



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET DEPARTMAN ZA FIZIKU



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

ПРИМЉЕНО:	13 СЕП 2007
ОРГАНИЗЈЕД:	БРОЈ
0603	9 / 867

Vremenska analiza mionima indukovane anihilacione linije

- diplomski rad -

Mentor: dr Ištvan Bikit

Kandidat: Gergelj Šoti

Novi Sad, 2007

1. Uvod

Osnovni cilj ovog diplomskog rada je ispitivanje vremenske zavisnosti kosmičkog zračenja. Pod kosmičkim zračenjem podrazumevamo sve čestice koje stižu do Zemlje iz svemira. Izvori tog zračenja su supernove, pulsari, kvazari, crne rupe, aktivna galaktička jezgra, radiogalaksije i delom naše Sunce. Vremenska analiza intenziteta kosmičkih zraka bi davala dodatne informacije o izvorima i faktorima koji utiču na njih.

Na nivou mora dominantna komponenta kosmičkog zračenja su mioni – sekundarne čestice nastale pri sudaru primarne čestice sa jezgrima atoma atmosfere. Njih identifikujemo na osnovu energije (prosečna energija miona na visini mora je oko 2 GeV). Mion interagujući sa atomima okoline može da proizvede par elektron-pozitron. Tokom anihilacije pozitrona javlja se anihilaciona linija od 511 keV.

U ovom radu je korišćen plastični scintilator za detekciju miona i HPGe detektor za merenje anihilacione linije. Ta dva detektora su bila u koincidenciji i iz tog spektra se dobijaju događaji anihilacije pozitrona koji su direktno povezani sa mionima.

Ispitivanje vremenske varijacije intenziteta anihilacione linije može doprineti poboljšanju analize i tumačenju događaja detektovanih u niskofonskim eksperimentima čiji je cilj detekcija retkih nuklearnih procesa ili potencijalnih kandidata za čestice tamne materije.

2. Mioni

2.1 Otkriće

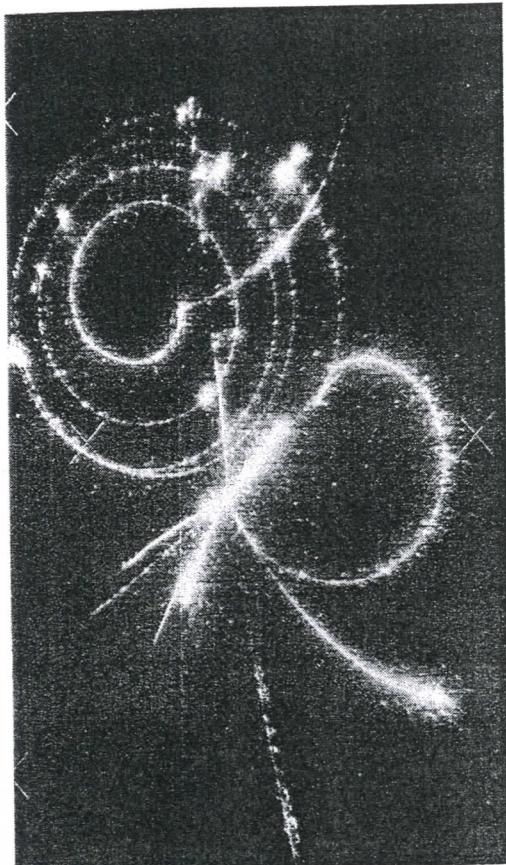
Kao objašnjenje nuklearnih sila japanski fizičar Hideki Yukawa predložio je uvođenje jedne nove čestice, mezona. On je svoju teoriju razvio po analogiji sa elektromagnetnim silama. Prema tome, sila između dve naelektrisane čestice je rezultat izmene virtuelnih fotona. Ovo se dobija kao primena teorije perturbacije u kvantnoj elektrodinamici. Po Hajzenbergovom principu neodređenosti je dozvoljeno da sistem za neko kratko vreme stvori foton određene energije. Što interakcija duže traje, to je manja dozvoljena energija virtuelnih fotona. Elektromagnetne sile imaju beskonačan domet, stoga je masa fotona jednaka nuli.

Za razliku od elektromagnetskih, nuklearne sile imaju kratak domet $\sim 1/r^7$. Po Yukawi, čestice koje posreduju pri nastanku nuklearnih sila između nukleona u jezgru, imale bi masu 275 puta veću od mase elektrona. Kada bi se sistemu predala energija veća od ekvivalenta mase čestice, očekivano je da se ova virtuelna čestica može oslobođiti.

Uprkos otkrićima nekih drugih elementarnih čestica (neutron, pozitron), Yukawina teorija je ostala prilično neopažena. Tek dve godine nakon objavlјivanja Yukawine teorije, Carl D. Andeson i Seth H. Neddermeyer su, izučavajući domet, moment i ionizaciju kosmičkih zraka u maglenoj komori, pronašli česticu iz prodorne komponente kosmičkog zračenja istog naelektrisanja kao elektroni i mase otprilike 200 puta veće od elektrona.

U prvoj polovini četrdesetih godina 20. veka, M. Conversi, E. Pancini i O. Piccioni su eksperimentalno proučavali raspad pozitivnih i negativnih čestica prodorne komponente kosmičkog zračenja u različitim materijalima. Pokazano je da se pozitivni mezoni iz kosmičkog zračenja raspadaju kada bivaju zaustavljeni i u materijalima lakših i u materijalima težih elemenata, dok se negativni mezoni raspadaju samo pri zaustavljanju u lakšim elementima. Zaključeno je da mioni ne mogu biti mezonii koje je Yukawa predviđao, jer ne reaguju jakom interakcijom sa atomskim jezgrima i po svojim karakteristikama odgovara teškom elektronu. Dakle, mioni se ne sudaraju sa jezgrima atmosfere, već su proizvedeni u pljuskovima kosmičkog zračenja.

Cecil Frank Powel je 1947. godine sa grupom naučnika našao vezu ranijih eksperimentalnih rezultata. Otkrio je dve vrste mezona u kosmičkom zračenju, pri čemu se teži u veoma kratkom vremenu raspada u lakši mezon i neutralnu česticu. Potom se lakši raspada na elektrone i neutralne čestice. Teži su nazvali π mezon (pion), a lakši μ mezon (mion). Kasnije se ispostavilo da ne spadaju u istu familiju čestica, pošto se pion sastoji od kvarkova, a mion je lepton – fundamentalna čestica. Stoga je ime μ mezon nepravilno i koristi se samo mion.



Slika 2.1.1: Iz sudara se dobija pion (na slici napravi krug na desno), koji se raspada na mion (na slici napravi četiri kruga na levo). Mion se posle raspada u elektron (na slici se kreće na gore).

2.2 Osobine

Mion je fundamentalna čestica, fermion (spin $\frac{1}{2}$) sa negativnim naelektrisanjem. Po osobinama je bliži elektronu nego mezonima, stoga je klasifikovan u leptonsku familiju fermiona zajedno sa elektronom i neutrinom. Osnovne osobine su prikazane u tabeli 2.2.1.

Oznaka	μ^-
Naelektrisanje	-e
Masa	$1.88 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$ $(105.66 \text{ MeV}/c^2)$
Spin	$\frac{1}{2}$ (fermion)
Srednje vreme života	$2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$
Interakcije	Slaba, elektromagnetna, gravitaciona

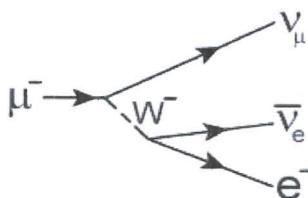
Tabela 2.2.1: Osobine miona

Mionova antičestica μ^+ se razlikuje od miona samo u nanelektrisanju +e. Pokazano je da je ispoštovana osobina invarijantnosti, jer su vremena života μ^+ i μ^- jednaka.

Raspad miona se odvija po jedinstvenom kanalu. Proizvodi raspada μ^- su elektron, elektronski antineutrino i mionski neutrino, a proizvodi raspada μ^+ su pozitron, elektronski neutrino i mionski antineutrino [Burcham74]:

$$\begin{aligned}\mu^- &\rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \\ \mu^+ &\rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu\end{aligned}$$

Feynmanov dijagram raspada μ^- dat je na slici 2.2.1, a u tabeli 2.2.2 su prikazane osobine miona i drugih leptona.



Slika 2.2.1: Feynmanov dijagram raspada miona

Naziv čestice	Simbol	Masa [$\frac{MeV}{c^2}$]	Naelektrisanje [e]	Srednje vreme života [s]
Elektron	e	0.511	-1	stabilan
Elektronski neutrino	ν_e	$<7 \cdot 10^{-6}$	0	stabilan
Mion	μ	105.7	-1	$2.2 \cdot 10^{-6}$
Mionski neutrino	ν_μ	<0.27	0	stabilan
Tau	τ	1777.1	-1	$2.96 \cdot 10^{-13}$
Tau neutrino	ν_τ	<31	0	stabilan

Tabela 2.2.2: Osobine leptona

3. Kosmičko zračenje

Proučavanja radioaktivnih materijala u periodu od 1898. do 1912. godine bila su od velikog interesa, jer su davala direktni uvid u prirodu atoma, čija struktura je bila još uvek nepoznata. Za merenja veoma malog fluksa čestica koje potiču od radioaktivnih materijala korišten je često elektrometar. 1900. godine Wilson, Geitel i Elster otkrili su da elektrometar održava pražnjenje i kada je smešten u mraku, veoma udaljen od izvora prirodne radioaktivnosti (otkrio Bequerel 1896. godine). Eksperimentima pomoću balona opovrgнута je pretpostavka da kompletan prirodnji fon zračenja potiče od radionuklida koji ulaze u sastav stena i minerala. Dvadesetih godina prošlog veka, A. Millikan izvršio je niz merenja na različitim nadmorskim visinama, da bi konačno bilo usvojeno mišljenje da se atmosfera ponaša kao velika količina apsorbujućeg materijala i da nije izvor kosmičkog zračenja. Konačno je bilo usvojeno mišljenje o postojanju kosmičkog zračenja.

Kosmičko zračenje možemo podeliti u dve gupe: primarno i sekundarno.

Primarno kosmičko zračenje koje dolazi u Zemljinu atmosferu čine ogoljena atomska jezgra - oko 98% i elektroni - oko 2%. Od jezgara, najviše ima jezgara lakih atoma sa vrlo visokom energijom, pretežno vodonikovih jezgara (protoна) - oko 86%, zatim helijumovih jezgara - oko 12.7%, a mali deo čine teža jezgra - 1.3% i zastupljeni su skoro svi elementi periodnog sistema elemenata. Energije čestica u rasponu su od nekoliko hiljada eV do preko 10^{20} eV. Na putanju nanelektrisanih čestica utiče galaktičko, magnetosferno, međuplanetarno i zemaljsko magnetno polje, i to objašnjava činjenicu da kosmičko zračenje najčešće svojim delom dolazi podjednako iz svih pravaca. Mali deo kosmičkog zračenja predstavljaju fotonii, i na osnovu pravca odakle dolaze fotonii može verodostojnije utvrditi izvor kosmičkog zračenja. Analizom anizitropnosti pravaca visokoenergetskog kosmičkog zračenja, može se zaključiti da su izvori kosmičkog zračenja supernove, pulsari, kvazari, crne rupe, aktivna galaktička jezgra, radiogalaksije. Osim nanelektrisanih čestica, na Zemlju dolaze i neutralne čestice: elektromagnetsko zračenje različitih energija i neutrini.

Po svom poreklu primarno kosmičko zračenje može da bude intergalaktičko, galaktičko i solarno. Udeo intergalaktičkog kosmičkog zračenja koje dolazi na gornju granicu atmosfere je zanemarljiv. Energija primarnog kosmičkog zračenja koja potiče od Sunca znatno je manja od energije izmerene u galaktičkom zračenju. Solarna komponenta kosmičkog zračenja veoma je promenljiva i pokazuje česte fluktuacije. Komponenta kosmičkog zračenja koja do nas dospeva iz galaksije, odlikuje se nešto višom stabilnošću, mada je i ona uslovljena Sunčevom aktivnošću. Svakih 11 godina snažni procesi u

Vremenska zavisnost mionima indukovane anihilacione linije

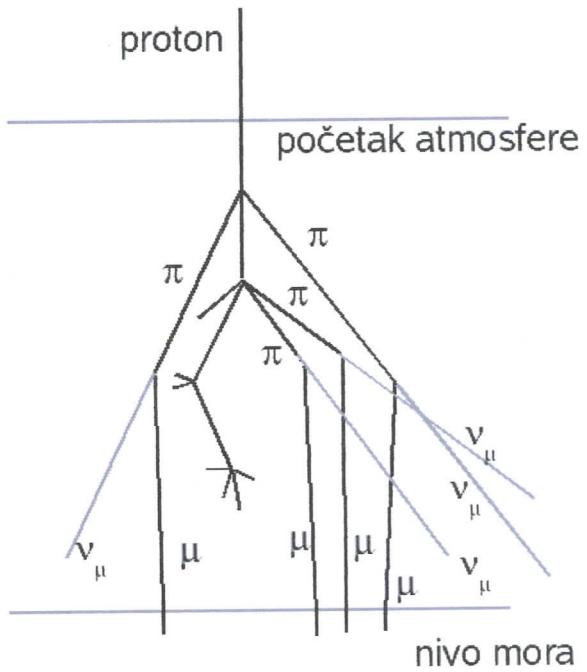
heliosferi znatno utiču na sunčevu magnetno polje, što kao posledicu ima varijacije intenziteta galaktičkog kosmičkog zračenja.

Čestice primarnog kosmičkog zračenja ne uspevaju da se probiju duboko u atmosferu. Srednji slobodni put visokoenergetskog protona u odnosu na interakciju sa jezgrom je oko 1/13 dela ukupne debljine atmosfere. To znači da primarno kosmičko zračenje, kao i svi nukleoni i teže nanelektrisane čestice koje odlikuju snažne interakcije sa jezgrima veoma retko uspevaju da stignu do nižih slojeva atmosfere. Do nivoa mora dospevaju uglavnom lakše čestice, pretežno mioni i elektroni.

Sekundarno kosmičko zračenje nastaje u interakciji čestica primarnog kosmičkog zračenja energija većih od 1 GeV sa jezgrima atoma vazduha. Tom prilikom stvaraju se sve nama poznate elementarne čestice, koje na razne načine mogu da stupaju u nove reakcije, pa se na taj način stvara sledeća generacija čestica. Po načinu kako čestice sekundarnog kosmičkog zračenja interaguju mogu se podeliti u tri grupe:

- nuklearno aktivna grupa (hadroni). Primarna čestica sudarom stvara pione i kaone, koji se posle raspadaju u mione ili daljim sudarima stvaraju nove hadrone.
- tvrda (mioni). Glavni izvor predstavljaju nanelektrisani pioni. (slika 3.1)
- meka (elektromagnetno zračenje). Glavni izvor predstavljaju neutralni pioni.

Primarna čestica (najčešće proton) sudarom transformiše se u neke druge čestice putem jake interakcije, dok se jezgro cepa na sastavne nukleone. U tim procesima stvaraju se intenzivno pioni, a u manjem broju nastaju kaoni (20% od ukupnog broja stvorenih čestica). Visokoenergetski proton prilikom interakcije sa nekim jezgrom može da dovede do njegovog cepanja i tom prilikom potroši od 20% od 50% svoje početne energije. Nakon toga doživaljava ponovo interakciju sa jezgrom gde mu se enegrija ponovo umanji. Kada mu se energija spusti ispod 100 MeV, on više nije u stanju da stupa u nuklearne interakcije, već svoju energiju gubi prvenstveno putem ionizacije. Nanelektrisani pioni, pre nego što se raspadnu na mione i neutrina, takođe stupaju u reakcije sa jezgrima i stvaraju nove hadrone. Ukoliko im je energija veća od 200 GeV, na osnovu relativističkih efekata im se srednji život dovoljno produži, tako da imaju vremena da putem reakcija sa jezgrom umnože broj hadrona. Konačno se pioni raspadaju na mione putem reakcija



Slika 3.1: Stvaranje tvrde komponente kosmičkog zračenja

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu, \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

Vremenska zavisnost mionima indukovane anihilacione linije

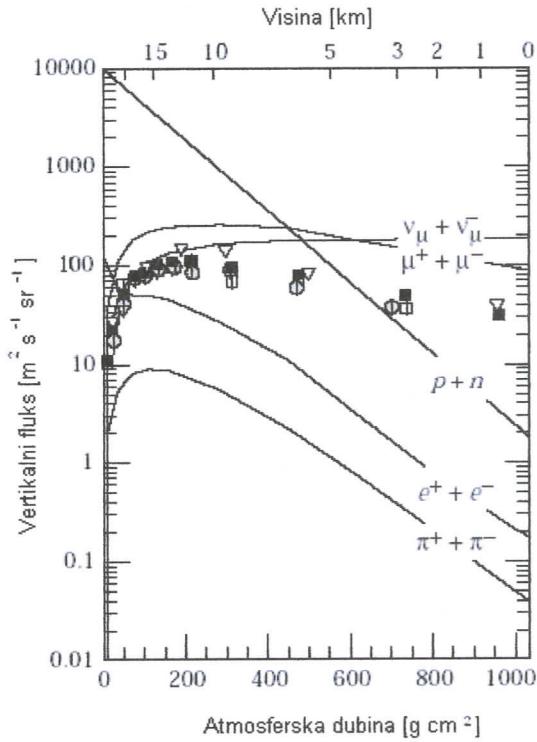
Kaoni nastali pri interakciji primarne čestice sa jezgrima atmosfere takođe se raspadaju na mione ili piona [Yao06]:

$$\kappa^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_u \quad \kappa^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_u \quad \kappa^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0 \quad \kappa^- \rightarrow \pi^- + \pi^0 \quad \kappa^- \rightarrow \pi^0 + \mu^- + \bar{\nu}_u$$

Tvrda komponenta kosmičkog zračenja sastoji se uglavnom od visokoenergetskih miona, koji nastaju prvenstveno raspadom nanelektrisanih piona. Mioni u proseku primaju oko 80% energije piona i imaju približno isti pravac kao njihovi pretci. Oni su vrlo prodorni, pošto je presek za njihovu interakciju samo oko $10 \text{ }\mu\text{barn}$. Zbog relativističke dilatacije vremena mioni dovoljno velike energije mogu doći do površine Zemlje iako im je vreme raspada $\sim 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$. Na visini od $\sim 15 \text{ km}$ počinju da se generišu mioni, a na visini od 10 km već je formirano oko 90% ukupnog broja miona koji se formira u atmosferi. Spektar miona se pri prolazu kroz atmosferu modifikuje zbog jonizacionih gubitaka, raspada i zahvata suprotno nanelektrisanih miona, i razlikuje se od spektra piona, sa kojim je skoro isti na mestu njihovog stvaranja. Znatan broj miona se u letu raspada na elektron (pozitron) i neutrino (antineutrino), pri čemu elektron odnosi $1/3$ kinetičke energije miona, dok ostatak energije odnose neutrini.

U materijalima velike gustine, kao što je atmosfera Zemlje, većina miona izgubi svu svoju energiju pre raspada putem ionizacije. Elektroni i neutrini, u tom slučaju, dele energiju mirovanja miona od 105.7 MeV . Iako se veliki deo miona raspade u atmosferi, znatan deo dostigne nivo mora, i to, 20 % od onih sa energijom 1 GeV i 80% od onih sa 10 GeV . [Slivka00] Zbog velike prodorne moći miona, njihov fluks opada mnogo sporije sa dubinom atmosfere nego fluks njihovih predaka, protona. Elektromagnetna komponenta dominira na velikim visinama, ali zbog jake atenuacije, na površini mora predstavlja manji deo zračenja. Nukleonska komponenta zbog intenzivne interakcije sa okолнom atmosferom gotovo isčeza na površini mora.

Najbrojnije nanelektrisane čestice na površini mora su mioni. Mioni se generišu od $\sim 15 \text{ km}$, a na površini Zemlje stižu sa srednjom energijom od $\sim 4 \text{ GeV}$. Intenzitet miona proporcionalan je sa $\cos^2\theta$, gde je θ ugao upada u detektor u odnosu na vertikalnu. Fluks miona u atmosferi opada znatno sporije od fluksa čestica predaka, protona (slika 3.2). [Yao06]



Slika 3.2: Zavisnost vertikalnog fluksa kosmičkog zračenja

3.1 Interakcija sa materijom

Mioni sa materijom interaguju praktično najviše preko elektromagnetne interakcije. Zbog izuzetno visoke energije imaju veliku prodornu moć, tako da mogu prodreti duboko u površinu Zemlje. Procesi koji prevlađuju su ionizacija i ekscitacija, ali takođe dolazi i do sudara sa izbijanjem elektrona, i u manjoj meri, do zakočnog zračenja i stvaranja parova.

Zaustavljeni negativni mioni upadaju u klopku atomske orbita, koje su, zbog mnogo veće mase miona, mnogo bliže jezgru nego atomske orbite elektrona u materijalima velikog Z i formiraju mionske atome. Pri tome se emituje mionsko X zračenje [Leo94]. Spori pozitivni mioni mogu da formiraju mionijum – sistem sličan atomu vodonika, gde ulogu protona igra antimion. U oba sistema javlja se normalni raspodjeljenje miona, pri čemu je kod mionskih atoma takođe moguća (slaba) nuklearna interakcija. Negativni mion može takođe da veže dva atoma i da formira mionski molekul. Osim elektromagnetne interakcije, mioni manjim delom interaguju preko slabe interakcije. Glavni slabiji proces je raspodjeljenje miona, ali postoji takođe verovatnoća da jezgra zahvate negativni mion sa nižih orbita mionskih atoma. Raspodu miona sada konkuriše novi proces, to je zahvat protona iz jezgra, koji se može predstaviti putem reakcije:

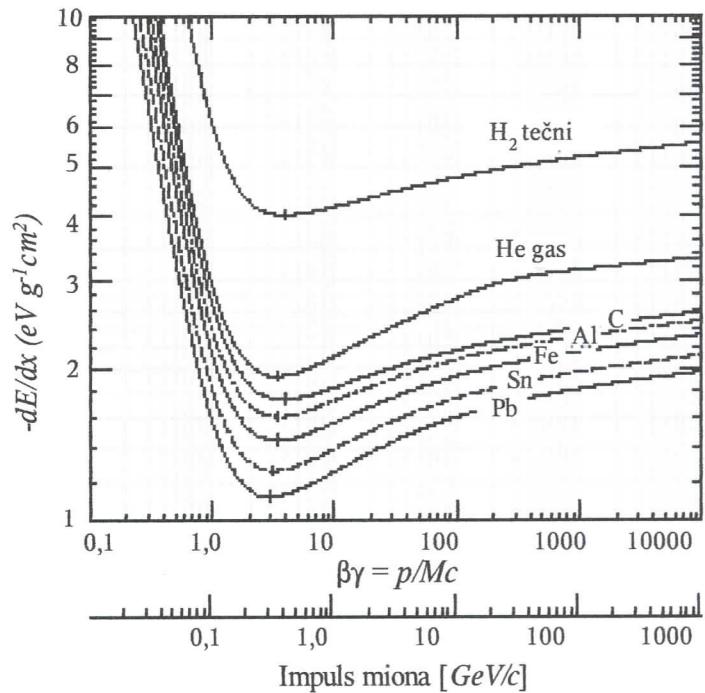
$$\mu^- + p^+ \rightarrow n + \nu_\mu .$$

Raspodjeljenje je dominantan proces u materijalima malog rednog broja, a zahvat je verovatniji u jezgrima velikog rednog broja. Ovo je značajno jer se iz energije emitovanih X-zraka mogu dobiti energetski nivoi i uporediti sa teorijskim modelima. Na kraju, mion se ili raspodjeli na elektron i par neutrina, ili ga zahvati proton u jezgru i zajedno daju neutron i neutrino.

Uvođenjem površinske gustine, odnosno efektivne debljine izražene u $\frac{g}{cm^2}$, vrši se normiranje energetskih gubitaka u raznim materijalima. Efektivna debljina predstavlja proizvod dužine puta i gustine materijala. Kada čestice prelaze velike efektivne debljine, što važi za mione i druge čestice kosmičkog zračenja, njihova vrednost se izražava u metrima vodenog ekvivalenta [$mwe = 100 \frac{g}{cm^2}$].

Na slici 3.1.1 je dat srednji energetski gubitor upadnih miona u različitim materijalima.

Razlozi energetskih gubitaka miona mogu biti radijacioni procesi i ionizacija. Na višim energijama, većim od nekoliko stotina GeV , to su radijacioni procesi poput proizvodnje



Slika 3.1.1: Srednji gubitor energije miona u različitim materijalima [Yao06]

Vremenska zavisnost mionima indukovane anihilacione linije

parova, zakočnog zračenja i fotonuklearne reakcije. Ukupni gubici energije miona se mogu izraziti kao funkcija količine materije:

$$-\frac{dE_\mu}{dx} = a + bE_\mu$$

gde a predstavlja ionizacione gubitke, a b frakcione energetske gubitke preko tri radijaciona procesa. Oba su blage funkcije energije. Odnos $e \equiv a/b$ ($\approx 500 \text{ GeV}$ za standardne stene $A = 22$, $Z = 11$, $\rho = 2.65 \text{ g cm}^{-3}$) definiše kritičnu energiju ispod koje kontinuirani ionizacioni gubici su značajniji od radijacionih gubitaka.

Za nerelativističke čestice, zaustavna moć $(-\frac{dE}{dx})$ je funkcija faktora $\frac{1}{\beta^2}$ (gde je $\beta = \frac{v}{c}$) i opada sa porastom brzine čestice sve do $v = 0.96c$, gde je dostignut minimum. Kako energija dalje raste, faktor $\frac{1}{\beta^2}$ postaje skoro konstantan i zaustavna moć ponovo raste po logaritamskoj zavisnosti dатој preko korigovane *Bethe-Bloch* formule, kao osnovne jednačine za proračune energetskih gubitaka. [Leo94] Minimalna vrednost zaustavne moći je približno ista za sve čestice istog nazelektrisanja. U fizici čestica se vrši identifikacija elementarnih čestica u energetskom intervalu manjem od minimalne ionizacione vrednosti. To je moguće jer je kriva $\frac{dE}{dx}$ različita za svaku vrstu čestica. Vrednost zaustavne moći dostiže maksimalnu vrednost pri brzinama bliskim brzinama orbitalnih elektrona materijala. Nakon toga naglo opada.

Na nivou mora, sekundarno kosmičko zračenje se uglavnom sastoji od visokoenergetskih miona. Pri prolasku kroz detektor oni gube deo svoje energije i proizvode deo kontinuuma u spektru. Niskoenergetski deo ovog kontinuuma, ispod 3 MeV , kombinovan je sa zračenjem iz okoline, dok visokoenergetski deo u potpunosti potiče od kosmičkih zraka. U niskofonskim laboratorijama je moguće, pomoću posebnih detektora, sa velikom tačnošću izdvojiti visokoenergetski deo spektra. Dakle, interakcija kosmičkog zračenja sa detektorskim materijalom omogućava proučavanje karakteristika kosmičkog zračenja.

Kada materijal detektora ima veliku debljinu i gustinu, većina impulsa koji potiču od miona je velika u odnosu na one koji se uobičajeno registruju u γ spektrometriji, oblast ispod 3 MeV . Pri tome zanemarujuemo impulse niskoenergetskog mionskog fluksa, koji nastaju kada mioni prolaze kroz ivice detektora. Primeri takvog detektora u čvrstom stanju su plastični (polietilen, polistiren), tečni scintilacioni detektori (NaI) i poluprovodnički Ge detektori.

Mioni su vrlo prodorni, pa oni sa najvećom energijom prodiru više stotina metara pod površinu zemlje. Zavisnost atenuacije miona od dubine zemlje data je aproksimativnom funkcijom:

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

gde je I_0 intenzitet bez pokrivnog sloja

I intenzitet pod pokrivnim slojem

$$d = 1 + \frac{m}{10}, \text{ gde je } m \text{ debljina pokrivnog sloja u mwe)$$

Vremenska zavisnost mionima indukovane anihilacione linije

Ovom jednačonom je dat fluks miona sa tačnošću od 5% do dubine od 100 mwe i sa tačnošću od 10% do 1000 mwe. Ona se slaže sa rezultatima dobijenim u merenjima atenuacije u debelim apsorberima Pb i Fe, što je blisko atenuaciji u stenama. EM pjuskovi, meka komponenta kosmičkog zračenja, ne prodiru kroz debeo Pb. Međutim, protoni i mioni formiraju nove generacije pljuskova, tzv. sekundarno zračenje, unutar zaštite. Potomci protona su neutralni pioni, a miona izbijeni elektroni. Pri tome, mioni proizvode oko 2/3 elektronskog fluksa, a 1/3 potiče od protona. [Slivka00]

4. Anihilaciono zračenje

Anihilaciono zračenje je gama zračenje koje nastaje anihilacijom čestice i odgovarajuće antičestice. Pri anihilaciji nastaju najmanje dva fotona jednakih energija (koja je jednaka masi mirovanja čestice) približno istog pravca, ali suprotnih smerova. U zemaljskim uslovima najčešća antičestica je pozitron, te je anihilaciono zračenje elektrona i pozitrona najznačajnije. Pošto je masa mirovanja elektrona 511 keV/c², stoga je ovo zračenje sa energijom od 511 keV. Na oblik vrha anihilacione linije snimljen nekim spektrometrom znatno utiče Dopplerov efekat, pa je taj vrh mnogo širi od drugih strogo definisanih vrhova u spektru.

Glavni izvori pozitrona:

- elementi koji se raspadaju β^+ raspadom (^{22}Na)
- kreacija elektron-pozitron parova od strane gama kvanata (^{40}K , ^{214}Bi , ^{208}Tl)
- kosmičko zračenje

4.1 Mehanizmi produkcije pozitrona od strane miona

Mioni se raspada u materijalnim sredinama mogu da proizvedu pozitrone na još neke načine:

- direktno
- putem zakočnog zračenja

Direktni mehanizam u opštem obliku je efekat stvaranja para lepton-antilepton od strane drugog leptona u polju jezgra Z, što se može zapisati na sledeći način:

$$I_1(Z, I_2^+, I_2^-, Z) I_1$$

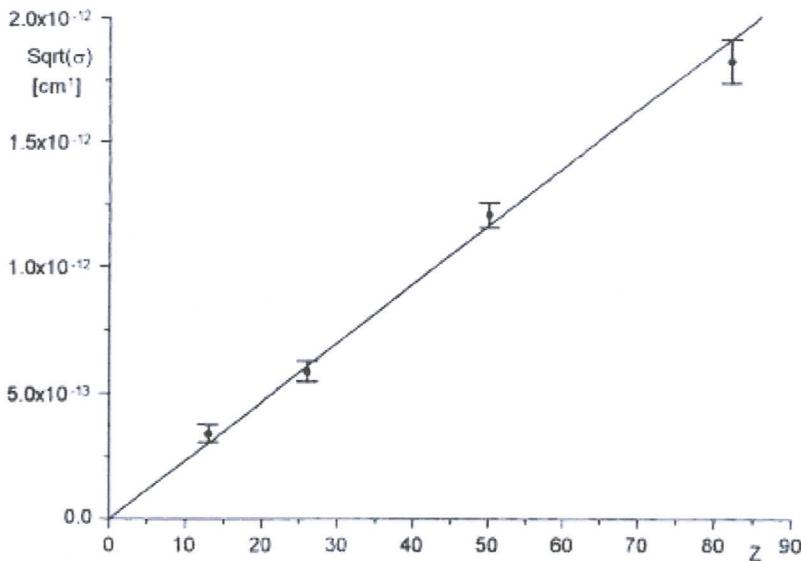
Mi ćemo koristiti ovu formulu u konkretnom obliku:

$$\mu(Z, e^+, e^-, Z) \mu$$

Ovaj način je dominantan za visoke energije miona (TeV), i uvek je verovatniji u odnosu na proizvodnju putem zakočnog zračenja.

Proizvodnja pozitrona putem zakočnog zračenja se sastoji u sledećem: upadni mion u polju jezgra Z se usporava, emitujući pri tome zakočno zračenje. Za visokoenergetske mione kvanti zakočnog zračenja mogu biti dovoljno visoke energije za stvaranje para elektron-pozitron.

Poznato je iz teorijskih razmatranja da se efikasni preseci ovih interakcija proporcionalni korenu rednog broja datog materijala. Međutim, zbog višestrukih procesa tačna zavisnost se mora odrediti eksperimentalno. Rezultat je prikazan na slici 4.1.1



Slika 4.1.1: Zavisnost efikasnog preseka za stvaranje anihilacionog zračenja od rednog broja [Puzovic02]

Fitovanjem metodom najmanjih kvadrata eksperimentalno dobijena vrednost za efikasni presek je:

$$\sigma = 5.2(2) \cdot 10^{-4} Z^2 [\text{barn}] \quad [\text{Puzovic02}]$$

5. Opis eksperimenta

5.1 Detektori

U eksperimentu su korišćena 2 detektora, germanijumski poluprovodnički (HPGe) i plastični scintilacioni.

5.1.1 HPGe

U slučaju poluprovodničkih detektora aktivnu zonu čini sloj prostornog naelektrisanja pn spoja. Širina ovog sloja je određena formulom:

$$d = \sqrt{\frac{2 \epsilon V_0}{e N}}$$

Vremenska zavisnost mionima indukovane anihilacione linije

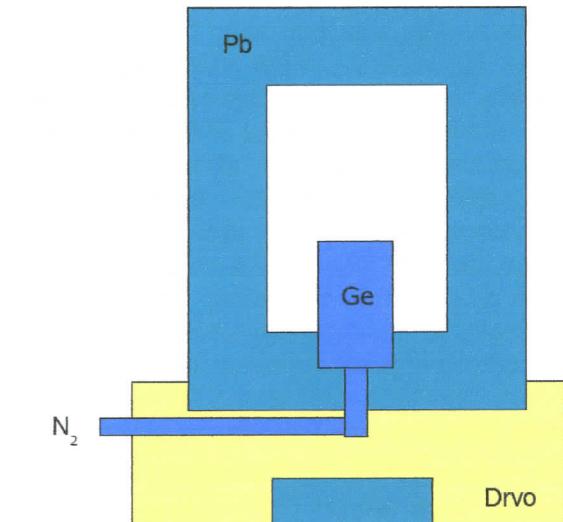
gde N označava primese, a V_0 napon na spoju. Ovaj sloj je reda veličine $100 \mu\text{m}$ za obične poluprovodnike. Ako na diodu dovedemo inverzno polarizovan napon, kroz spoj će da teče samo struja zasićenja. Upadno gama zračenje stvara parove elektron-šupljina koji će pod dejstvom električnog polja da se kreću prema elektrodama, stvarajući struju veću od struje zasićenja. Jačina ove struje je proporcionalna deponovanoj energiji gama kvanta.

Problem je u tome što ovoliki aktivni sloj nije dovoljno širok da bi gama kvant izgubio svu svoju energiju. Prema datoј formuli smanjenjem primesa u kristalu se može postići proširivanje sloja prostornog nanelektrisanja. Ovo se može uraditi u slučaju germanijuma, gde su postignute čistoće sa koncentracijom primesa manjom od $10^{10} \text{ atoma/cm}^3$. [Leo94] Ovakav detektor se naziva HPGe (High-Purity Germanium) detektor. Da bi struja zasićenja bila dovoljno niska, detektor moramo držati na temperaturi tečnog azota (oko 77 K).

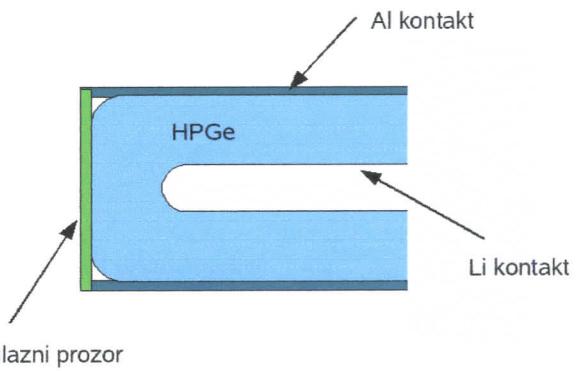
Na slici 5.1.1 je prikazan koaksijalni HPGe detektor.

U ovom eksperimentu je korišćen Gamma-X koaksijalni HPGe detektor sa tankim ulaznim prozorom od $0,3 \mu\text{m}$. Kalibracija detektora je izvršena pomoću standardnih izvora (^{241}Am , ^{133}Ba ^{60}Co i ^{137}Cs), a provera efikasnosti je izvršena u [Stanivuk00].

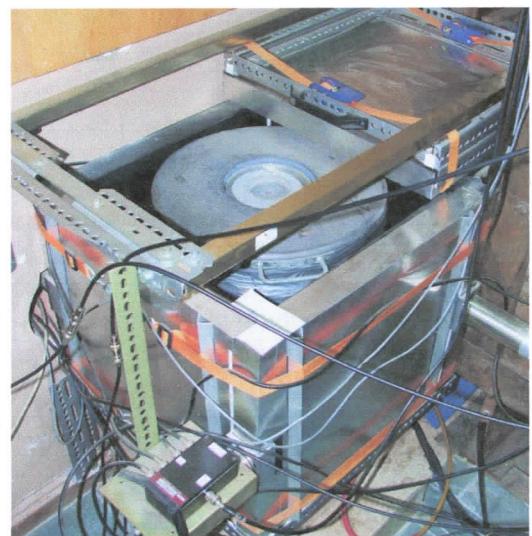
Shema detektora u olovnoj zaštiti je prikazana na slici 5.1.2. Na slici 5.1.3 je detektor koji je korišćen tokom eksperimenta, sa olovnom zaštitom. Vide se i 5 plastična detektora oko olovne zaštite, ali ti detektori nisu bili aktivni tokom merenja.



Slika 5.1.2: Shema HPGe detektora u olovnoj zaštiti



Slika 5.1.1: Shema HPGe detektora



Slika 5.1.3: HPGe detektor u olovnoj zaštiti sa plastičnim detektorima

5.1.2 Scintilacioni detektor

U scintilacionim detektorima se koriste materijali koji emituju mali impuls svetlosti kada ionizujuće zračenje prolazi kroz njih. Osnovni problem kod scintilatora je pojačanje svetlosnog signala, tako da su dobili na značaju tek razvojem fotomultiplikatora.

Savremeni scintilacioni detektori se sastoje od scintilacionog materijala koji daje svetlosni signal proporcionalan deponovanoj energiji i od fotomultiplikatora koji pretvara slabi svetlosni u naponski impuls. Pošto je izlazni signal proporcionalan svetlosnom signalu, ovakav detektor se može koristiti kao spektrometar.

Prednosti scintilacionih detektora su:

- brzina signala XXX (reda veličine 10^{-10} s)
- proizvoljan oblik i veličina
- visina signala zavisi od predate energije, a oblik od vrste čestice

Prema scintilacionom materijalu ovi detektori se dele na

- organske (organski kristali, plastični, tečni)
- neorganske ($\text{NaI}(\text{Tl})$, $\text{CsI}(\text{Tl})$)

U ovom eksperimentu je korišćen plastični scintilacioni detektor tipa SCIONIX (slika 5.1.4), dimenzija $50\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 5\text{ cm}$. Plastika od koje su izrađeni ovi detektori je polistiren (C_6H_6) čija gustina iznosi 1.032 g/cm^3 , efektivni redni broj $Z_{\text{eff}} = 5.28$, a efektivni maseni broj $A_{\text{eff}} = 11.146\text{ g/mol}$ [Jovin05].

Pored vertikalne mionske komponente, u detektor ulaze i mioni koji se u odnosu na vertikalu kreću pod nekim uglom. Znamo da na gubitak energije čestica pri interakciji sa detektorskim materijalom utiče njihov pređeni put u detektoru. Zato je logično da vertikalna mionska komponenta ima najmanje energetske gubitke, odnosno deponuju najmanju energiju u detektorima. Teorijski proračun za deponovanu energiju miona koji pod određenim uglom u odnosu na vertikalu ulaze u detektor, dat je u [Jovin05].

Energetska kalibracija detektora je izvršena pomoću standardnih izvora ^{22}Na , ^{60}Co i ^{137}Cs . U plastičnim detektorima verovatnoća fotoefekta je zanemarljiva (zbog male vrednosti efektivnog rednog broja), pa se informacija o energiji detektovanih γ kvanata dobija samo analizom Komptonovske ivice. [Jovin05]

Eksperimentalno dobijena vrednost za deponovanu energiju vertikalne mionske komponente na nivou mora u detektoru SCIONIX iznosi $E_{\mu d}^{\text{exp}} = 10.279(28)\text{ MeV}$. Iz nje je dobijena srednja energija miona, što je oko $E_{\mu}^{\text{exp}} = 1.96\text{ GeV}$. [Jovin05]



Slika 5.1.4: Plastični scintilacioni detektor korišćen tokom eksperimenta

5.2 Nuklearna elektronika

Da bi očitali vrednosti signala iz korišćenih detektora, moramo imati odgovarajuća elektronska kola. U sledećoj listi su nabrojane osnovne komponente jednog detektorskog sistema:

- predpojačavač (PreAmp) služi za usklađivanje impedansi samog detektoru i ostalih komponenata sistema
- pojačavač (Amp) služi za pojačanje signala iz detektora, kao i za oblikovanje signala (pulse shaping)
- TFA (timing filter amplifier) pojačavač za brze signale
- diskriminator odbacuje sve signale koji su niži od zadate vrednosti napona, izlaz je digitalan (postoji ili ne postoji signal koji je ispunio uslov). U ovom eksperimentu smo koristili CFD (Constant Fraction Discriminator)
- ADC analogno-digitalni pretvarač
- skaler (brojač) broji digitalne signale na ulazu
- MCA (multikanalski analizator) služi za dobijanje energetskog spektra. Ceo energetski spektar je podeljen na kanale, a MCA broji događaje u svakom kanalu.
- TAC (pretvarač vreme amplituda) vremenu razliku između start i stop signala pretvara u naponski (analogni) signal
- koincidentna kola daju digitalni signal ako su dva ulazna signala istovremena
- kola za kašnjenje služe da signal koji uđe u ovakvo kolo će da izade nepromenjen, ali za određeno vreme kasnije

5.3 Obrada podataka

U sklopu ovog eksperimenta je korišćen MPA-3 sistem (slika 5.3.1) za prikupljanje i obradu podataka. On je projektovan za rad sa najviše 16 spoljašnjih ADC-a, multiskalera, detektora vremena preleta, itd. Koincidentni događaji se mogu definisati kao gotovo sve kombinacije 16 ADC portova, kao i spoljašnjih konektora. Kontrola kompletognog sistema omogućena je preko multiparametarskog operativnog softvera MPANT. Praćenje sistema omogućeno je u *on-line* modu u jednoparametarskom i dvoparametarskom spektru.



Slika 5.3.1: MPA-3 bazni modul

5.4 Princip rada

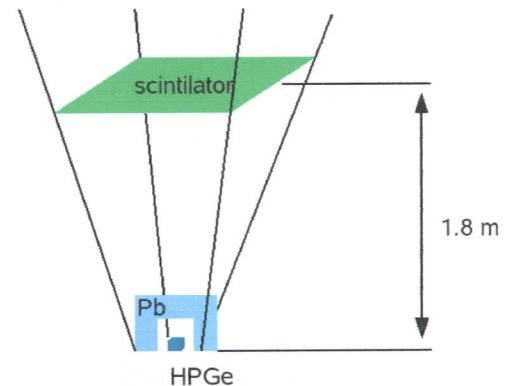
Cilj ovog eksperimenta je vremenska analiza anihilacione linije indukovane mionima. Koristili smo dva detektora, plastični scintilacioni i germanijumski. Plastični detektor je bio 1.8 m iznad germanijumskog, tako da formiraju jednu vrstu teleskopa koji je uperen prema gore. (slika 5.4.1)

Ovakva konfiguracija definiše događaje koji nas zanimaju. Prosečan mion koji prođe kroz scintilacioni detektor (i deponuje više od 6 MeV) će da stvori pozitron u olovnoj zaštiti germanijumskog detektora. Posle njegove anihilacije sa elektronom stvore se dva gama kvanta energije 511 keV. Jedan deo ovih anihilacionih kvanata će biti registrovan u germanijumskom detektoru.

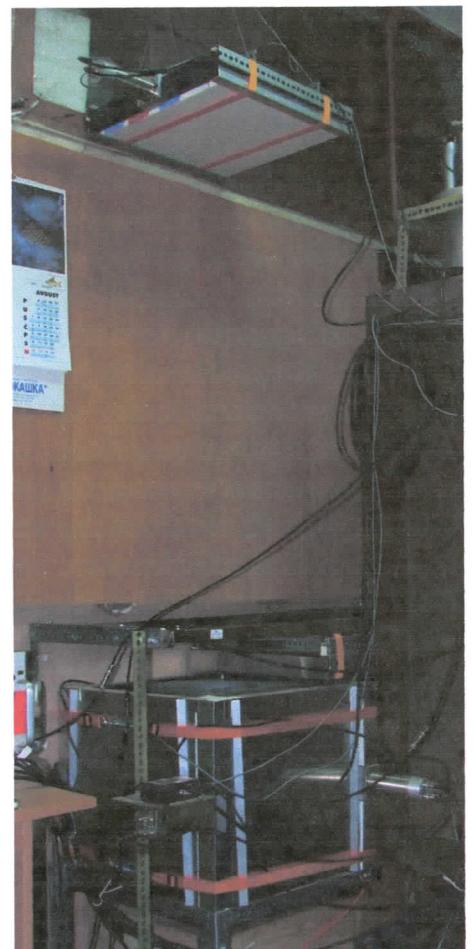
Ako se u spektru germanijumskog detektora ograničimo na energije oko 511 keV, a u scintilacionom spektru na oko 10 MeV, dobijamo broj gama kvanata koji su koincidentni sa mionima.

Izlaz iz plastičnog scintilatora se vodi u pojačalo, koji preko ADC-a je povezan sa MPA-3 sistemom. Izlaz iz germanijumskog detektora takođe se vodi preko predpojačala, pojačala i ADC-a do MPA-3 sistema.

U slučaju ovakvog sistema koincidentni interval bio bi oko 50 μ s [MPAman05], što je dosta velika vrednost. To se može smanjiti uvođenjem jedne brze linije signala. Naime, izlaz sa jedne dinode fotomultiplikatora scintilatora je mnogo brža od izlaza samog fotomultiplikatora. Ovaj izlaz se vodi na TFA (pojačavač za brze signale) čiji izlaz se vodi na CFD (diskriminator konstantne frakcije). Drugi izlaz sa predpojačala germanijumskog detektora (ovaj signal se ne razlikuje od sporog signala) se isto vodi na TFA i posle na CFD. Izlazi sa dva CFD-a se vode na TAC, čiji izlaz se vodi u MPA-3 sistem. (slika 5.4.3) Ovakvom konfiguracijom smo smanjili koincidentni interval na 10 μ s.

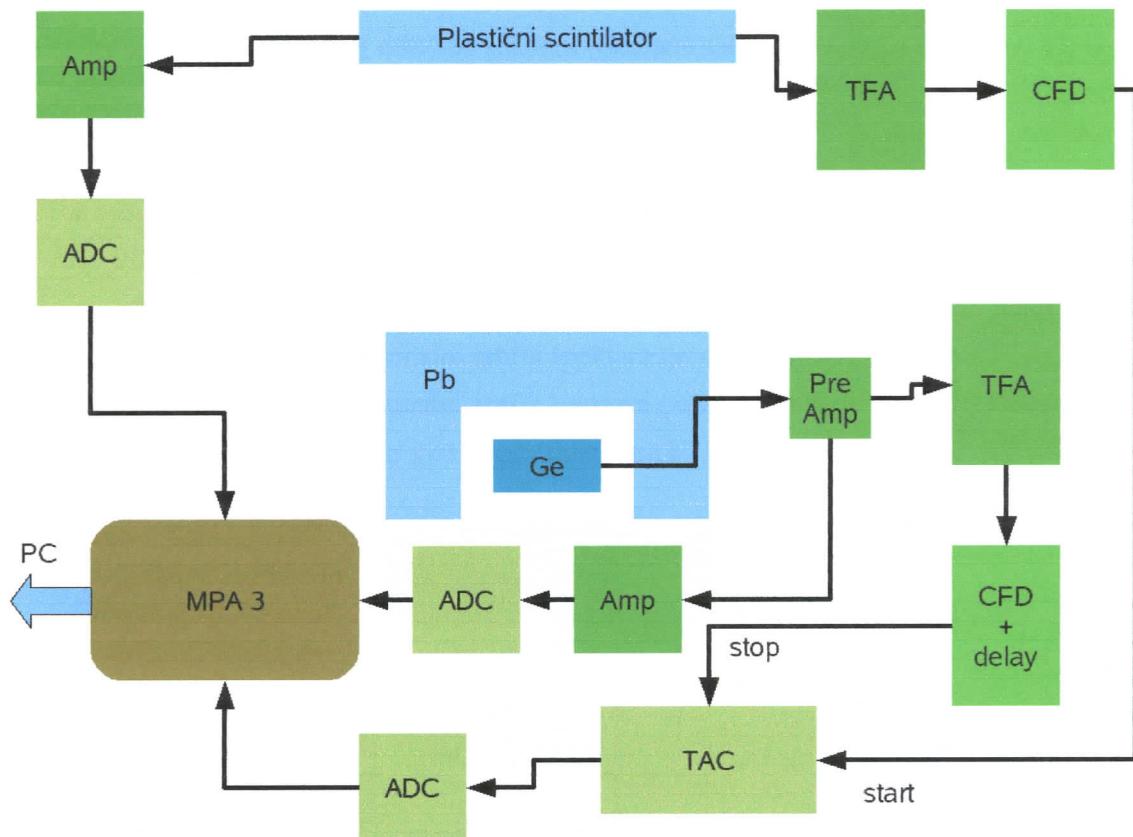


Slika 5.4.1: Prostorni ugao koji obrazuju dva detektora



Slika 5.4.2: Merni sistem

Vremenska zavisnost mionima indukovane anihilacione linije



Slika 5.4.3: Shema detekcionog sistema

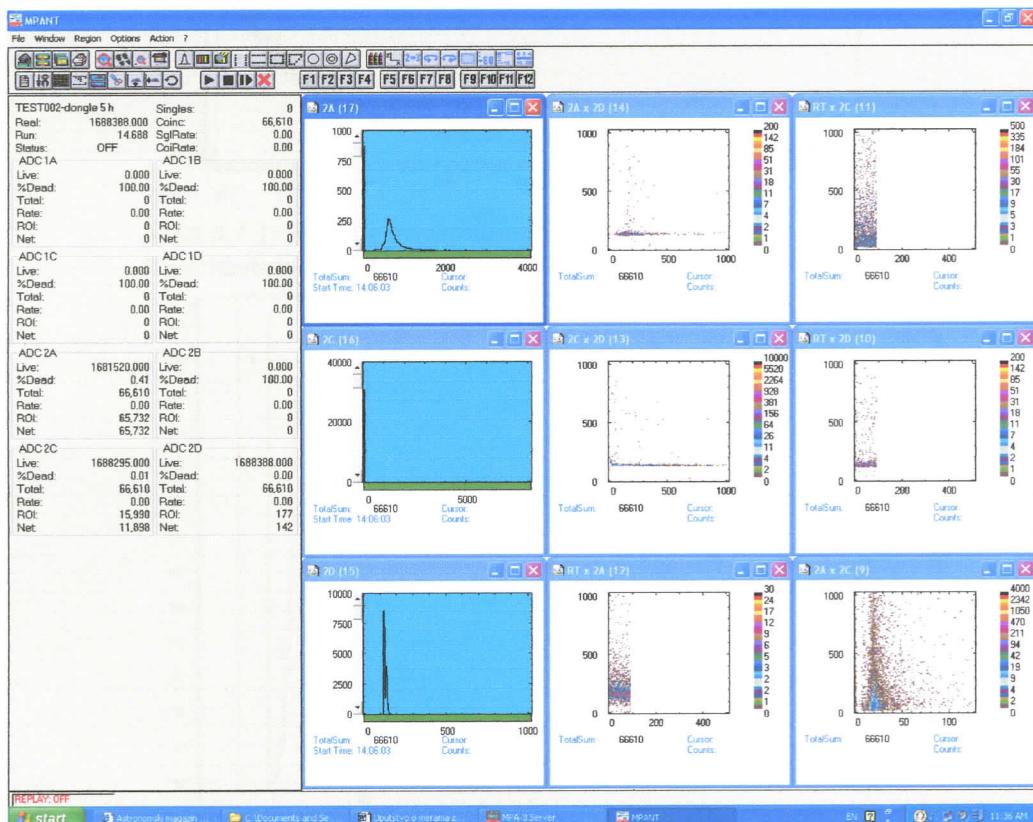
Diskriminator u grani scintilacionog detektora je bio podešen da odbacuje signale manje od 5 MeV. Tako odbacujemo gama zrake i većinu visokoenergetskih elektrona i pozitrona, a zahvatamo mione. Diskriminator u grani germanijumskog detektora je bio podešen malo iznad šuma.

Sistem je podešen u koincidentni režim rada sa sve tri ulazne jedinice. Tako u spektru germanijumskog detektora imamo događaje koji su istovremeni sa prolaskom miona u scintilacionom detektoru. Kao što smo pomenuli, TAC signal služi samo za smanjenje koincidentnog intervala.

6. Rezultati

Ukupno vreme merenja je bilo 1 688 388 sekundi (oko 469 sata). Merenje je vršeno od 17. novembra 2006.-te godine do 7. decembra iste godine. Na slici 6.1 dat je prikaz monitora nakon završene akvizicije. Mali prozori sa desna sadrže spektre iz detektora.

- 2A – spektar scintilacionog detektora
- 2C – spektar germanijumskog detektora
- 2D – spektar TACa
- 2A x 2D – dvodimenzionalni grafik spektara scintilacionog detektora i TAC-a
- 2C x 2D – dvodimenzionalni grafik spektara germanijumskog detektora i TAC-a
- 2A x 2C – dvodimenzionalni grafik spektara germanijumskog i scintilacionog detektora
- RT grafici su vremenski grafici oba detektora i TAC-a

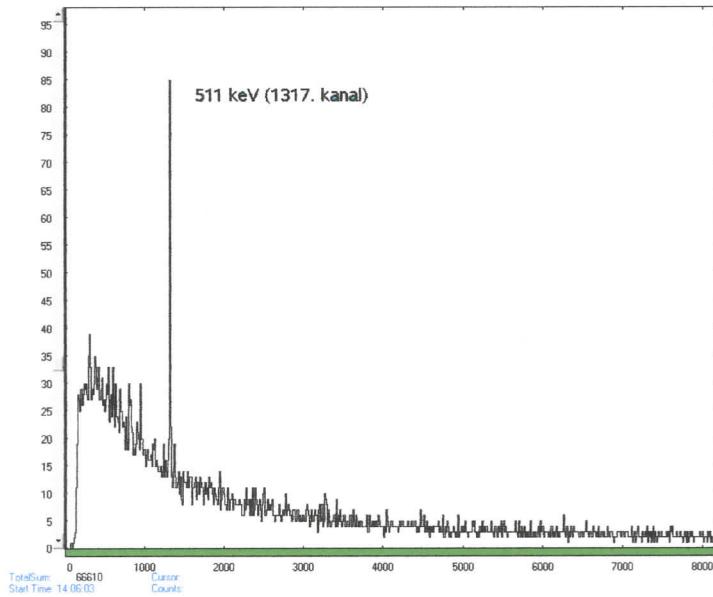


Slika 6.1: Izgled programa MPANT sa snimljenim spektrima

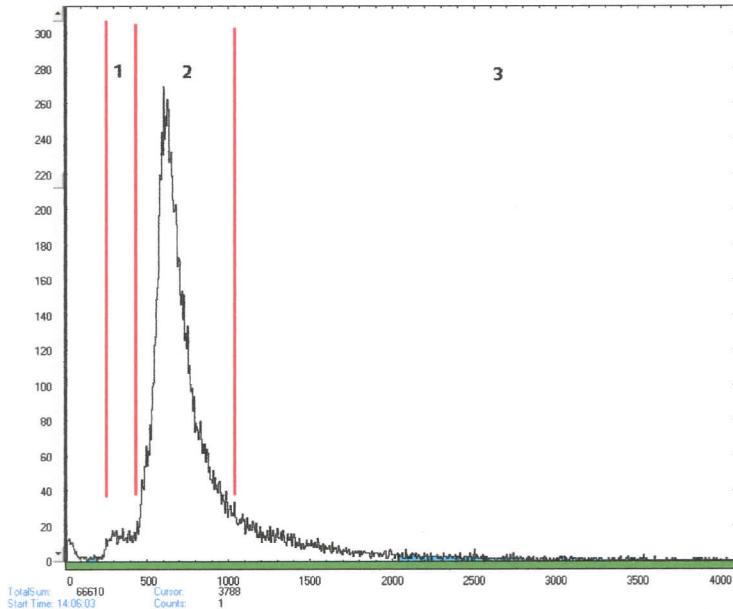
Vremenska zavisnost mionima indukovane anihilacione linije

6.1 Koincidentni spektri

Na slikama 6.1.1 i 6.1.2 su prikazani spektri germanijumskog i scintilacionog detektora za ceo vremenski interval.



Slika 6.1.1: Spektar germanijumskog detektora u koincidenciji sa plastičnim scintilatorom



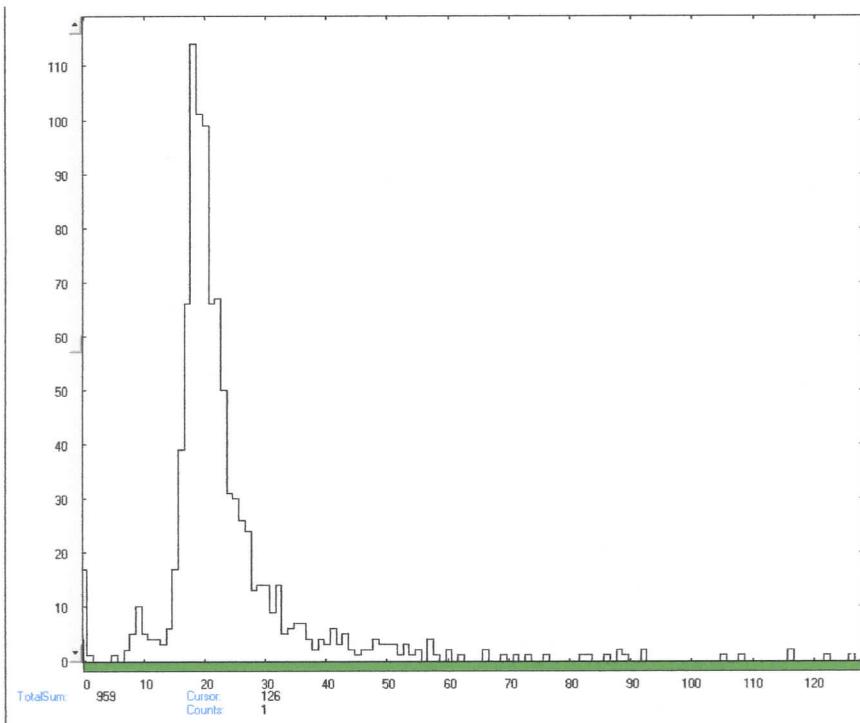
Slika 6.1.2: Spektar plastičnog scintilatora u koincidenciji sa germanijumskim detektorom

Vremenska zavisnost mionima indukovane anihilacione linije

Na spektru scintilacionog detektora (slika 6.1.2) možemo definisati tri oblasti

1. meka komponenta kosmičkog zračenja (od 260. do 448. kanala, energije od 5 do 7 MeV)
2. mionski vrh (od 449. do 1020. kanala, energije od 7 do 14 MeV)
3. mionski rep (od 1021. do 4096. kanala, energije od 14 do 50 MeV)

Koristeći dvodimenzionalni grafik spektra germanijumskog i scintilacionog detektora možemo da ustanovimo koji mionski događaji su uzrokovali koincidentni signal u poluprovodničkom detektoru. Na slici 6.1.3 je prikazan broj događaja po kanalima spektra scintilacionog detektora, koji je zbog softverskih ograničenja smanjen na 128.

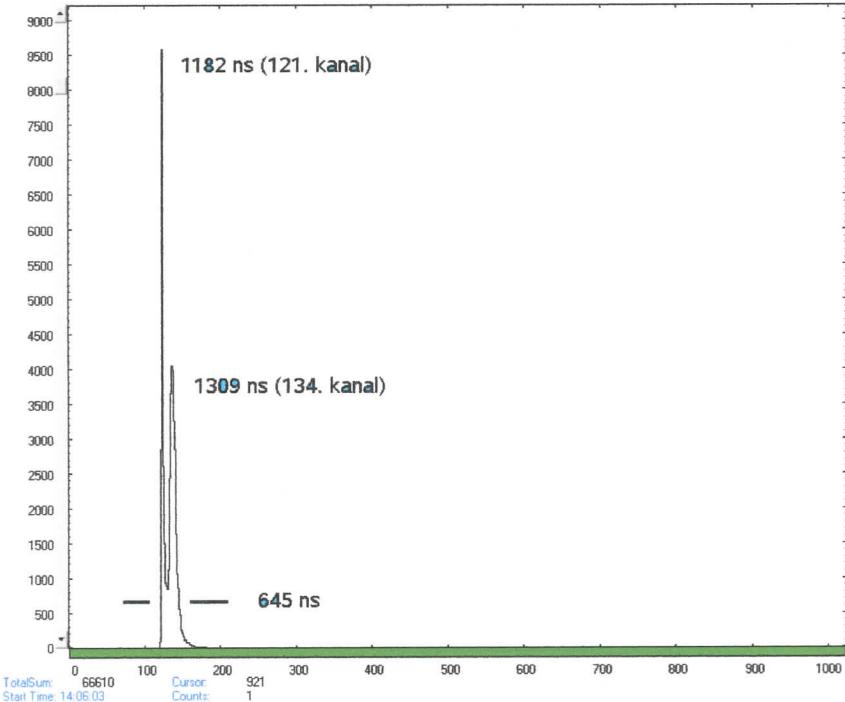


Slika 6.1.3: Događaji u mionskom detektoru po kanalima koji su uzrokovali koincidentni događaj u poluprovodničkom detektoru

Sa spektra se vidi da prvenstveno događaji iz mionskog vrha uzrokuju koincidentne događaje u germanijumskom detektoru. Na ovoj slici mionskom vrhu odgovara region od 14. do 32. kanala.

Vremenska zavisnost mionima indukovane anihilacione linije

Na slici 6.1.4 je prikazan spektar iz TAC-a. Donja osa je vremenska, 1024 kanala predstavljaju $10 \mu\text{s}$ (9.77 ns po kanalu).



Slika 6.1.4: Spektar TACa

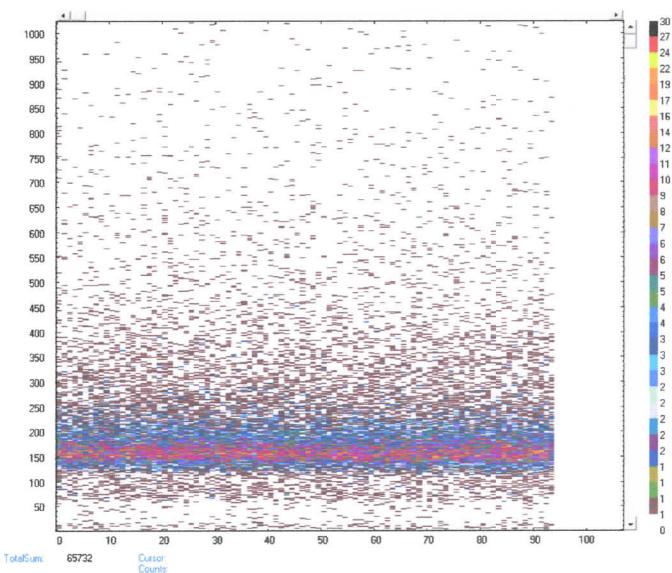
Sa spektra se vidi da su koincidentni događaji u vremenskom intervalu oko 645 ns.

Iz odnosa vrha i kontinuuma vidimo da su slučajne koincidencije zanemarljive.

Na slici 6.1.4 vidimo dva vrha, što bi značilo da imamo dve vrste događaja koji su u koincidenciji sa upadnim mionima. Analizom sistema sa izvorom pozitrona (^{22}Na) se ustanovilo da drugi vrh predstavlja pravu koincidenciju. Ispostavilo se da je prvi vrh rezultat saturacije brzog pojačavača (TFA) u germanijumskoj grani. Ako mion pogodi germanijumski detektor, on će deponovati energiju iznad 20 MeV. Ti signali dovode TFA u saturaciju, te se “rise time” signala smanjuje. Ovako dobijamo 2 vrha u TAC spektru: jedan od saturisanih, a drugi od nesaturisanih signala (ako mion izbegne germanijumski detektor). Međutim, saturisane signale nećemo videti u energetskom spektru germanijuma, pošto su izvan opsega. [Mrdja07]

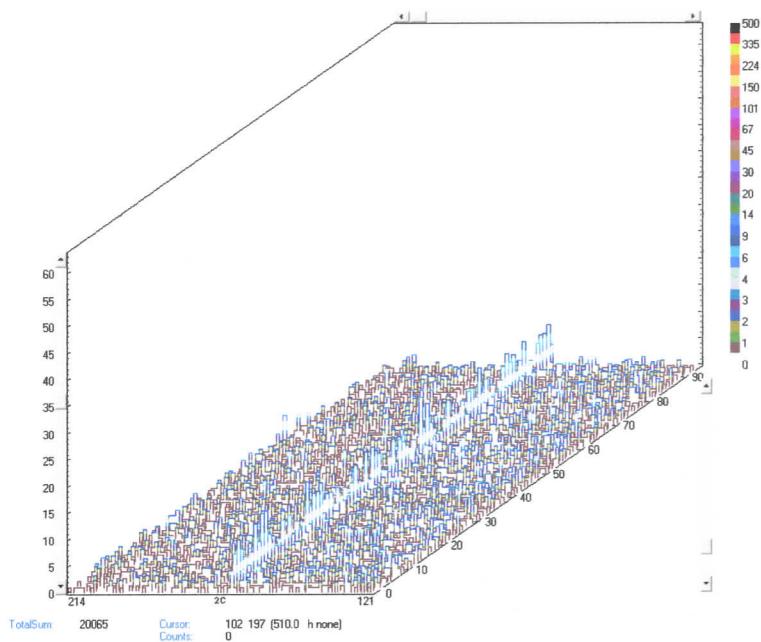
Vremenska zavisnost mionima indukovane anihilacione linije

Na slici 6.1.5 prikazana je vremenska zavisnost spektra plastičnog scintilatora. Na horizontalnoj osi je vreme (u koracima od 5 sati), dok je na vertikalnoj broj kanala (taj broj je smanjen sa 4096 na 1024 zbog softverskih ograničenja) scintilatora. Bojom se označava broj događaja u datom kanalu i vremenu.



Slika 6.1.5: Vremenska zavisnost spektra plastičnog scintilatora

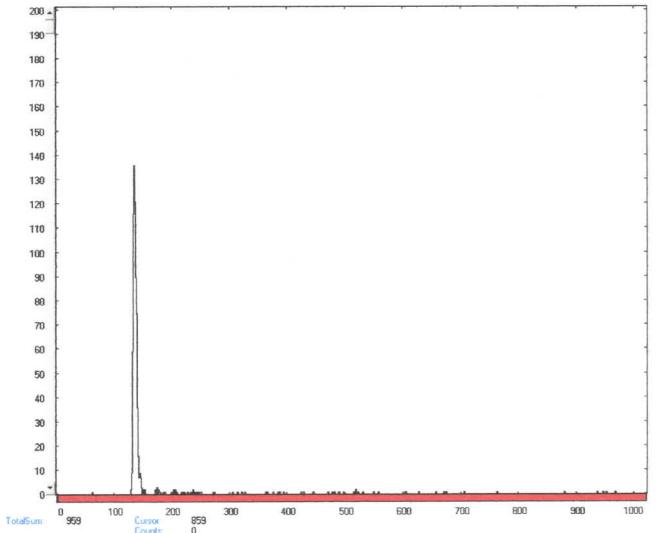
Na slici 6.1.6 je prikazan koincidentni vremenski spektar germanijumskog detektora. Na y osi je vreme (u koracima od 5 sati), na x osi broj kanala (taj broj je smanjen sa 4096 na 1024 zbog softverskih ograničenja) germanijumskog detektora. Bojom i visinom se označava broj događaja u datom kanalu i vremenu.



Slika 6.1.6: Vremenska zavisnost spektra germanijumskog detektora

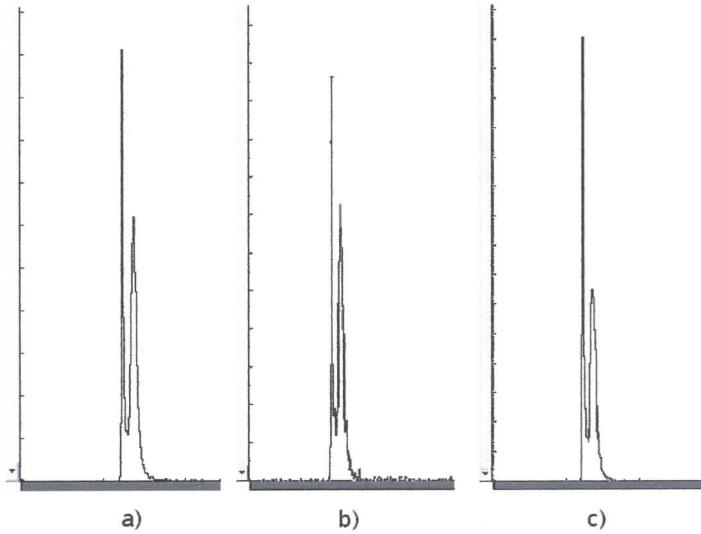
Vremenska zavisnost mionima indukovane anihilacione linije

Jedna od mogućnosti MPANT programa je odabir regiona u dvodimenzionalnim spektrima. Posle se taj region može posmatrati kao jednodimenzionalan spektar. Na slici 6.1.7 je spektar TAC-a prouzrokovani događajima pri kojima u germanijumskom detektoru je deponovana energija od 511 keV. Vidi se da postoji samo jedan vrh na 134. kanalu (1309 ns) što ukazuje na ispravnost objašnjenja dvostrukog vrha TAC spektra, to jest da prvi vrh potiče od događaja koji su u germanijumu ostavili više od 3 MeV.



Slika 6.1.7: Događaji TAC-a koji su koincidentni sa događajima od 511 keV u germanijumskom detektoru

Spektri TAC-a od mionskih događaja iz plastičnog scintilatora međutim zadržavaju oba vrha, kao što se vidi na slici 6.1.8.



Slika 6.1.8: Prikaz TAC spektara koji odgovaraju raznim regionima u spektru scintilatora

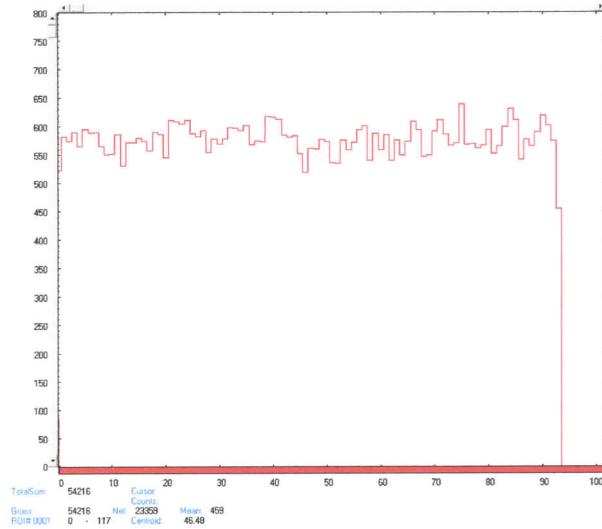
Na slici 6.1.8 a) su događaji uzrokovani od mionskog repa (visokoenergetski mioni ili oni koji prolaze kroz detektor pod velikim uglom u odnosu na normalu). Na b) delu su događaji uzrokovani od nekog kosmičkog zračenja. Na c) delu su događaji od mionskog vrha, i iz odnosa prvog i drugog vrha se vidi da je prvi vrh uzrok miona koji su prošli plastični detektor pod malim uglom i stoga su imali veću verovatnoću da prođu kroz germanijumski detektor.

Vremenska zavisnost mionima indukovane anihilacione linije

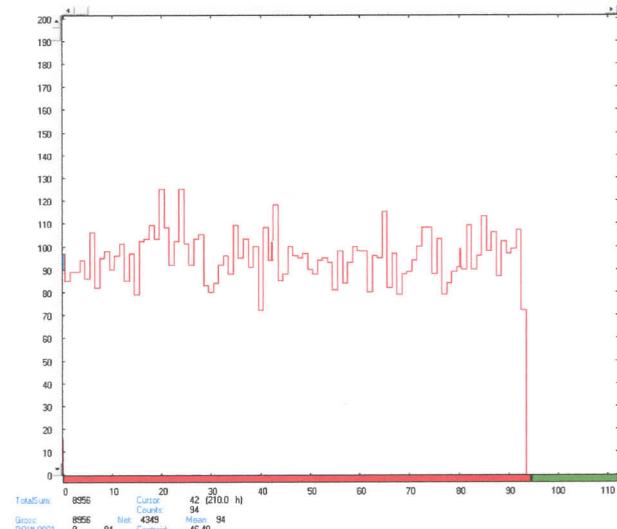
6.2 Vremenska analiza

Ukupno vreme merenja je bilo 1 688 388 sekundi (oko 469 sati). Ako želimo da posmatramo promenu intenziteta zračenja po vremenu, moramo crtati grafike tako što odaberemo jedan vremenski interval (koji će biti mnogo manji od ukupnog vremena merenja), sumirati događaje u tom intervalu i od tih suma praviti histograme. Naravno, ako je interval (bin) prevelik, onda će vremenske fluktuacije da se “ispeglaju”, a ako je prekratak, onda će doći do značajnih fluktuacija zbog statističke prirode procesa. Ispostavilo se da u našem slučaju najbolje da za bin uzmemo 5 sati.

Vremenske promene fluksa miona raznih energija su prikazane na slikama 6.2.1 i 6.2.2.



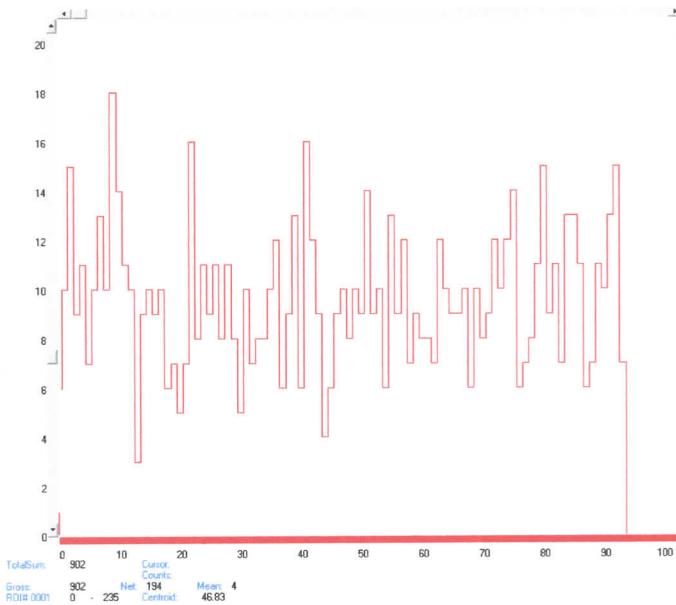
Slika 6.2.1: Vremenska zavisnost intenziteta miona iz mionskog vrha spektra scintilatora



Slika 6.2.2: Vremenska zavisnost intenziteta miona iz mionskog repa spektra scintilatora

Vremenska zavisnost mionima indukovane anihilacione linije

Vremenska promena anihilacione linije je prikazana na slici 6.2.3.



Slika 6.2.3: Vremenska promena intenziteta anihilacione linije spektra germanijumskog detektora

U tabeli 6.2.1 su date prosečne vrednosti odbroja detektora sa odgovarajućim nesigurnostima:

	Mionski rep	Mionski vrh	Anihilaciona linija
Srednja vrednost (N)	95	576	9.6
Standardna devijacija (σ)	10	27	2.8
Koren iz srednje vrednosti (\sqrt{N})	9.76	24	3.1

Tabela 6.2.1: Prosečne vrednosti intenziteta miona i anihilacione linije po vremenu

Dobro slaganje standardne devijacije sa korenom srednje vrednosti ukazuje na to da su fluktuacije u okviru Gausove raspodele i da u posmatranom periodu vremena nije došlo do značajnih promena u fluksu kosmičkog zračenja.

Vremenska zavisnost mionima indukovane anihilacione linije

U cilju dodatne provere međusobne zavisnosti spektara, u tabeli 6.2.2 su predstavljeni koeficijenti korelacija između snimljenih spektara:

	Mionski vrh	Mionski rep	Meka komponenta kosmičkog zračenja	Anihilaciona linija
Mionski vrh	X	0.16	-0.07	0.21
Mionski rep	0.16	X	0.11	0.12
Meka komponenta kosmičkog zračenja	-0.07	0.11	X	-0.15
Anihilaciona linija	0.21	0.12	-0.15	X

Tabela 6.2.2: Vrednosti koeficijenata korelacije između snimljenih spektara

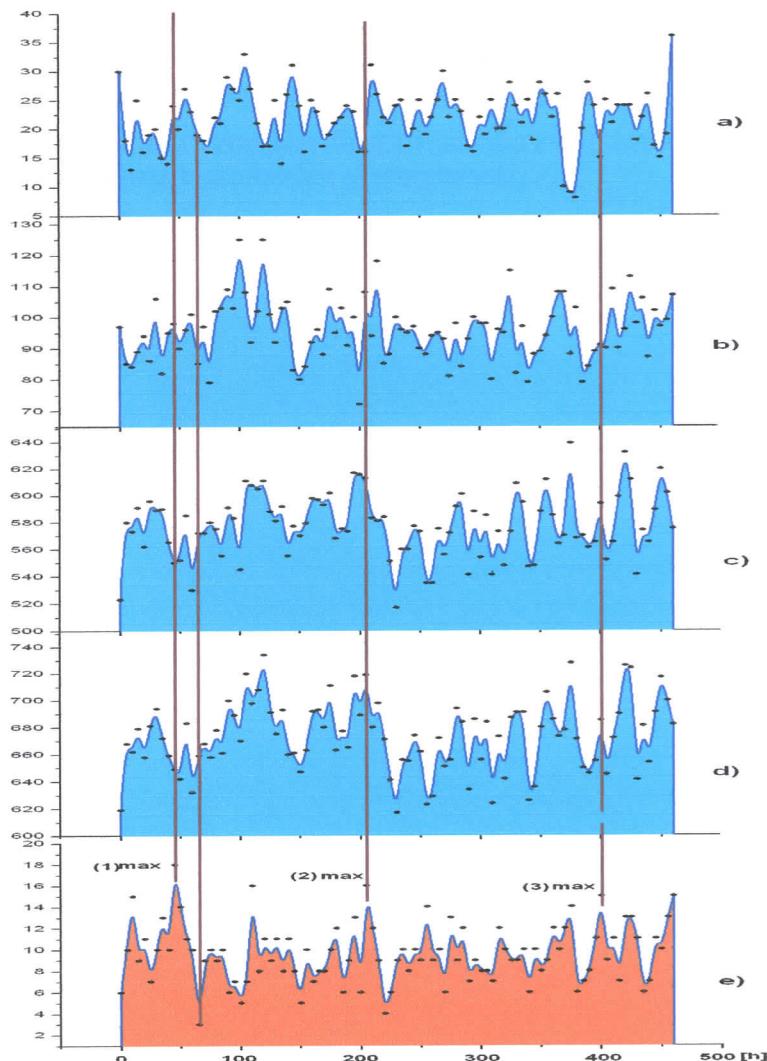
Da se radi o stvarnim promenama u fluksu miona, očekivalo bi se da promene u spektru anihilacione linije linearno prate promenu fluksa miona. Prema vrednostima koeficijenata korelacija ne postoji (linearna) zavisnost između spektara. Takođe, ne postoji veza između mionskog vrha i repa, kao i između meke komponente kosmičkog zračenja.

Uzrok niske vrednosti koeficijenata korelacije mogu biti male fluktuacije različitih spektara koje se ne dešavaju istovremeno, ili da promena intenziteta raznih spektara nije linearna. Samo na osnovu koeficijenata korelacije nemoguće je odlučiti između ove dve mogućnosti.

Uočene su promene intenziteta fluksa miona na nivou poverenja od 90%. Maksimalni odbroj u mionskom regionu je 736(45), a minimalni je 526(38). Maksimum odbroja anihilacione linije je 18(7), a minimalni je 4(3).

Vremenska zavisnost mionima indukovane anihilacione linije

Na slici 6.2.4 je prikazana vremenska varijacija broja događaja u raznim regionima plastičnog i germanijumskog detektora. Na delu a) je prikazana vremenska varijacija meke komponente kosmičkog zračenja, na b) delu događaji iz mionskog repa, na c) delu događaji iz mionskog vrha scintilacionog detektora. Na delu e) je prikazana varijacija odbroja anihilacione linije u spektru germanijumskog detektora.



Slika 6.2.4: Vremenska zavisnost događaja u raznim spektralnim regionima plastičnog i germanijumskog detektora

Analizom slike 6.2.4 se vidi da vrhovi u vremenskoj zavisnosti anihilacione linije su prouzrokovani vrhovima u različitim delovima mionskog spektra.

7. Zaključak

Tokom merenja u vremenskom intervalu (oko 20 dana) nisu uočene varijacije mionskog fluksa velikog intenziteta, ali postoje varijacije manjeg intenziteta na nivou poverenja od 90%.

Nije uočena periodičnost variranja (npr. dnevne varijacije).

Za detekciju mogućih dugoperiodičnih varijacija neophodna su znatno duža vremenska merenja.

Uočeno je da porast intenziteta anihilacione linije može biti koreliran sa porastom broja događaja u različitim spektralnim regionima deponovane energije plastičnog detektora, što odgovara mionima raznih energija ili pak uticaju meke komponente kosmičkog zračenja.

Izučavanje vremenskih promena mionskog fluksa i anihilacionih događaja može doprineti boljem razumevanju i tumačenju rezultata niskofonskih eksperimenata.

8. Reference

- [Burcham74] W. E. Burcham, "Nuklearna fizika - uvod" sa fizikom čestica, 2nd ed, Longman Group Limited, London, (1974)
- [GeantMan03] Geant4, "Physics Reference Manual"
<http://geant4.cern.ch/G4UsersDocuments/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/html/node50.html>
- [Grieder01] Peter K.F. Grieder, "Cosmic rays at Earth", Elsevier, Amsterdam, (2001)
- [Jovin05] Tatjana Jovin, "Određivanje energije i fluksa kosmičkih miona na nivou mora", Diplomski rad, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno–matematički fakultet, Novi Sad, (2005)
- [Leo94] W. R. Leo, "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments" A how to approach, 2nd ed, Springer – Verlag, Berlin Heidelberg New York, (1994)
- [MPAman05] Multiparameter Data Acquisition System, User Manual, FAST ComTec GmbH, Oberchaching, Germany, (2005)
- [Mrdja07] Dušan Mrđa, "Analiza metoda redukcije fona germanijumskih spektrometara", Doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno–matematički fakultet, Novi Sad, (2007)
- [Popadic06] Svetlana Popadić, "Multiparametarsko istraživanje kosmičkih miona", Diplomski rad, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno–matematički fakultet, Novi Sad, (2006)
- [Puzovic02] J.M. Puzović , I.V. Aničin "Production of positron annihilation radiation by cosmic rays near sea level", Nucl. Instr. and Meth. A 480 (2002) 565
- [Slivka00] J. Slivka, I. Bikit, M. Vesković, Lj. Čonkić, "Gama spektrometrija", specijalne metode i primene, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno–matematički fakultet, Novi Sad, (2000)
- [Stanivuk00] Stanivuk, Ljiljana: "Provera osnovnih radnih karakteristika poluprovodničkog Gamma-X HPGe detektora", Diplomski rad, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno–matematički fakultet, Novi Sad, (2000)
- [Yao06] W-M Yao *et al* 2006 *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **33** 1
http://www.iop.org/EJ/article/0954-3899/33/1/001/g_33_1_001.html

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Mioni.....	2
2.1 Otkriće.....	2
2.2 Osobine.....	3
3. Kosmičko zračenje.....	4
3.1 Interakcija sa materijom.....	7
4. Anihilaciono zračenje.....	9
4.1 Mehanizmi produkcije pozitrona od strane miona.....	9
5. Opis eksperimenta.....	10
5.1 Detektori.....	10
5.1.1 HPGe.....	10
5.1.2 Scintilacioni detektor.....	12
5.2 Nuklearna elektronika.....	13
5.3 Obrada podataka.....	13
5.4 Princip rada.....	14
6. Rezultati.....	16
6.1 Koincidentni spektri.....	17
6.2 Vremenska analiza.....	22
7. Zaključak.....	26
8. Reference.....	27

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: mion, anihilaciono zračenje, vremenska zavisnost

PO

UDK

Čuva se:

ČU

Važna napomena:

VN

Vremenska zavisnost mionima indukovane anihilacione linije

Izvod:
IZ

Cilj diplomskog rada je ispitivanje vremenske zavisnosti kosmičkog zračenja. Na nivou mora dominantna komponenta kosmičkog zračenja su mioni. Mion interagujući sa atomima okoline može da proizvede par elektron-pozitron. Tokom anihilacije pozitrona javlja se anihilaciona linija od 511 keV.

U ovom radu je korišćen plastični scintilator za detekciju miona i HPGe detektor za merenje anihilacione linije. Ta dva detektora su bila u koincidenciji i iz tog spektra se dobijaju događaji anihilacije pozitrona koji su direktno povezani sa mionima.

Tokom merenja su primećene promene broja registrovanih anihilacionih događaja na nivou poverenja od 90%. Nisu uočene periodične varijacije.

*Datum prihvatanja teme od NN
veća:*

DP

Datum odbrane:

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik: dr Miroslav Vesković

član: dr Stevica Đurović

član:dr Ištvan Bikit

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

DT

Type of record: Textual printed material

TR

Content code: Final paper

CC

Author: Gergelj Šoti

AU

Mentor/comentor: dr Ištván Bikit

MN

Title: Time dependence of the muon induced annihilation line

TI

Language of text: Serbian (Latin)

LT

Language of abstract: English

LA

Country of publication: Serbia and Montenegro

CP

Locality of publication: Vojvodina

LP

Publication year: 2005

PY

Publisher: Author's reprint

PU

Publication place: Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4,
Novi Sad

PP

Physical description: 7 chapters, 28 pages, 4 tables, 27 figures

PD

Scientific field: Physics

SF

Scientific discipline: Nuclear physics

SD

Subject/ Key words: muons, annihilation line, time dependence

SKW

UC

Holding data: Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

HD

Note: none

N

Vremenska zavisnost mionima indukovane anihilacione linije

Abstract:

AB

The goal of the diploma thesis was to investigate the time dependence of cosmic rays. On sea level the dominant component of the cosmic rays are muons. Muons interact with the atoms of the atmosphere and can produce positrons. The annihilation of the positrons emits two gamma rays of 511 keV.

A plastic scintillator was used to detect the muons and a HPGe detector to measure the annihilation line. The two detectors were in coincidence and from that spectrum we can get the positron annihilation events caused by muons.

During the measurement changes in the number of registered annihilation events were recorded with the confidence level of 90%. No periodic variations were observed.

Accepted by the Scientific Board:

ASB

Defended on:

DE

Thesis defend board:

DB

President: dr Miroslav Vesović

Member: dr Stevica Đurović

Member: dr Istvan Bikit

Kratka biografija

Gergelj Šoti rođen je 16.08.1983. godine u Novom Sadu, gde je završio osnovnu školu "Nikola Tesla" 1998. godine. Gimnaziju "Svetozar Marković" završio je 2002. godine sa Vukovom diplomom kao đak generacije. Prirodno-matematički Fakultet, odsek za fiziku je upisao 2002. godine, gde je posle prve godine dobio izuzetnu nagradu za postignut uspeh. Bio je u organizacionom odboru ICPS-a 2004. godine, a na ostalima je učestvovao sa radovima. Držao je studentima prve godine demonstracione vežbe iz predmeta Oscilacije i talasi.

