pojačavač za oblikovanje signala.
- ◆ *Višekanalni analizator (MCA)* – je instrument koji razdvaja ulazne signale na osnovu njihove visine i broji koliko ima signala određene visine. Višekanalni analizator služi za dobijanje energijskog spektra, ceo enegrijski spektar je podeljen na kanale, a događaji se broje u svakom kanalu.
- ◆ *Pretvarač vremena u amplitudu (TAC)* – je instrument koji pretvara vremenski interval između dva impulsa u izlazni signal (naponski) čija je visina proporcionalna tom vremenskom intervalu. Ovaj pretvarač počinje sa merenjem od START impulsa, a završava kada naiđe na STOP impuls.
- ◆ *Koincidentni uređaj* – određuje da li su dva ili više signala istovremeni (da li se preklapaju), ako jesu na izlazu se javlja digitalni signal.
- ◆ *Linija za kašnjenje* – je uređaj koji pomera signal za neki vremenski interval (od nekoliko ns do nekoliko s) tako da signal ostaje nepromenjen. Ove linije se koriste kada postoje dva različita detektora koji ne rade istom brzinom.

5.4. Princip rada

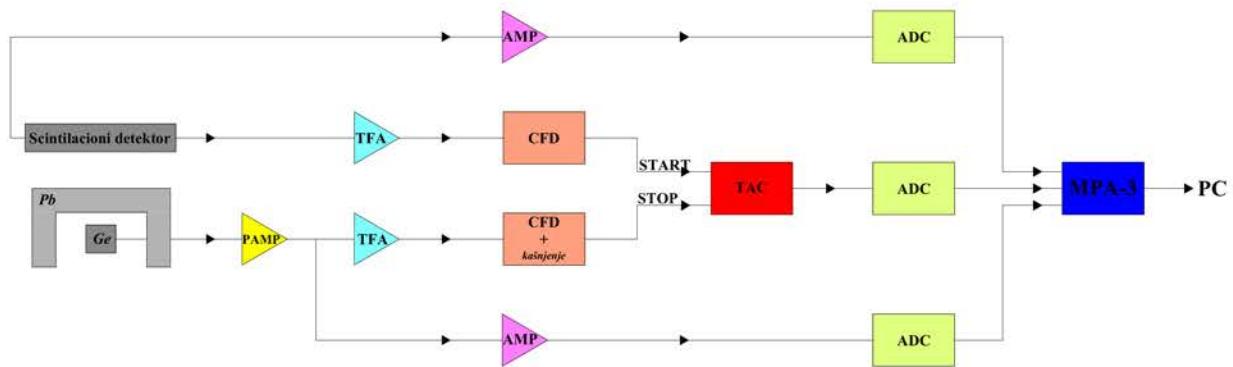
U eksperimentalnoj postavci koja je realizovana HP Ge i plastični scintilacioni detektor rade u koincidentnom režimu (svakom registrovanom događaju u jednom detektoru odgovara događaj u drugom detektoru). Mioni, pored vertikalne komponente, u detektore mogu da uđu i pod drugim uglom. Samo mioni koji vertikalno ulaze u detektore imaju minimalni gubitak energije. Što je upadni ugao miona veći (u odnosu na vertikalu), veći je i pređeni put miona u detektoru, dakle, veći su i gubici energije miona.

Plastični scintilacioni detektor nalazi se na visini od 2.05 m iznad HP Ge detektora (slika 5.4), tako da formiraju neku vrstu teleskopa. Broj detektovanih miona zavisi od prostornog ugla detektorskog sistema. U ovoj geometriji prostorni ugao je $\Omega = 59.49 \cdot 10^{-3} \text{ sr}$. Mali prostorni ugao omogućava bolju definisanost fluksa vertikalnih miona.



**Slika 5.4 – Prostorni ugao koji obrazuju scintilacioni i germanijumski detektor (levo)
Fotografija oba detektora u laboratoriji (desno)**

Na slici 5.5 dat je šematski prikaz detektorskog sistema. Signal sa plastičnog scintilacionog detektor-a vodi se na pojačavač (na ulazima je napon od 1000 V), pa na ADC pretvarač i u MPA-3 sistem. Brzi signal iz scintilacionog detektor-a pretvara se u negativni TFA pojačavačem, dalje je signal preko diskriminatora CFD odveden u TAC. Sa germanijumskog detektor-a signali se preko predpojačavača PREAMP pretvaraju u negativne signale uz pomoć pojačavača brzih signala TFA, dalje se preko diskriminatora CFD pretvaraju u brze logičke signale i takođe dovode u TAC. U pretvaraču vremena u amplitudu TAC, START signal potiče iz scintilacionog, a STOP iz germanijumskog detektor-a. Signali iz TAC, scintilacionog i germanijumskog detektor-a, se nakon prolaska kroz ADC pretvarač, dovode do MPA-3 sistema. Sistem je podešen u koincidentni režim rada sa sve tri ulazne jedinice. Dakle, u spektru germanijumskog detektor-a prikazani su događaji koji su istovremeni sa prolaskom miona kroz scintilacioni detektor.



Slika 5.5 – Šema detektorskog sistema

Koincidentni interval predstavlja maksimalno vreme između dva događaja koji se mogu smatrati istovremenim (npr. može se definisati TAC opsegom). Minimalni koincidentni interval za MPA-3 sistem je oko 50 μ s (vreme razlaganja), kada se koriste spori signali iz pojačavača grane germanijumskog detektor-a i grane scintilacionog detektor-a, što je velika vrednost. Ovaj interval je smanjen uvođenjem brze linije signala. Naime, izlaz sa anode fotomultiplikatora scintilacionog detektor-a je mnogo brži od dinodnog izlaza samog fotomultiplikatora. Dakle, izlaz sa anode fotomultiplikatora vodi se na TFA, dalje se signal dovodi do diskriminatora CFD pa u TAC (START signal). Dovođenjem TAC signala na MPA-3 sistem minimalni koincidentni interval je smanjen na oko 100 ns (vreme razlaganja), čime je znatno smanjen broj slučajnih koïncidencija.

Diskriminator u kojem se uvode signali iz scintilacionog detektor-a je podešen da odbacuje signale manje od 5 MeV, na taj način odbacuju se fotoni i većina visokoenergijskih elektrona i pozitrona, tako da ostaju samo mioni. Diskriminator koji razdvaja signale iz germanijumskog detektor-a podešen je nešto iznad šuma (35 keV), maksimalna vrednost energije koja se može registrovati je 3 MeV.

5.5. Obrada podataka

Za prikupljanje i obradu podataka korišćen je MPA-3 sistem (*Multiparameter Data Acquisition System*), proizvođača FAST ComTec (Nemačka). MPA-3 sistem je projektovan za rad sa najviše 16 spoljašnjih ADC pretvarača, skalera... Bazni modul MPA-3 sistema prikazan je na slici 5.6. Ovaj sistem ima dva režima rada: pojedinačni i koincidentni. Koincidentni način rada omogućava bilo koju kombinaciju 16 ADC ulaza. [29] U ovom eksperimentu korišćeno je 4 ADC ulaza. Dakle, koincidentni događaji se prikazuju u dvodimenzionim koincidentnim spektrima (jedna osa odgovara jednom, a druga drugom detektoru; ili bilo kojoj drugoj kombinaciji ADC ulaza), koji omogućavaju dobijanje spektra jednog detektora prouzrokovanih spektrom drugog detektora. Multiparametarskim programom MPA-NT korisnik ima potpunu kontrolu nad MPA-3 sistemom. MPA-NT je server program za merenje i čuvanje podataka, može da prikazuje podatke direktno (dok se vrši merenje).



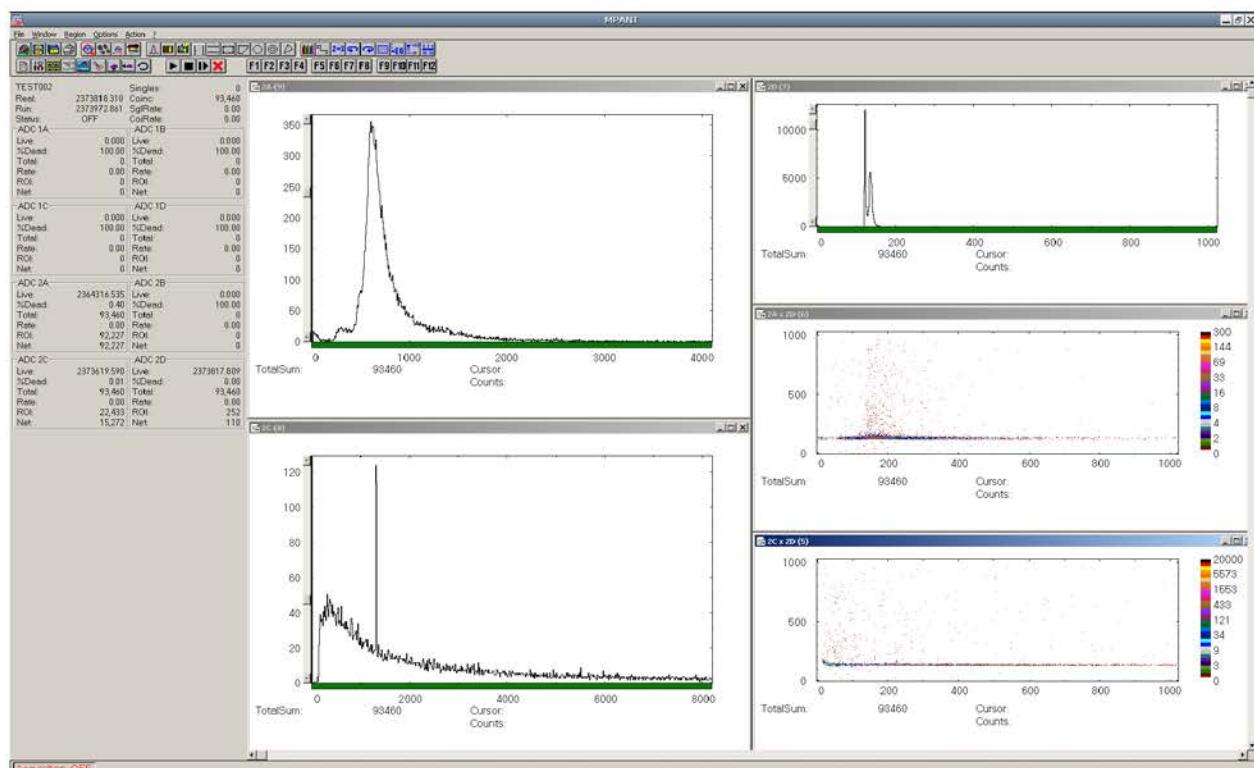
Slika 5.6 – Fotografija baznog modula MPA-3 sistema

U ovom eksperimentu na ulaze multiparametarskog MPA-3 sistema dovedeni su impulsi iz plastičnog scintilacionog detektora, poluprovodničkog detektora i TAC pretvarača. MPA-3 sistem je podešen tako da registruje samo istovremene događaje iz sva tri ADC ulaza, tj. svakom događaju u TAC spektru odgovara jedan događaj u spektru germanijumskog detektora i jedan događaj u spektru scintilacionog detektora.

Sve funkcije su dobijene fitovanjem u programu TableCurve, a svi grafici u programu OriginPro.

VI Rezultati i diskusija

Ukupno vreme prikupljanja podataka iznosi $2.37 \cdot 10^6$ s (od 17. novembra do 15. decembra 2006. godine). Na slici 6.1 prikazan je izgled programa MPA-NT nakon merenja. Na ulaze 2A, 2C i 2D MPA-3 sistema dovode se signali iz scintilacionog, germanijumskog detektora i TAC pretvarača. Mrtvo vreme scintilacionog detektora je 0.40 %, a germanijumskog 0.01 %. Ukupno je registrovano 93460 koincidentnih događaja.



Slika 6.1 - Program MPA-NT sa snimljenim spektrima

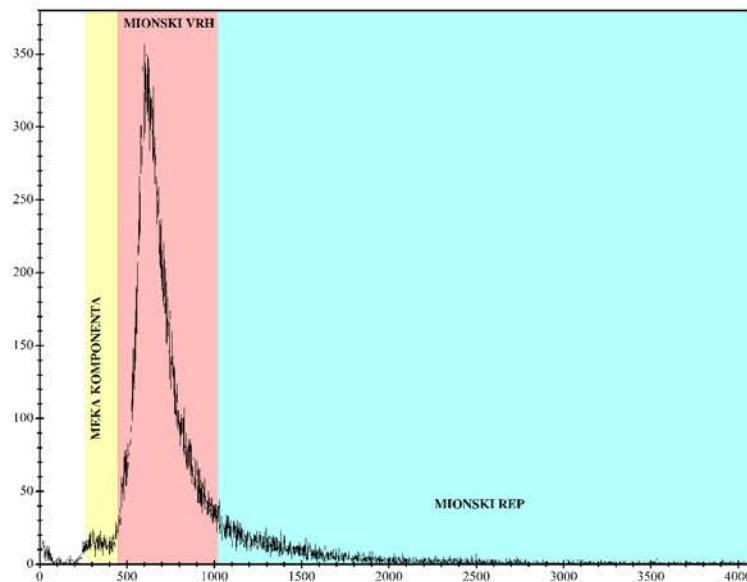
Dobijeni su spektri:

- ▶ 2A – koincidentni spektar scintilacionog detektora
- ▶ 2C – koincidentni spektar germanijumskog detektora
- ▶ 2D – TAC spektar
- ▶ 2A x 2D – dvodimenzioni spektar scintilacionog detektora i TAC-a
- ▶ 2C x 2D – dvodimenzioni spektar germanijumskog detektora i TAC-a

Dvodimenzioni spektri predstavljaju vremensku zavisnost broja događaja u svakom kanalu germanijumskog, odnosno scintilacionog koincidentnog spektra.

6.1. Koincidentni spektri

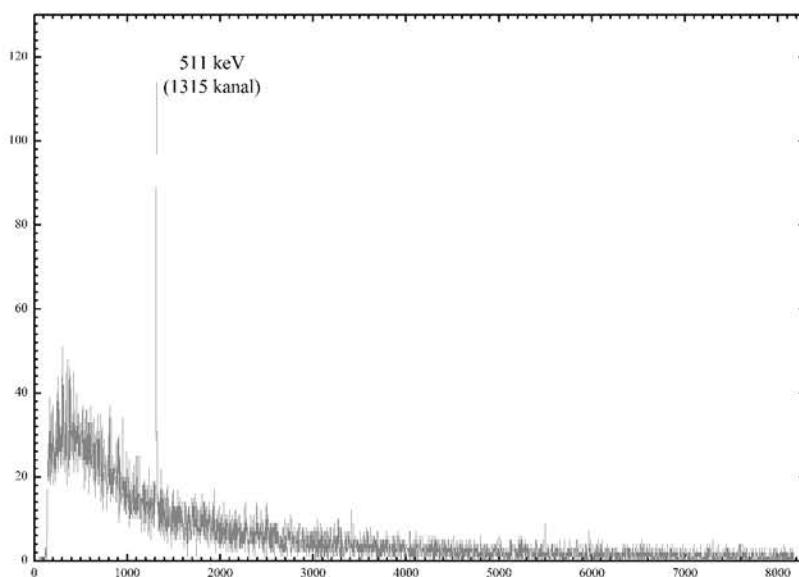
Na slici 6.2 prikazan je koincidentni spektar scintilacionog detektora za ceo vremenski interval.



Slika 6.2 - Koincidentni spektar scintilacionog detektora

U spektru se mogu uočiti tri oblasti: meka komponenta (5 MeV – 9 MeV), mionski vrh (9 MeV – 15 MeV) i mionski rep (15 MeV – 57 MeV). [25]

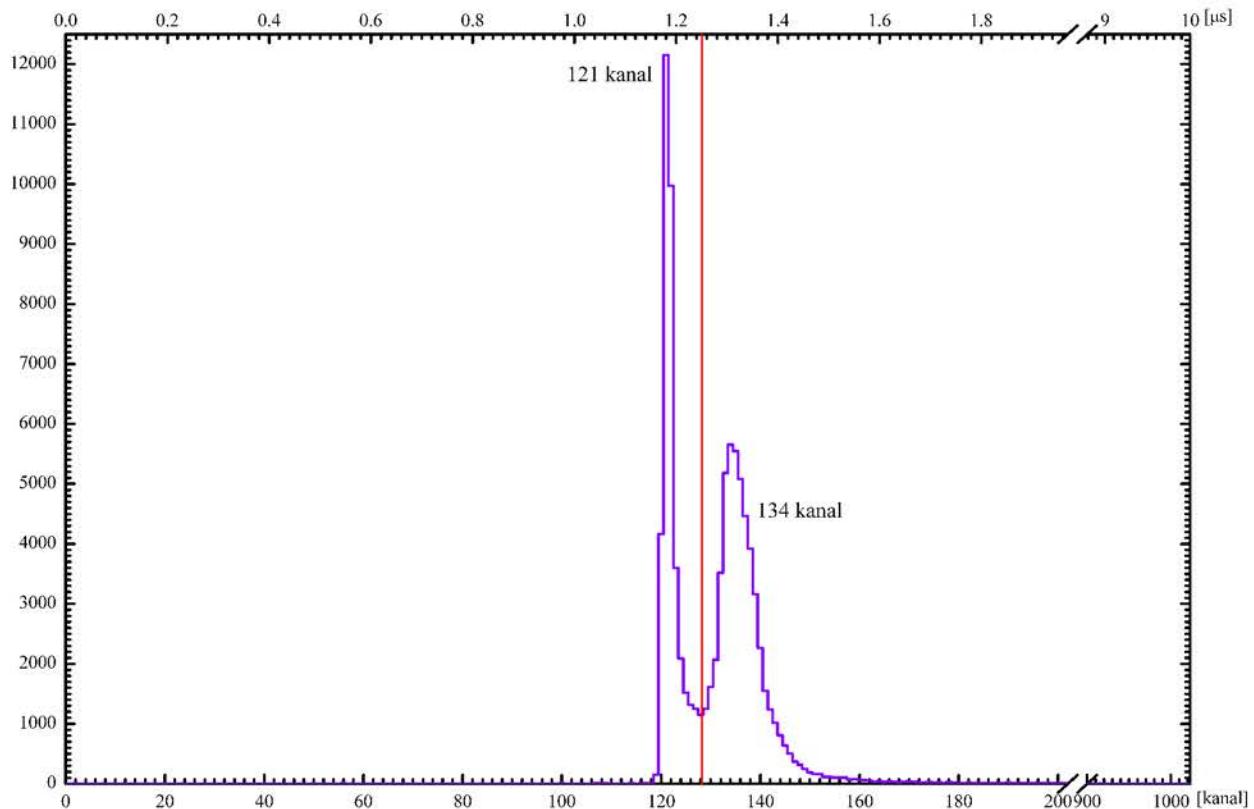
Koincidentni spektar germanijumskog detektora prikazan je na slici 6.3.



Slika 6.3 - Koincidentni spektar germanijumskog detektora

Ovaj spektar karakteriše kontinualna raspodela sa istaknutom anihilacionom linijom (511 keV odgovara 1315-om kanalu).

Spektar TAC-a prikazan je na slici 6.4.



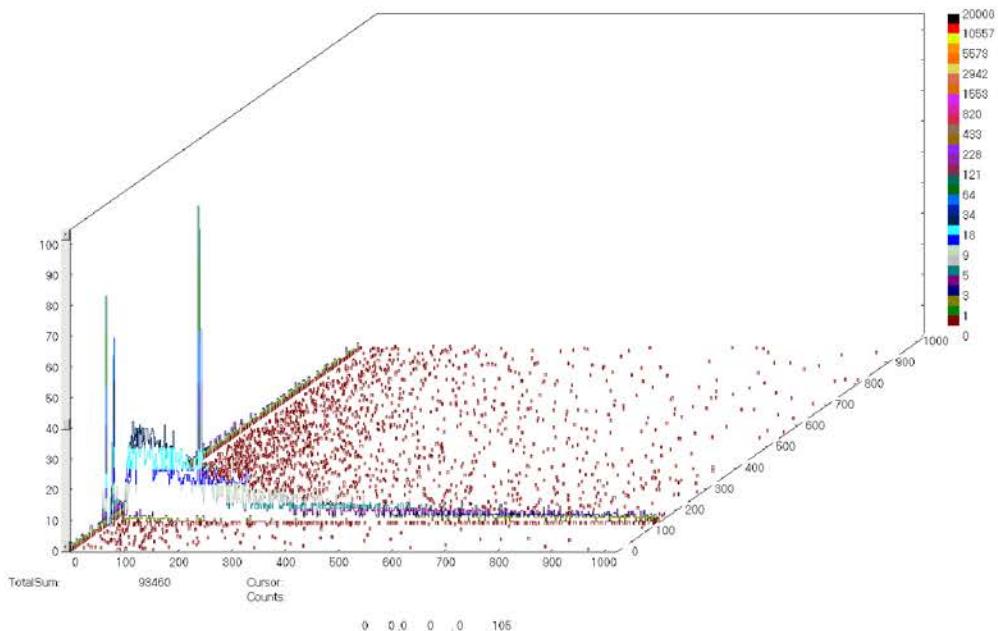
Slika 6.4 - Koincidentni spektar TAC-a

Ukupan broj kanala u spektru je 1024 (od 0 do 1023), kojem odgovara koincidentni interval od 10 μ s (maksimalni vremenski interval između START i STOP signala u TAC). Dakle, 10 μ s je maksimalno vreme unutar kojeg se dva događaja mogu smatrati koincidentnim. Na spektru se mogu uočiti dva pika, prvi sa vrhom na 121 kanalu (širine 19 ns) i drugi na 134 kanalu (širine 78 ns).

Utvrđeno je da je prvi vremenski pik posledica saturacije u pojačavaču brzih signala TFA u grani germanijumskog detektora. Kada pri interakciji miona sa germanijumskim detektorom, mion deponuje više od 20 MeV, dolazi do saturacije signala u TFA, tako da ovi signali imaju znatno kraće vreme porasta (u odnosu na nesaturisane signale – koji odgovaraju događajima sa manjom energijom). Saturisani signali, u diskriminatoru CFD, okidaju znatno ranije i prate START signale iz scintilacionog detektora mnogo brže nego nesaturisani signali. Dakle, drugi vremenski pik odgovara pravim nesaturisanim koincidencijama. [17] Širina na polovini visine vrha pravih nesaturisanih koincidencija definiše njihovo vremensko razlaganje. U ovoj postavci vremensko razlaganje je 78 ns.

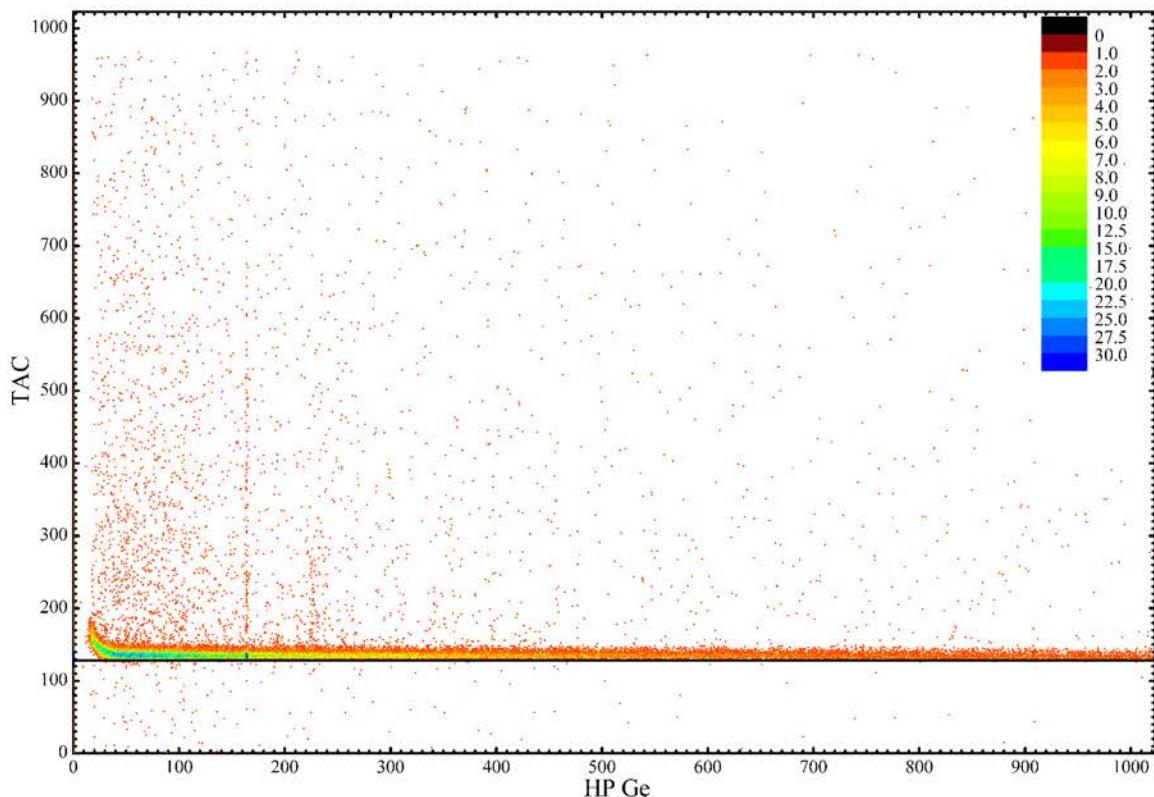
Minimum između ova dva pika (tj. početak drugog pika) odgovara 128 kanalu, pa je za **početni trenutak** u daljem razmatranju izabran upravo 128 kanal. Na slici 6.4 početni trenutak je označen crvenom vertikalnom linijom.

Na slici 6.5 prikazan je dvodimenzionalni spektar germanijumskog detektora i TAC-a. Visinom i bojom označen je broj koincidentnih događaja na određenom kanalu u nekom vremenskom intervalu.



Slika 6.5 – Vremenska zavisnost koincidentnih događaja u germanijumskom detektoru

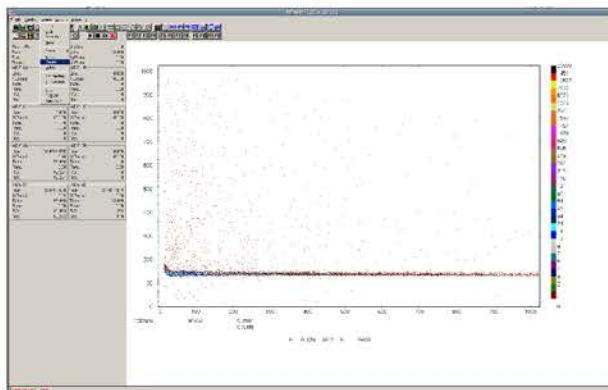
Drugačiji prikaz ovog spektra dat je na slici 6.6 gde boja tačke predstavlja broj događaja. Horizontalna osa odgovara germanijumskom detektoru (energija), a zbog softverskih ograničenja opseg ove ose je sa 8192 kanala (jednodimenzionalni spektar) smanjen na 1024 kanala, a vertikalna TAC-u (vremenski interval).



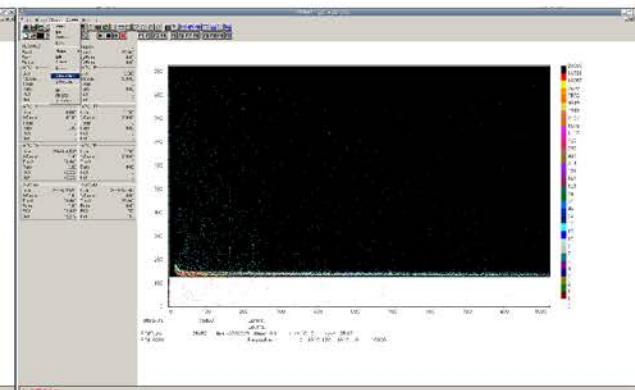
**Slika 6.6 - Vremenska zavisnost koincidentnog spektra germanijumskog detektora.
Horizontalnom linijom na 128.-om kanalu prikazan početni trenutak.**

Događaji koji odgovaraju saturisanim koincidencijama se ne vide na ovom dvodimenzionom spektru jer je maksimalna energija događaja koji se vide u spektru germanijumskog detektora oko 3 MeV.

Analiza dvodimenzionih koincidentnih spektara u programu MPA-NT se vrši odabirom određenih regiona i njihovom projekcijom na horizontalnu ili vertikalnu osu, pri čemu se dobijaju spektri jednog detektora uzrokovani spektralnim regionima u drugom detektoru. Na primer, u dvodimenzionom spektru germanijumskog detektora i TAC-a biramo region od 128 kanala do 1023 kanala, komandom **Create** u meniju **Region** (slika 6.7a). Projekcijom izabranog regiona na x – osu, komandom **X-Projection** u meniju **Region** (slika 6.7b), dobijen je spektar događaja germanijumskog detektora uzrokovanih događajima u TAC-u u izabranom regionu (intervalu vremena).

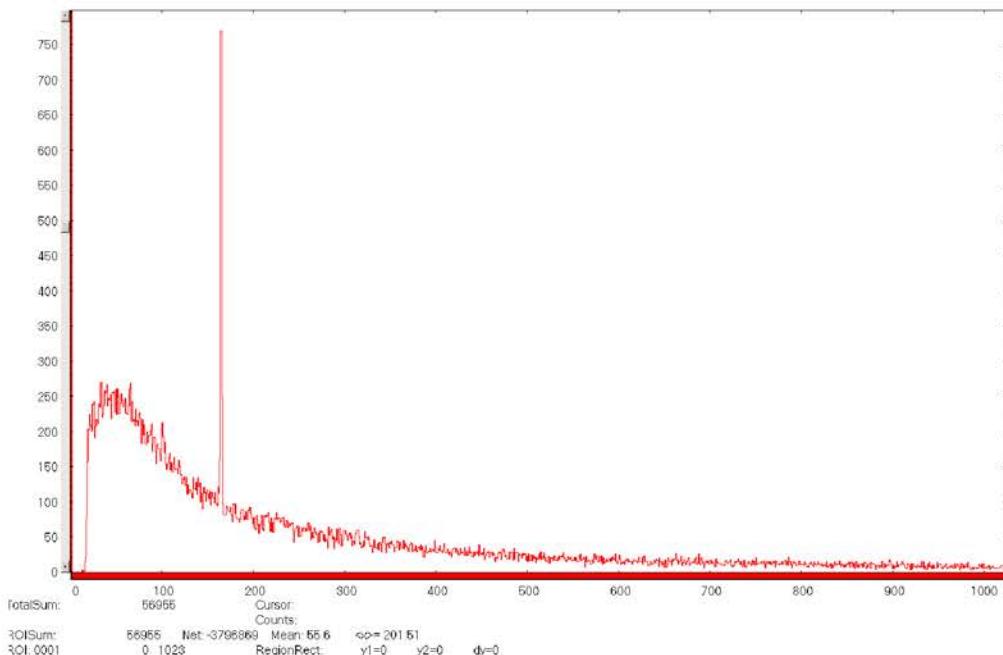


Slika 6.7a – Selektovanje regiona u programu MPA-NT



Slika 6.7b – Projekcija izabranog regiona na x – osu

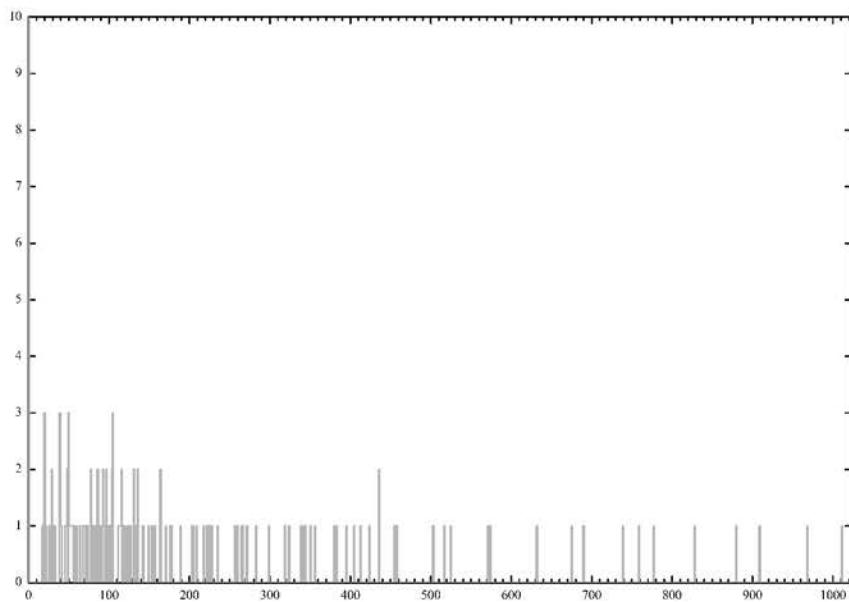
Dobijeni spektar, koji predstavlja skup onih događaja u germanijumskom detektoru koji su bili istovremeni sa događajima u scintilacionom detektoru unutar vremenskog intervala od $8.75 \mu\text{s}$ (od 128 do 1023 kanala) prikazan je na slici 6.8.



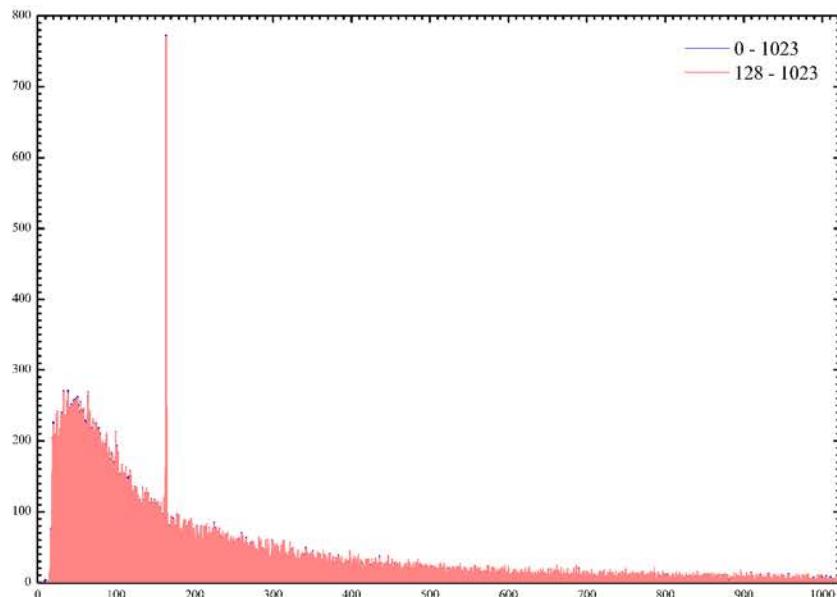
Slika 6.8 – Koincidentni spektar germanijumskog detektora u vremenskom intervalu od $8.75 \mu\text{s}$

U slučajne koincidencije ubrajaju se događaji koji su registrovani ispod 118 kanala u TAC spektru. Koincidentan spektar germanijumskog detektora dobijen selektovanjem posmatranog regiona prikazan je na slici 6.9. Sa slike se može zaključiti da je broj slučajnih koincidentnih događaja zanemarljiv.

Potvrda ispravnosti odluke da se za početni trenutak izabere 128 kanal je i nepostojanje razlike kod spektara od 0 do 1023 kanala i od 128 do 1023 kanala (slika 6.10).



Slika 6.9 – Koincidentni spektar germanijumskog detektora od 0 do 118 kanala

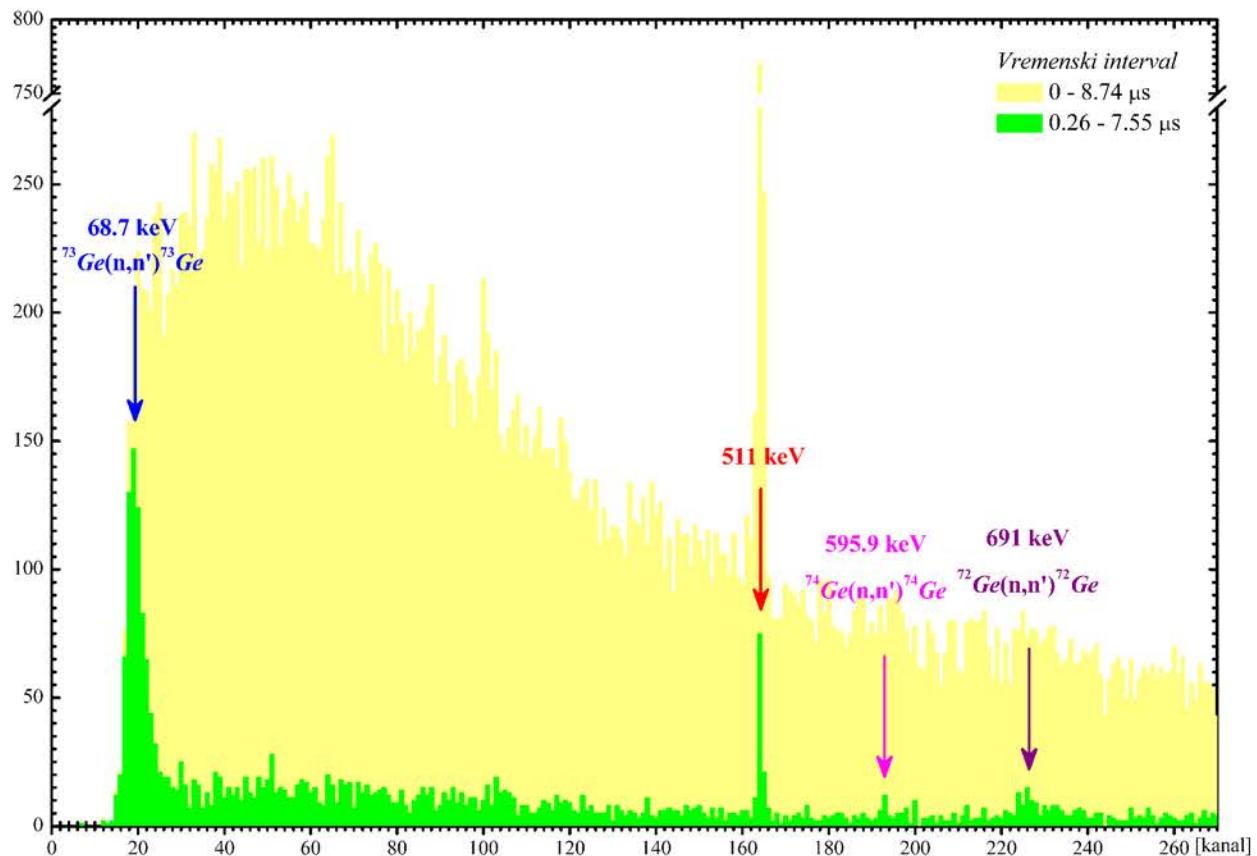


Slika 6.10 – Uporedni prikaz koincidentnih spektara germanijumskog detektora u intervalima 0 – 1023 i 128 – 1023

U dvodimenzionom spektru germanijumskog detektora i TAC-a birani su regioni tako da je varirana njihova širina (vremenski interval) i početni kanal (početak vremenskog intervala). Projektovanjem ovih regiona dobijeni su spektri germanijumskog detektora kojima odgovaraju različiti događaji. Početak vremenskog intervala odgovara minimalnom koincidentnom vremenu, a kraj maksimalnom koincidentnom vremenu između dva događaja. Podaci iz ovih spektara prikazani su u tabelama datim u Dodatku.

U spektrima germanijumskog detektora treba da se uoče neke od linija datih u tabeli 3.3. Zbog postavke štita detektora ($0.5 \text{ mm } Cu + 3.5 \text{ mm } Sn + 12 \text{ cm } Pb$, unutrašnjost se ispira gasovitim N_2) nema doprinosa x – zraka u niskoenergijskom regionu (3 mm kalaja redukuje x – zrake energija $75 - 80 \text{ keV}$ koji su poreklom iz olova i x – zrake energija manjih od 10 keV koje su poreklom iz bakra; dok bakar redukuje x – zrake koji su poreklom iz kalaja). Takođe, nema linija prouzrokovanih zahvatom termalnih neutrona (n, γ) zbog dugog života ovih reakcija (koji je mnogo veći od $10 \mu\text{s}$).

Uočene su tri γ linije koje nastaju pri neelastičnom rasejanju brzih neutrona na jezgrima ^{73}Ge , ^{74}Ge i ^{72}Ge (kojima odgovaraju energije 68.7 keV, 595.9 keV i 691.0 keV) i anihilaciona linija (511 keV). Za svaku liniju posmatrana je promena intenziteta, normiranog intenziteta i širine u zavisnosti od širine i početka vremenskog intervala. Na slici 6.11 prikazan je spektar germanijumskog detektora na kojem se najbolje vide sve četiri uočene linije.



Slika 6.11 – Uporedni prikaz koincidentnih spektara germanijumskog detektora u vremenskom intervalu od 0 do 8.74 μs i od 0.26 μs do 7.55 μs

6.2. Energijska kalibracija

Energija se najčešće može predstaviti kao linearna funkcija kanala:

$$E = a + b \cdot x \quad (13)$$

gde su: a , b – parametri prave, x – redni broj kanala. Odstupanja od linearnosti su najveća na krajevima kanalnog intervala višekanalnog analizatora i kreću se oko ± 0.2 kanala. [24]

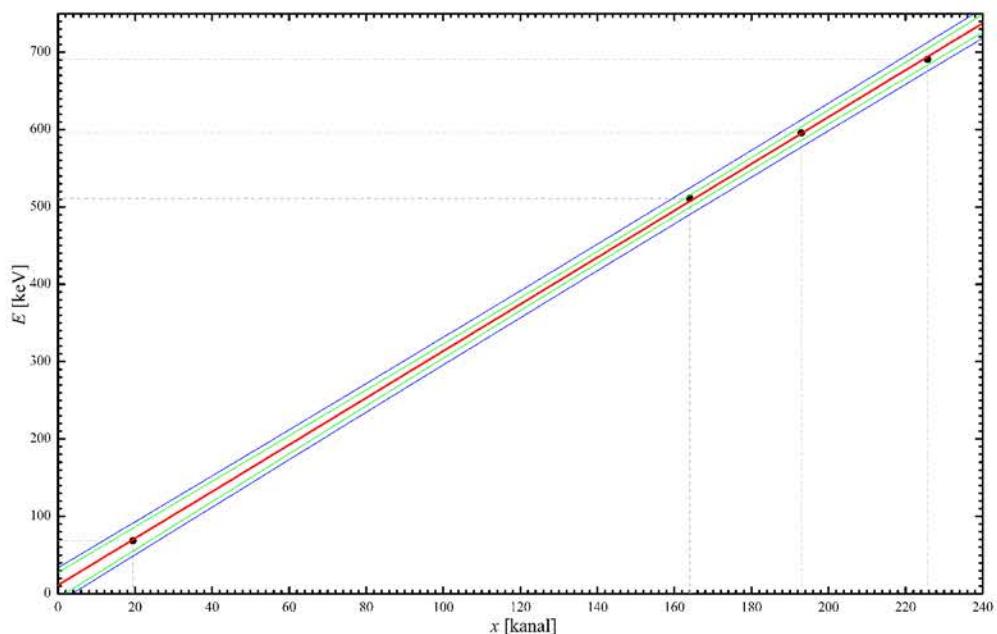
Vrednosti energija uzete su iz tabele 3.3, a redni brojevi kanala su određeni kao srednja vrednost pozicije uočenih pikova (kolona centroida u tabelama datim u Dodatku) u koincidentnim spektrima germanijumskog detektora dobijenim projektovanjem različitih regiona dvodimenzionog koincidentnog spektra.

Tabela 6.1 – Vrednosti uočenih linija u spektru

x [kanal]	E [keV]
19.4(18)	68.7
164.00	511
192.97(16)	595.9
225.7(7)	691

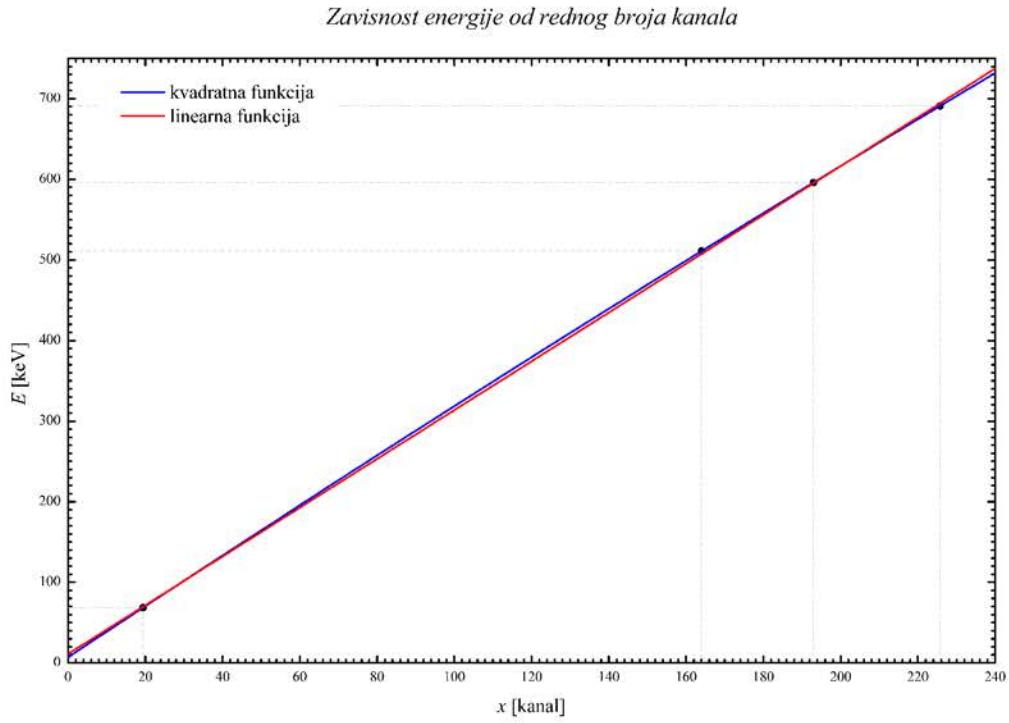
Grafik zavisnosti energije od rednog broja kanala prikazan je na slici 6.12. Izvršen je linearni fit ovih podataka, koji je sa koridorom greške (interval poverenja je 95 %) takođe prikazan na slici. Kao procena kvaliteta fita posmatrana je vrednost r^2 koja u ovom slučaju iznosi 0.99983. Ovako visoka vrednost r^2 ukazuje da linije u spektru stvarno odgovaraju pretpostavljenim vrednostima energije. Dobijena vrednost parametara je: $a=11(4)$ keV i $b=3.027(23)$ keV/kanal .

Grafik zavisnosti energije od rednog broja kanala



Slika 6.12 – Energijska kalibracija

Zavisnost energije od rednog broja kanala mnogo bolje se može opisati kvadratnom funkcijom, čime se odstupanje smanjuje na oko ± 0.1 keV. [24] Na slici 6.13 prikazana je linearna i kvadratna zavisnost energije od kanala.



Slika 6.13 – Linearna i kvadratna zavisnost energije od rednog broja kanala

Dakle, ne postoji značajna razlika između ove dve funkcije, tako da se koristi linearna zavisnost.

6.3. Linija 68.7 keV

Neelastičnim rasejanjem brzih neutrona na jezgru ^{73}Ge , jezgro se pobuđuje i vraća na osnovno stanje emisijom fotona energije 68.7 keV. Ovako nastala linija je proširena (asimetrična) i ima blaži nagib na višoj energiji zbog uzmaka jezgra.

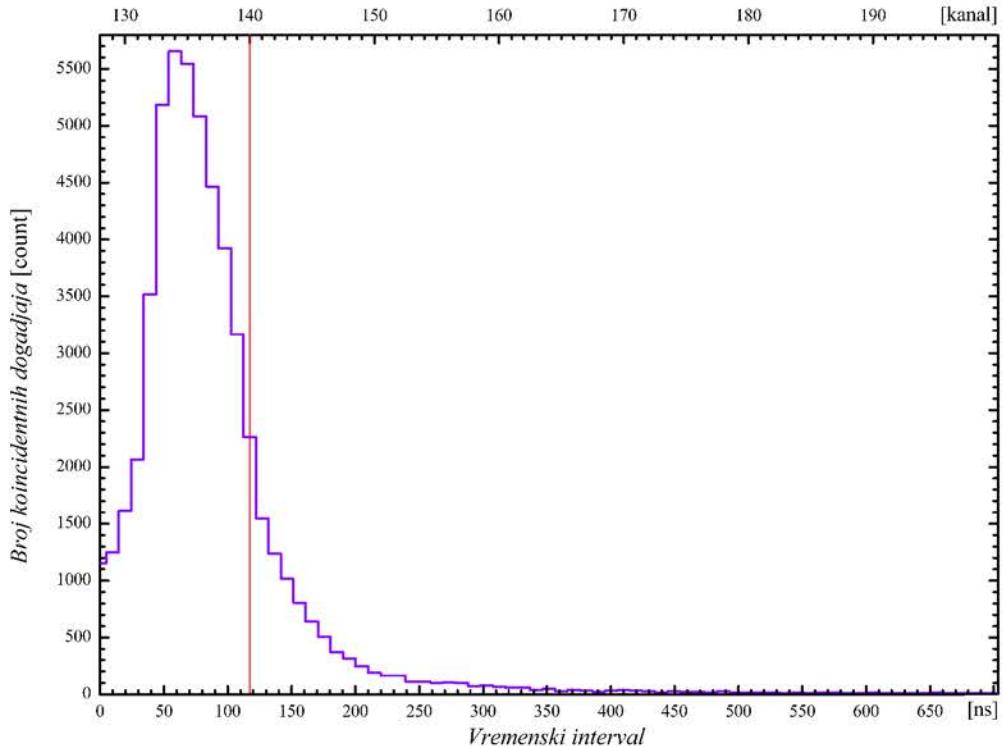
Ova linija je posmatrana za različite širine vremenskog intervala, pri čemu su za fiksiranu širinu intervala uzete različite početne vrednosti. Karakteristike linije iz ovako dobijenih spektara date su u tabeli koja je prikazana u Dodatku. U tabeli 6.2 date su vrednosti posmatranih širina vremenskih intervala i početnih vrednosti.

Tabela 6.2 – Posmatrane širine i počeci vremenskog intervala za liniju 68.7 keV

Početak vremenskog intervala t						Širina vremenskog intervala T	
[kanal]	[ns]	[kanal]	[ns]	[kanal]	[ns]	[kanal]	[ns]
140	117.19	150	214.84	160	312.5	5	48.83
141	126.95	151	224.61			10	97.66
142	136.72	152	234.38	162	332.03	20	195.31
143	146.48	153	244.14			50	488.28
144	156.25	154	253.91	164	351.56	100	976.56
145	166.02	155	263.67			165	361.33
146	175.78	156	273.44	166	371.09	200	1953.13
147	185.55	157	283.20			167	380.86
148	195.31	158	292.97	168	390.63	300	2929.69
149	205.08	159	302.73			169	400.39
				170	410.16	400	3906.25
						600	5859.38
						800	7812.50

Na primer, ako je spektar dobijen projekcijom vremenskog intervala širine 5 kanala sa početkom na 140-om kanalu na horizontalnu osu, to znači da se posmatraju koincidentni događaji čije je minimalno koinidentno vreme 117.19 ns, a maksimalno $117.19 \text{ ns} + 48.83 \text{ ns}$, tj. oni događaji koji su se odigrali u vremenskom razmaku većem od 117.19 ns i manjem od 166.02 ns.

Na slici 6.14 prikazan je deo TAC spektra. Linija 68.7 keV je počela da "izlazi" iz kontinuuma tek nakon 140 kanala (117.19 ns), što znači da odgovara zakasnelim koincidencijama.

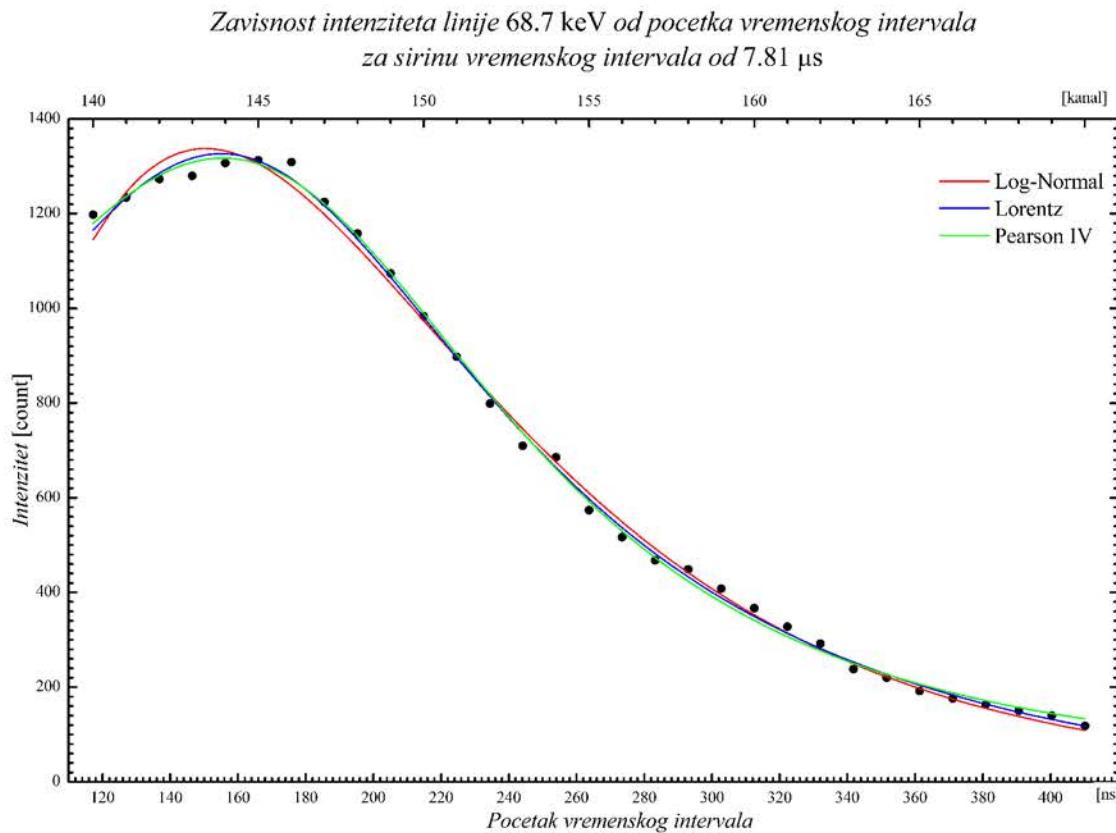


Slika 6.14 – Deo vremenske krive

Kada se posmatra zavisnost intenziteta linije od početka vremenskog intervala, najveći intenziteti za fiksirani početak intervala dobijaju se za najveću širinu intervala, tj. za 7.81 μ s. Ova zavisnost fitovana je krivama sa tri, četri i pet slobodnih parametara. Vrednosti parametara date su u tabeli 6.3, a zavisnost je prikazana na slici 6.15.

Tabela 6.3 – Krive koje karakterišu zavisnost intenziteta linije 68.7 keV od početka vremenskog intervala za širinu intervala od 7.81 μ s

Funkcija	r^2	Vrednosti parametara
Log-Normal $I=a \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t}{b} \right)^2}$	0.99651	$a=1338(9)$ count $b=150.4(11)$ ns $c=0.448(6)$
Lorentz $I=a + \frac{b}{1 + \left(\frac{t-c}{d} \right)^2}$	0.99827	$a=-89(15)$ count $b=1416(14)$ count $c=155.0(10)$ ns $d=105.4(25)$ ns
Pearson IV $I=a \cdot \left(\frac{1 + \frac{e^2}{4 \cdot d^2}}{1 + \left(\frac{t-b-\frac{c \cdot e}{2 \cdot d}}{c} \right)^2} \right)^d e^{-e \cdot \left(\arctan \frac{e}{2 \cdot d} + \arctan \frac{t-b-\frac{c \cdot e}{2 \cdot d}}{c} \right)}$	0.99823	$a=1318(9)$ count $b=155.5(14)$ ns $c=117(10)$ ns $d=1.16(23)$ $e=0.33(24)$

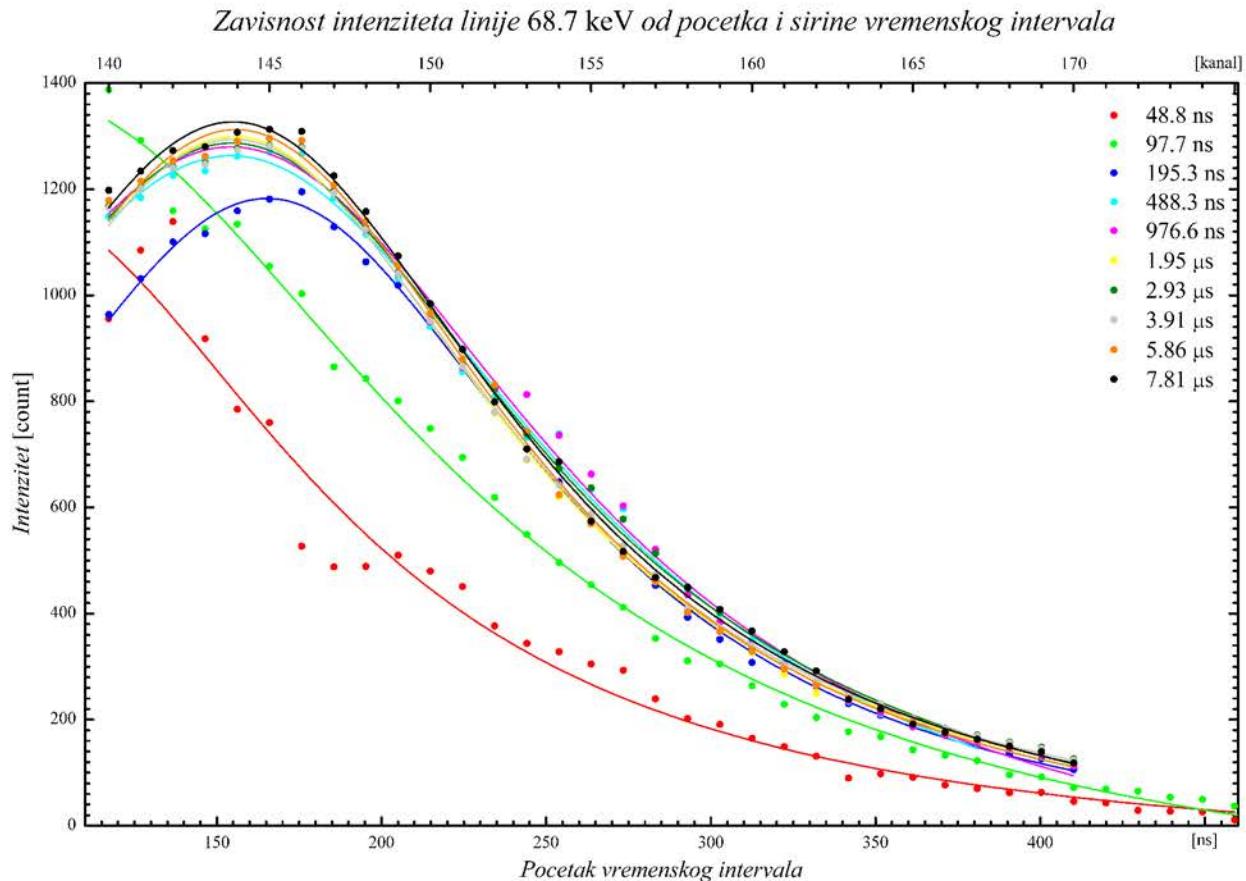


Slika 6.15 – Zavisnost intenziteta linije 68.7 keV od početka vremenskog intervala za širinu intervala od 7.81 μs

Sve tri funkcije dobro opisuju zavisnost intenziteta linije od početka vremenskog intervala, a najbolji odnos dobrote fita i broja slobodnih parametara ima *Lorentz-ova raspodela*, tako da su ostali intervali fitovani na ovu funkciju. Vrednosti parametara za svaki interval date su u tabeli 6.4, a zavisnost je prikazana na slici 6.16.

Tabela 6.4 – Parametri Lorentz-ove distribucije koja karakteriše zavisnost intenziteta linije 68.7 keV od početka vremenskog intervala za različite širine intervala

Širina vremenskog intervala [ns]	r^2	a [count]	b [count]	c [ns]	d [ns]
48.83	0.96714	- 7(4) · 10	$1.24(20) \cdot 10^3$	88(25)	107(15)
97.66	0.99571	- 185(29)	$1.56(7) \cdot 10^3$	92(9)	143(8)
195.31	0.99909	- 84(10)	$1.267(9) \cdot 10^3$	165.4(6)	102.1(16)
488.28	0.99638	- 17(3) · 10	$1.44(3) \cdot 10^3$	154.3(17)	121(5)
976.56	0.99616	- 169(28)	$1.449(26) \cdot 10^3$	154.4(18)	121(5)
1953.13	0.99856	- 70(13)	$1.369(12) \cdot 10^3$	155.2(10)	101.9(22)
2929.69	0.99810	- 109(17)	$1.396(16) \cdot 10^3$	154.6(12)	112(3)
3906.25	0.99883	- 68(12)	$1.362(11) \cdot 10^3$	155.2(8)	103.1(20)
5859.38	0.99841	- 87(14)	$1.399(13) \cdot 10^3$	155.8(10)	103.2(24)
7812.50	0.99827	- 89(15)	$1.416(14) \cdot 10^3$	155.0(10)	105.4(25)

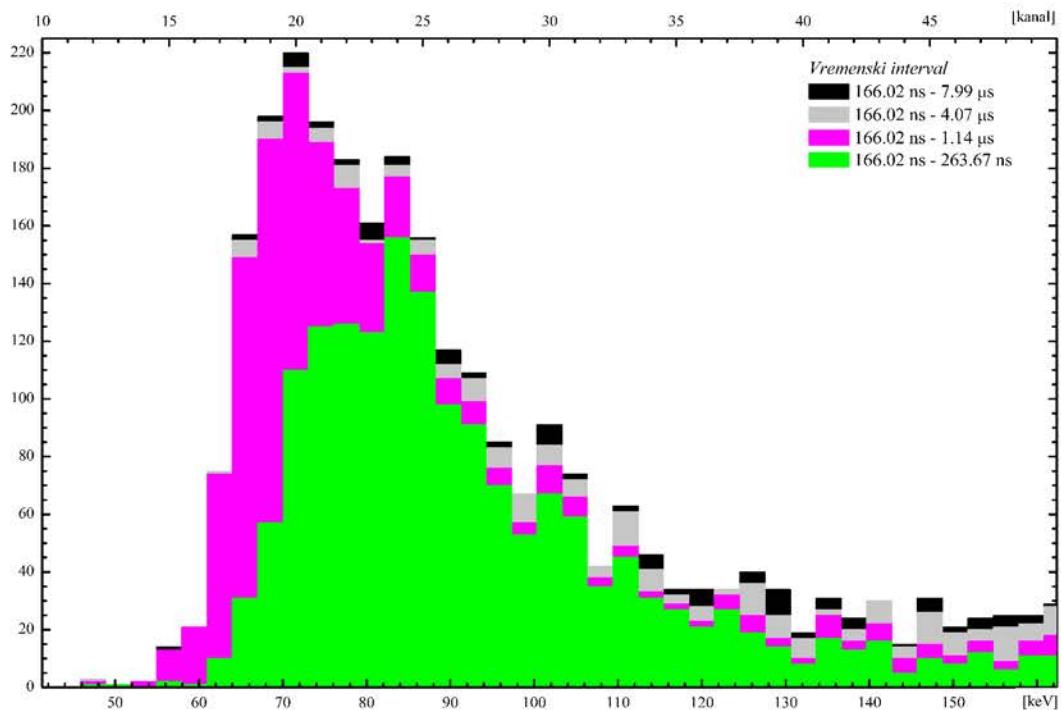


Slika 6.16 – Zavisnost intenziteta linije 68.7 keV od početka i širine vremenskog intervala

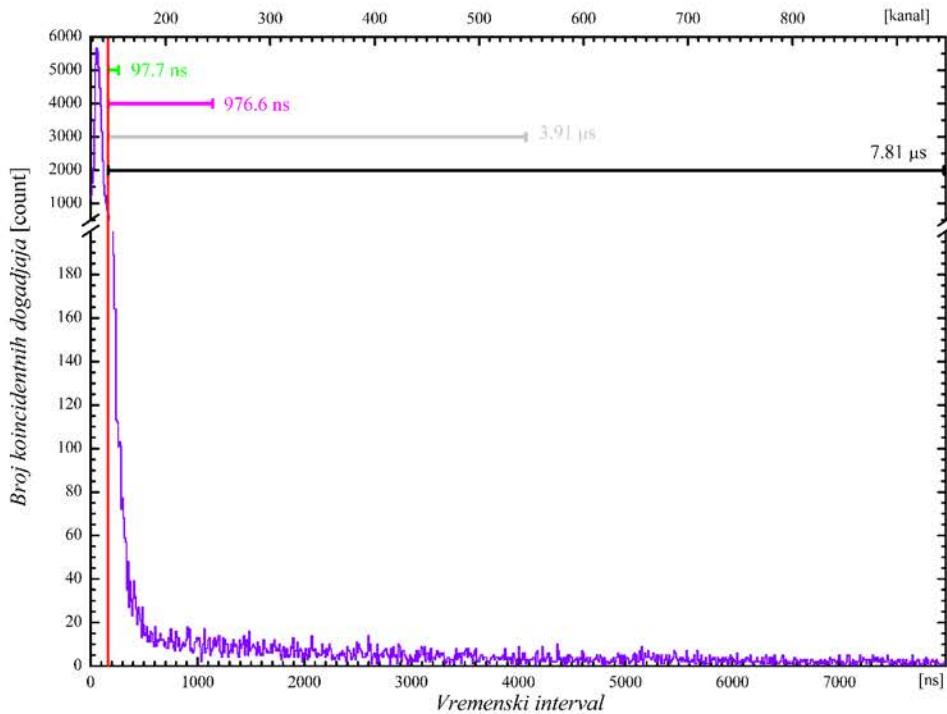
Intenziteti linije dobijeni posmatranjem vremenskih intervala širine manje od 100 ns, su jako loše definisani zbog malog broja obuhvaćenih koincidentnih događaja. Može se primetiti da vrednosti parametara fitovane funkcije (tabela 6.4) imaju i fizički smisao, dakle, $a+b$ predstavlja vrednost najvećeg intenziteta linije za posmatranu širinu vremenskog intervala, a c je početak intervala za koji se dobija maksimalni intenzitet linije.

Sa slike 6.16 se vidi da je za sve početke vremenskih intervala najveći intenzitet linije za najširi interval, što se i očekuje jer je na taj način obuhvaćeno najviše događaja. Takođe, može se zaključiti da sa povećanjem širine intervala intenzitet linije teži istoj zavisnosti od početka intervala. Za širine intervala veće od 1 μ s, zavisnost intenziteta do početka vremenskog intervala je ista (neznatno se menja sa daljim povećanjem širine intervala), što se može očekivati jer je tada broj koincidentnih događaja skoro konstantan.

Za svaku širinu vremenskog intervala linija ima najveći intenzitet za početak od 166.02 ns (145 kanal). Na slici 6.17 prikazani su uporedni spektro germanijumskog detektora za isti početak vremenskog intervala od 166.02 ns sa različitim širinama intervala. Da bi se jasnije videla promena broja događaja sa povećanjem širine vremenskog intervala na slici 6.18 prikazan je deo TAC spektra. Dakle, za širine intervala veće od 1 μ s gotovo da nema razlike u obliku linije (tj. u broju obuhvaćenih koincidentnih događaja).



Slika 6.17 – Uporedni spektri germanijumskog detektora sa istim početkom vremenskog intervala 166.02 ns za četiri širine vremenskog intervala (97.7 ns, 976.6 ns, 3.91 μs i 7.81 μs)

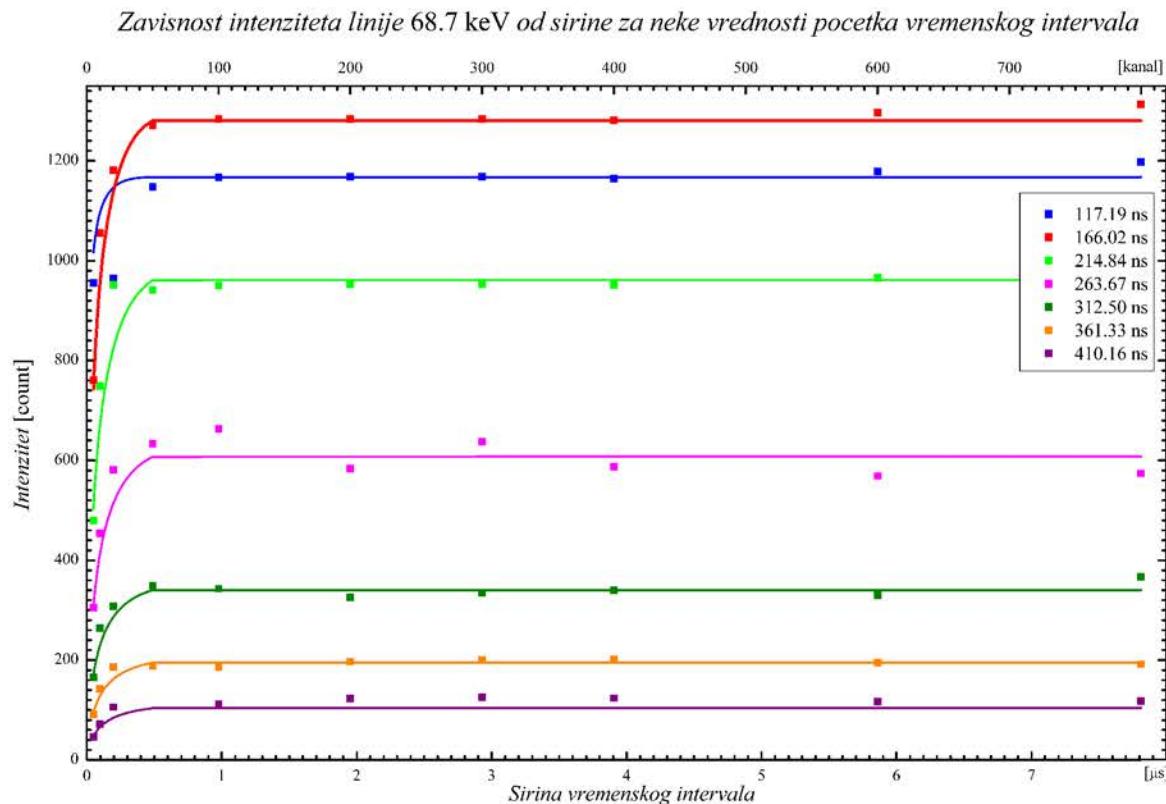


Slika 6.18 – Deo vremenske krive na kojoj je crvenom vertikalnom linijom označen početak intervala 166.02 ns, a horizontalnim linijama prikazane su širine vremenskih intervala

Posmatrana je i promena intenziteta linije sa širinom vremenskog intervala za nekoliko fiksnih vrednosti početka intervala. Zbog velikog broja mogućih početaka intervala, izabrano je 7 karakterističnih. Zavisnost intenziteta linije od širine vremenskog intervala fitovana je na eksponencijalnu funkciju sa dva slobodna parametra. Vrednosti parametara i dobrote fita date su u tabeli 6.5, a grafik zavisnosti prikazan je na slici 6.19. Parametar a predstavlja vrednost maksimalnog intenziteta za posmatrani početak vremenskog intervala.

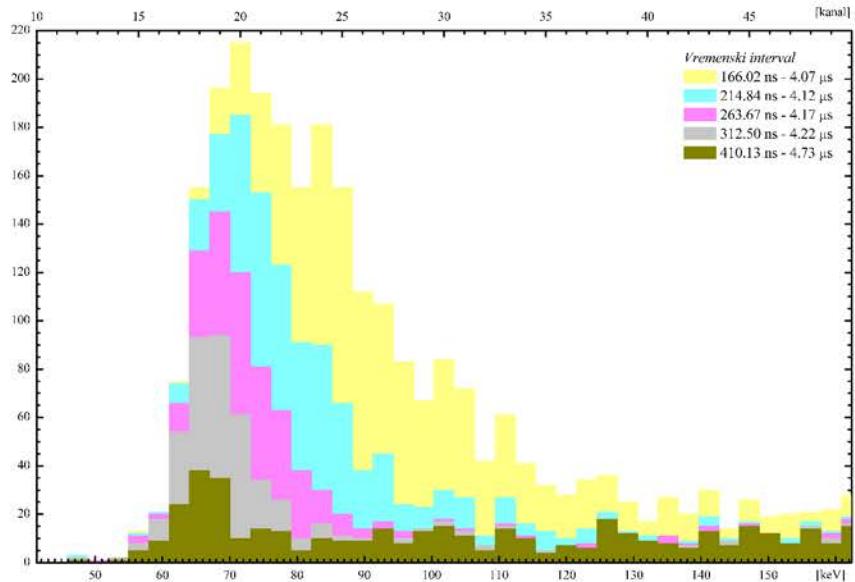
Tabela 6.5 – Parametri eksponencijalne funkcije koja karakteriše zavisnost intenziteta linije 68.7 keV od širine vremenskog intervala za neke izabrane početke intervala

Funkcija	Početak vremenskog intervala [ns]	r^2	a [count]	b [ns $^{-1}$]
$I = a \cdot (1 - e^{-b \cdot T})$	117.19	0.21993	$1.17(4) \cdot 10^3$	0.042(16)
	166.02	0.97478	$1.280(9) \cdot 10^3$	0.0178(8)
	214.84	0.98009	$0.961(8) \cdot 10^3$	0.0152(7)
	263.67	0.89254	$0.608(12) \cdot 10^3$	0.0144(16)
	312.50	0.94211	$0.340(5) \cdot 10^3$	0.0141(11)
	361.33	0.97237	$0.1950(20) \cdot 10^3$	0.0135(8)
	410.16	0.21257	$0.104(15) \cdot 10^3$	0.012(10)



Slika 6.19 – Zavisnost intenziteta linije 68.7 keV od širine za neke vrednosti početka vremenskog intervala

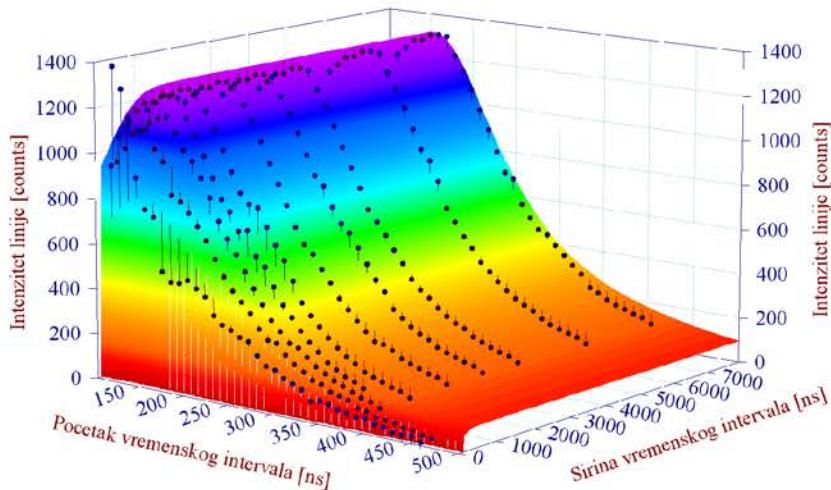
Linija 68.7 keV je za početke 117.19 ns i 410.16 ns (najmanji i najveći početak) vremenskog intervala jako loše definisana (fitovana funkcija ima lošu statistiku) jer je u tim slučajevima sa linijom obuhvaćen i kontinuum (117.19 ns) ili je obuhvaćen samo deo linije (410.16 ns). Dakle, kada je minimalni koincidentni interval između događaja u TAC spektru: 117.19 ns onda su pored neelastičnog rasejanja brzih neutrona na ^{73}Ge prikupljeni i drugi (brzi) koincidentni događaji; a kada je 410.16 ns onda se najveći deo neelastičnog rasejanja brzih neutrona na ^{73}Ge već dogodio, pa se slabo registruje u zakasnelom vremenskom intervalu. Maksimalni intenzitet se dobija za početak vremenskog intervala od 166.02 ns. Za širine vremenskog intervala veće od 1 μs, intenzitet linije teži konstantnoj vrednosti (parametru a u tabeli 6.5). Uporedni spektri sa konstantnom širinom intervala od 3.91 μs sa različitim počecima vremenskog intervala prikazani su na slici 6.20.



Slika 6.20 – Uporedni spektri germanijumskog detektora za istu širinu vremenskog intervala 3.91 μ s za pet početaka vremenskog intervala (166.02 ns, 214.84 ns, 263.67 ns, 312.50 ns i 410.16 ns)

Intenzitet linije zavisi od početka i od širine vremenskog intervala, što se može prikazati trodimenzionim grafikom datim na slici 6.21.

Grafik zavisnosti intenziteta linije 68.7 keV od pocetka i sirine vremenskog intervala



Slika 6.21 – Trodimenzionalni grafik zavisnosti intenziteta linije 68.7 keV od početka i širine vremenskog intervala
Ova zavisnost fitovana je dvodimenzionom Lorentz-ovom funkcijom:

$$I = I_0 + \frac{a}{\left(1 + \left(\frac{t-t_c}{w_1}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \left(\frac{T-T_c}{w_2}\right)^2\right)} \quad (14)$$

Vrednosti parametara su: $I_0 = -130(27)$ count, $a = 1488(28)$ count, $t_c = 148.3(24)$ ns, $T_c = 5.13(28) \cdot 10^3$ ns, $w_1 = 116(5)$ ns i $w_2 = 11.4(9) \cdot 10^3$ ns, a dobrota fita je $r^2 = 0.94998$. Ovi parametri mogu imati sledeće značenje: $I_0 + a$ – vrednost maksimalnog intenziteta linije, t_c – početak vremenskog intervala kojem odgovara maksimalni intenzitet i T_c – širina vremenskog intervala za koju se javlja maksimalni intenzitet linije.

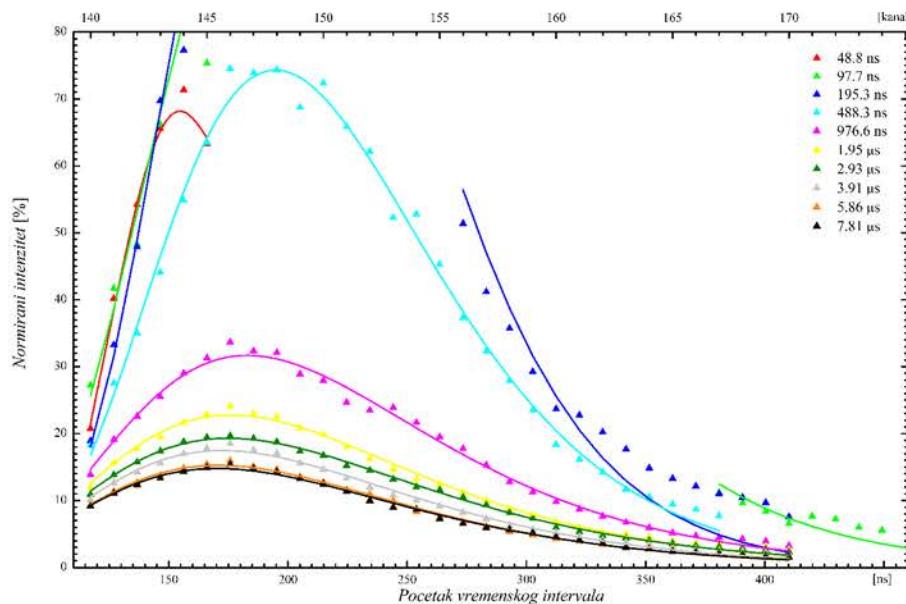
Intenzitet linije 68.7 keV je normiran na intenzitet linije 511 keV u istom spektru (sa istom širinom i početkom vremenskog intervala). Za neke vrednosti vremenskog intervala u spektru anihilaciona linija se nije izdvojila iz kontinuma, za te slučajeve linija 68.7 keV nije normirana. Vrednosti normiranog intenziteta mogu se naći u tabeli prikazanoj u Dodatku.

Posmatrana je zavisnost normiranog intenziteta linija 68.7 keV od početka vremenskog intervala za različite širine intervala. Vrednosti parametara fitovane funkcije, dobrota fita i posmatrane širine vremenskih intervala dati su u tabeli 6.6, a grafik zavisnosti prikazan je na slici 6.22.

Tabela 6.6 – Parametri LogNormal funkcije koja karakteriše zavisnost normiranog intenziteta linije 68.7 keV od početka i širine vremenskog intervala

Funkcija	Širina vremenskog intervala [ns]	r^2	a [%]	b [ns]	c
$I_n = a \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln \frac{t}{b}}{c} \right)^2}$	48.83	0.98581	69.6(11)	154.4(12)	0.180(8)
	97.66	0.96124	111(8)	199(5)	0.310(14)
	195.31	0.97090	128(5)	196.0(16)	0.260(8)
	488.28	0.99244	74.3(8)	194.7(7)	0.294(4)
	976.56	0.99162	31.8(3)	182.7(9)	0.358(5)
	1953.13	0.99290	27.77(22)	176.0(9)	0.373(5)
	2929.69	0.99676	19.30(12)	175.1(7)	0.392(4)
	3906.25	0.99317	17.46(16)	172.2(10)	0.382(5)
	5859.38	0.99532	15.26(12)	170.7(8)	0.383(5)
	7812.50	0.99462	14.78(12)	170.4(9)	0.388(5)

Zavisnost normiranog intenziteta linije 68.7 keV od početka i širine vremenskog intervala



Slika 6.22 – Zavisnost normiranog intenziteta linije 68.7 keV od početka i širine vremenskog intervala

Nedefinisanost tačaka, za liniju 68.7 keV, za male širine vremenskog intervala (manje od 200 ns) je posledica neizdvajanja anihilacione linije iz kontinuma za te intervale. Vrednosti parametara fitovane funkcije odgovaraju: a – vrednost maksimalnog normiranog intenziteta za posmatranu širinu vremenskog intervala i b – početak vremenskog intervala za koji se javlja

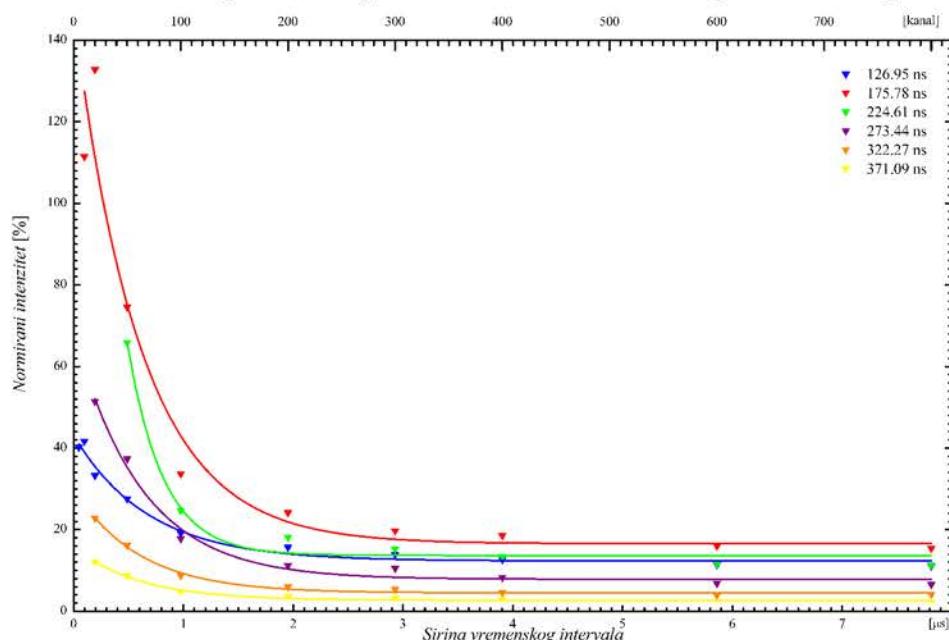
maksimalni normirani intenzitet linije. Normirani inetnzitet linije je najveći za manje vrednosti širine intervala (konkretno 488.28 ns), za razliku od intenziteta koji je najveći za najveću širinu vremenskog intervala. Ovakva zavisnost normiranog intenziteta linije 68.7 keV je prouzrokovana manjim intenzitetom anihilacione linije kod malih širina intervala. Maksimalni normirani intenzitet linije za sve širine intervala je za početak vremenskog intervala od 175.78 ns (146 kanala).

Zavisnost normiranog intenziteta linije 68.7 keV od širine vremenskog intervala za neke vrednosti početka intervala prikazan je na slici 6.23. Posmatrani počeci vremenskog intervala, dobrota fita i vrednosti parametara dati su u tabeli 6.7.

Tabela 6.7 – Parametri eksponencijalne funkcije koja karakteriše zavisnost normiranog intenziteta linije 68.7 keV od širine vremenskog intervala za neke početke intervala

Funkcija	Početak vremenskog intervala [ns]	r^2	a [%]	b [%]	c [ns]
$I_n = a + b \cdot e^{-\frac{T}{c}}$	126.95	0.98130	12.3(8)	30.8(15)	$6.8(9) \cdot 10^2$
	175.78	0.93292	16(6)	130(14)	$6.1(17) \cdot 10^2$
	224.61	0.98631	13.7(12)	$2.3(6) \cdot 10^2$	$3.2(5) \cdot 10^2$
	273.44	0.99156	7.8(10)	61(4)	$6.1(7) \cdot 10^2$
	322.27	0.98286	4.5(3)	25.6(13)	$5.9(5) \cdot 10^2$
	371.09	0.93384	2.65(23)	13.3(10)	$5.9(8) \cdot 10^2$

Zavisnost normiranog intenziteta linije 68.7 keV od širine za neke vrednosti početka vremenskog intervala



Slika 6.23 – Zavisnost normiranog intenziteta linije 68.7 keV od širine za neke vrednosti početka vremenskog intervala

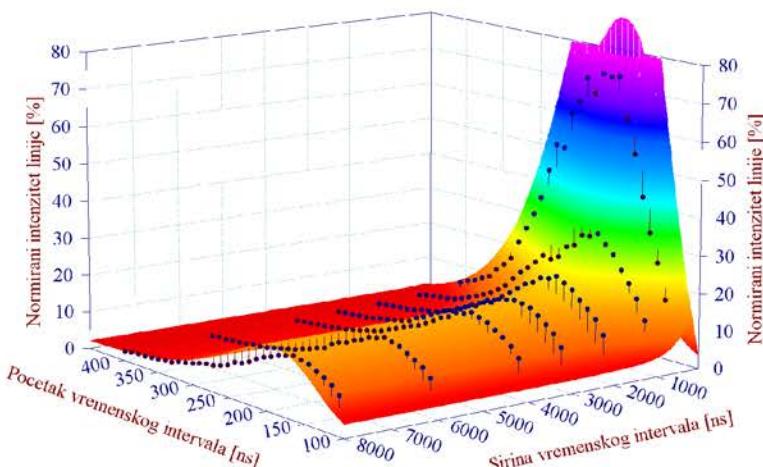
Normirani intenzitet je najveći za početak vremenskog intervala od 175.78 ns, tj. za ovaj početak vremenskog intervala javlja se najveća razlika u intezitetima linija 68.7 keV i 511 keV (tada dominiraju procesi koji prouzrokuju stvaranje linije 68.7 keV u detektorima). Parametar b predstavlja vrednost najvećeg normiranog intenziteta za posmatrani početak vremenskog intervala. Normirani intenzitet linije 68.7 keV opada sa povećanjem širine vremenskog intervala zato što intenzitet anihilacione linije raste sa povećanjem širine intervala. Za vremenske intervale šire od 3 μs normirani intezitet teži konstantnoj vrednosti (parametru a u tabeli 6.7).

Dakle, normirani intenzitet linije 68.7 keV zavisi od početka i širine vremenskog intervala. Ova zavisnost je fitovana dvodimenzionom *LogNormal* funkcijom:

$$I_n = a \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln \frac{t}{b}}{c} \right)^2} + d \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln \frac{T}{e}}{f} \right)^2} + g \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\left(\frac{\ln \frac{t}{b}}{c} \right)^2 + \left(\frac{\ln \frac{T}{e}}{f} \right)^2 \right)} \quad (15)$$

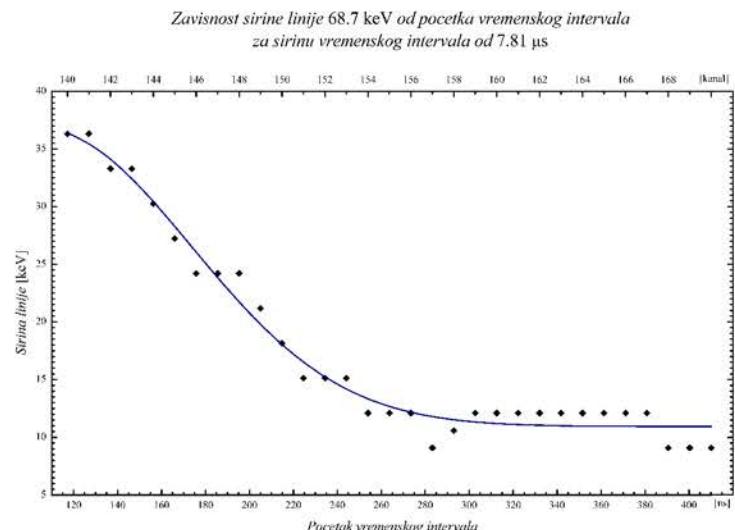
Vrednosti parametara su: $a=17.0(5)\%$, $b=189.7(8)\text{ns}$, $c=0.333(7)$, $d=-7(5)\%$, $e=1.8(12) \cdot 10^2 \text{ns}$, $f=0.90(22)$ i $g=1.1(6) \cdot 10^2\%$, a dobrota fita je $r^2=0.97211$. Parametar g odgovara vrednosti maksimalnog normiranog intenziteta linije 68.7 keV, b – vrednost početka vremenskog intervala za koji se javlja maksimalni normirani inenzitet i e – širina vremenskog intervala sa maksimalnim normiranim intenzitetom. Grafik zavisnosti prikazan je na slici 6.24.

Grafik zavisnosti normiranog intenziteta linije 68.7 keV od početka i širine vremenskog intervala



Slika 6.24 – Trodimenijski grafik zavisnosti normiranog intenziteta linije 68.7 keV od početka i širine vremenskog intervala

Kod γ linije na 68.7 keV javlja se zavisnost širine linije od početka vremenskog intervala. Pri analizi spektara samo je određena širina linije na polovini visine (ove vrednosti date su u tabeli u Dodatku), a nakon energijske kalibracije izračunata je širina linije u keV. Pošto je najveći intenzitet linije za naveću širinu intervala, onda je zavisnost širine linije od početka vremenskog intervala analizirana za 7.81 μs (slika 6.25).



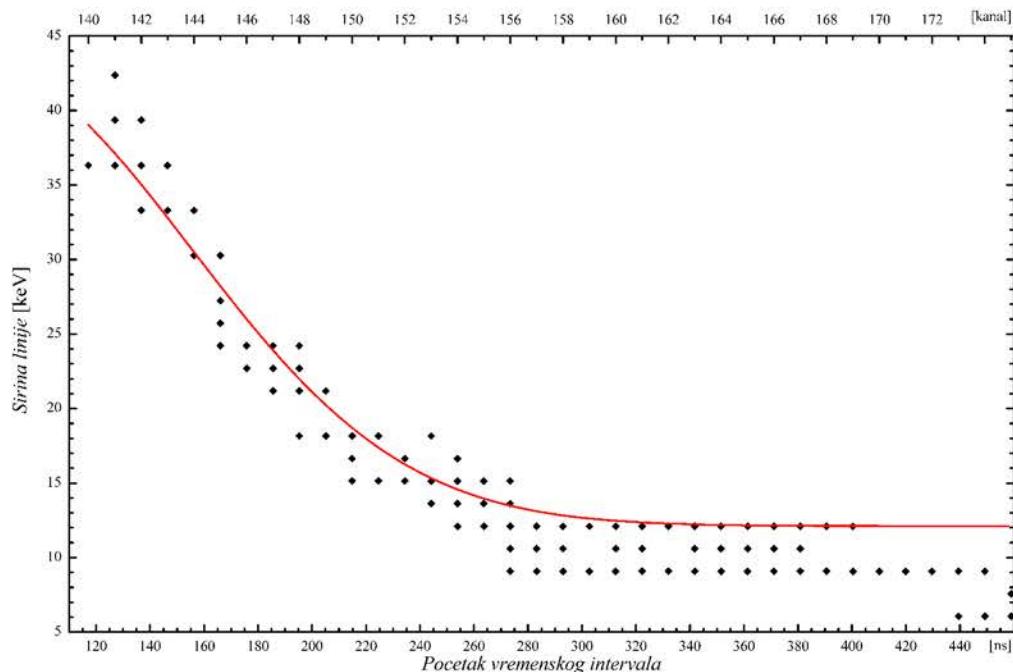
Slika 6.25 – Grafik zavisnosti širine linije 68.7 keV od početka vremenskog intervala za širinu od 7.81 μs

Za svaku širinu vremenskog intervala zavisnost širine linije od početka vremenskog intervala je ista, tj. širina linije ostaje konstantna za fiksni početak vremenskog intervala, a pri promeni širine intervala. Kao posledica, zavisnost širine linije od početka intervala može se fitovati jedinstvenom funkcijom za sve širine intervala. Vrednosti paremetara fitovane funkcije dati su u tabeli 6.8, a grafik zavisnosti prikazan je na slici 6.26.

Tabela 6.8 – Parametri eksponencijalne funkcije koja karakteriše zavisnost širine linije 68.7 keV od početka vremenskog intervala

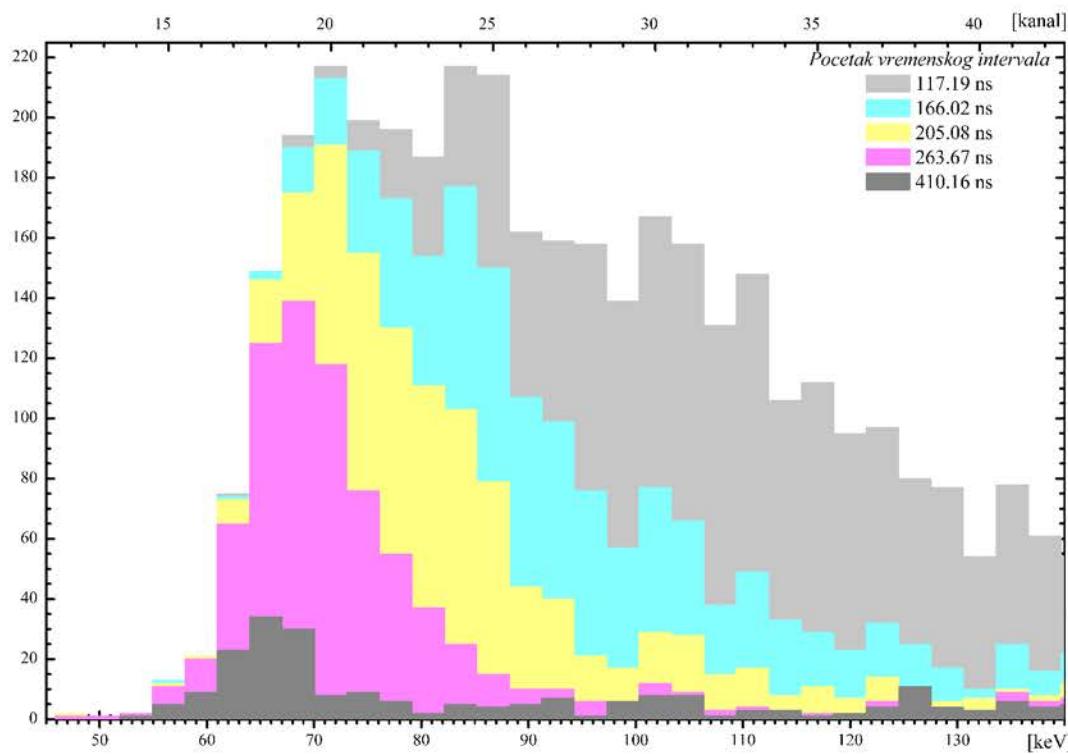
Funkcija	Širina vremenskog intervala [μs]	r^2	a [keV]	b [keV]	c [ns]	d [ns]
$\sigma_{1/2} = a + b \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-c}{d} \right)^2}$	7.81	0.97584	10.9(4)	25.8(18)	105(12)	68 (8)
	Sve širine intervala	0.89281	12.1(3)	31(3)	76(17)	79 (8)

*Zavisnost sirine linije 68.7 keV od pocetka vremenskog intervala
za sve sirine vremenskih intervala*



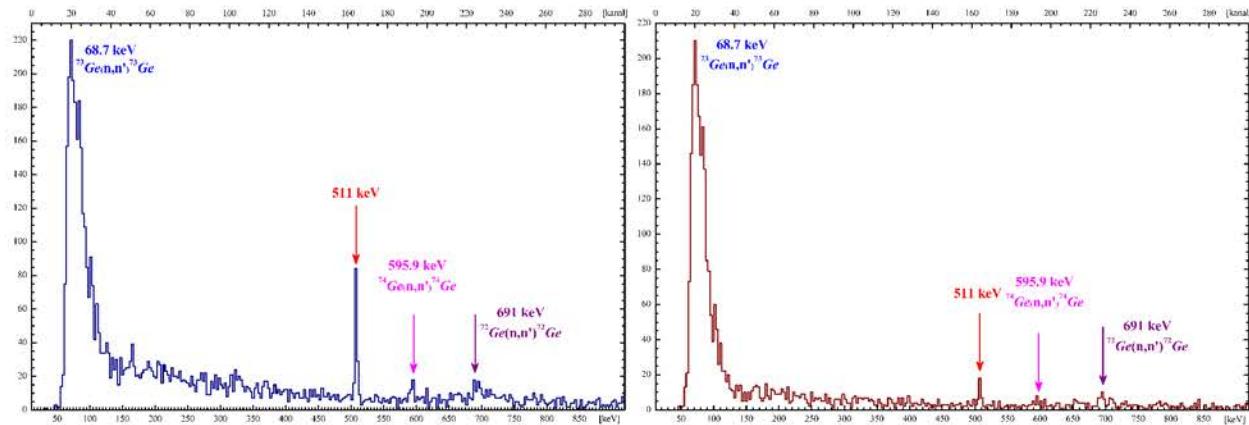
Slika 6.26 – Zavisnost širine linije 68.7 keV od početka vremenskog intervala za sve širine vremenskog intervala

Širina linije 68.7 keV eksponencijalno opada sa povećanjem početka vremenskog intervala. Najveća širina linije odgovara najmanjoj vrednosti početka vremenskog intervala, jer je tada pored linije zahvaćen i deo kontinuma (linija je tek počela da „izlazi“ iz kontinuma). Dok je za najveći posmatrani početak vremenskog intervala širina linije najmanja, jer je tada obuhvaćen samo vrh linije. Da bi se videla promena širine linije 68.7 keV, uporedni spektri za širinu vremenskog intervala od 976.6 ns, dobijeni za neke početke vremenskog intervala prikazani su na slici 6.27. Za početak vremenskog intervala od 166.02 ns, kada je intenzitet linije maksimalan, dobija se da je širina linije 28.2 keV.



Slika 6.27 – Uporedni spektri za neke vrednosti početka vremenskog intervala sa širinom od 976.6 ns

Na slici 6.28 prikazani su spektri germanijumskog detektoru kod kojih se javlja maksimalni intenzitet (vremenski interval sa početkom 166.02 ns i širinom 7.81 μ s) i maksimalni normirani intenzitet (vremenski interval sa početkom 175.78 ns i širinom 488.28 ns) linije 68.7 keV.



Slika 6.28 – Koincidentni spektri germanijumskog detektora za vremenske intervale sa:

- a) početkom 166.02 ns i širinom 7.81 μ s
- b) početkom 175.78 ns i širinom 488.28 ns

6.4. Linija 511 keV

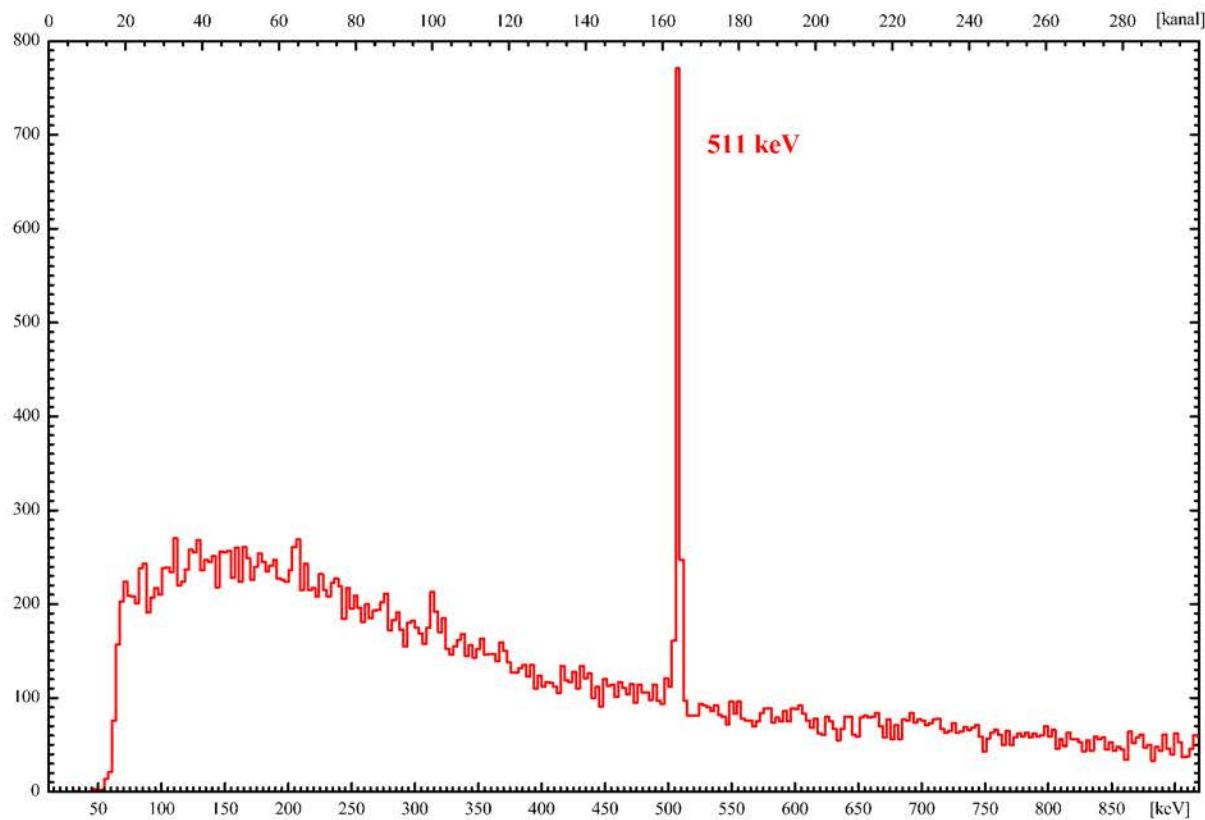
Anihilaciona linija se javlja kao posledica rekombinacije pozitrona i elektorna. Pozitroni nastaju kao rezultat elektromagnetskih pljuskova uzrokovanih interakcijom kosmičkih miona sa materijalom zaštite detektora. Posmatrana je vremenska zavisnost intenziteta anihilacione linije. Karakteristike linije 511 keV dobijene iz koincidentnih spektara posmatranih u vremenskim intervalima sa različitim vrednostima početka i širine date su u tabeli koja je prikazana u Dodatku. Posmatrane početne vrednosti i širine vremenskih intervala za anihilacionu liniju date su u tabeli 6.9.

Tabela 6.9 – Posmatrane širine i počeci vremenskog intervala za liniju 511 keV

Početak vremenskog intervala t								Širina vremenskog intervala T	
[kanal]	[ns]	[kanal]	[ns]	[kanal]	[ns]	[kanal]	[ns]	[kanal]	[ns]
128	0.00	139	107.42	150	214.84	161	332.27	5	48.83
129	9.77	140	117.19	151	224.61	162	332.03	10	97.66
130	19.53	141	126.95	152	234.38	163	341.80	20	195.31
131	29.30	142	136.72	153	244.14	164	351.56	50	488.28
132	39.06	143	146.48	154	253.91	165	361.33	100	976.56
133	48.83	144	156.25	155	263.67				
134	58.59	145	166.02	156	273.44	166	371.09	200	1953.13
135	68.36	146	175.78	157	283.20	167	380.86	300	2929.69
136	78.13	147	185.55	158	292.97	168	390.63	400	3906.25
137	87.89	148	195.31	159	302.73	169	400.39	600	5859.38
138	97.66	149	205.08	160	312.50	170	410.16	800	7812.50

Anihilaciona linija je u koincidentnom spektru germanijumskog detektora veoma istaknuta već od početnog trenutka vremenskog spektra. Intenzitet anihilacione linije je normiran na maksimalnu vrednost koja se dobija za vremenski interval sa početkom 0 ns i širinom 8.2 μ s (ukupan vremenski interval).

Spektar germanijumskog detektora na kojem anihilaciona linija ima najveći intenzitet prikazan je na slici 6.29. Pošto su intenziteti linije normirani na jednu vrednost, vremenska zavisnost intenziteta ista je kao i vremenska zavisnost normiranih intenziteta, tako da se razmatra samo vremenska zavisnost normiranog intenziteta anihilacione linije.

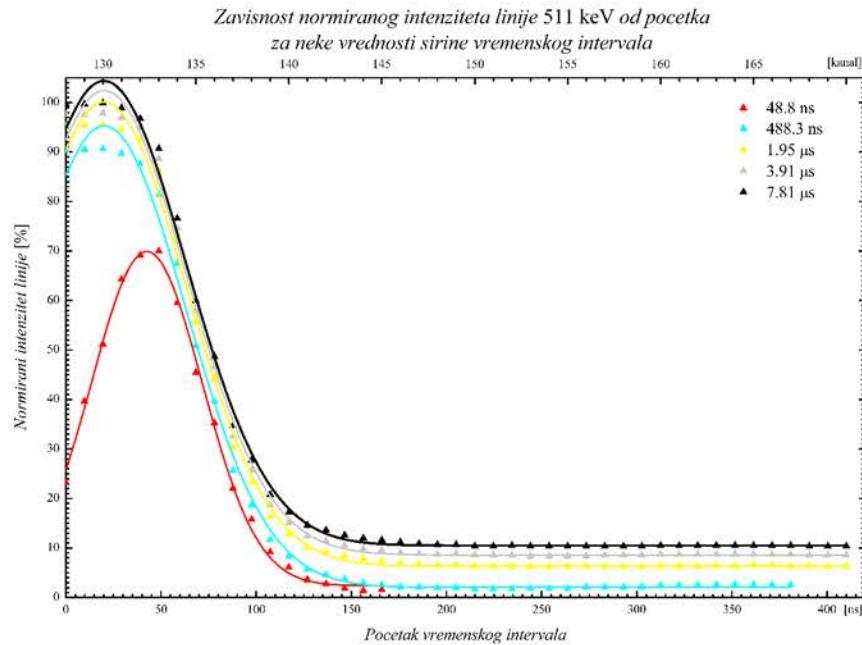


Slika 6.29 – Deo koincidentnog spektra germanijumskog detektoru u vremenskom intervalu sa početkom 0 ns i širinom 8.2 μ s

Zavisnost normiranog intenziteta linije 511 keV od početka vremenskog intervala za fiksnu širinu intervala može se fitovati Gauss-ovom funkcijom sa četiri parametra. Grafik zavisnosti za neke širine vremenskog intervala prikazan je na slici 6.30. U tabeli 6.10 date su vrednosti posmatrane širine vremenskog intervala, dobrote fita i parametara.

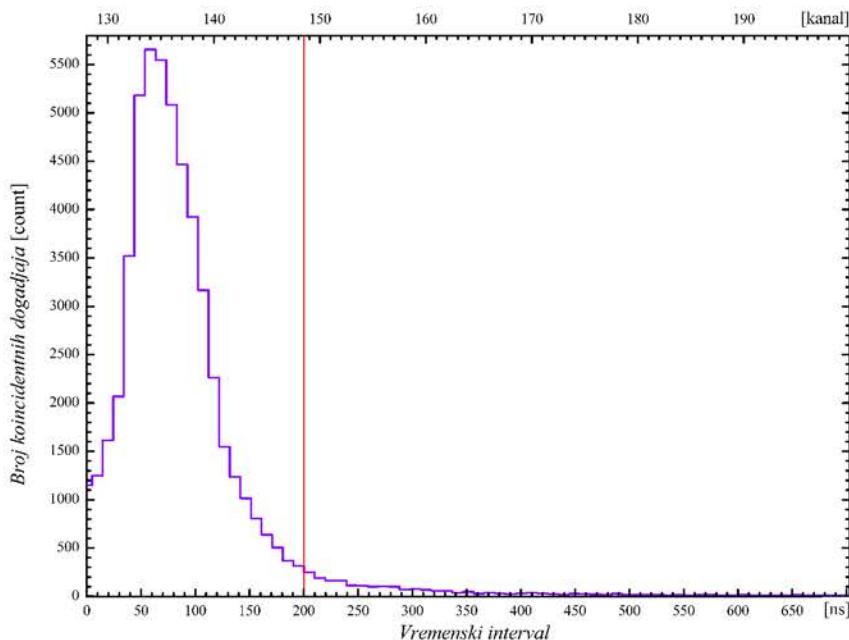
Tabela 6.10 – Parametri Gauss-ove funkcije koja karakteriše zavisnost normiranog intenziteta linije 511 keV od početka i širine vremenskog intervala

Funkcija	Širina vremenskog intervala [ns]	r^2	a [%]	b [%]	c [ns]	d [ns]
$I_n = a + b \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-c}{d} \right)^2}$	48.83	0.99652	2.4(6)	67.6(9)	42.6(4)	29.1(5)
	97.66	0.99690	1.1(5)	88.4(10)	24.2(9)	40.4(9)
	195.31	0.99634	1.3(4)	92.9(10)	20.6(11)	42.1(10)
	488.28	0.99680	2.1(4)	93.2(9)	20.3(10)	42.7(9)
	976.56	0.99689	4.5(3)	93.1(8)	20.2(10)	42.9(9)
	1953.13	0.99691	6.3(3)	93.8(8)	20.2(9)	42.9(9)
	2929.69	0.99693	7.4(3)	93.9(8)	20.2(9)	43.0(9)
	3906.25	0.99698	8.6(3)	93.8(8)	20.3(9)	42.9(9)
	5859.38	0.99698	10.0(3)	94.0(8)	20.2(9)	43.0(9)
	7812.50	0.99698	10.5(3)	93.9(8)	20.1(9)	43.1(9)



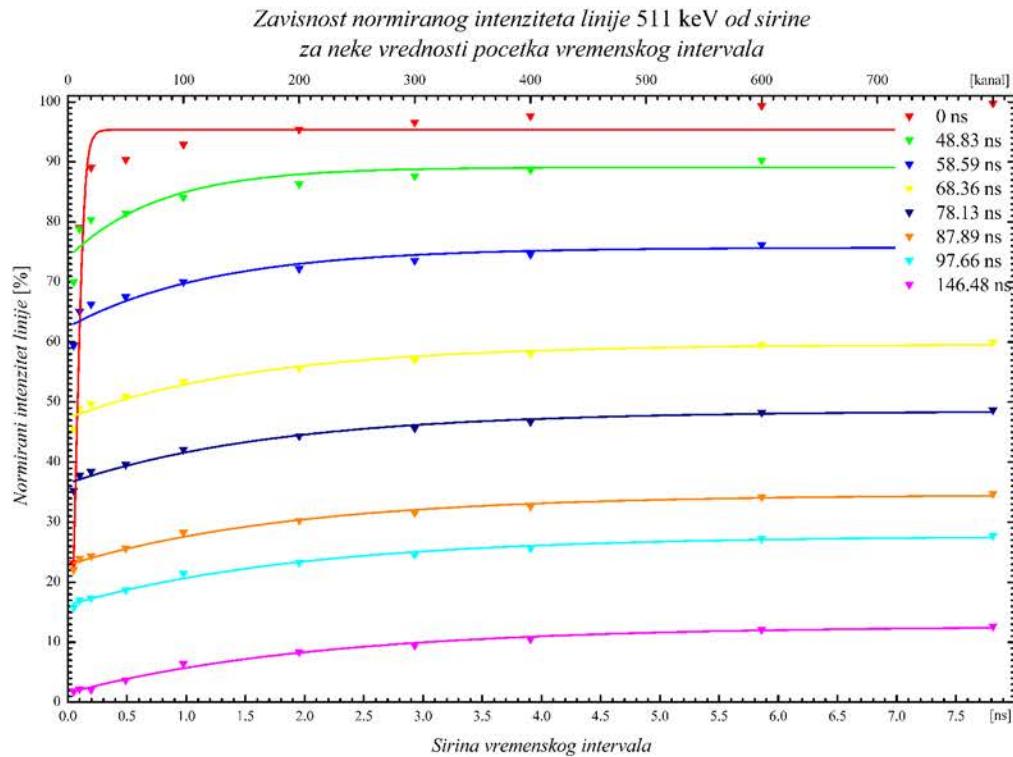
Slika 6.30 – Zavisnost normiranog intenziteta linije 511 keV od početka za neke vrednosti širine vremenskog intervala

Vrednosti parametara fitovane krive predstavljaju: $a+b$ – vrednost maksimalnog normiranog intenziteta linije za posmatranu širinu vremenskog intervala, c – početak vremenskog intervala kod kojeg se javlja maksimalna vrednost normiranog intenziteta za posmatranu širinu intervala. Normirani intenzitet linije je najveći za najveću širinu vremenskog intervala (za sve početke intervala), što se i očekuje jer je na taj način prikupljeno najviše koincidentnih događaja. Za širine vremenskog intervala veće od 1 μ s, zavisnost normiranog intenziteta linije od početka vremenskog intervala je ista. Sa povećanjem početka vremenskog intervala, pri konstantnoj vrednosti širine intervala, normirani intenzitet opada jer je obuhvaćeno manje koincidentnih događaja. Za početke veće od 200 ns normirani intenzitet postaje konstantan za posmatranu širinu vremenskog intervala. Zavisnost broja koincidentnih događaja od vremenskog intervala prikazana je na slici 6.31. Povećanjem vremenskog intervala smanjuje se broj događaja.



Slika 6.31 – Deo vremenske krive

Zavisnost normiranog intenziteta anihilacione linije od širine vremenskog intervala za neke početke intervala prikazana je na slici 6.32.



Slika 6.32 – Grafik zavisnosti normiranog intenziteta linije 511 keV od širine za neke vrednosti početka vremenskog intervala

Експоненцијална функција са три слободна параметра може описати зavisност нормираног интензитета анихиляционе линије од ширине временског интервала. Параметар a описује вредност максималног нормираног интензитета линије за посматрани почетак временског интервала. Појечи временског интервала, доброја фита и вредности параметара приказани су у табели 6.11.

Tabela 6.11 – Parametri eksponencijalne funkcije koja karakterише zavisnost normiranog intenziteta linije 511 keV od širine vremenskog intervala za neke početke intervala

Funkcija	Početak vremenskog intervala [ns]	r^2	a [%]	b [%]	c [ns]
$I_n = a + b \cdot e^{-\frac{T}{c}}$	0.00	0.97271	95.3(14)	- 3.0(7) · 10 ²	34(5)
	48.83	0.82135	89.1(14)	- 15.0(24)	7(4) · 10 ²
	58.59	0.89632	75.7(12)	- 13.2(15)	1.2(4) · 10 ³
	68.36	0.95326	59.6(8)	- 12.3(9)	1.6(4) · 10 ³
	78.13	0.97274	48.5(7)	- 12.0(7)	1.8(3) · 10 ³
	87.89	0.98207	34.6(5)	- 11.7(6)	1.9(3) · 10 ³
	97.66	0.98810	27.7(4)	- 11.5(5)	1.99(25) · 10 ³
	146.48	0.98990	12.6(4)	- 11.1(4)	2.12(25) · 10 ³

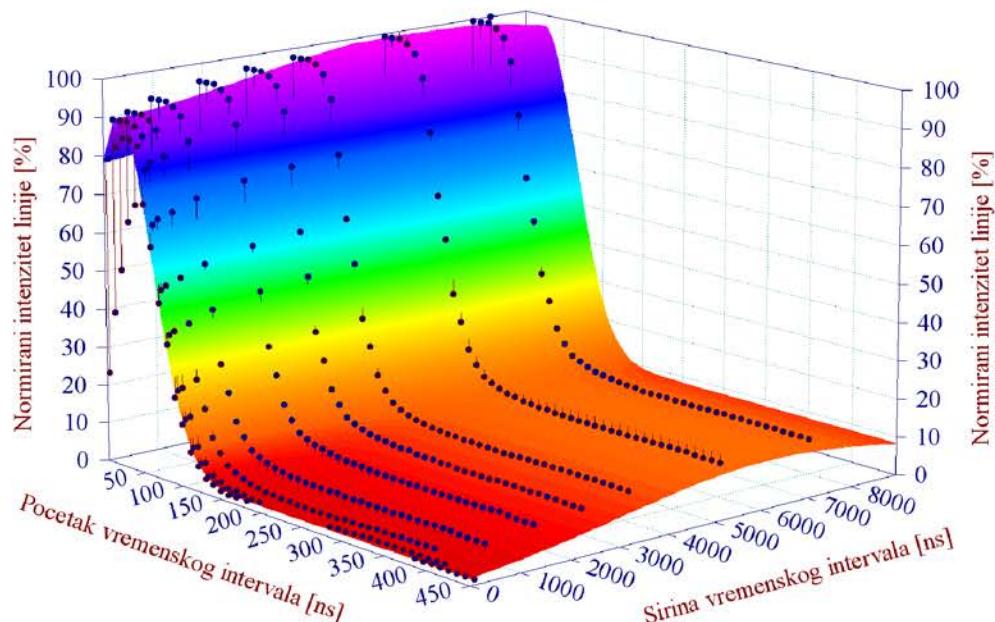
Као што се и очекује максимални нормирани интензитети за све ширине временског интервала добијају се за најмањи почетак интервала (0 ns), јер су на тај начин обухваћени брзи коинцидентни догађаји. Са слика 6.30 и 6.32 се види да са повећањем ширине временског интервала, за вредности веће од 1 μs, нормирани интензитет линије се јако благо менја, тј. теži вредности параметра a у табели 6.11.

Zavisnost normiranog intenziteta anihilacione linije od početka i širine vremenskog intervala fitovana je dvodimenzonom *Gauss*-ovom funkcijom sa šest slobodnih parametara:

$$I_n = a \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-b}{c} \right)^2} + d \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{T-e}{f} \right)^2} \quad (16)$$

Vrednosti parametara su: $a=89.2(8)\%$, $b=22.9(8)\text{ ns}$, $c=41.3(8)\text{ ns}$, $d=12.4(6)\%$, $e=6.2(3) \cdot 10^3\text{ ns}$ i $f=3.2(3) \cdot 10^3\text{ ns}$, a dobrota fita je $r^2=0.97183$. Parametar $a+d$ odgovara vrednosti maksimalnog normiranog intenziteta linije, b – početak vremenskog intervala, a e – širinu vremenskog intervala za koji se dobija najveći normirani intenzitet linije. Grafik zavisnosti prikazan je na slici 6.33.

Grafik zavisnosti normiranog intenziteta linije 511 keV od pocetka i sirine vremenskog intervala



Slika 6.33 – Trodimenzionalni grafik zavisnosti normiranog intenziteta linije 511 keV od početka i širine vremenskog intervala

Širina na polovini visine anihilacione linije ne zavisi od izbora vremenskog intervala, ona je konstantna i iznosi 3.03 keV.

6.5. Linija 595.9 keV

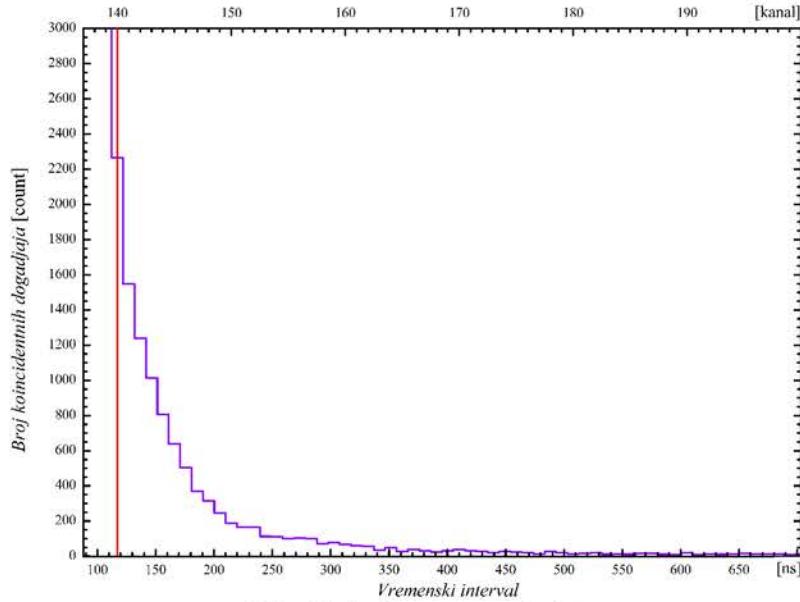
Foton energije 595.9 keV nastaje emisijom pobuđenog jezgra ^{74}Ge , nakon neelastičnog rasejanja brzih neutrona, odnosno reakcijom $^{74}Ge(n,n')^{74}Ge$. Linija koja nastaje u spektru ovom reakcijom je asimetrična, zbog uzmaka jezgra nakon rasejanja neutrona.

Vremenski intervali za koje je posmatrana ova linija prikazani su u tabeli 6.12. Karakteristike linije 595.9 keV dobijene za posmatrane vremenske intervale prikazane su u tabeli u dodatku.

Tabela 6.12 – Posmatrane širine i počeci vremenskog intervala za liniju 595.9 keV

Početak vremenskog intervala t						Širina vremenskog intervala T	
[kanal]	[ns]	[kanal]	[ns]	[kanal]	[ns]	[kanal]	[ns]
140	117.19	150	214.84	160	312.5	10	97.66
141	126.95	151	224.61	161	322.27		
142	136.72	152	234.38	162	332.03	20	195.31
143	146.48	153	244.14	163	341.8	50	488.28
144	156.25	154	253.91	164	351.56	100	976.56
145	166.02	155	263.67	165	361.33	200	1953.13
146	175.78	156	273.44	166	371.09	300	2929.69
147	185.55	157	283.20	167	380.86	400	3906.25
148	195.31	158	292.97	168	390.63	600	5859.38
149	205.08	159	302.73	169	400.39	800	7812.50
				170	410.16		

Linija 595.9 keV, kao i linija 68.7 keV, spada u zakasnele koincidencije, što utiče na njen intenzitet i statistiku. Na slici 6.34 prikazana je deo vremenske krive na kojoj je označen početak vremenskog intervala za koji je ova linija počela da se javlja.

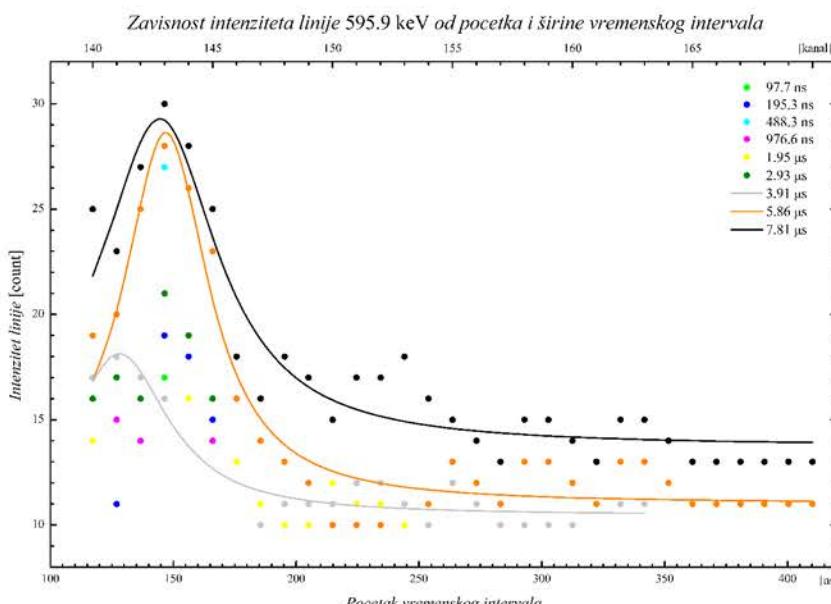


Slika 6.34 – Deo vremenske krive

Zavisnost intenziteta linije od početka vremenskog intervala, za različite širine intervala, prikazana je ne slici 6.35. Zbog male definisanosti linije, tačnije malog broja tačaka za neke širine intervala, fitovano je samo tri širine vremenskog intervala za koje je postojao dovoljan broj tačaka. Fitovana funkcija, posmatrane širine intervala, dobrota fita i vrednosti dobijenih parametara prikazani su u tabeli 6.13.

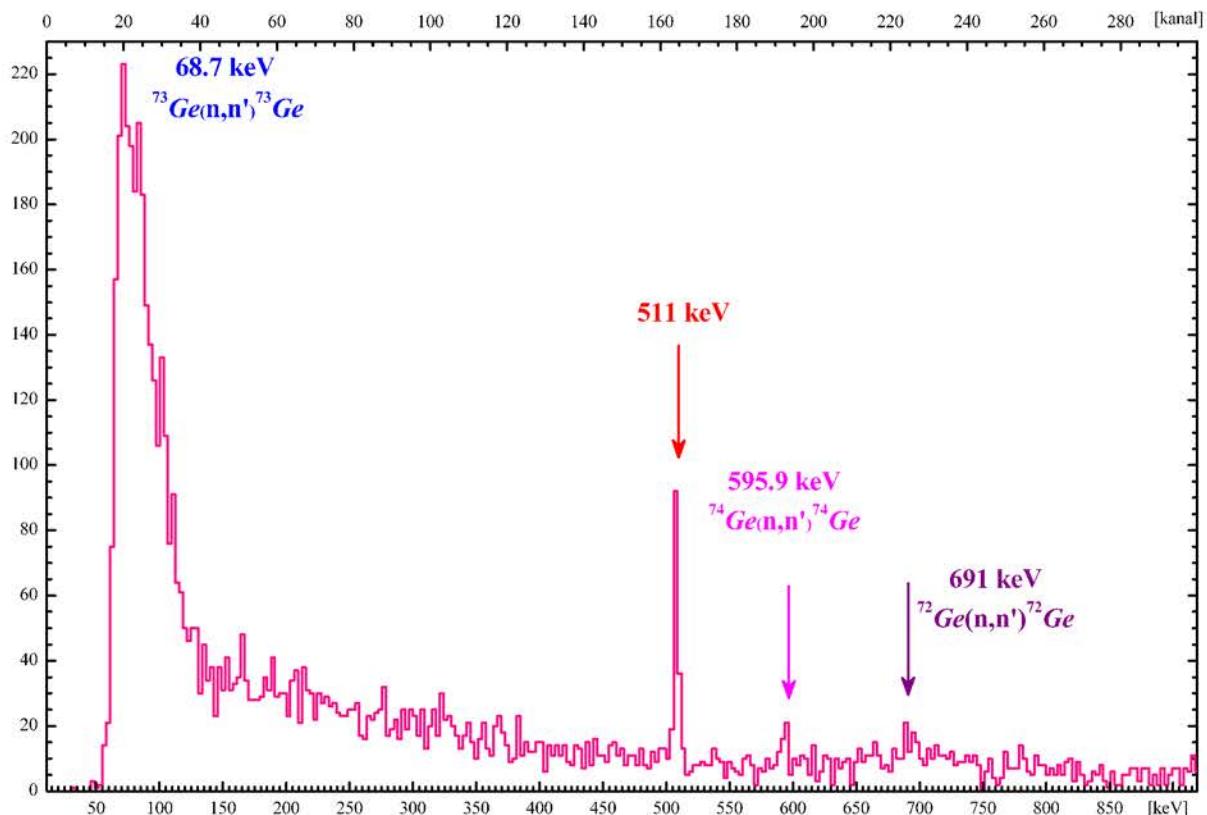
Tabela 6.13 – Parametri Lorentz-ove funkcije koja karakteriše zavisnost intenziteta linije 595.9 keV od početka za neke širine vremenskog intervala

Funkcija	Širina vremenskog intervala [ns]	r^2	a [count]	b [count]	c [ns]	d [ns]
$I = a + \frac{b}{1 + \left(\frac{t-c}{d}\right)^2}$	3906.25	0.90340	10.5(3)	7.7(6)	128(3)	24(6)
	5859.38	0.92985	11.0(3)	17.6(10)	147.0(12)	20.9(21)
	7812.50	0.89903	13.7(4)	15.6(11)	144.6(20)	28(4)



Slika 6.35 – Zavisnost intenziteta linije 595.9 keV od početka za neke vrednosti širine vremenskog intervala

Parametri imaju značenje: $a+b$ – maksimalna vrednosti intenziteta linije za posmatranu širinu vremenskog intervala, c – početak intervala za koji se dobija najveća širina. Na slici 6.35 prikazane su i tačke za ostale širine vremenskog intervala. Za svaki početak intervala najveći intenzitet se dobija za najveću širinu vremenskog intervala, što se i očekuje jer je na taj način prikupljeno najviše koincidentnih događaja. Postoji veći broj tačaka (bolja definisanost linije) za veće širine vremenskog intervala (koje su i fitovane). Za sve širine vremenskog intervala, najveći intenzitet se dobija za početak od 146.48 ns (slika 6.36).



Slika 6.36 – Koincidentni spektar germanijumskog detektora za vremenski interval sa početkom 146.48 ns i širinom 7.81 μ s

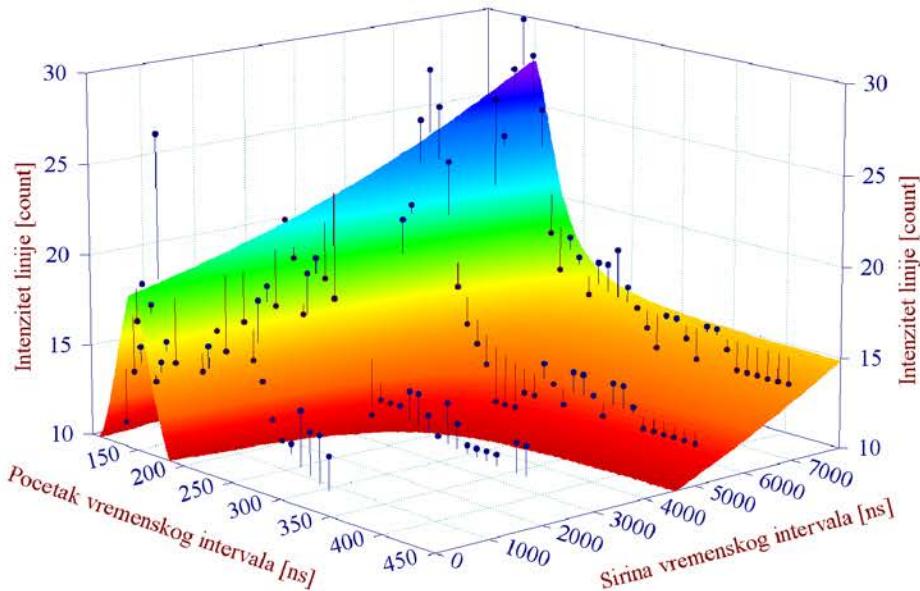
Zavisnost intenziteta linije od širine vremenskog intervala za različite vrednosti početka intervala nije razmatrana zbog malog broja tačaka po početku intervala, što je posledica slabe definisanosti linije. Za sve širine intervala, na osnovu podataka iz tabele prikazane u dodatku, najveći intenzitet se javlja za početak od 146.48 ns.

Zavisnost intenziteta linije 595.9 keV od početka i širine vremenskog intervala, posmatrana je za sve tačke i fitovana dvodimanzionom *Lorentz*-ovom funkcijom sa šest slobodnih parametara oblika:

$$I = \frac{a}{1 + \left(\frac{t-b}{c}\right)^2} + \frac{d}{1 + \left(\frac{T-e}{f}\right)^2} \quad (17)$$

Dobrota fita je $r^2=0.80286$, a vrednosti parametara su: $a=12.9(7)$ count, $b=147.3(12)$ ns, $c=25.9(25)$ ns, $d=21(12)$ count, $e=13(6)$ μ s i $f=8.3(9)$ μ s, grafik zavisnosti dat je na slici 6.37. Parametri treba da predstavljaju $a+d$ – maksimalna vrednost intenziteta linije, b – početak, a e – širinu vremenskog intervala za koji se javlja maksimalni intenzitet linije.

Grafik zavisnosti intenziteta linije 595.9 keV od pocetka i sirine vremenskog intervala

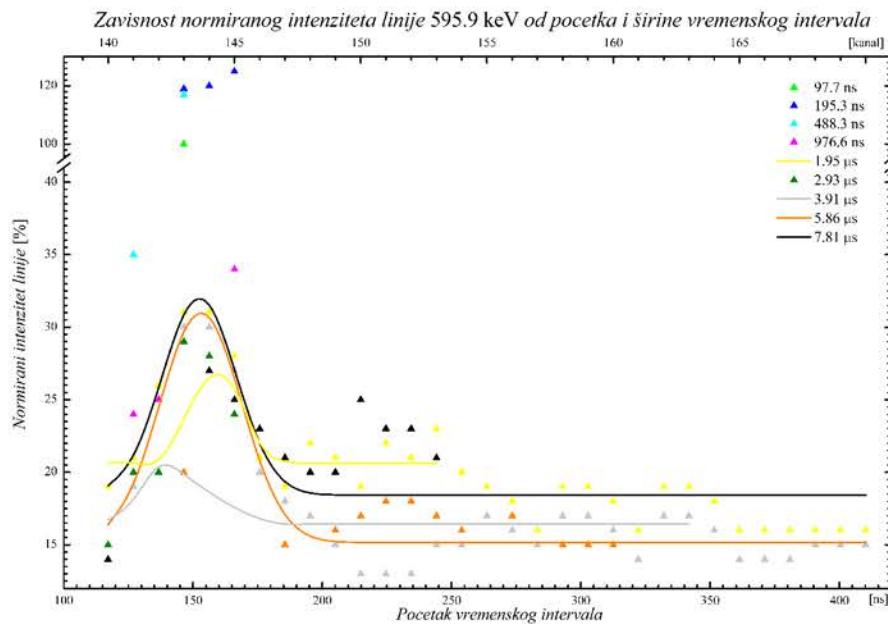


Slika 6.37 – Trodimenzionalni grafik zavisnosti intenziteta linije 595.9 keV od početka i širine vremenskog intervala

Intenzitet linije 595.9 keV je normiran na anihilacionu liniju. Ove linije su posmatrane u istom spektru (sa istim početkom i širinom vremenskog intervala). Zavisnost normiranog intenziteta od početka vremenskog intervala nije fitovana za sve posmatrane vrednosti širine intervala, zbog malog broja tačaka za jednu širinu intervala. Grafik zavisnosti prikazan je na slici 6.38. Fitovana kriva, posmatrane širine intervala, dobrota fita i vrednosti parametara dati su u tabeli 6.14.

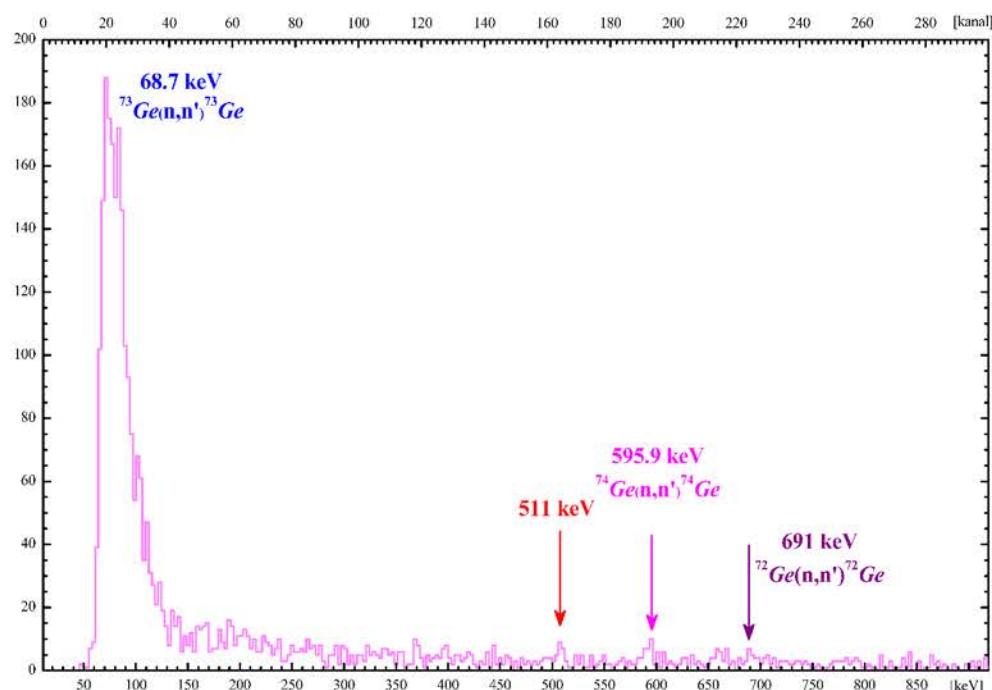
Tabela 6.14 – Parametri Gauss-ove funkcije koja karakteriše zavisnost normiranog intenziteta linije 595.9 keV od početka za neke širine vremenskog intervala

Funkcija	Širina vremenskog intervala [ns]	r^2	a [%]	b [%]	c [ns]	d [ns]
$I_n = a + b \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-c}{d} \right)^2}$	1953.13	0.38602	20.6(10)	6(3)	160(7)	9(8)
	3906.25	0.48138	16.4(3)	4.2(13)	140(4)	10(5)
	5859.38	0.91775	15.2(3)	15.8(9)	153.0(11)	15.8(11)
	7812.50	0.74477	18.4(4)	13.6(16)	152.4(19)	14.3(20)



Slika 6.38 – Zavisnost normiranog intenziteta linije 595.9 keV od početka za neke vrednosti širine vremenskog intervala

Normirani intenzitet linije 595.9 keV ima veće vrednosti za manje širine vremenskog intervala, što je posledica većeg intenziteta anihilacione linije za veće širine intervala. Mali broj tačaka po jednoj širini intervala prouzrokovao je lošu definisanost vrednosti parametara fitovane funkcije. Sa slike 6.38 se vidi da je najveći normirani intenzitet linije sa početkom na 166.02 ns i širinom vremenskog intervala 195.3 ns. Koincidentni spektar germanijumskog detektoru koji prikazuje najveću vrednosti normiranog intenziteta linije 595.9 keV dat je na slici 6.39.



Slika 6.39 – Koincidentni spektar germanijumskog detektoru za vremenski interval sa početkom 166.02 ns i širinom 195.3 ns

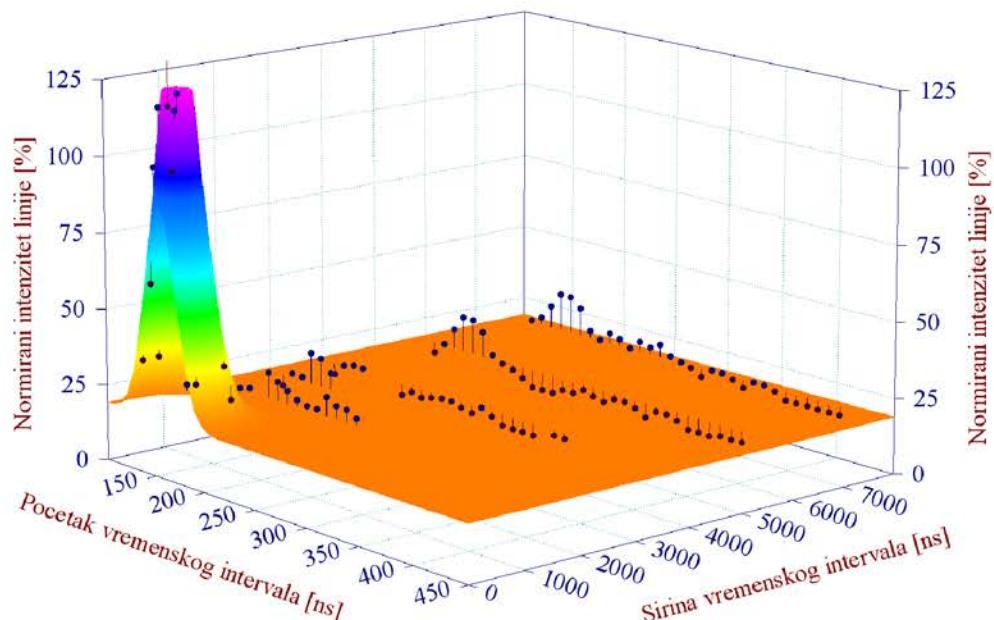
Za sve vrednosti širine vremenskog intervala, najveći norimirani intenzitet se dobija za početak oko 165 ns. Zavisnost normiranog intenziteta od širine vremenskog intervala nije posmatrana zbog malog broja tačaka po fiksiranoj vrednosti početka intervala.

Zavisnost normiranog intenziteta linije 595.9 keV od početka i širine vremenskog intervala za sve tačke fitovana je dvodimenzionom *Gauss*-ovom funkcijom sa šest slobodnih parametara:

$$I_n = a + b \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\left(\frac{t-c}{d} \right)^2 + \left(\frac{T-e}{f} \right)^2 \right)} \quad (18)$$

Vrednosti parametara su: $a=18.9(5)\%$, $b=131(5)\%$, $c=157.3(7)\text{ns}$, $d=15.7(8)\text{ns}$, $e=354(15)\text{ns}$ i $f=319(20)\text{ns}$, a dobrota fita je $r^2=0.95537$, $a+b$ predstavlja vrednost maksimalnog normiranog intenziteta linije, c – početak a e – širina vremenskog intervala za koji se javlja maksimalni normirani intenzitet. Grafik zavisnosti prikazan je na slici 6.40.

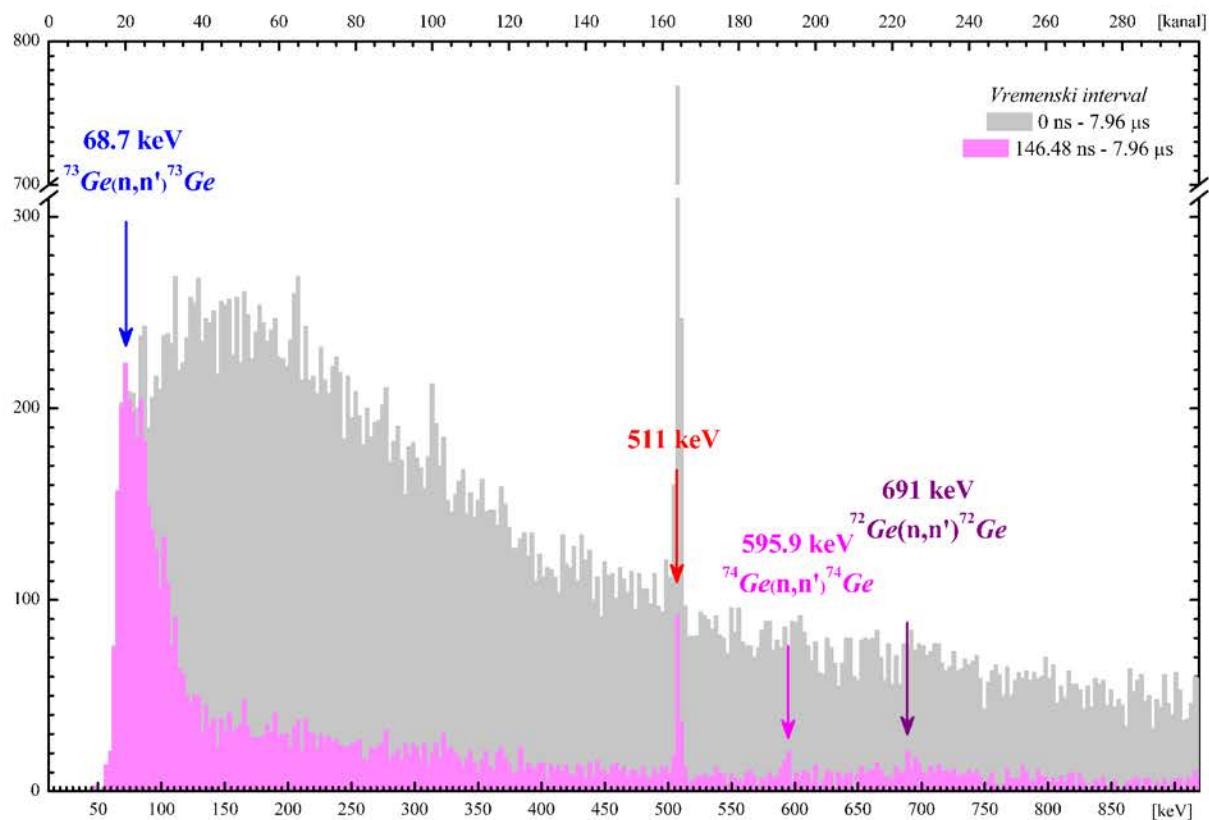
Grafik zavisnosti normiranog intenziteta linije 595.9 keV od pocetka i sirine vremenskog intervala



Slika 6.40 – Trodimenijski grafik zavisnosti normiranog intenziteta linije 595.9 keV od početka i širine vremenskog intervala

Širina linije na polovini visine jeste vremenski zavisna, ali zbog loše definisanosti linije ona jako malo varira, pa je njena vrednost oko 6.5 keV.

Loša definisanost linije 595.9 keV i njen mali intenzitet, u odnosu na liniju 68.7 keV, je na prvi pogled u suprotnosti sa očekivanjima. Na osnovu zastupljenosti izotopa germanijuma u prirodi (tabela 5.1) najviše ima ^{74}Ge a najmanje ^{73}Ge , pa se očekuje da se i intenziteti njima nastalih linija ponašaju na isti način. Međutim, pošto linija 595.9 keV počinje da se uočava u koincidentnom spektru germanijumskog detektora tek sa početkom vremenskog intervala od 117.19 ns najveći deo nastalih fotona energije 595.9 keV prouzrokovao je koincidentne događaje pri manjim vrednostima vremenske razlike, pa se ti događaji ne uspevaju razdvojiti od kontinuma. Sa druge strane, očigledna veća zakasnelost linije od 68.7 keV prema liniji od 595.9 keV i anihilacionim događajima omogućava joj dobro izdvajanje iz kontinuma i zbog toga visok opservabilni intenzitet. Na slici 6.41 prikazan je uporedni koincidentni spektar germanijumskog detektora za vremenske intervale $0 \mu\text{s} - 7.959 \mu\text{s}$ i $146 \text{ ns} - 7.959 \mu\text{s}$.

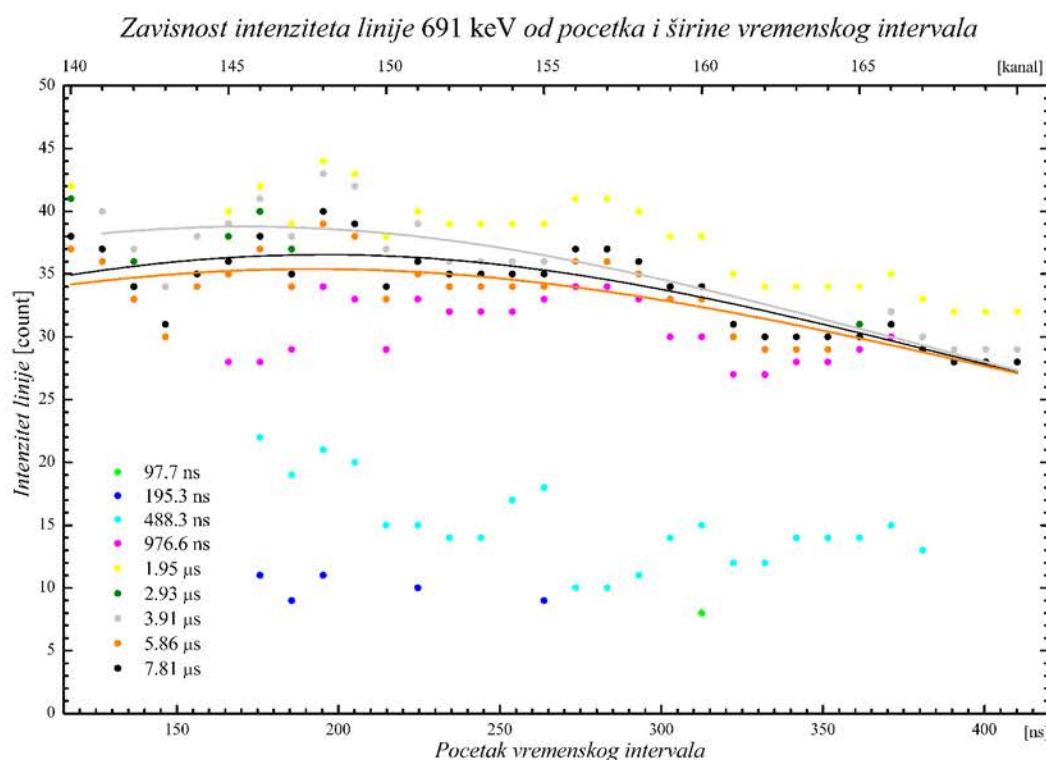


Slika 6.41 – Uporedni spektri germanijumskog detektora za vremenske intervale 0 μs – 7.959 μs i 146 ns – 7.959 μs

6.6. Linija 691 keV

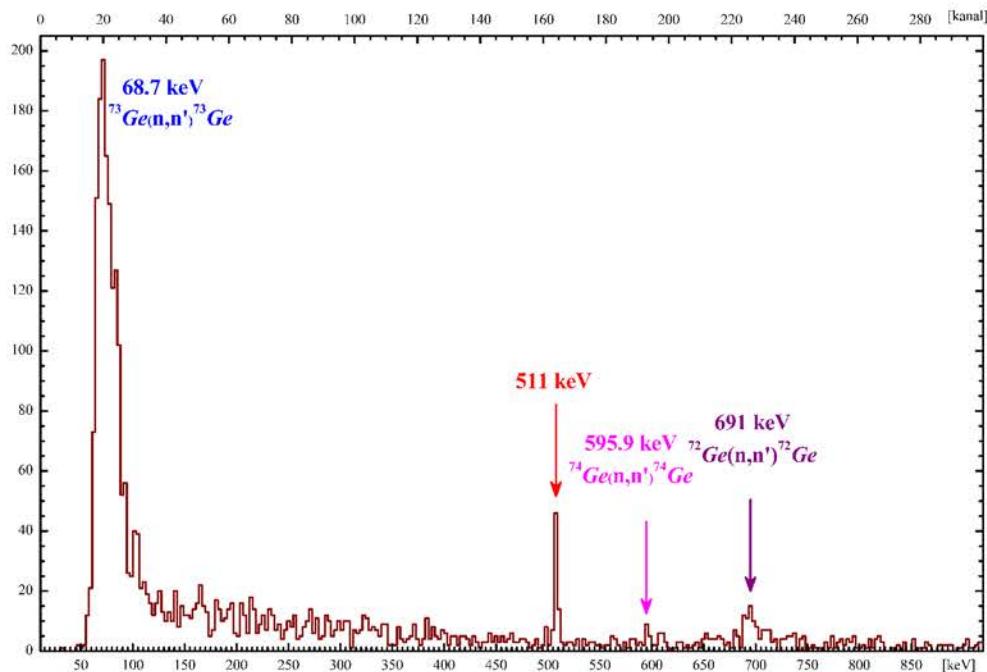
Neelastičnim rasejanjem brzih neutrona na ^{72}Ge , jezgro se pobuđuje, i emitovanjem fotona energije 691 keV vreća se u osnovno stanje. Ovako nastala linija u spektru je asimetrična zbog uzmaka jezgra.

Linija 691 keV je posmatrana za iste početke i širine vremenskog intervala kao i linija 595.9 keV (tabela 6.12). Zavisnost intenziteta linije od početka intervala za različite širine vremenskog intervala prikazana je na slici 6.42.



Slika 6.42 – Grafik zavisnosti intenziteta linije 691 keV od početka i širine vremenskog intervala

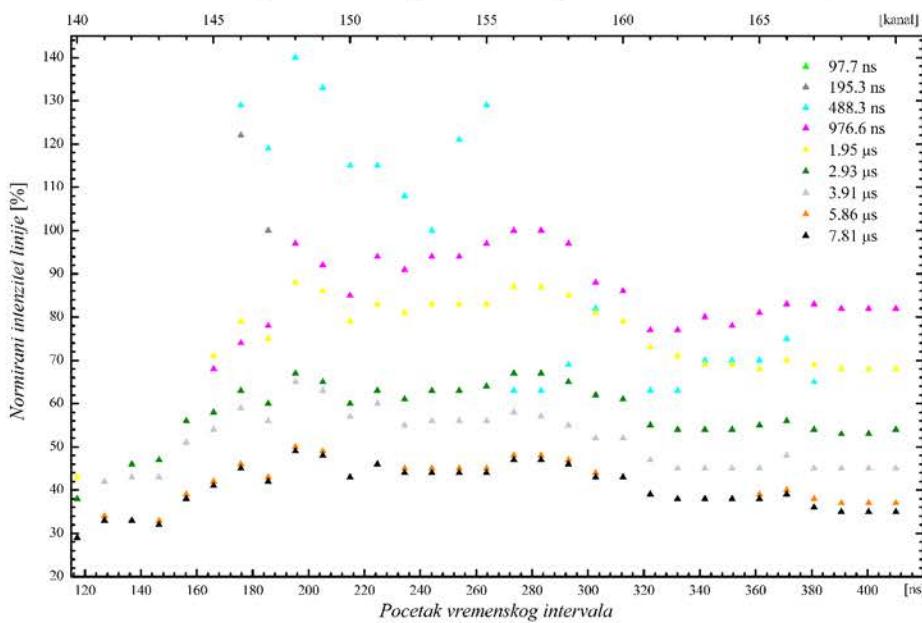
Za vremenske intervale највеће ширине intenzitet linije 691 keV je fitovan Lorentz-ovom funkcijom, међутим dobrota fita je jako mala, tako da ostali intervali nisu fitovani. Promena intenziteta za konstantну ширину vremenskog intervala je oko 10 count, što je mala promena u odnosu na posmatrane intenzitete drugih linija. Zbog ovako slabe definisanosti linije vremenska zavisnost intenziteta linije 691 keV nije fitovana. Sa slike 6.42 se vidi da je intenzitet linije највећи за ширину интервала од 1.95 μs, iako se очekuje да то буде временски интервал ширине 7.81 μs. За све ширине интервала највећи intenzitet linije је за почетак од 195.31 ns, што је највећа вредност у односу на претходно посматране linije (указује на закасне коинцидencije). Koincidentni spektar germanijumskog detektora за временски interval sa почетком 195.31 ns и ширином 1.95 μs prikazan je na slici 6.43.



Slika 6.43 – Koincidentni spektar germanijumskog detektora za vremenski interval sa početkom 195.31 ns i širinom 1.95 μ s

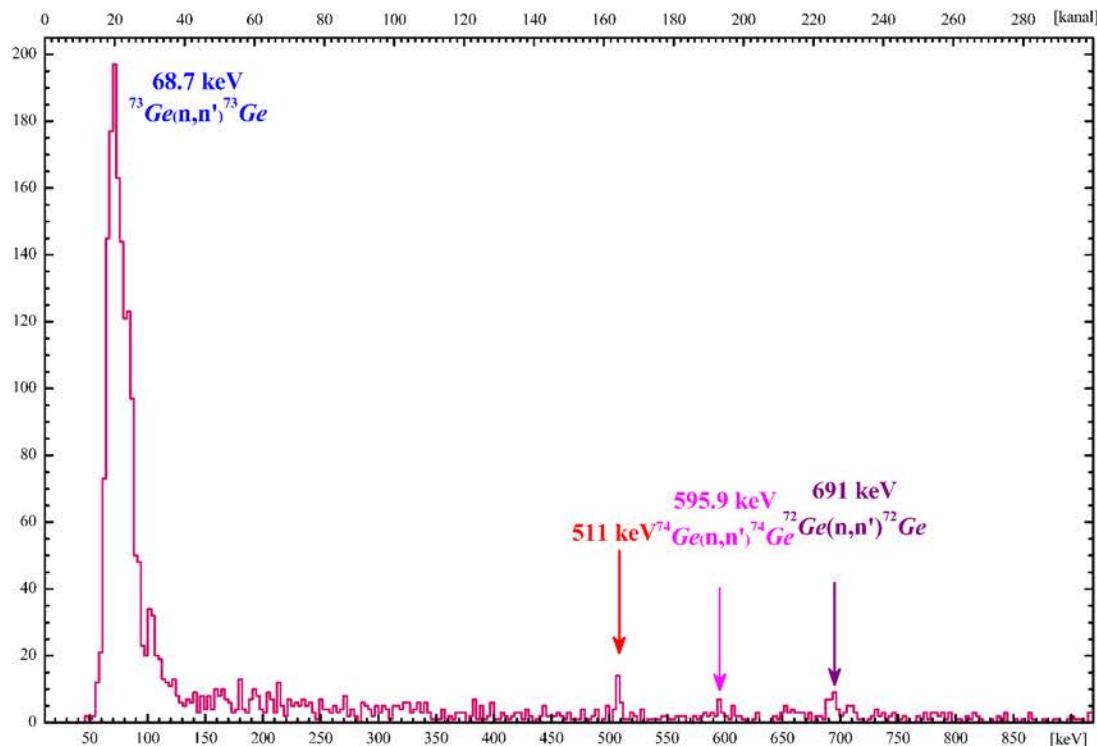
Intenzitet linije 691 keV normiran je na intenzitet linije 511 keV dobijen u spektru sa istim početkom i širinom vremenskog intervala. Zavisnost normiranog intenziteta linije od početka vremenskog intervala prikazana je na slici 6.44.

Zavisnost normiranog intenziteta linije 691 keV od početka i širine vremenskog intervala



Slika 6.44 – Grafik zavisnosti normiranog intenziteta linije 691 keV od početka i širine vremenskog intervala

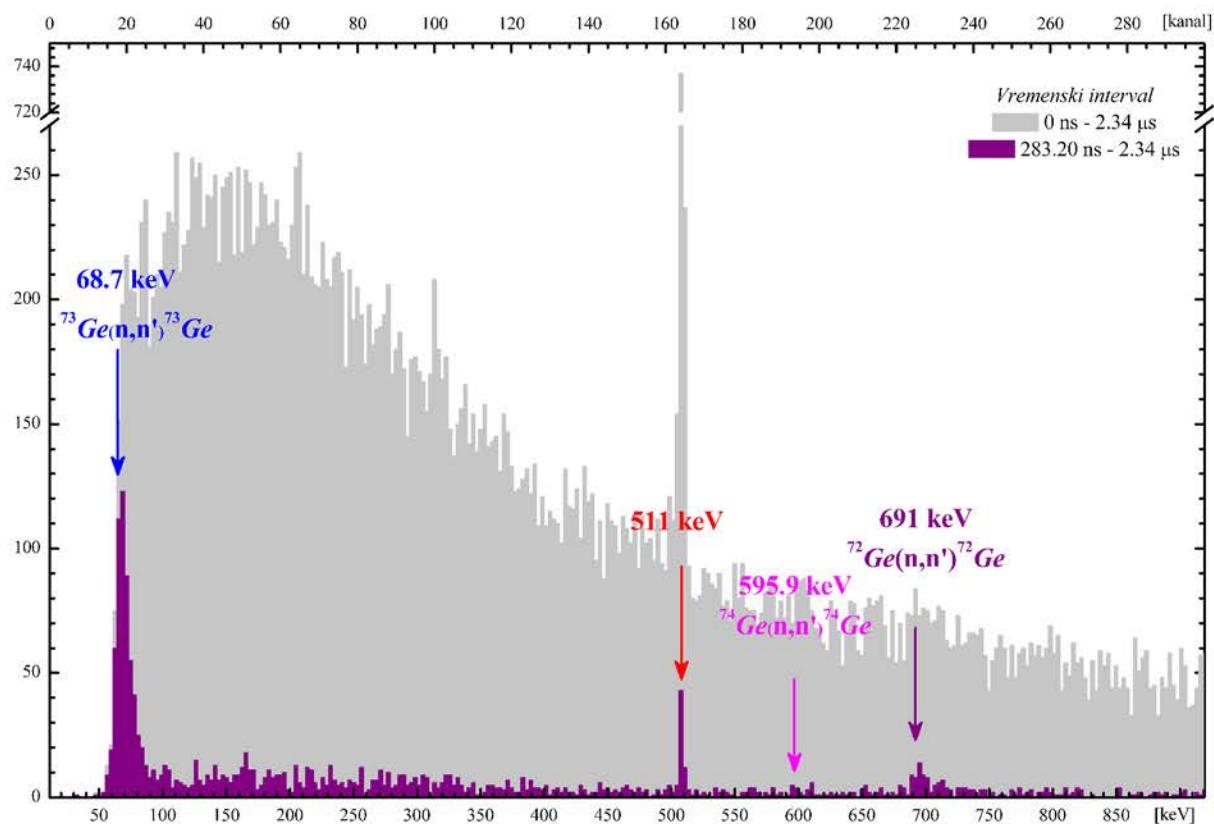
Najveći normirani intenzitet linije je za manje dužine vremenskog intervala, što se i očekuje jer intenzitet anihilacione linije raste sa povećanjem širine intervala. Za sve vrednosti širine vremenskog intervala najveći normirani intenzitet se dobija za početak 195.31 ns. Koincidentni spektar germanijumskog detektora za vremenski interval sa početkom 195.31 ns i širinom 488.28 ns prikazan je na slici 6.45.



Slika 6.45 – Koincidentni spektar germanijumskog detektora za vremenski interval sa početkom 195.31 ns i širinom 488.28 ns

Širina linije 691 keV na polovini visine varira u intervalu od 7 keV do 15 keV u zavisnosti od početka i širine vremenskog intervala. Vremenska zavisnost širine linije 691 keV nije dobro definisana, haotično se menja oko neke vrednosti, tako da se zavisnost širine linije od početka ili širine vremenskog intervala ne može diskutovati.

Zastupljenost izotopa germanijuma ^{72}Ge u prirodi je slična zastupljenosti ^{74}Ge (tabela 5.1), što je 4 odnosno 5 puta veće od zastupljenosti ^{73}Ge , dok intenziteti linija pokazuju da je najveći intenzitet za liniju 68.7 keV (^{73}Ge). Razlog ovog neslaganja je tome što su linije 595.9 keV i 691 keV počele da se izdvajaju iz kontinuuma tek za vremenske intervale sa početkom oko 150 ns, tj. za kraće intervale bi bile intenzivnije – ali tada je intenzivan i kontinuum, pa se ne mogu iz njega izdvojiti. Sa druge strane liniju na 68.7 keV karakteriše veća zakasnelost u odnosu na linije 595.9 keV i 691 keV i u odnosu na anihilacione događaje, jer se ona veoma dobro uočava i za početak vremenskog intervala od oko 280 ns. Na slici 6.46 je prikazan uporedni spektar germanijumskog detektora za vremenske intervale 0 μs – 2.24 μs i 283.2 ns – 2.24 μs.



Slika 6.46 – Uporedni spektri germanijumskog detektor-a za vremenske intervale 0 μ s – 2.24 μ s i 283 ns – 2.24 μ s

Za γ linije od 68.7 keV, 595.9 keV i 691 keV sa povećanjem početka vremenskog intervala gubi se deo koincidentnih događaja kojima one nastaju.

Zaključak

Usavršavanje niskofonskih eksperimenata i snižavanje detekcionog praga omogućeno je proučavanjem interakcije kosmičkih miona sa detektorima i njihovim okruženjem. Vremenska spektroskopija nuklearnih reakcija indukovanih kosmičkim mionima daje dodatnu informaciju o načinu redukcije fona u spektrima HP Ge detektora primenom aktivne zaštite jer omogućava adekvatan izbor TAC opsega, odnosno pojedinih oblasti vremenske krive kojima se može birati region u spektru germanijumskog detektora pri antikoincidentnom režimu rada sa scintilacionim (veto) detektorima.

U koincidentnom spektru germanijumskog detektora posmatrani su procesi nastali interakcijom sekundarnog zračenja generisanog kosmičkim mionima. Odabirom različitih regiona u dvodimenzionom koincidentnom spektru germanijumskog detektora i TAC pretvarača uočene su linije sa energijama 68.7 keV, 511 keV, 595.9 keV i 691 keV. Na osnovu vremenske analize koincidentnih spektara germanijumskog detektora utvrđeni su koincidentni vremenski intervali koji daju maksimalne intenzitete posmatranih linija.

Za liniju 68.7 keV maksimalni intenzitet se dobija za vremenski interval sa početkom 166.02 ns i širinom 7.81 μs. Maksimalni intenzitet ove linije, normiran na intenzitet anihilacione linije (u istom spektru), se dobija za vremenski interval sa početkom 175.78 ns i širinom 488.78 ns. Za ovu liniju, takođe je analizirana zavisnost širine linije u koincidentnim spektrima od izabranog regiona vremenske krive.

Linija 511 keV ima maksimalan intenzitet za početak vremenskog intervala 0 ns sa širinom 8.20 μs (najveća širina vremenskog intervala – obuhvaćeni su svi koincidentni događaji), iako je doprinos zakasnelyih koincidencija ovoj liniji dosta slab.

Linija 595.9 keV ima najveći intenzitet za vremenski interval sa početkom 146.48 ns i širinom 7.81 μs. Maksimalni normirani intenzitet ove linije je za početak vremenskog intervala od 166.02 ns sa širinom 195.3 ns.

Linija 691 keV nema jasno izražen koincidentni interval za koji je njen intenzitet maksimalan zbog loše definisanosti linije pri raznim odabranim zakasnelyim koincidentnim regionima.

Na osnovu koincidentnih vremenskih intervala zaključuje se da (n,n') događaji koji prouzrokuju nastanak γ linija na 68.7 keV, 595.9 keV i 691 keV (neelastično rasejanje brzih neutrona na jezgrima germanijuma) spadaju u zakasnele koincidencije, posmatrano u odnosu na promptne anihilacione događaje. Zakasnelost događaja odgovornih za intenzitet linije na 68.7 keV u odnosu na događaje koji uzrokuju linije na 595.9 keV i 691 keV je takođe uočena.

Literatura

- 1: Anderson C. D., Neddermeyer S. H., *Cosmic-Ray Particles of Intermediate Mass*, Physical Review Letters **54**(88) 1938.
- 2: Bietenholz W., *Cosmic Rays and the Search of Lorentz Invariance Violation*, John von Neumann Institut, 2008.
- 3: Brandt S., *The Harvest of a Century - Discoveries of Modern Physics in 100 Episodes*, Oxford University Press, 2009.
- 4: Brown L. M., Rechenberg H., *The Origin of the Concept of Nuclear Forces*, The Institute of Physics, London, 1996.
- 5: Groom D. E., Mokhov N. V., Striganov S. I., *Muon Stopping Power and Range Tables 10 MeV - 100 TeV*, Atomic Data and Nuclear Data Tables, **72**(183) 2001.
- 6: Grupen C., *Astroparticle Physics*, Springer, 2005.
- 7: Grupen C., Shwartz B., *Particle Detectors*, Cambridge University Press, 2008.
- 8: Henley E., Garcia A., *Subatomic Physics*, World Scientific, 2007.
- 9: Heusser G., *Cosmic Ray Induced Background in Ge-spectrometry*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B **83**(223) 1993.
- 10: Heusser G., *Cosmic Ray Interaction Study With Low-Level Ge-Spectrometry*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **369**(539) 1996.
- 11: Heusser G., *Low - Radioactivity Background Techniques*, Annual Review of Nuclear and Particle Science **45**(543) 1995.
- 12: Jovin T., *Odredjivanje energije i fluksa kosmickih miona na nivou mora*, Univerzitet u Novom Sadu, 2005.
- 13: L'Annunziata M. F., *Handbook of Radioactivity Analysis*, Elsevier, 2003.
- 14: Lee T. D., *Heavy Leptons*, World Scientific, 1998.
- 15: Leo W. R., *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: a How-To Approach*, Springer, 1994.
- 16: Lyle H., Anderson, Carl. Interview by Harriett Lyle, California Institute of Technology, 1979.
- 17: Mrdja D., *Analiza Metoda Redukcije Fona Germanijumskih Spektrometara*, Univerzitet u Novom Sadu, 2007.
- 18: Nishina Y., Takeuchi M., Ichimiy T., *On the nature of cosmic-ray particles*, Physical Review Letters **52**(1198) 1937.
- 19: Perkins D. H., *Particle Astrophysics*, Oxford, 2009.
- 20: Povinec P., *Analysis of Environmental Radionuclides*, Elsevier, 2008
- 21: Schlickeiser R., *Cosmic Ray Astrophysics*, Springer, 2003.
- 22: Serra J., *A Journey of Ultra Heavy Cosmic Ray Nuclei with Z>65*, Universitat de Barcelona, 2004.
- 23: Skoro G., *Uvod u Fiziku Elementarnih Cestica*, Univerzitet u Beogradu, 2007
- 24: Slivka J., Bikit I., Vesovic M., Conkic Lj., *Gama Spektrometrija - specijalne metode i primene*, Univerzitet u Novom Sadu, 2000.
- 25: Sotić G., *Vremenska zavisnost mionima indukovane anihilacione linije*, Univerzitet u Novom Sadu, 2007.
- 26: Stanivuk Lj., *Provera osnovnih radnih karakteristika poluprovodničkog HP Ge detektora*, Univerzitet u Novom Sadu, 2000.
- 27: Theodórsson P., *Measurement of Weak Radioactivity*, World Scientific, 1996.
- 28: Turner J. E., *Penetration of Charged Particles in Matter: A Symposium*, National Academy of Sciences Washington, 1970
- 29: *Multiparameter Data Acquisition System - User Manual*, FAST ComTec, <http://www.fastcomtec.com>, 2007.
- 30: http://nsspi.tamu.edu/NSEP/basic_rad_detection/index.php?course=0600
- 31: web.ihep.su/dbserv/compas/contents
- 32: <http://www.gutenberg-e.org/rentetzi/chapter07.html>
- 33: <http://public.web.cern.ch/public/en/Research/Detector-en.html>
- 34: http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/cloudchamber/cloudchamber10_2.htm
- 35: <http://www.ssplprints.com/image.php?id=84697&idx=2&keywords=Crookes,%20William,%20Sir&filterCategoryId=&fromsearch=true>
- 36: <http://www.vigyanprasar.gov.in/scientists/bhabha/BHABHANEW>
- 37: <http://www.physi.uni-heidelberg.de/Einrichtungen/FP/anleitungen/F13/>
- 38: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/HBASE/astro/cosmic.html#c1>
- 39: <http://helios.gsfc.nasa.gov/cosmic.html>
- 40: www.wikipedia.org
- 41: *Los Alamos Science and Technology Magazine*, Los Alamos, 2008.
- 42: [www.telescopearray.org/outreach/intro2](http://telescopearray.org/outreach/intro2)
- 43: <http://pdg.lbl.gov>
- 44: <http://www.pbs.org/wgbh/nova/elegant/part-flash>
- 45: http://www.ansto.gov.au/research/institute_of_environmental_research/science/isotopes_in_climate_change_and_atmospheric_systems/cosmogenic_climate_archives_of_the_southern_hemisphere_ccash

Dodatak

Tabela A – Linija 68.7 keV

68.7 keV									
Interval [kanal]			Interval [ns]			Intenzitet [count]		Poluširina	Centroida [kanal]
Početak	Kraj	Dužina	Početak	Kraj	Dužina	Net	Normiran	FWHM	
140	145	5	117.19	166.02	48.83	956	20.78	15.0	31.0
141	146	5	126.95	175.78	48.83	1085	40.19	13.0	28.0
142	147	5	136.72	185.55	48.83	1139	54.24	13.0	28.0
143	148	5	146.48	195.31	48.83	918	65.57	12.0	25.0
144	149	5	156.25	205.08	48.83	785	71.36	10.0	24.0
145	150	5	166.02	214.84	48.83	760	63.33	9.0	24.0
146	151	5	175.78	224.61	48.83	527	-	7.5	24.0
147	152	5	185.55	234.38	48.83	488	-	7.5	24.0
148	153	5	195.31	244.14	48.83	489	-	6.0	24.0
149	154	5	205.08	253.91	48.83	510	-	6.0	22.5
150	155	5	214.84	263.67	48.83	480	-	6.0	21.0
151	156	5	224.61	273.44	48.83	451	-	6.0	20.0
152	157	5	234.38	283.20	48.83	377	-	5.5	20.0
153	158	5	244.14	292.97	48.83	344	-	6.0	20.5
154	159	5	253.91	302.73	48.83	328	-	5.5	20.0
155	160	5	263.67	312.50	48.83	305	-	5.0	20.0
156	161	5	273.44	322.27	48.83	293	-	5.0	19.0
157	162	5	283.20	332.03	48.83	239	-	4.0	19.0
158	163	5	292.97	341.80	48.83	202	-	3.0	19.0
159	164	5	302.73	351.56	48.83	191	-	3.0	19.0
160	165	5	312.50	361.33	48.83	165	-	3.0	19.0
161	166	5	322.27	371.09	48.83	149	-	3.0	19.0
162	167	5	332.03	380.86	48.83	131	-	3.0	18.5
163	168	5	341.80	390.63	48.83	90	-	4.0	18.0
164	169	5	351.56	400.39	48.83	98	-	4.0	18.0
165	170	5	361.33	410.16	48.83	91	-	4.0	18.0
166	171	5	371.09	419.92	48.83	77	-	4.0	18.0
167	172	5	380.86	429.69	48.83	70	-	4.0	19.0
168	173	5	390.63	439.45	48.83	62	-	4.0	18.0
169	174	5	400.39	449.22	48.83	63	-	4.0	19.0
170	175	5	410.16	458.98	48.83	46	-	3.0	19.0
171	176	5	419.92	468.75	48.83	43	-	3.0	18.0
172	177	5	429.69	478.52	48.83	29	-	3.0	18.0
173	178	5	439.45	488.28	48.83	27	-	2.0	18.0

68.7 keV									
Interval [kanal]			Interval [ns]			Intenzitet [count]		Poluširina	Centroida [kanal]
Početak	Kraj	Dužina	Početak	Kraj	Dužina	Net	Normiran	FWHM	
174	179	5	449.22	498.05	48.83	26	-	2.0	18.0
175	180	5	458.98	507.81	48.83	11	-	2.0	18.0
140	150	10	117.19	214.84	97.66	1387	27.20	15.0	25.0
141	151	10	126.95	224.61	97.66	1292	41.68	14.0	25.0
142	152	10	136.72	234.38	97.66	1159	48.29	13.0	24.0
143	153	10	146.48	244.14	97.66	1125	66.18	12.0	24.0
144	154	10	156.25	253.91	97.66	1134	94.50	11.0	24.0
145	155	10	166.02	263.67	97.66	1055	75.36	8.0	24.0
146	156	10	175.78	273.44	97.66	1003	111.44	8.0	24.0
147	157	10	185.55	283.20	97.66	865	-	7.0	21.0
148	158	10	195.31	292.97	97.66	843	-	7.0	20.0
149	159	10	205.08	302.73	97.66	801	-	7.0	20.0
150	160	10	214.84	312.50	97.66	749	-	6.0	20.0
151	161	10	224.61	322.27	97.66	694	-	6.0	20.0
152	162	10	234.38	332.03	97.66	619	-	5.5	20.0
153	163	10	244.14	341.80	97.66	549	-	5.0	20.0
154	164	10	253.91	351.56	97.66	496	-	5.0	19.0
155	165	10	263.67	361.33	97.66	454	-	5.0	19.0
156	166	10	273.44	371.09	97.66	412	-	4.5	19.0
157	167	10	283.20	380.86	97.66	353	-	3.5	19.0
158	168	10	292.97	390.63	97.66	311	-	3.0	19.0
159	169	10	302.73	400.39	97.66	305	-	3.0	19.0
160	170	10	312.50	410.16	97.66	264	-	3.5	19.0
161	171	10	322.27	419.92	97.66	229	-	3.5	19.0
162	172	10	332.03	429.69	97.66	204	-	4.0	18.0
163	173	10	341.80	439.45	97.66	177	-	4.0	18.0
164	174	10	351.56	449.22	97.66	168	-	4.0	18.0
165	175	10	361.33	458.98	97.66	143	-	4.0	18.0
166	176	10	371.09	468.75	97.66	133	-	4.0	18.0
167	177	10	380.86	478.52	97.66	123	11.18	4.0	18.0
168	178	10	390.63	488.28	97.66	96	9.60	3.0	18.0
169	179	10	400.39	498.05	97.66	92	8.36	3.0	18.0
170	180	10	410.16	507.81	97.66	72	6.55	3.0	18.0
171	181	10	419.92	517.58	97.66	69	7.67	3.0	18.0
172	182	10	429.69	527.34	97.66	65	7.22	3.0	18.0
173	183	10	439.45	537.11	97.66	54	6.00	3.0	18.0
174	184	10	449.22	546.88	97.66	50	5.56	3.0	18.0
175	185	10	458.98	556.64	97.66	37	-	2.5	18.0
176	186	10	468.75	566.41	97.66	33	-	2.5	18.0
140	160	20	117.19	312.50	195.31	964	18.90	12.0	24.0
141	161	20	126.95	322.27	195.31	1031	33.26	12.0	24.0
142	162	20	136.72	332.03	195.31	1101	47.87	11.0	24.0
143	163	20	146.48	341.80	195.31	1116	69.75	11.0	24.0
144	164	20	156.25	351.56	195.31	1159	77.27	10.0	20.0
145	165	20	166.02	361.33	195.31	1181	98.42	9.0	20.0
146	166	20	175.78	371.09	195.31	1195	132.78	8.0	20.0
147	167	20	185.55	380.86	195.31	1129	125.44	8.0	20.0
148	168	20	195.31	390.63	195.31	1063	-	8.0	20.0
149	169	20	205.08	400.39	195.31	1019	-	7.0	20.0
150	170	20	214.84	410.16	195.31	952	-	5.5	20.0
151	171	20	224.61	419.92	195.31	875	-	5.0	20.0

68.7 keV									
Interval [kanal]			Interval [ns]			Intenzitet [count]		Poluširina	Centroida [kanal]
Početak	Kraj	Dužina	Početak	Kraj	Dužina	Net	Normiran	FWHM	
152	172	20	234.38	429.69	195.31	780	-	5.0	20.0
153	173	20	244.14	439.45	195.31	710	-	5.0	19.0
154	174	20	253.91	449.22	195.31	648	-	4.0	19.0
155	175	20	263.67	458.98	195.31	581	-	4.0	19.0
156	176	20	273.44	468.75	195.31	514	51.40	3.0	19.0
157	177	20	283.20	478.52	195.31	453	41.18	3.5	19.0
158	178	20	292.97	488.28	195.31	393	35.73	3.5	18.5
159	179	20	302.73	498.05	195.31	351	29.25	4.0	18.5
160	180	20	312.50	507.81	195.31	308	23.69	4.0	18.5
161	181	20	322.27	517.58	195.31	296	22.77	4.0	18.0
162	182	20	332.03	527.34	195.31	263	20.23	4.0	18.0
163	183	20	341.80	537.11	195.31	230	17.69	4.0	18.0
164	184	20	351.56	546.88	195.31	208	14.86	3.5	18.0
165	185	20	361.33	556.64	195.31	186	13.29	3.5	18.0
166	186	20	371.09	566.41	195.31	170	12.14	3.5	18.0
167	187	20	380.86	576.17	195.31	154	11.00	3.0	18.0
168	188	20	390.63	585.94	195.31	136	10.46	3.0	18.0
169	189	20	400.39	595.70	195.31	126	9.69	3.0	18.0
170	190	20	410.16	605.47	195.31	106	7.57	3.0	18.0
140	190	50	117.19	605.47	488.28	1148	18.22	12.0	20.0
141	191	50	126.95	615.23	488.28	1184	27.53	12.0	20.0
142	192	50	136.72	625.00	488.28	1226	35.03	12.0	20.0
143	193	50	146.48	634.77	488.28	1234	44.07	11.0	20.0
144	194	50	156.25	644.53	488.28	1262	54.87	10.0	20.0
145	195	50	166.02	654.30	488.28	1270	63.50	8.5	20.0
146	196	50	175.78	664.06	488.28	1267	74.53	8.0	20.0
147	197	50	185.55	673.83	488.28	1183	73.94	8.0	20.0
148	198	50	195.31	683.59	488.28	1115	74.33	8.0	20.0
149	199	50	205.08	693.36	488.28	1031	68.73	7.0	20.0
150	200	50	214.84	703.13	488.28	941	72.38	5.5	20.0
151	201	50	224.61	712.89	488.28	856	65.85	5.0	20.0
152	202	50	234.38	722.66	488.28	808	62.15	5.0	20.0
153	203	50	244.14	732.42	488.28	732	52.29	5.0	19.0
154	204	50	253.91	742.19	488.28	739	52.79	4.5	19.0
155	205	50	263.67	751.95	488.28	634	45.29	4.5	19.0
156	206	50	273.44	761.72	488.28	597	37.31	4.0	19.0
157	207	50	283.20	771.48	488.28	517	32.31	4.0	19.0
158	208	50	292.97	781.25	488.28	446	27.88	4.0	19.0
159	209	50	302.73	791.02	488.28	399	23.47	4.0	19.0
160	210	50	312.50	800.78	488.28	349	18.37	4.0	19.0
161	211	50	322.27	810.55	488.28	307	16.16	4.0	18.0
162	212	50	332.03	820.31	488.28	271	14.26	4.0	18.0
163	213	50	341.80	830.08	488.28	234	11.70	4.0	18.0
164	214	50	351.56	839.84	488.28	211	10.55	4.0	18.0
165	215	50	361.33	849.61	488.28	189	9.45	4.0	18.0
166	216	50	371.09	859.38	488.28	173	8.65	4.0	18.0
167	217	50	380.86	869.14	488.28	155	7.75	3.5	18.0
140	240	100	117.19	1093.75	976.56	1167	13.89	12.0	20.0
141	241	100	126.95	1103.52	976.56	1203	19.10	12.0	20.0
142	242	100	136.72	1113.28	976.56	1242	22.58	12.0	20.0
143	243	100	146.48	1123.05	976.56	1250	25.51	11.0	20.0

68.7 keV									
Interval [kanal]			Interval [ns]			Intenzitet [count]		Poluširina	Centroida [kanal]
Početak	Kraj	Dužina	Početak	Kraj	Dužina	Net	Normiran	FWHM	
144	244	100	156.25	1132.81	976.56	1277	29.02	10.0	20.0
145	245	100	166.02	1142.58	976.56	1283	31.29	9.0	20.0
146	246	100	175.78	1152.34	976.56	1279	33.66	8.0	20.0
147	247	100	185.55	1162.11	976.56	1197	32.35	8.0	20.0
148	248	100	195.31	1171.88	976.56	1123	32.09	7.5	20.0
149	249	100	205.08	1181.64	976.56	1040	28.89	7.0	20.0
150	250	100	214.84	1191.41	976.56	950	27.94	5.5	20.0
151	251	100	224.61	1201.17	976.56	864	24.69	5.0	20.0
152	252	100	234.38	1210.94	976.56	823	23.51	5.0	19.5
153	253	100	244.14	1220.70	976.56	813	23.91	4.5	19.0
154	254	100	253.91	1230.47	976.56	736	21.65	4.0	19.0
155	255	100	263.67	1240.23	976.56	663	19.50	4.0	19.0
156	256	100	273.44	1250.00	976.56	603	17.74	4.0	19.0
157	257	100	283.20	1259.77	976.56	521	15.32	4.0	19.0
158	258	100	292.97	1269.53	976.56	435	12.79	4.0	19.0
159	259	100	302.73	1279.30	976.56	384	11.29	4.0	18.5
160	260	100	312.50	1289.06	976.56	343	9.80	4.0	18.5
161	261	100	322.27	1298.83	976.56	304	8.69	4.0	18.0
162	262	100	332.03	1308.59	976.56	268	7.66	4.0	18.0
163	263	100	341.80	1318.36	976.56	236	6.74	3.0	18.0
164	264	100	351.56	1328.13	976.56	213	5.92	3.0	18.0
165	265	100	361.33	1337.89	976.56	186	5.17	3.0	18.0
166	266	100	371.09	1347.66	976.56	170	4.72	3.0	18.0
167	267	100	380.86	1357.42	976.56	157	4.49	3.0	18.0
168	268	100	390.63	1367.19	976.56	144	4.24	3.0	18.0
169	269	100	400.39	1376.95	976.56	134	3.94	3.0	18.0
170	270	100	410.16	1386.72	976.56	112	3.29	3.0	18.0
140	340	200	117.19	2070.31	1953.13	1168	12.04	12.0	24.0
141	341	200	126.95	2080.08	1953.13	1204	15.64	12.0	20.0
142	342	200	136.72	2089.84	1953.13	1243	17.76	12.0	20.0
143	343	200	146.48	2099.61	1953.13	1250	19.53	11.0	20.0
144	344	200	156.25	2109.38	1953.13	1277	21.64	10.0	20.0
145	345	200	166.02	2119.14	1953.13	1283	22.91	9.0	20.0
146	346	200	175.78	2128.91	1953.13	1279	24.13	8.0	20.0
147	347	200	185.55	2138.67	1953.13	1195	22.98	8.0	20.0
148	348	200	195.31	2148.44	1953.13	1127	22.54	8.0	20.0
149	349	200	205.08	2158.20	1953.13	1043	20.86	7.0	20.0
150	350	200	214.84	2167.97	1953.13	953	19.85	5.0	20.0
151	351	200	224.61	2177.73	1953.13	867	18.06	5.0	20.0
152	352	200	234.38	2187.50	1953.13	778	16.21	5.0	19.0
153	353	200	244.14	2197.27	1953.13	689	14.66	5.0	19.0
154	354	200	253.91	2207.03	1953.13	620	13.19	4.0	19.0
155	355	200	263.67	2216.80	1953.13	584	12.43	4.0	19.0
156	356	200	273.44	2226.56	1953.13	525	11.17	3.0	19.0
157	357	200	283.20	2236.33	1953.13	472	10.04	3.0	19.0
158	358	200	292.97	2246.09	1953.13	409	8.70	3.5	19.0
159	359	200	302.73	2255.86	1953.13	368	7.83	4.0	19.0
160	360	200	312.50	2265.63	1953.13	326	6.79	4.0	18.5
161	361	200	322.27	2275.39	1953.13	286	5.96	4.0	18.0
162	362	200	332.03	2285.16	1953.13	250	5.21	4.0	18.0
163	363	200	341.80	2294.92	1953.13	243	4.96	3.5	18.0

68.7 keV										
Interval [kanal]			Interval [ns]			Intenzitet [count]		Poluširina	Centroida [kanal]	
Početak	Kraj	Dužina	Početak	Kraj	Dužina	Net	Normiran	FWHM		
164	364	200	351.56	2304.69	1953.13	225	4.59	3.0	18.0	
165	365	200	361.33	2314.45	1953.13	197	3.94	3.0	18.0	
166	366	200	371.09	2324.22	1953.13	181	3.62	3.0	18.0	
167	367	200	380.86	2333.98	1953.13	168	3.50	3.0	18.0	
168	368	200	390.63	2343.75	1953.13	155	3.30	3.0	18.0	
169	369	200	400.39	2353.52	1953.13	145	3.09	3.0	18.0	
170	370	200	410.16	2363.28	1953.13	123	2.62	3.0	18.0	
140	440	300	117.19	3046.88	2929.69	1168	10.92	12.0	24.0	
141	441	300	126.95	3056.64	2929.69	1204	13.84	12.0	20.0	
142	442	300	136.72	3066.41	2929.69	1243	15.73	12.0	20.0	
143	443	300	146.48	3076.17	2929.69	1250	17.36	11.0	20.0	
144	444	300	156.25	3085.94	2929.69	1277	18.78	10.0	20.0	
145	445	300	166.02	3095.70	2929.69	1283	19.44	9.0	20.0	
146	446	300	175.78	3105.47	2929.69	1279	19.68	8.0	20.0	
147	447	300	185.55	3115.23	2929.69	1195	19.27	8.0	20.0	
148	448	300	195.31	3125.00	2929.69	1127	18.78	8.0	20.0	
149	449	300	205.08	3134.77	2929.69	1043	17.38	7.0	20.0	
150	450	300	214.84	3144.53	2929.69	953	16.72	5.0	20.0	
151	451	300	224.61	3154.30	2929.69	867	15.21	5.0	20.0	
152	452	300	234.38	3164.06	2929.69	827	14.51	5.0	19.0	
153	453	300	244.14	3173.83	2929.69	739	13.20	5.0	19.0	
154	454	300	253.91	3183.59	2929.69	673	12.02	4.0	19.0	
155	455	300	263.67	3193.36	2929.69	637	11.58	4.0	19.0	
156	456	300	273.44	3203.13	2929.69	578	10.51	3.5	19.0	
157	457	300	283.20	3212.89	2929.69	513	9.33	3.0	19.0	
158	458	300	292.97	3222.66	2929.69	450	8.18	4.0	19.0	
159	459	300	302.73	3232.42	2929.69	403	7.33	4.0	18.0	
160	460	300	312.50	3242.19	2929.69	334	5.96	4.0	18.0	
161	461	300	322.27	3251.95	2929.69	300	5.36	4.0	18.0	
162	462	300	332.03	3261.72	2929.69	269	4.80	4.0	18.0	
163	463	300	341.80	3271.48	2929.69	246	4.39	4.0	18.0	
164	464	300	351.56	3281.25	2929.69	228	4.07	4.0	18.0	
165	465	300	361.33	3291.02	2929.69	200	3.57	4.0	18.0	
166	466	300	371.09	3300.78	2929.69	184	3.23	4.0	18.0	
167	467	300	380.86	3310.55	2929.69	171	3.05	3.0	18.0	
168	468	300	390.63	3320.31	2929.69	158	2.87	3.0	18.0	
169	469	300	400.39	3330.08	2929.69	148	2.69	3.0	18.0	
170	470	300	410.16	3339.84	2929.69	126	2.33	3.0	18.0	
140	540	400	117.19	4023.44	3906.25	1165	10.13	12.0	24.0	
141	541	400	126.95	4033.20	3906.25	1201	12.64	12.0	20.0	
142	542	400	136.72	4042.97	3906.25	1240	14.25	12.0	20.0	
143	543	400	146.48	4052.73	3906.25	1247	15.59	11.0	20.0	
144	544	400	156.25	4062.50	3906.25	1274	16.99	10.0	20.0	
145	545	400	166.02	4072.27	3906.25	1281	17.79	9.0	20.0	
146	546	400	175.78	4082.03	3906.25	1277	18.51	8.0	20.0	
147	547	400	185.55	4091.80	3906.25	1193	17.54	8.0	20.0	
148	548	400	195.31	4101.56	3906.25	1125	17.05	8.0	20.0	
149	549	400	205.08	4111.33	3906.25	1041	15.54	7.0	20.0	
150	550	400	214.84	4121.09	3906.25	952	14.65	5.0	20.0	
151	551	400	224.61	4130.86	3906.25	866	13.32	5.0	20.0	
152	552	400	234.38	4140.63	3906.25	780	12.00	5.0	19.0	

68.7 keV									
Interval [kanal]			Interval [ns]			Intenzitet [count]		Poluširina	Centroida [kanal]
Početak	Kraj	Dužina	Početak	Kraj	Dužina	Net	Normiran	FWHM	
153	553	400	244.14	4150.39	3906.25	691	10.80	5.0	19.0
154	554	400	253.91	4160.16	3906.25	642	10.03	4.0	19.0
155	555	400	263.67	4169.92	3906.25	587	9.17	4.0	19.0
156	556	400	273.44	4179.69	3906.25	528	8.25	4.0	19.0
157	557	400	283.20	4189.45	3906.25	474	7.29	3.5	19.0
158	558	400	292.97	4199.22	3906.25	410	6.31	4.0	19.0
159	559	400	302.73	4208.98	3906.25	369	5.68	4.0	19.0
160	560	400	312.50	4218.75	3906.25	340	5.15	4.0	19.0
161	561	400	322.27	4228.52	3906.25	302	4.58	4.0	18.0
162	562	400	332.03	4238.28	3906.25	271	4.11	4.0	18.0
163	563	400	341.80	4248.05	3906.25	248	3.76	3.0	18.0
164	564	400	351.56	4257.81	3906.25	230	3.48	3.0	18.0
165	565	400	361.33	4267.58	3906.25	202	3.06	3.5	18.0
166	566	400	371.09	4277.34	3906.25	185	2.80	3.5	18.0
167	567	400	380.86	4287.11	3906.25	169	2.56	3.0	18.0
168	568	400	390.63	4296.88	3906.25	156	2.40	3.0	18.0
169	569	400	400.39	4306.64	3906.25	146	2.25	3.0	18.0
170	570	400	410.16	4316.41	3906.25	124	1.91	3.0	18.0
140	740	600	117.19	5976.56	5859.38	1179	9.28	12.0	24.0
141	741	600	126.95	5986.33	5859.38	1215	11.36	12.0	20.0
142	742	600	136.72	5996.09	5859.38	1254	12.67	12.0	20.0
143	743	600	146.48	6005.86	5859.38	1262	13.72	11.0	20.0
144	744	600	156.25	6015.63	5859.38	1290	14.83	10.0	20.0
145	745	600	166.02	6025.39	5859.38	1296	15.43	10.0	20.0
146	746	600	175.78	6035.16	5859.38	1292	15.95	8.0	20.0
147	747	600	185.55	6044.92	5859.38	1208	15.10	8.0	20.0
148	748	600	195.31	6054.69	5859.38	1140	14.62	8.0	20.0
149	749	600	205.08	6064.45	5859.38	1056	13.54	7.0	20.0
150	750	600	214.84	6074.22	5859.38	966	12.71	6.0	20.0
151	751	600	224.61	6083.98	5859.38	880	11.58	5.0	20.0
152	752	600	234.38	6093.75	5859.38	831	10.93	5.0	19.0
153	753	600	244.14	6103.52	5859.38	743	9.91	5.0	19.0
154	754	600	253.91	6113.28	5859.38	624	8.32	4.0	19.0
155	755	600	263.67	6123.05	5859.38	569	7.59	4.0	19.0
156	756	600	273.44	6132.81	5859.38	508	6.77	3.5	19.0
157	757	600	283.20	6142.58	5859.38	460	6.13	3.0	19.0
158	758	600	292.97	6152.34	5859.38	402	5.36	4.0	19.0
159	759	600	302.73	6162.11	5859.38	366	4.88	4.0	19.0
160	760	600	312.50	6171.88	5859.38	329	4.33	4.0	19.0
161	761	600	322.27	6181.64	5859.38	295	3.88	4.0	18.0
162	762	600	332.03	6191.41	5859.38	264	3.47	4.0	18.0
163	763	600	341.80	6201.17	5859.38	241	3.13	3.5	18.0
164	764	600	351.56	6210.94	5859.38	223	2.90	3.5	18.0
165	765	600	361.33	6220.70	5859.38	195	2.53	4.0	18.0
166	766	600	371.09	6230.47	5859.38	175	2.27	4.0	18.0
167	767	600	380.86	6240.23	5859.38	162	2.13	3.5	18.0
168	768	600	390.63	6250.00	5859.38	149	1.99	3.0	18.0
169	769	600	400.39	6259.77	5859.38	139	1.85	3.0	18.0
170	770	600	410.16	6269.53	5859.38	117	1.56	3.0	18.0
140	940	800	117.19	7929.69	7812.50	1198	9.15	12.0	24.0
141	941	800	126.95	7939.45	7812.50	1234	11.12	12.0	20.0

68.7 keV									
Interval [kanal]			Interval [ns]			Intenzitet [count]		Poluširina	Centroida [kanal]
Početak	Kraj	Dužina	Početak	Kraj	Dužina	Net	Normiran	FWHM	
142	942	800	136.72	7949.22	7812.50	1273	12.36	11.0	20.0
143	943	800	146.48	7958.98	7812.50	1280	13.33	11.0	20.0
144	944	800	156.25	7968.75	7812.50	1307	14.36	10.0	20.0
145	945	800	166.02	7978.52	7812.50	1313	14.92	9.0	20.0
146	946	800	175.78	7988.28	7812.50	1309	15.40	8.0	20.0
147	947	800	185.55	7998.05	7812.50	1225	14.76	8.0	20.0
148	948	800	195.31	8007.81	7812.50	1158	14.30	8.0	20.0
149	949	800	205.08	8017.58	7812.50	1074	13.26	7.0	20.0
150	950	800	214.84	8027.34	7812.50	984	12.46	6.0	20.0
151	951	800	224.61	8037.11	7812.50	898	11.37	5.0	20.0
152	952	800	234.38	8046.88	7812.50	799	9.99	5.0	19.0
153	953	800	244.14	8056.64	7812.50	710	8.99	5.0	19.0
154	954	800	253.91	8066.41	7812.50	686	8.68	4.0	19.0
155	955	800	263.67	8076.17	7812.50	574	7.27	4.0	19.0
156	956	800	273.44	8085.94	7812.50	517	6.54	4.0	19.0
157	957	800	283.20	8095.70	7812.50	468	5.92	3.0	19.0
158	958	800	292.97	8105.47	7812.50	449	5.68	3.5	19.0
159	959	800	302.73	8115.23	7812.50	408	5.16	4.0	19.0
160	960	800	312.50	8125.00	7812.50	367	4.59	4.0	19.0
161	961	800	322.27	8134.77	7812.50	328	4.10	4.0	18.0
162	962	800	332.03	8144.53	7812.50	292	3.65	4.0	18.0
163	963	800	341.80	8154.30	7812.50	238	2.98	4.0	18.0
164	964	800	351.56	8164.06	7812.50	220	2.75	4.0	18.0
165	965	800	361.33	8173.83	7812.50	192	2.40	4.0	18.0
166	966	800	371.09	8183.59	7812.50	176	2.20	4.0	18.0
167	967	800	380.86	8193.36	7812.50	163	2.04	4.0	18.0
168	968	800	390.63	8203.13	7812.50	150	1.90	3.0	18.0
169	969	800	400.39	8212.89	7812.50	140	1.77	3.0	18.0
170	970	800	410.16	8222.66	7812.50	118	1.49	3.0	18.0

Tabela B – Linija 511 keV

511 keV									
Interval [kanal]			Interval [ns]			Intenzitet [count]		Poluširina FWHM	Centroida [kanal]
Početak	Kraj	Dužina	Početak	Kraj	Dužina	Net	Normiran		
128	133	5	0.00	48.83	48.83	176	0.232	1.0	164
129	134	5	9.77	58.59	48.83	302	0.397	1.0	164
130	135	5	19.53	68.36	48.83	389	0.512	1.0	164
131	136	5	29.30	78.13	48.83	489	0.643	1.0	164
132	137	5	39.06	87.89	48.83	526	0.692	1.0	164
133	138	5	48.83	97.66	48.83	532	0.700	1.0	164
134	139	5	58.59	107.42	48.83	452	0.595	1.0	164
135	140	5	68.36	117.19	48.83	346	0.455	1.0	164
136	141	5	78.13	126.95	48.83	268	0.353	1.0	164
137	142	5	87.89	136.72	48.83	168	0.221	1.0	164
138	143	5	97.66	146.48	48.83	120	0.158	1.0	164
139	144	5	107.42	156.25	48.83	70	0.092	1.0	164
140	145	5	117.19	166.02	48.83	46	0.061	2.0	164
141	146	5	126.95	175.78	48.83	27	0.036	2.0	164
142	147	5	136.72	185.55	48.83	21	0.028	2.0	164
143	148	5	146.48	195.31	48.83	14	0.018	2.0	164
144	149	5	156.25	205.08	48.83	11	0.014	2.0	164
145	150	5	166.02	214.84	48.83	12	0.016	2.0	164
128	138	10	0.00	97.66	97.66	601	0.791	1.0	164
129	139	10	9.77	107.42	97.66	628	0.826	1.0	164
130	140	10	19.53	117.19	97.66	649	0.854	1.0	164
131	141	10	29.30	126.95	97.66	650	0.855	1.0	164
132	142	10	39.06	136.72	97.66	641	0.843	1.0	164
133	143	10	48.83	146.48	97.66	599	0.788	1.0	164
134	144	10	58.59	156.25	97.66	495	0.651	1.0	164
135	145	10	68.36	166.02	97.66	372	0.489	1.0	164
136	146	10	78.13	175.78	97.66	287	0.378	1.0	164
137	147	10	87.89	185.55	97.66	182	0.239	1.0	164
138	148	10	97.66	195.31	97.66	129	0.170	1.0	164
139	149	10	107.42	205.08	97.66	78	0.103	1.0	164
140	150	10	117.19	214.84	97.66	51	0.067	2.0	164
141	151	10	126.95	224.61	97.66	31	0.041	2.0	164
142	152	10	136.72	234.38	97.66	24	0.032	2.0	164
143	153	10	146.48	244.14	97.66	17	0.022	2.0	164
144	154	10	156.25	253.91	97.66	12	0.016	2.0	164
145	155	10	166.02	263.67	97.66	14	0.018	2.5	164
146	156	10	175.78	273.44	97.66	9	0.012	2.5	164
167	177	10	380.86	478.52	97.66	11	0.014	1.0	164
168	178	10	390.63	488.28	97.66	10	0.013	1.0	164
169	179	10	400.39	498.05	97.66	11	0.014	1.0	164
170	180	10	410.16	507.81	97.66	11	0.014	1.5	164
171	181	10	419.92	517.58	97.66	9	0.012	1.0	164
172	182	10	429.69	527.34	97.66	9	0.012	1.0	164
173	183	10	439.45	537.11	97.66	9	0.012	1.0	164
174	184	10	449.22	546.88	97.66	9	0.012	1.0	164
128	148	20	0.00	195.31	195.31	677	0.891	1.0	164
129	149	20	9.77	205.08	195.31	679	0.893	1.0	164
130	150	20	19.53	214.84	195.31	680	0.895	1.0	164
131	151	20	29.30	224.61	195.31	673	0.886	1.0	164

511 keV									
Interval [kanal]			Interval [ns]			Intenzitet [count]		Poluširina	Centroida [kanal]
Početak	Kraj	Dužina	Početak	Kraj	Dužina	Net	Normiran	FWHM	
132	152	20	39.06	234.38	195.31	658	0.866	1.0	164
133	153	20	48.83	244.14	195.31	611	0.804	1.0	164
134	154	20	58.59	253.91	195.31	504	0.663	1.0	164
135	155	20	68.36	263.67	195.31	378	0.497	1.0	164
136	156	20	78.13	273.44	195.31	292	0.384	1.0	164
137	157	20	87.89	283.20	195.31	185	0.243	1.0	164
138	158	20	97.66	292.97	195.31	132	0.174	1.0	164
139	159	20	107.42	302.73	195.31	78	0.103	1.0	164
140	160	20	117.19	312.50	195.31	51	0.067	2.0	164
141	161	20	126.95	322.27	195.31	31	0.041	2.0	164
142	162	20	136.72	332.03	195.31	23	0.030	2.0	164
143	163	20	146.48	341.80	195.31	16	0.021	2.0	164
144	164	20	156.25	351.56	195.31	15	0.020	2.0	164
145	165	20	166.02	361.33	195.31	12	0.016	2.0	164
146	166	20	175.78	371.09	195.31	9	0.012	1.5	164
147	167	20	185.55	380.86	195.31	9	0.012	1.5	164
156	176	20	273.44	468.75	195.31	10	0.013	1.5	164
157	177	20	283.20	478.52	195.31	11	0.014	1.0	164
158	178	20	292.97	488.28	195.31	11	0.014	1.5	164
159	179	20	302.73	498.05	195.31	12	0.016	1.0	164
160	180	20	312.50	507.81	195.31	13	0.017	1.0	164
161	181	20	322.27	517.58	195.31	13	0.017	1.0	164
162	182	20	332.03	527.34	195.31	13	0.017	1.0	164
163	183	20	341.80	537.11	195.31	13	0.017	1.0	164
164	184	20	351.56	546.88	195.31	14	0.018	1.0	164
165	185	20	361.33	556.64	195.31	14	0.018	1.0	164
166	186	20	371.09	566.41	195.31	14	0.018	1.0	164
167	187	20	380.86	576.17	195.31	14	0.018	1.0	164
168	188	20	390.63	585.94	195.31	13	0.017	1.0	164
169	189	20	400.39	595.70	195.31	13	0.017	1.0	164
170	190	20	410.16	605.47	195.31	14	0.018	1.5	164
128	178	50	0.00	488.28	488.28	687	0.904	1.0	164
129	179	50	9.77	498.05	488.28	688	0.905	1.0	164
130	180	50	19.53	507.81	488.28	689	0.907	1.0	164
131	181	50	29.30	517.58	488.28	682	0.897	1.0	164
132	182	50	39.06	527.34	488.28	666	0.876	1.0	164
133	183	50	48.83	537.11	488.28	619	0.814	1.0	164
134	184	50	58.59	546.88	488.28	513	0.675	1.0	164
135	185	50	68.36	556.64	488.28	387	0.509	1.0	164
136	186	50	78.13	566.41	488.28	301	0.396	1.0	164
137	187	50	87.89	576.17	488.28	195	0.257	1.0	164
138	188	50	97.66	585.94	488.28	142	0.187	1.0	164
139	189	50	107.42	595.70	488.28	89	0.117	1.0	164
140	190	50	117.19	605.47	488.28	63	0.083	1.5	164
141	191	50	126.95	615.23	488.28	43	0.057	1.5	164
142	192	50	136.72	625.00	488.28	35	0.046	1.5	164
143	193	50	146.48	634.77	488.28	28	0.037	1.5	164
144	194	50	156.25	644.53	488.28	23	0.030	1.5	164
145	195	50	166.02	654.30	488.28	20	0.026	1.5	164
146	196	50	175.78	664.06	488.28	17	0.022	1.0	164
147	197	50	185.55	673.83	488.28	16	0.021	1.0	164

511 keV									
Interval [kanal]			Interval [ns]			Intenzitet [count]		Poluširina	Centroida [kanal]
Početak	Kraj	Dužina	Početak	Kraj	Dužina	Net	Normiran	FWHM	
148	198	50	195.31	683.59	488.28	15	0.020	1.0	164
149	199	50	205.08	693.36	488.28	15	0.020	1.0	164
150	200	50	214.84	703.13	488.28	13	0.017	1.0	164
151	201	50	224.61	712.89	488.28	13	0.017	1.0	164
152	202	50	234.38	722.66	488.28	13	0.017	1.0	164
153	203	50	244.14	732.42	488.28	14	0.018	1.0	164
154	204	50	253.91	742.19	488.28	14	0.018	1.0	164
155	205	50	263.67	751.95	488.28	14	0.018	1.0	164
156	206	50	273.44	761.72	488.28	16	0.021	1.0	164
157	207	50	283.20	771.48	488.28	16	0.021	1.0	164
158	208	50	292.97	781.25	488.28	16	0.021	1.0	164
159	209	50	302.73	791.02	488.28	17	0.022	1.0	164
160	210	50	312.50	800.78	488.28	19	0.025	1.0	164
161	211	50	322.27	810.55	488.28	19	0.025	1.0	164
162	212	50	332.03	820.31	488.28	19	0.025	1.0	164
163	213	50	341.80	830.08	488.28	20	0.026	1.0	164
164	214	50	351.56	839.84	488.28	20	0.026	1.0	164
165	215	50	361.33	849.61	488.28	20	0.026	1.0	164
166	216	50	371.09	859.38	488.28	20	0.026	1.0	164
167	217	50	380.86	869.14	488.28	20	0.026	1.0	164
128	228	100	0.00	976.56	976.56	706	0.929	1.0	164
129	229	100	9.77	986.33	976.56	706	0.929	1.0	164
130	230	100	19.53	996.09	976.56	707	0.930	1.0	164
131	231	100	29.30	1005.86	976.56	700	0.921	1.0	164
132	232	100	39.06	1015.63	976.56	685	0.901	1.0	164
133	233	100	48.83	1025.39	976.56	639	0.841	1.0	164
134	234	100	58.59	1035.16	976.56	532	0.700	1.0	164
135	235	100	68.36	1044.92	976.56	406	0.534	1.0	164
136	236	100	78.13	1054.69	976.56	320	0.421	1.0	164
137	237	100	87.89	1064.45	976.56	215	0.283	1.0	164
138	238	100	97.66	1074.22	976.56	163	0.214	1.0	164
139	239	100	107.42	1083.98	976.56	111	0.146	1.0	164
140	240	100	117.19	1093.75	976.56	84	0.111	1.0	164
141	241	100	126.95	1103.52	976.56	63	0.083	1.0	164
142	242	100	136.72	1113.28	976.56	55	0.072	1.0	164
143	243	100	146.48	1123.05	976.56	49	0.064	1.0	164
144	244	100	156.25	1132.81	976.56	44	0.058	1.0	164
145	245	100	166.02	1142.58	976.56	41	0.054	1.0	164
146	246	100	175.78	1152.34	976.56	38	0.050	1.0	164
147	247	100	185.55	1162.11	976.56	37	0.049	1.0	164
148	248	100	195.31	1171.88	976.56	35	0.046	1.0	164
149	249	100	205.08	1181.64	976.56	36	0.047	1.0	164
150	250	100	214.84	1191.41	976.56	34	0.045	1.0	164
151	251	100	224.61	1201.17	976.56	35	0.046	1.0	164
152	252	100	234.38	1210.94	976.56	35	0.046	1.0	164
153	253	100	244.14	1220.70	976.56	34	0.045	1.0	164
154	254	100	253.91	1230.47	976.56	34	0.045	1.0	164
155	255	100	263.67	1240.23	976.56	34	0.045	1.0	164
156	256	100	273.44	1250.00	976.56	34	0.045	1.0	164
157	257	100	283.20	1259.77	976.56	34	0.045	1.0	164
158	258	100	292.97	1269.53	976.56	34	0.045	1.0	164

511 keV									
Interval [kanal]			Interval [ns]			Intenzitet [count]		Poluširina	Centroida [kanal]
Početak	Kraj	Dužina	Početak	Kraj	Dužina	Net	Normiran	FWHM	
159	259	100	302.73	1279.30	976.56	34	0.045	1.0	164
160	260	100	312.50	1289.06	976.56	35	0.046	1.0	164
161	261	100	322.27	1298.83	976.56	35	0.046	1.0	164
162	262	100	332.03	1308.59	976.56	35	0.046	1.0	164
163	263	100	341.80	1318.36	976.56	35	0.046	1.0	164
164	264	100	351.56	1328.13	976.56	36	0.047	1.0	164
165	265	100	361.33	1337.89	976.56	36	0.047	1.0	164
166	266	100	371.09	1347.66	976.56	36	0.047	1.0	164
167	267	100	380.86	1357.42	976.56	35	0.046	1.0	164
168	268	100	390.63	1367.19	976.56	34	0.045	1.0	164
169	269	100	400.39	1376.95	976.56	34	0.045	1.0	164
170	270	100	410.16	1386.72	976.56	34	0.045	1.0	164
128	328	200	0.00	1953.13	1953.13	725	0.954	1.0	164
129	329	200	9.77	1962.89	1953.13	725	0.954	1.0	164
130	330	200	19.53	1972.66	1953.13	726	0.955	1.0	164
131	331	200	29.30	1982.42	1953.13	719	0.946	1.0	164
132	332	200	39.06	1992.19	1953.13	703	0.925	1.0	164
133	333	200	48.83	2001.95	1953.13	656	0.863	1.0	164
134	334	200	58.59	2011.72	1953.13	549	0.722	1.0	164
135	335	200	68.36	2021.48	1953.13	423	0.557	1.0	164
136	336	200	78.13	2031.25	1953.13	337	0.443	1.0	164
137	337	200	87.89	2041.02	1953.13	230	0.303	1.0	164
138	338	200	97.66	2050.78	1953.13	177	0.233	1.0	164
139	339	200	107.42	2060.55	1953.13	124	0.163	1.0	164
140	340	200	117.19	2070.31	1953.13	97	0.128	1.0	164
141	341	200	126.95	2080.08	1953.13	77	0.101	1.0	164
142	342	200	136.72	2089.84	1953.13	70	0.092	1.0	164
143	343	200	146.48	2099.61	1953.13	64	0.084	1.0	164
144	344	200	156.25	2109.38	1953.13	59	0.078	1.0	164
145	345	200	166.02	2119.14	1953.13	56	0.074	1.0	164
146	346	200	175.78	2128.91	1953.13	53	0.070	1.0	164
147	347	200	185.55	2138.67	1953.13	52	0.068	1.0	164
148	348	200	195.31	2148.44	1953.13	50	0.066	1.0	164
149	349	200	205.08	2158.20	1953.13	50	0.066	1.0	164
150	350	200	214.84	2167.97	1953.13	48	0.063	1.0	164
151	351	200	224.61	2177.73	1953.13	48	0.063	1.0	164
152	352	200	234.38	2187.50	1953.13	48	0.063	1.0	164
153	353	200	244.14	2197.27	1953.13	47	0.062	1.0	164
154	354	200	253.91	2207.03	1953.13	47	0.062	1.0	164
155	355	200	263.67	2216.80	1953.13	47	0.062	1.0	164
156	356	200	273.44	2226.56	1953.13	47	0.062	1.0	164
157	357	200	283.20	2236.33	1953.13	47	0.062	1.0	164
158	358	200	292.97	2246.09	1953.13	47	0.062	1.0	164
159	359	200	302.73	2255.86	1953.13	47	0.062	1.0	164
160	360	200	312.50	2265.63	1953.13	48	0.063	1.0	164
161	361	200	322.27	2275.39	1953.13	48	0.063	1.0	164
162	362	200	332.03	2285.16	1953.13	48	0.063	1.0	164
163	363	200	341.80	2294.92	1953.13	49	0.064	1.0	164
164	364	200	351.56	2304.69	1953.13	49	0.064	1.0	164
165	365	200	361.33	2314.45	1953.13	50	0.066	1.0	164
166	366	200	371.09	2324.22	1953.13	50	0.066	1.0	164

511 keV										
Interval [kanal]			Interval [ns]			Intenzitet [count]		Poluširina	Centroida [kanal]	
Početak	Kraj	Dužina	Početak	Kraj	Dužina	Net	Normiran	FWHM		
167	367	200	380.86	2333.98	1953.13	48	0.063	1.0	164	
168	368	200	390.63	2343.75	1953.13	47	0.062	1.0	164	
169	369	200	400.39	2353.52	1953.13	47	0.062	1.0	164	
170	370	200	410.16	2363.28	1953.13	47	0.062	1.0	164	
128	428	300	0.00	2929.69	2929.69	734	0.966	1.0	164	
129	429	300	9.77	2939.45	2929.69	735	0.967	1.0	164	
130	430	300	19.53	2949.22	2929.69	736	0.968	1.0	164	
131	431	300	29.30	2958.98	2929.69	729	0.959	1.0	164	
132	432	300	39.06	2968.75	2929.69	713	0.938	1.0	164	
133	433	300	48.83	2978.52	2929.69	666	0.876	1.0	164	
134	434	300	58.59	2988.28	2929.69	559	0.736	1.0	164	
135	435	300	68.36	2998.05	2929.69	433	0.570	1.0	164	
136	436	300	78.13	3007.81	2929.69	347	0.457	1.0	164	
137	437	300	87.89	3017.58	2929.69	240	0.316	1.0	164	
138	438	300	97.66	3027.34	2929.69	187	0.246	1.0	164	
139	439	300	107.42	3037.11	2929.69	134	0.176	1.0	164	
140	440	300	117.19	3046.88	2929.69	107	0.141	1.0	164	
141	441	300	126.95	3056.64	2929.69	87	0.114	1.0	164	
142	442	300	136.72	3066.41	2929.69	79	0.104	1.0	164	
143	443	300	146.48	3076.17	2929.69	72	0.095	1.0	164	
144	444	300	156.25	3085.94	2929.69	68	0.089	1.0	164	
145	445	300	166.02	3095.70	2929.69	66	0.087	1.0	164	
146	446	300	175.78	3105.47	2929.69	63	0.083	1.0	164	
147	447	300	185.55	3115.23	2929.69	62	0.082	1.0	164	
148	448	300	195.31	3125.00	2929.69	60	0.079	1.0	164	
149	449	300	205.08	3134.77	2929.69	60	0.079	1.0	164	
150	450	300	214.84	3144.53	2929.69	57	0.075	1.0	164	
151	451	300	224.61	3154.30	2929.69	57	0.075	1.0	164	
152	452	300	234.38	3164.06	2929.69	57	0.075	1.0	164	
153	453	300	244.14	3173.83	2929.69	56	0.074	1.0	164	
154	454	300	253.91	3183.59	2929.69	56	0.074	1.0	164	
155	455	300	263.67	3193.36	2929.69	55	0.072	1.0	164	
156	456	300	273.44	3203.13	2929.69	55	0.072	1.0	164	
157	457	300	283.20	3212.89	2929.69	55	0.072	1.0	164	
158	458	300	292.97	3222.66	2929.69	55	0.072	1.0	164	
159	459	300	302.73	3232.42	2929.69	55	0.072	1.0	164	
160	460	300	312.50	3242.19	2929.69	56	0.074	1.0	164	
161	461	300	322.27	3251.95	2929.69	56	0.074	1.0	164	
162	462	300	332.03	3261.72	2929.69	56	0.074	1.0	164	
163	463	300	341.80	3271.48	2929.69	56	0.074	1.0	164	
164	464	300	351.56	3281.25	2929.69	56	0.074	1.0	164	
165	465	300	361.33	3291.02	2929.69	56	0.074	1.0	164	
166	466	300	371.09	3300.78	2929.69	57	0.075	1.0	164	
167	467	300	380.86	3310.55	2929.69	56	0.074	1.0	164	
168	468	300	390.63	3320.31	2929.69	55	0.072	1.0	164	
169	469	300	400.39	3330.08	2929.69	55	0.072	1.0	164	
170	470	300	410.16	3339.84	2929.69	54	0.071	1.0	164	
128	528	400	0.00	3906.25	3906.25	742	0.976	1.0	164	
129	529	400	9.77	3916.02	3906.25	742	0.976	1.0	164	
130	530	400	19.53	3925.78	3906.25	744	0.979	1.0	164	
131	531	400	29.30	3935.55	3906.25	737	0.970	1.0	164	

511 keV									
Interval [kanal]			Interval [ns]			Intenzitet [count]		Poluširina	Centroida [kanal]
Početak	Kraj	Dužina	Početak	Kraj	Dužina	Net	Normiran	FWHM	
132	532	400	39.06	3945.31	3906.25	721	0.949	1.0	164
133	533	400	48.83	3955.08	3906.25	674	0.887	1.0	164
134	534	400	58.59	3964.84	3906.25	567	0.746	1.0	164
135	535	400	68.36	3974.61	3906.25	441	0.580	1.0	164
136	536	400	78.13	3984.38	3906.25	355	0.467	1.0	164
137	537	400	87.89	3994.14	3906.25	248	0.326	1.0	164
138	538	400	97.66	4003.91	3906.25	195	0.257	1.0	164
139	539	400	107.42	4013.67	3906.25	142	0.187	1.0	164
140	540	400	117.19	4023.44	3906.25	115	0.151	1.0	164
141	541	400	126.95	4033.20	3906.25	95	0.125	1.0	164
142	542	400	136.72	4042.97	3906.25	87	0.114	1.0	164
143	543	400	146.48	4052.73	3906.25	80	0.105	1.0	164
144	544	400	156.25	4062.50	3906.25	75	0.099	1.0	164
145	545	400	166.02	4072.27	3906.25	72	0.095	1.0	164
146	546	400	175.78	4082.03	3906.25	69	0.091	1.0	164
147	547	400	185.55	4091.80	3906.25	68	0.089	1.0	164
148	548	400	195.31	4101.56	3906.25	66	0.087	1.0	164
149	549	400	205.08	4111.33	3906.25	67	0.088	1.0	164
150	550	400	214.84	4121.09	3906.25	65	0.086	1.0	164
151	551	400	224.61	4130.86	3906.25	65	0.086	1.0	164
152	552	400	234.38	4140.63	3906.25	65	0.086	1.0	164
153	553	400	244.14	4150.39	3906.25	64	0.084	1.0	164
154	554	400	253.91	4160.16	3906.25	64	0.084	1.0	164
155	555	400	263.67	4169.92	3906.25	64	0.084	1.0	164
156	556	400	273.44	4179.69	3906.25	64	0.084	1.0	164
157	557	400	283.20	4189.45	3906.25	65	0.086	1.0	164
158	558	400	292.97	4199.22	3906.25	65	0.086	1.0	164
159	559	400	302.73	4208.98	3906.25	65	0.086	1.0	164
160	560	400	312.50	4218.75	3906.25	66	0.087	1.0	164
161	561	400	322.27	4228.52	3906.25	66	0.087	1.0	164
162	562	400	332.03	4238.28	3906.25	66	0.087	1.0	164
163	563	400	341.80	4248.05	3906.25	66	0.087	1.0	164
164	564	400	351.56	4257.81	3906.25	66	0.087	1.0	164
165	565	400	361.33	4267.58	3906.25	66	0.087	1.0	164
166	566	400	371.09	4277.34	3906.25	66	0.087	1.0	164
167	567	400	380.86	4287.11	3906.25	66	0.087	1.0	164
168	568	400	390.63	4296.88	3906.25	65	0.086	1.0	164
169	569	400	400.39	4306.64	3906.25	65	0.086	1.0	164
170	570	400	410.16	4316.41	3906.25	65	0.086	1.0	164
128	728	600	0.00	5859.38	5859.38	755	0.993	1.0	164
129	729	600	9.77	5869.14	5859.38	755	0.993	1.0	164
130	730	600	19.53	5878.91	5859.38	756	0.995	1.0	164
131	731	600	29.30	5888.67	5859.38	749	0.986	1.0	164
132	732	600	39.06	5898.44	5859.38	733	0.964	1.0	164
133	733	600	48.83	5908.20	5859.38	686	0.903	1.0	164
134	734	600	58.59	5917.97	5859.38	579	0.762	1.0	164
135	735	600	68.36	5927.73	5859.38	453	0.596	1.0	164
136	736	600	78.13	5937.50	5859.38	367	0.483	1.0	164
137	737	600	87.89	5947.27	5859.38	260	0.342	1.0	164
138	738	600	97.66	5957.03	5859.38	207	0.272	1.0	164
139	739	600	107.42	5966.80	5859.38	154	0.203	1.0	164

511 keV									
Interval [kanal]			Interval [ns]			Intenzitet [count]		Poluširina	Centroida [kanal]
Početak	Kraj	Dužina	Početak	Kraj	Dužina	Net	Normiran	FWHM	
140	740	600	117.19	5976.56	5859.38	127	0.167	1.0	164
141	741	600	126.95	5986.33	5859.38	107	0.141	1.0	164
142	742	600	136.72	5996.09	5859.38	99	0.130	1.0	164
143	743	600	146.48	6005.86	5859.38	92	0.121	1.0	164
144	744	600	156.25	6015.63	5859.38	87	0.114	1.0	164
145	745	600	166.02	6025.39	5859.38	84	0.111	1.0	164
146	746	600	175.78	6035.16	5859.38	81	0.107	1.0	164
147	747	600	185.55	6044.92	5859.38	80	0.105	1.0	164
148	748	600	195.31	6054.69	5859.38	78	0.103	1.0	164
149	749	600	205.08	6064.45	5859.38	78	0.103	1.0	164
150	750	600	214.84	6074.22	5859.38	76	0.100	1.0	164
151	751	600	224.61	6083.98	5859.38	76	0.100	1.0	164
152	752	600	234.38	6093.75	5859.38	76	0.100	1.0	164
153	753	600	244.14	6103.52	5859.38	75	0.099	1.0	164
154	754	600	253.91	6113.28	5859.38	75	0.099	1.0	164
155	755	600	263.67	6123.05	5859.38	75	0.099	1.0	164
156	756	600	273.44	6132.81	5859.38	75	0.099	1.0	164
157	757	600	283.20	6142.58	5859.38	75	0.099	1.0	164
158	758	600	292.97	6152.34	5859.38	75	0.099	1.0	164
159	759	600	302.73	6162.11	5859.38	75	0.099	1.0	164
160	760	600	312.50	6171.88	5859.38	76	0.100	1.0	164
161	761	600	322.27	6181.64	5859.38	76	0.100	1.0	164
162	762	600	332.03	6191.41	5859.38	76	0.100	1.0	164
163	763	600	341.80	6201.17	5859.38	77	0.101	1.0	164
164	764	600	351.56	6210.94	5859.38	77	0.101	1.0	164
165	765	600	361.33	6220.70	5859.38	77	0.101	1.0	164
166	766	600	371.09	6230.47	5859.38	77	0.101	1.0	164
167	767	600	380.86	6240.23	5859.38	76	0.100	1.0	164
168	768	600	390.63	6250.00	5859.38	75	0.099	1.0	164
169	769	600	400.39	6259.77	5859.38	75	0.099	1.0	164
170	770	600	410.16	6269.53	5859.38	75	0.099	1.0	164
128	928	800	0.00	7812.50	7812.50	758	0.997	1.0	164
129	929	800	9.77	7822.27	7812.50	758	0.997	1.0	164
130	930	800	19.53	7832.03	7812.50	759	0.999	1.0	164
131	931	800	29.30	7841.80	7812.50	752	0.989	1.0	164
132	932	800	39.06	7851.56	7812.50	736	0.968	1.0	164
133	933	800	48.83	7861.33	7812.50	689	0.907	1.0	164
134	934	800	58.59	7871.09	7812.50	582	0.766	1.0	164
135	935	800	68.36	7880.86	7812.50	456	0.600	1.0	164
136	936	800	78.13	7890.63	7812.50	370	0.487	1.0	164
137	937	800	87.89	7900.39	7812.50	264	0.347	1.0	164
138	938	800	97.66	7910.16	7812.50	211	0.278	1.0	164
139	939	800	107.42	7919.92	7812.50	158	0.208	1.0	164
140	940	800	117.19	7929.69	7812.50	131	0.172	1.0	164
141	941	800	126.95	7939.45	7812.50	111	0.146	1.0	164
142	942	800	136.72	7949.22	7812.50	103	0.136	1.0	164
143	943	800	146.48	7958.98	7812.50	96	0.126	1.0	164
144	944	800	156.25	7968.75	7812.50	91	0.120	1.0	164
145	945	800	166.02	7978.52	7812.50	88	0.116	1.0	164
146	946	800	175.78	7988.28	7812.50	85	0.112	1.0	164
147	947	800	185.55	7998.05	7812.50	83	0.109	1.0	164

511 keV									
Interval [kanal]			Interval [ns]			Intenzitet [count]		Poluširina	Centroida [kanal]
Početak	Kraj	Dužina	Početak	Kraj	Dužina	Net	Normiran	FWHM	
148	948	800	195.31	8007.81	7812.50	81	0.107	1.0	164
149	949	800	205.08	8017.58	7812.50	81	0.107	1.0	164
150	950	800	214.84	8027.34	7812.50	79	0.104	1.0	164
151	951	800	224.61	8037.11	7812.50	79	0.104	1.0	164
152	952	800	234.38	8046.88	7812.50	80	0.105	1.0	164
153	953	800	244.14	8056.64	7812.50	79	0.104	1.0	164
154	954	800	253.91	8066.41	7812.50	79	0.104	1.0	164
155	955	800	263.67	8076.17	7812.50	79	0.104	1.0	164
156	956	800	273.44	8085.94	7812.50	79	0.104	1.0	164
157	957	800	283.20	8095.70	7812.50	79	0.104	1.0	164
158	958	800	292.97	8105.47	7812.50	79	0.104	1.0	164
159	959	800	302.73	8115.23	7812.50	79	0.104	1.0	164
160	960	800	312.50	8125.00	7812.50	80	0.105	1.0	164
161	961	800	322.27	8134.77	7812.50	80	0.105	1.0	164
162	962	800	332.03	8144.53	7812.50	80	0.105	1.0	164
163	963	800	341.80	8154.30	7812.50	80	0.105	1.0	164
164	964	800	351.56	8164.06	7812.50	80	0.105	1.0	164
165	965	800	361.33	8173.83	7812.50	80	0.105	1.0	164
166	966	800	371.09	8183.59	7812.50	80	0.105	1.0	164
167	967	800	380.86	8193.36	7812.50	80	0.105	1.0	164
168	968	800	390.63	8203.13	7812.50	79	0.104	1.0	164
169	969	800	400.39	8212.89	7812.50	79	0.104	1.0	164
170	970	800	410.16	8222.66	7812.50	79	0.104	1.0	164
128	968	840	0.00	8203.13	8203.13	760	1.000	1.0	164

Tabela C – Linija 595.9 keV

595.8 keV									
Interval [kanal]			Interval [ns]			Intenzitet [count]		Poluširina	Centroida [kanal]
Početak	Kraj	Dužina	Početak	Kraj	Dužina	Net	Normiran	FWHM	
143	153	10	146.48	244.14	97.66	17	1.00	4.0	192.0
145	155	10	166.02	263.67	97.66	14	1.00	3.0	192.0
141	161	20	126.95	322.27	195.31	11	0.35	2.5	193.0
142	162	20	136.72	332.03	195.31	14	0.61	2.5	193.0
143	163	20	146.48	341.80	195.31	19	1.19	3.0	193.0
144	164	20	156.25	351.56	195.31	18	1.20	3.0	192.0
145	165	20	166.02	361.33	195.31	15	1.25	3.0	193.0
141	191	50	126.95	615.23	488.28	15	0.35	2.0	193.0
143	193	50	146.48	634.77	488.28	27	1.17	3.0	193.0
141	241	100	126.95	1103.52	976.56	15	0.24	2.0	193.0
142	242	100	136.72	1113.28	976.56	14	0.25	2.0	193.0
145	245	100	166.02	1142.58	976.56	14	0.34	3.0	193.0
140	340	200	117.19	2070.31	1953.13	14	0.14	2.0	193.0
141	341	200	126.95	2080.08	1953.13	15	0.19	2.0	193.0
142	342	200	136.72	2089.84	1953.13	14	0.20	2.5	193.0
144	344	200	156.25	2109.38	1953.13	16	0.27	3.0	193.0
145	345	200	166.02	2119.14	1953.13	14	0.25	3.0	193.0
146	346	200	175.78	2128.91	1953.13	13	0.23	3.0	193.0
147	347	200	185.55	2138.67	1953.13	11	0.21	2.0	193.0
148	348	200	195.31	2148.44	1953.13	10	0.20	2.0	193.0
149	349	200	205.08	2158.20	1953.13	10	0.20	2.0	193.0
150	350	200	214.84	2167.97	1953.13	12	0.25	2.0	193.0
151	351	200	224.61	2177.73	1953.13	11	0.23	2.0	193.0
152	352	200	234.38	2187.50	1953.13	11	0.23	2.0	193.0
153	353	200	244.14	2197.27	1953.13	10	0.21	2.0	193.0
140	440	300	117.19	3046.88	2929.69	16	0.15	3.0	193.0
141	441	300	126.95	3056.64	2929.69	17	0.20	2.0	193.0
142	442	300	136.72	3066.41	2929.69	16	0.20	2.0	193.0
143	443	300	146.48	3076.17	2929.69	21	0.29	3.0	193.0
144	444	300	156.25	3085.94	2929.69	19	0.28	3.0	193.0
145	445	300	166.02	3095.70	2929.69	16	0.24	3.0	193.0
140	540	400	117.19	4023.44	3906.25	17	0.15	2.0	193.0
141	541	400	126.95	4033.20	3906.25	18	0.19	2.0	193.0
142	542	400	136.72	4042.97	3906.25	17	0.20	2.0	193.0
143	543	400	146.48	4052.73	3906.25	16	0.20	3.0	193.0
147	547	400	185.55	4091.80	3906.25	10	0.15	2.0	193.0
148	548	400	195.31	4101.56	3906.25	11	0.17	2.0	193.0
149	549	400	205.08	4111.33	3906.25	11	0.16	2.0	193.0
150	550	400	214.84	4121.09	3906.25	11	0.17	2.0	193.0
151	551	400	224.61	4130.86	3906.25	12	0.18	2.0	193.0
152	552	400	234.38	4140.63	3906.25	12	0.18	2.0	193.0
153	553	400	244.14	4150.39	3906.25	11	0.17	2.0	193.0
154	554	400	253.91	4160.16	3906.25	10	0.16	2.0	193.0
155	555	400	263.67	4169.92	3906.25	12	0.19	1.5	193.0
156	556	400	273.44	4179.69	3906.25	11	0.17	1.5	193.0
157	557	400	283.20	4189.45	3906.25	10	0.15	1.5	193.0
158	558	400	292.97	4199.22	3906.25	10	0.15	1.5	193.0
159	559	400	302.73	4208.98	3906.25	10	0.15	1.5	193.0
160	560	400	312.50	4218.75	3906.25	10	0.15	1.5	193.0

595.8 keV									
Interval [kanal]			Interval [ns]			Intenzitet [count]		Poluširina	Centroida [kanal]
Početak	Kraj	Dužina	Početak	Kraj	Dužina	Net	Normiran	FWHM	
162	562	400	332.03	4238.28	3906.25	11	0.17	1.5	193.0
163	563	400	341.80	4248.05	3906.25	11	0.17	1.5	193.0
140	740	600	117.19	5976.56	5859.38	19	0.15	3.0	193.0
141	741	600	126.95	5986.33	5859.38	20	0.19	2.0	193.0
142	742	600	136.72	5996.09	5859.38	25	0.25	3.0	193.0
143	743	600	146.48	6005.86	5859.38	28	0.30	3.0	193.0
144	744	600	156.25	6015.63	5859.38	26	0.30	3.0	193.0
145	745	600	166.02	6025.39	5859.38	23	0.27	3.0	193.0
146	746	600	175.78	6035.16	5859.38	16	0.20	3.0	193.0
147	747	600	185.55	6044.92	5859.38	14	0.18	3.0	193.0
148	748	600	195.31	6054.69	5859.38	13	0.17	3.0	193.0
149	749	600	205.08	6064.45	5859.38	12	0.15	1.5	193.0
150	750	600	214.84	6074.22	5859.38	10	0.13	1.5	193.0
151	751	600	224.61	6083.98	5859.38	10	0.13	1.5	193.0
152	752	600	234.38	6093.75	5859.38	10	0.13	1.5	193.0
153	753	600	244.14	6103.52	5859.38	11	0.15	1.5	193.0
154	754	600	253.91	6113.28	5859.38	11	0.15	1.5	193.0
155	755	600	263.67	6123.05	5859.38	13	0.17	1.5	193.0
156	756	600	273.44	6132.81	5859.38	12	0.16	1.5	193.0
157	757	600	283.20	6142.58	5859.38	11	0.15	1.5	193.0
158	758	600	292.97	6152.34	5859.38	13	0.17	1.5	193.0
159	759	600	302.73	6162.11	5859.38	13	0.17	1.5	193.0
160	760	600	312.50	6171.88	5859.38	12	0.16	1.5	193.0
161	761	600	322.27	6181.64	5859.38	11	0.14	1.5	193.0
162	762	600	332.03	6191.41	5859.38	13	0.17	1.5	193.0
163	763	600	341.80	6201.17	5859.38	13	0.17	2.0	193.0
164	764	600	351.56	6210.94	5859.38	12	0.16	2.0	193.0
165	765	600	361.33	6220.70	5859.38	11	0.14	1.5	193.0
166	766	600	371.09	6230.47	5859.38	11	0.14	1.5	193.0
167	767	600	380.86	6240.23	5859.38	11	0.14	1.5	193.0
168	768	600	390.63	6250.00	5859.38	11	0.15	1.5	193.0
169	769	600	400.39	6259.77	5859.38	11	0.15	1.5	193.0
170	770	600	410.16	6269.53	5859.38	11	0.15	1.5	193.0
140	940	800	117.19	7929.69	7812.50	25	0.19	3.0	193.0
141	941	800	126.95	7939.45	7812.50	23	0.21	2.0	193.0
142	942	800	136.72	7949.22	7812.50	27	0.26	2.0	193.0
143	943	800	146.48	7958.98	7812.50	30	0.31	3.0	193.0
144	944	800	156.25	7968.75	7812.50	28	0.31	3.0	193.0
145	945	800	166.02	7978.52	7812.50	25	0.28	3.0	193.0
146	946	800	175.78	7988.28	7812.50	18	0.21	3.0	193.0
147	947	800	185.55	7998.05	7812.50	16	0.19	2.0	193.0
148	948	800	195.31	8007.81	7812.50	18	0.22	2.0	193.0
149	949	800	205.08	8017.58	7812.50	17	0.21	2.0	193.0
150	950	800	214.84	8027.34	7812.50	15	0.19	1.5	193.0
151	951	800	224.61	8037.11	7812.50	17	0.22	1.5	193.0
152	952	800	234.38	8046.88	7812.50	17	0.21	1.5	193.0
153	953	800	244.14	8056.64	7812.50	18	0.23	2.0	193.0
154	954	800	253.91	8066.41	7812.50	16	0.20	2.0	193.0
155	955	800	263.67	8076.17	7812.50	15	0.19	2.0	193.0
156	956	800	273.44	8085.94	7812.50	14	0.18	2.0	193.0
157	957	800	283.20	8095.70	7812.50	13	0.16	2.0	193.0

595.8 keV									
Interval [kanal]			Interval [ns]			Intenzitet [count]		Poluširina	Centroida [kanal]
Početak	Kraj	Dužina	Početak	Kraj	Dužina	Net	Normiran	FWHM	
158	958	800	292.97	8105.47	7812.50	15	0.19	2.0	193.0
159	959	800	302.73	8115.23	7812.50	15	0.19	2.0	193.0
160	960	800	312.50	8125.00	7812.50	14	0.18	2.0	193.0
161	961	800	322.27	8134.77	7812.50	13	0.16	2.0	193.0
162	962	800	332.03	8144.53	7812.50	15	0.19	2.0	193.0
163	963	800	341.80	8154.30	7812.50	15	0.19	2.0	193.0
164	964	800	351.56	8164.06	7812.50	14	0.18	2.0	193.0
165	965	800	361.33	8173.83	7812.50	13	0.16	2.0	193.0
166	966	800	371.09	8183.59	7812.50	13	0.16	2.0	193.0
167	967	800	380.86	8193.36	7812.50	13	0.16	2.0	193.0
168	968	800	390.63	8203.13	7812.50	13	0.16	2.0	193.0
169	969	800	400.39	8212.89	7812.50	13	0.16	2.0	193.0
170	970	800	410.16	8222.66	7812.50	13	0.16	3.0	193.0

Tabela D – Linija 691 keV

691 keV									
Interval [kanal]			Interval [ns]			Intenzitet [count]		Poluširina	Centroida [kanal]
Početak	Kraj	Dužina	Početak	Kraj	Dužina	Net	Normiran	FWHM	
160	170	10	312.50	410.16	97.66	8	-	2.5	224.5
146	166	20	175.78	371.09	195.31	11	1.22	4.0	225.0
147	167	20	185.55	380.86	195.31	9	1.00	3.0	225.0
148	168	20	195.31	390.63	195.31	11	-	3.0	225.0
151	171	20	224.61	419.92	195.31	10	-	3.0	225.5
146	196	50	175.78	664.06	488.28	22	1.29	4.0	226.0
147	197	50	185.55	673.83	488.28	19	1.19	3.5	226.0
148	198	50	195.31	683.59	488.28	21	1.40	3.0	226.0
149	199	50	205.08	693.36	488.28	20	1.33	3.0	226.0
150	200	50	214.84	703.13	488.28	15	1.15	2.5	226.0
151	201	50	224.61	712.89	488.28	15	1.15	2.5	226.0
152	202	50	234.38	722.66	488.28	14	1.08	2.5	226.0
153	203	50	244.14	732.42	488.28	14	1.00	2.5	226.0
154	204	50	253.91	742.19	488.28	17	1.21	2.5	226.0
155	205	50	263.67	751.95	488.28	18	1.29	3.0	225.5
156	206	50	273.44	761.72	488.28	10	0.63	3.0	226.0
157	207	50	283.20	771.48	488.28	10	0.63	3.0	226.0
158	208	50	292.97	781.25	488.28	11	0.69	3.0	226.0
159	209	50	302.73	791.02	488.28	14	0.82	3.0	226.0
160	210	50	312.50	800.78	488.28	15	0.79	3.0	226.0
161	211	50	322.27	810.55	488.28	12	0.63	3.0	226.0
162	212	50	332.03	820.31	488.28	12	0.63	3.0	226.0
163	213	50	341.80	830.08	488.28	14	0.70	2.5	226.0
164	214	50	351.56	839.84	488.28	14	0.70	2.5	226.0
165	215	50	361.33	849.61	488.28	14	0.70	2.5	226.0
166	216	50	371.09	859.38	488.28	15	0.75	2.5	226.0
167	217	50	380.86	869.14	488.28	13	0.65	2.5	226.0
145	245	100	166.02	1142.58	976.56	28	0.68	4.0	226.0
146	246	100	175.78	1152.34	976.56	28	0.74	4.0	226.0
147	247	100	185.55	1162.11	976.56	29	0.78	4.0	226.0
148	248	100	195.31	1171.88	976.56	34	0.97	5.0	226.0
149	249	100	205.08	1181.64	976.56	33	0.92	5.0	226.0
150	250	100	214.84	1191.41	976.56	29	0.85	5.0	226.0
151	251	100	224.61	1201.17	976.56	33	0.94	5.0	226.0
152	252	100	234.38	1210.94	976.56	32	0.91	5.0	226.0
153	253	100	244.14	1220.70	976.56	32	0.94	5.0	226.0
154	254	100	253.91	1230.47	976.56	32	0.94	5.0	226.0
155	255	100	263.67	1240.23	976.56	33	0.97	5.0	226.0
156	256	100	273.44	1250.00	976.56	34	1.00	5.0	226.0
157	257	100	283.20	1259.77	976.56	34	1.00	5.0	226.0
158	258	100	292.97	1269.53	976.56	33	0.97	5.0	226.0
159	259	100	302.73	1279.30	976.56	30	0.88	4.0	226.0
160	260	100	312.50	1289.06	976.56	30	0.86	4.0	226.0
161	261	100	322.27	1298.83	976.56	27	0.77	4.0	226.0
162	262	100	332.03	1308.59	976.56	27	0.77	4.0	226.0
163	263	100	341.80	1318.36	976.56	28	0.80	4.0	226.0
164	264	100	351.56	1328.13	976.56	28	0.78	4.0	226.0
165	265	100	361.33	1337.89	976.56	29	0.81	4.0	226.0
166	266	100	371.09	1347.66	976.56	30	0.83	4.0	226.0

691 keV									
Interval [kanal]			Interval [ns]			Intenzitet [count]		Poluširina	Centroida [kanal]
Početak	Kraj	Dužina	Početak	Kraj	Dužina	Net	Normiran	FWHM	
167	267	100	380.86	1357.42	976.56	29	0.83	4.0	226.0
168	268	100	390.63	1367.19	976.56	28	0.82	5.0	226.0
169	269	100	400.39	1376.95	976.56	28	0.82	5.0	226.0
170	270	100	410.16	1386.72	976.56	28	0.82	5.0	226.0
140	340	200	117.19	2070.31	1953.13	42	0.43	4.0	226.0
145	345	200	166.02	2119.14	1953.13	40	0.71	4.0	226.0
146	346	200	175.78	2128.91	1953.13	42	0.79	4.5	226.0
147	347	200	185.55	2138.67	1953.13	39	0.75	4.5	226.0
148	348	200	195.31	2148.44	1953.13	44	0.88	5.0	226.0
149	349	200	205.08	2158.20	1953.13	43	0.86	5.0	226.0
150	350	200	214.84	2167.97	1953.13	38	0.79	5.0	226.0
151	351	200	224.61	2177.73	1953.13	40	0.83	5.0	226.0
152	352	200	234.38	2187.50	1953.13	39	0.81	5.0	226.0
153	353	200	244.14	2197.27	1953.13	39	0.83	5.0	226.0
154	354	200	253.91	2207.03	1953.13	39	0.83	5.0	226.0
155	355	200	263.67	2216.80	1953.13	39	0.83	5.0	226.0
156	356	200	273.44	2226.56	1953.13	41	0.87	5.0	226.0
157	357	200	283.20	2236.33	1953.13	41	0.87	5.0	226.0
158	358	200	292.97	2246.09	1953.13	40	0.85	5.0	226.0
159	359	200	302.73	2255.86	1953.13	38	0.81	4.0	226.0
160	360	200	312.50	2265.63	1953.13	38	0.79	4.0	226.0
161	361	200	322.27	2275.39	1953.13	35	0.73	4.0	226.0
162	362	200	332.03	2285.16	1953.13	34	0.71	3.5	226.0
163	363	200	341.80	2294.92	1953.13	34	0.69	3.5	226.0
164	364	200	351.56	2304.69	1953.13	34	0.69	3.5	226.0
165	365	200	361.33	2314.45	1953.13	34	0.68	3.5	226.0
166	366	200	371.09	2324.22	1953.13	35	0.70	4.0	226.0
167	367	200	380.86	2333.98	1953.13	33	0.69	4.0	226.0
168	368	200	390.63	2343.75	1953.13	32	0.68	4.0	226.0
169	369	200	400.39	2353.52	1953.13	32	0.68	4.0	226.0
170	370	200	410.16	2363.28	1953.13	32	0.68	4.5	226.0
140	440	300	117.19	3046.88	2929.69	41	0.38	4.5	226.0
142	442	300	136.72	3066.41	2929.69	36	0.46	4.5	224.0
143	443	300	146.48	3076.17	2929.69	34	0.47	4.0	224.0
144	444	300	156.25	3085.94	2929.69	38	0.56	4.0	224.0
145	445	300	166.02	3095.70	2929.69	38	0.58	4.0	224.0
146	446	300	175.78	3105.47	2929.69	40	0.63	4.5	226.0
147	447	300	185.55	3115.23	2929.69	37	0.60	5.0	226.0
148	448	300	195.31	3125.00	2929.69	40	0.67	4.5	226.0
149	449	300	205.08	3134.77	2929.69	39	0.65	4.5	226.0
150	450	300	214.84	3144.53	2929.69	34	0.60	5.0	226.0
151	451	300	224.61	3154.30	2929.69	36	0.63	5.0	226.0
152	452	300	234.38	3164.06	2929.69	35	0.61	5.0	226.0
153	453	300	244.14	3173.83	2929.69	35	0.63	5.0	226.0
154	454	300	253.91	3183.59	2929.69	35	0.63	5.0	226.0
155	455	300	263.67	3193.36	2929.69	35	0.64	5.0	226.0
156	456	300	273.44	3203.13	2929.69	37	0.67	5.0	226.0
157	457	300	283.20	3212.89	2929.69	37	0.67	5.0	226.0
158	458	300	292.97	3222.66	2929.69	36	0.65	5.0	226.0
159	459	300	302.73	3232.42	2929.69	34	0.62	4.0	226.0
160	460	300	312.50	3242.19	2929.69	34	0.61	4.0	226.0

691 keV									
Interval [kanal]			Interval [ns]			Intenzitet [count]		Poluširina	Centroida [kanal]
Početak	Kraj	Dužina	Početak	Kraj	Dužina	Net	Normiran	FWHM	
161	461	300	322.27	3251.95	2929.69	31	0.55	4.0	226.0
162	462	300	332.03	3261.72	2929.69	30	0.54	3.5	226.0
163	463	300	341.80	3271.48	2929.69	30	0.54	3.5	226.0
164	464	300	351.56	3281.25	2929.69	30	0.54	3.5	226.0
165	465	300	361.33	3291.02	2929.69	31	0.55	3.5	226.0
166	466	300	371.09	3300.78	2929.69	32	0.56	3.5	226.0
167	467	300	380.86	3310.55	2929.69	30	0.54	4.0	226.0
168	468	300	390.63	3320.31	2929.69	29	0.53	4.0	226.0
169	469	300	400.39	3330.08	2929.69	29	0.53	4.0	226.0
170	470	300	410.16	3339.84	2929.69	29	0.54	4.0	226.0
141	541	400	126.95	4033.20	3906.25	40	0.42	5.0	224.0
142	542	400	136.72	4042.97	3906.25	37	0.43	4.0	224.0
143	543	400	146.48	4052.73	3906.25	34	0.43	4.0	224.0
144	544	400	156.25	4062.50	3906.25	38	0.51	4.0	224.0
145	545	400	166.02	4072.27	3906.25	39	0.54	4.5	224.0
146	546	400	175.78	4082.03	3906.25	41	0.59	5.0	226.0
147	547	400	185.55	4091.80	3906.25	38	0.56	5.0	226.0
148	548	400	195.31	4101.56	3906.25	43	0.65	5.0	226.0
149	549	400	205.08	4111.33	3906.25	42	0.63	5.0	226.0
150	550	400	214.84	4121.09	3906.25	37	0.57	5.0	226.0
151	551	400	224.61	4130.86	3906.25	39	0.60	5.0	226.0
152	552	400	234.38	4140.63	3906.25	36	0.55	5.0	226.0
153	553	400	244.14	4150.39	3906.25	36	0.56	5.0	226.0
154	554	400	253.91	4160.16	3906.25	36	0.56	5.0	226.0
155	555	400	263.67	4169.92	3906.25	36	0.56	5.0	226.0
156	556	400	273.44	4179.69	3906.25	37	0.58	5.0	226.0
157	557	400	283.20	4189.45	3906.25	37	0.57	5.0	226.0
158	558	400	292.97	4199.22	3906.25	36	0.55	5.0	226.0
159	559	400	302.73	4208.98	3906.25	34	0.52	4.5	226.0
160	560	400	312.50	4218.75	3906.25	34	0.52	4.5	226.0
161	561	400	322.27	4228.52	3906.25	31	0.47	4.0	226.0
162	562	400	332.03	4238.28	3906.25	30	0.45	4.0	226.0
163	563	400	341.80	4248.05	3906.25	30	0.45	4.0	226.0
164	564	400	351.56	4257.81	3906.25	30	0.45	4.0	226.0
165	565	400	361.33	4267.58	3906.25	30	0.45	4.0	226.0
166	566	400	371.09	4277.34	3906.25	32	0.48	4.0	226.0
167	567	400	380.86	4287.11	3906.25	30	0.45	4.0	226.0
168	568	400	390.63	4296.88	3906.25	29	0.45	4.0	226.0
169	569	400	400.39	4306.64	3906.25	29	0.45	4.0	226.0
170	570	400	410.16	4316.41	3906.25	29	0.45	4.0	226.0
140	740	600	117.19	5976.56	5859.38	37	0.29	4.0	226.0
141	741	600	126.95	5986.33	5859.38	36	0.34	4.0	224.0
142	742	600	136.72	5996.09	5859.38	33	0.33	4.0	224.0
143	743	600	146.48	6005.86	5859.38	30	0.33	4.0	224.0
144	744	600	156.25	6015.63	5859.38	34	0.39	4.0	224.0
145	745	600	166.02	6025.39	5859.38	35	0.42	5.0	224.0
146	746	600	175.78	6035.16	5859.38	37	0.46	5.0	226.0
147	747	600	185.55	6044.92	5859.38	34	0.43	5.0	226.0
148	748	600	195.31	6054.69	5859.38	39	0.50	5.0	226.0
149	749	600	205.08	6064.45	5859.38	38	0.49	5.0	226.0
150	750	600	214.84	6074.22	5859.38	33	0.43	5.0	226.0

691 keV									
Interval [kanal]			Interval [ns]			Intenzitet [count]		Poluširina	Centroida [kanal]
Početak	Kraj	Dužina	Početak	Kraj	Dužina	Net	Normiran	FWHM	
151	751	600	224.61	6083.98	5859.38	35	0.46	5.0	226.0
152	752	600	234.38	6093.75	5859.38	34	0.45	5.0	226.0
153	753	600	244.14	6103.52	5859.38	34	0.45	5.0	226.0
154	754	600	253.91	6113.28	5859.38	34	0.45	5.0	226.0
155	755	600	263.67	6123.05	5859.38	34	0.45	5.0	226.0
156	756	600	273.44	6132.81	5859.38	36	0.48	5.0	226.0
157	757	600	283.20	6142.58	5859.38	36	0.48	5.0	226.0
158	758	600	292.97	6152.34	5859.38	35	0.47	5.0	226.0
159	759	600	302.73	6162.11	5859.38	33	0.44	4.5	226.0
160	760	600	312.50	6171.88	5859.38	33	0.43	4.0	226.0
161	761	600	322.27	6181.64	5859.38	30	0.39	5.0	226.0
162	762	600	332.03	6191.41	5859.38	29	0.38	4.5	226.0
163	763	600	341.80	6201.17	5859.38	29	0.38	4.0	226.0
164	764	600	351.56	6210.94	5859.38	29	0.38	4.0	226.0
165	765	600	361.33	6220.70	5859.38	30	0.39	4.0	226.0
166	766	600	371.09	6230.47	5859.38	31	0.40	4.0	226.0
167	767	600	380.86	6240.23	5859.38	29	0.38	4.0	226.0
168	768	600	390.63	6250.00	5859.38	28	0.37	4.0	224.0
169	769	600	400.39	6259.77	5859.38	28	0.37	4.0	224.0
170	770	600	410.16	6269.53	5859.38	28	0.37	4.0	224.0
140	940	800	117.19	7929.69	7812.50	38	0.29	5.0	226.0
141	941	800	126.95	7939.45	7812.50	37	0.33	5.0	224.0
142	942	800	136.72	7949.22	7812.50	34	0.33	5.0	224.0
143	943	800	146.48	7958.98	7812.50	31	0.32	4.0	224.0
144	944	800	156.25	7968.75	7812.50	35	0.38	4.0	224.0
145	945	800	166.02	7978.52	7812.50	36	0.41	4.0	224.0
146	946	800	175.78	7988.28	7812.50	38	0.45	4.0	226.0
147	947	800	185.55	7998.05	7812.50	35	0.42	5.0	226.0
148	948	800	195.31	8007.81	7812.50	40	0.49	5.0	226.0
149	949	800	205.08	8017.58	7812.50	39	0.48	5.0	226.0
150	950	800	214.84	8027.34	7812.50	34	0.43	5.0	226.0
151	951	800	224.61	8037.11	7812.50	36	0.46	5.0	226.0
152	952	800	234.38	8046.88	7812.50	35	0.44	5.0	226.0
153	953	800	244.14	8056.64	7812.50	35	0.44	5.0	226.0
154	954	800	253.91	8066.41	7812.50	35	0.44	5.0	226.0
155	955	800	263.67	8076.17	7812.50	35	0.44	5.0	226.0
156	956	800	273.44	8085.94	7812.50	37	0.47	5.0	226.0
157	957	800	283.20	8095.70	7812.50	37	0.47	5.0	226.0
158	958	800	292.97	8105.47	7812.50	36	0.46	5.0	226.0
159	959	800	302.73	8115.23	7812.50	34	0.43	4.5	226.0
160	960	800	312.50	8125.00	7812.50	34	0.43	4.5	226.0
161	961	800	322.27	8134.77	7812.50	31	0.39	4.5	226.0
162	962	800	332.03	8144.53	7812.50	30	0.38	4.5	226.0
163	963	800	341.80	8154.30	7812.50	30	0.38	5.0	226.0
164	964	800	351.56	8164.06	7812.50	30	0.38	5.0	226.0
165	965	800	361.33	8173.83	7812.50	30	0.38	4.0	226.0
166	966	800	371.09	8183.59	7812.50	31	0.39	4.0	226.0
167	967	800	380.86	8193.36	7812.50	29	0.36	4.0	226.0
168	968	800	390.63	8203.13	7812.50	28	0.35	4.5	224.0
169	969	800	400.39	8212.89	7812.50	28	0.35	4.5	224.0
170	970	800	410.16	8222.66	7812.50	28	0.35	4.5	224.0

Biografija



Rođena sam 5. oktobra 1984. godine u Boru, gde sam završila Osnovnu školu "3. oktobar" i prirodno-matematički smer Gimnazije "Bora Stanković".

Studije fizike na Prirodno-matematičkom fakultetu u Novom Sadu upisala sam 2003. godine na smeru diplomirani fizičar.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

TD

Tip zapisa:

TZ

Vrsta rada:

VR

Autor:

AU

Mentor:

MN

Naslov rada:

NR

Jezik publikacije:

JP

Jezik izvoda:

JI

Zemlja publikovanja:

ZP

Uže geografsko područje:

UGP

Godina:

GO

Izdavač:

IZ

Mesto i adresa:

MA

Fizički opis rada:

FO

Naučna oblast:

NO

Naučna disciplina:

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči:

PO

UDK

Čuva se:

ČU

Važna napomena:

VN

Izvod:

IZ

Monografska dokumentacija

Tekstualni štampani materijal

Diplomski rad

Aleksandra Dimitrijevska 50/03

dr Dušan Mrđa

Vremenska spektroskopija nuklearnih reakcija kosmičkih miona

srpski (latinica)

srpski/engleski

Srbija

Vojvodina

2010

Autorski reprint

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

8/108/45/18/81/1

Fizika

Nuklearna fizika

Kosmički mioni, vremenska spektroskopija, neelastično rasejanje,

HP Ge detektor, γ linije, anihilaciona linija

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

nema

Vremenska spektroskopija nuklearnih reakcija indukovanim kosmičkim mionima je značajna za niskofonske eksperimente jer daje informaciju o načinu redukcije fona u spektrima HP Ge detektora adekvatnim izborom koincidentnog intervala (TAC opseg). U ovom eksperimentu germanijumski i scintilacioni detektor rade u koincidentnom režimu. Odabirom različitih regiona u dvodimenzionim spektrima uočene su sledeće linije 68.7 keV, 511 keV, 595.9 keV i 691 keV. Vremenskom analizom (n,n') i anihilacionih dodađaja koji uzrokuju nastanak ovih linija utvrđeno je kašnjenje (n,n') događaja u odnosu na anihilacione, kao i veća zakasnelost događaja odgovornih za nastanak linije na 68.7 keV u odnosu na događaje koji prouzrokuju linije na 595.9 keV i 691 keV.

Datum prihvatanja teme od NN veća: 2.2010.
DP

Datum odbrane: 6.9.2010.
DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik: Prof. dr Ištvan Bikit

član: Doc. dr Dušan Mrđa

član: Prof. dr Radomir Kobilarov

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS
KEY WORDS DOCUMENTATION

<i>Accession number:</i>	
ANO	
<i>Identification number:</i>	
INO	
<i>Document type:</i>	Monograph publication
DT	
<i>Type of record:</i>	Textual printed material
TR	
<i>Content code:</i>	Final paper
CC	
<i>Author:</i>	Aleksandra Dimitrijevska 50/03
AU	
<i>Mentor/comentor:</i>	PhD Dušan Mrđa
MN	
<i>Title:</i>	Time resolved spectroscopy of cosmic muon induced processes
TI	
<i>Language of text:</i>	Serbian (Latin)
LT	
<i>Language of abstract:</i>	English
LA	
<i>Country of publication:</i>	Serbia
CP	
<i>Locality of publication:</i>	Vojvodina
LP	
<i>Publication year:</i>	2010
PY	
<i>Publisher:</i>	Author's reprint
PU	
<i>Publication place:</i>	Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
PP	
<i>Physical description:</i>	8/108/45/18/81/1
PD	
<i>Scientific field:</i>	Physics
SF	
<i>Scientific discipline:</i>	Nuclear Physics
SD	
<i>Subject/ Key words:</i>	Cosmic muon, time resolved spectroscopy, inelastic scattering, HP Ge detector, gamma peaks, annihilation peak
SKW	
<i>UC</i>	
<i>Holding data:</i>	Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4
HD	
<i>Note:</i>	none
N	
<i>Abstract:</i>	Time resolved spectroscopy of cosmic muon induced processes is important for low-level background experiments because it gives information about background reduction methods of germanium spectrometers by selecting different coincidence interval (TAC window). In this experiment, germanium and scintillation plastic detector are working in coincidence mode. Following peaks at energies 68.7 keV, 511 keV, 595.9 keV and 691 keV were observed selecting the different regions in two-dimensional spectra. Time analysis of (n,n') and annihilation events that cause the development of these peaks confirmed the delay of (n,n') events in relation to annihilation, as well as greater dilation of events responsible for the appearance of peaks at 68.7 keV with respect to events that cause the lines at 595.9 keV and 691 keV.
AB	

Accepted by the Scientific Board: 2.2010.
ASB

Defended on: 6.9.2010.
DE

Thesis defend board:

DB

President: PhD Ištván Bikit, full professor
Member: PhD Dušan Mrđa, assistant professor
Member: PhD Radomir Kobilarov, full professor