



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
DEPARTMAN ZA  
MATEMATIKU I INFORMATIKU  
**FIZIKU**



# Detekcija gama zračenja nastalog neelastičnim rasejanjem neutrona u gvozdenoj zaštiti HPGe detektora

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

ПРИМЉЕНО:	29.03.2010
ОРГАНИЗ.ЈЕД.	БРОЈ
0603	9/342

- diplomski rad -

Mentor:

Miodrag Krmar

Kandidat:

Nataša Ostojić

Novi Sad, 2010

## SADRŽAJ

1. <b>Uvod</b> .....	1
2. <b>Kosmičko zračenje</b> .....	3
2.1. Primarno kosmičko zračenje.....	4
2.2. Sekundarno kosmičko zračenje.....	5
2.3. Mioni.....	7
2.4. Stvaranje miona u kosmičkom zračenju.....	8
2.5. Interakcije miona sa jezgrom.....	8
3. <b>Neutron</b> .....	12
3.1. Otkriće neutrona.....	12
3.2. Osobine neutrona.....	14
3.3. Izvori neutrona.....	16
4. <b>Fisija</b> .....	18
4.1. Mehanizam odvijanja procesa fisije.....	19
4.2. Fisioni neutroni.....	21
4.3. Spontana fisija.....	22
4.4. Kalifornijum.....	23
5. <b>Interakcije neutrona</b> .....	26
6. <b>Rezultati</b> .....	27
6.1. Opis aparature.....	27
6.2. Merenje.....	28
6.2.1. Fonski spektri.....	29
6.2.2. Fisioni spektri.....	29
6.3. Rezultati merenja.....	29
6.4. Relativni intenziteti.....	35
6.5. Uticaj mangana na merene linije fonskog spektra.....	38
7. <b>Zaključak</b> .....	40

### Literatura

### Biografija

## 1. UVOD

Početkom XX veka došlo je do jednog od značajnih otkrića u oblasti fizike. Naučnici su različitim eksperimentima uočili postojanje vrlo prodornog zračenja koje dospeva na zemlju iz svemira. Austrijski fizičar Hes je prvi potvrdio postojanje kosmičkog zračenja.

Kosmičko zračenje čine čestice vrlo visokih energija. U najvišim slojevima atmosfere, koji su neprestano izloženi dejstvu kosmičkog zračenja, dolazi do interakcije sa atomima i jezgrima azota i kiseonika od kojih se u najvećoj meri sastoji atmosfera.

Mala je verovatnoća da čestice primarnog kosmičkog zračenja dospeju do površine zemlje, međutim u pomenutim interakcijama nastaju nove čestice koje imaju dovoljnu prodornu moć ili vreme života i uspevaju da se probiju kroz atmosferu.

Kosmičko zračenje na nivou mora se uglavnom sastoji od visoko energetskih ***miona, elektrona i fotona***.

Mioni najveći deo svoje energije gube putem ionizacije. Međutim mioni visoke energije, kao i mali broj nukleona koji dospeju do tla mogu da stupe u različite nuklearne reakcije. Jedna od nuklearnih reakcija koje se odvija usled dejstva kosmičkog zračenja na površini zemlje je da jezgra zahvate mione i da se na taj način pobuđuju do nivoa kada emituju neutrone. Ovi neutroni dalje interaguju sa sredinom kroz koju prolaze putem sudara ili zahvata. Prilikom zahvata neutrona nastaje radioaktivno jezgro, koje je nestabilno i raspada se uz emisiju zračenja. Na ovaj način mioni aktiviraju materijale kroz koje prolaze, i ova aktivnost postaje značajna ako se indukuje u nuklearnim detektorima ili materijalima koji se upotrebljavaju kao njihova zaštita. Visokoenergetski mioni, kojih manje ima u stanju su i da izazovu spalacionu reakciju na jezgru kojom prilikom se emituju kako neutroni, tako i druge čestice, uključujući čitave fragmente jezgra. Zaštita detektora od mionskog zračenja nije jednostavna, jer zbog vrlo visoke prodorne moći dospevaju čak i duboko u unutrašnjost zemlje.



Nakon neelastičnog rasejanja, neutroni jezgra ostavljaju u pobuđenom stanju, odakle ona prelaze na osnovno emisijom gama zračenja. Ovo zračenje predstavlja ozbiljan problem u niskofonskim merenjima i potrebno ga je eliminisati u što je moguće većoj meri.

Gvožđe, pogotovo ono proizvedeno pre dugog svetskog rata, se često koristi za zaštitu detektora od spoljašnjeg zračenja. Ukoliko se mere neki procesi male verovatnoće, presudan uticaj na kvalitet rezultata ima nivo okolnog fonskog zračenja. Ponekad je snižavanje nivoa fonskog zračenja jedini metod da se popravi kvalitet merenja. U tom slučaju je posebno značajno poznavati mehanizme stvaranja aktivnosti koje kosmičko zračenje proizvede u niskofonskim detektorima kao i nivoe aktivnosti koji se u interakciji detektorskih sistema sa kosmičkim zračenjem mogu očekivati.

U ovom diplomskom radu je izvršena identifikacija gama linija koje nastaju detekcijom zračenja indukovanih u gvozdenoj zaštiti detektora. Posebna je pažnja poklonjena gama prelazima sa energetskih nivoa  $^{56}\text{Fe}$  pobuđenih prilikom neelastičnog rasejanja neutrona stvorenih mionskim zračenjem. Za identifikovane gama linije su određeni relativni intenziteti u odnosu na najintenzivniju liniju od 846.8 keV.

Relativni intenziteti gama linija emitovanih nakon elastičnog rasejanja neutrona zavise od energije neutrona. U literaturi postoje podaci o energetskom spektru neutrona nastalih u interakcijama miona proizvedenim u laboratoriji sa nekim materijalima. No, detaljna merenja spektra neutrona nastalih u interakcijama kosmičkih miona na površini zemlje do sada nisu izvedena. Iz tog razloga su detaljno određeni relativni intenziteti gama linija emitovanih od strane  $^{56}\text{Fe}$  prilikom interakcija sa neutronima emitovanim u fizijskoj  $^{252}\text{Cf}$ . Energetski spektar fisionih neutrona koje emituje kalifornijum je veoma dobro poznat. Poređenje relativnih intenziteta gama linija  $^{56}\text{Fe}$  izmerenih u fonskom spektru sa relativnim intenzitetima gama linija koje  $^{56}\text{Fe}$  emituje u interakciji sa fisionim neutronima koje je izvršeno u ovom radu ima za cilj da se dobiju informacije o energetskom spektru neutrona nastalih prilikom interakcija miona sa jezgrima gvožđa.

## 2. KOSMIČKO ZRAČENJE

### *OTKRIĆE*

Početkom XX veka izvedeni su ogledi koji su pokazali da se nanelektrisani elektroskop zatvoren u olovni sud debelih zidova, posle izvesnog vremena razelektriše a da u njegovu blizinu nije postavljen ni jedan izvor ionizujućeg zračenja. Brzina pražnjenja gasa unutar elektroskopa, izloženog dejstvu ionizujućeg zračenja, bila bi u direktnoj srazmernosti sa intenzitetom zračenja.

Prva istraživanja ovog nepoznatog ionizujućeg zračenja, koje su izveli Raderford, Kuk, Vulf, Gokel, Hes Kolhester, a zatim i Miliken, Bote i drugi dovela su do otkrića kosmičkog zračenja. Jedna od prvih činjenica koje su eksperimentalno ustanovljene u vezi sa ovim zračenjem je da ima veliku prodornu moć. Ovo zračenje je 1912. godine austrijski fizičar Hes nazvao visinskim zracima. On je penjući se balonom ka višim slojevima atmosfere merio intenzitet nivoa prirodnog zračenja na raznim visinama time što je pratio brzinu razelektrisavanja elektroskopa kojeg je napunio na površini zemlje i poneo sa sobom u balonu.. Rezultati koje je Hes dobio pokazali su da se do 600 m nadmorske visine, brzina pražnjenja elektroskopa blago smanjivala, ali iznad te visine je kontinuirano počela da raste i to sve brže.

Na maksimalnoj visini koju je Hes dostigao, od 4800 m ustanovljeno je da se elektroskop prazni četiri puta brže nego na nivou mora. Hesova merenja opovrgla su pretpostavku da kompletan prirodni fon zračenja potiče od radionuklida koji ulaze u sastav zemljista i stena. Jasno je bilo da se uzrok tih procesa nalazi samo na Zemlji, intenzitet jonizacije vazduha (tj. Brzina pražnjenja elektroskopa) bi se smanjivao sa povećanjem visine. Kosmičko poreklo ovog zračenja je potvrđeno novim merenjima koja su sva i bez izuzetka pokazala da na većim visinama od 1000 m intenzitet jonizacije vazduha naglo raste. Takođe je pokazano u eksperimentu da intenzitet kosmičkog zračenja ostaje nepromenjen u zavisnosti od toga da li je dan ili noć, kao ni godišnje doba, pa se Sunce nije moglo smatrati izvorom ovog zračenja.

Balonom je kasnijim eksperimentima dostignuta visina od 8400 m, gde je jonizacija 10 puta intenzivnija nego na nivou mora.

Veštački sateliti su dali preciznije informacije: intenzitet zračenja se od maksimalne vrednosti koju dostiže na 22 km relativno brzo smanjuje, a nakon visine od 60km je potpuno konstantan, ne menjajući se s visinom.

Proučavanja su pokazala da kosmičko zračenje dospeva na zemlju iz svih pravaca kosmičkog prostora. Nakon serije preciznih merenja koje je izveo na raznim nadmorskim visinama, uglavnom na planinama, 1925. godine Miliken je ovom zračenju dao naziv koji se i danas koristi - kosmičko zračenje.

Sve do izgradnje snažnih akceleratora za ubrzavanje nanelektrisanjanih čestica, kosmičko zračenje je bilo jedini prirodni izvor čestica – projektila dovoljno velikih energija za obrazovanje raznih elementarnih čestica.

## **2.1. Primarno kosmičko zračenje**

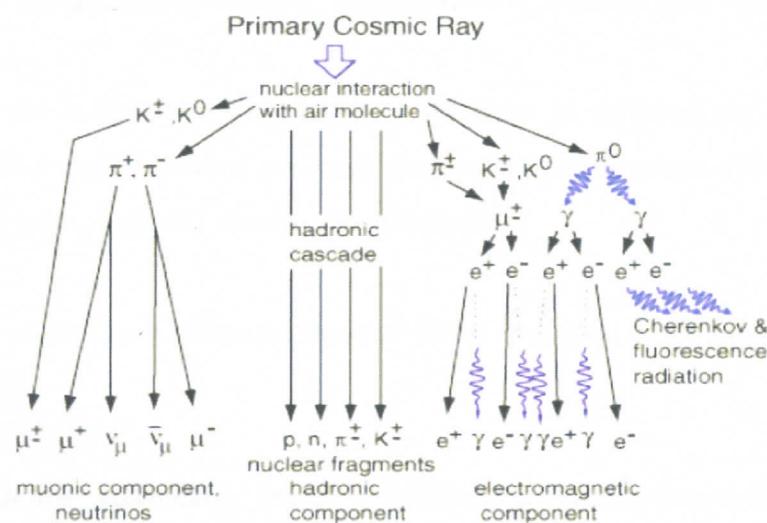
Kosmičko zračenje neprestano dospeva do Zemlje. Njega čine čestice ekstremno visokih energija koje putuju svemirom brzinom bliskoj brzini svetlosti. Čestice izvan zemljine atmosfere čine primarno kosmičko zračenje. Ulaskom u atmosferu, one se sudsaraju sa atomskim jezgrima, te stvaraju „pljuskove“ elementarnih čestica tzv. Sekundarno kosmičko zračenje.

U interakcijama u gornjim slojevima atmosfere ove čestice stupaju u interakcije sa atomima, ili tačnije rečeno jezgrima azota, kiseonika, argona kao i ostalih gasova.

Primarno kosmičko zračenje je korpuskularno zračenje, sa česticama izuzetno visoke energije, desetak MeV-a pa sve do  $10^{16}$  MeV. Najvećim delom, preko 90% ovo zračenje se sastoji od pozitivnih čestica – protona, potpuno ogoljenih jezgrara vodonika. Oko 7% čestica primarnog kosmičkog zračenja su alfa čestice, ili jezgra helijuma, dok ostatak čine ogoljena jezgra težih elemenata.

Po svom poreklu primarno kosmičko zračenje može biti intergalaktičko, galaktičko i solarno. Odakle čestice primarnog kosmičkog zračenja, pogotovo intergalaktičkog i galaktičkog bivaju emitovane i na koji način stiču visoke energije još uvek je jedno od polja izučavanja teorijske fizike. Solarno zračenje biva emitovano i sa površine Sunca od ove druge dve komponente kosmičkog zračenja se razlikuje po nižoj energiji kao i po varijacijama intenziteta karakterističnim za sunčeve cikluse.

Čestice primarnog kosmičkog zračenja ne uspevaju da se probiju duboko u atmosferu. Srednji slobodni put visoko energetskih protona u odnosu na interakciju sa jezgrom (putem kojih uglavnom i bivaju zaustavljeni na svom putu kroz atmosferu) je oko 1/13 ukupne debljine atmosfere.



Slika 1. Kosmičko zračenje razdvojeno po komponentama

To znači da primarno kosmičko zračenje, kao i nukleone i teže nanelektrisane čestice odlikuju snažne interakcije sa jezgrima. Iz tog razloga primarno kosmičko zračenje veoma retko uspeva da stigne do nižih slojeva atmosfere.

## 2.2. Sekundarno kosmičko zračenje

Prilikom interakcije čestica primarnog kosmičkog zračenja sa jezgrima atoma vazduha dolazi do burnih nuklearnih reakcija, i tom prilikom se stvaraju sve nama poznate elementarne čestice. Stvorene čestice na razne načine mogu da stupaju u nove reakcije, pa se na taj način

stvara sledeća generacija čestica. Po načinu interakcije čestice sekundarnog kosmičkog zračenja delimo na: nuklearno aktivnu, tvrdnu i meku grupu, sto se može videti na slici 1. U **nuklearno aktivnu grupu** spadaju hadroni. Čestice primarnog kosmičkog zračenja (najčešće protoni) putem jake interakcije sa jezgrima atmosfere intenzivno stvaraju  $\pi$  mezone, ali i kaone u malom broju (manje od 20% od ukupnog broja stvorenih čestica). U ovim interakcijama visokoenergetski protoni mogu da izazovu cepanje jezgra, pri čemu sam proton izgubi od 20% do 50% svoje početne energije. Nakon svake sledeće interakcije energija protona se umanji. Kada se energija protona spusti ispod 100MeV on vise ne stupa u nuklearne reakcije, već energiju gubi postepeno putem ionizacije.

Nuklearno aktivnom komponentom sekundarnog kosmičkog zračenja se nazivaju  $\pi$  mezoni i nukleoni, jer u interakcijama koje slede mogu takođe da stvaraju nove hadrone.

Neutroni mogu da učestvuju u nuklearnim reakcijama sa jezgrima do veoma niskih vrednosti energija. Naelektrisani  $\pi$  mezoni, pre nego što se raspadnu na mione i neutrina, takođe mogu da stupaju u reakcije sa jezgrom i stvaraju nove hadrone.

Na nivou mora, od ukupnog sekundarnog kosmičkog zračenja, manje od 1% sačinjavaju nuklearno aktivne čestice.

**Tvrdu komponentu** kosmičkog zračenja sačinjavaju visokoenergetski mioni, koji nastaju iz raspada nanelektrisanih piona. Mioni veoma slabo interaguju sa jezgrom, zbog čega ne stvaraju veliki broj čestica kao što je slučaj sa nuklearno aktivnim česticama. Takođe zbog slabe interakcije sa jezgrom svoju energiju gube isključivo putem ionizacije, sve dok se ne raspadnu na elektron (ili pozitron) sa odgovarajućim neutrinima.

Kako im je vreme života relativno dugo, reda veličine  $10^{-6}$  s, imaju dovoljno vremena da dodu do zemljine površine. Zbog svoje velike mase i radijacioni gubici su im mali, tako da uspevaju da prodru duboko u zemlju. Naziv tvrda komponenta potiče od toga što ova komponenta ima veliku prodornu moć. Olovo debljine i nekoliko desetina centimetara ne može je potpuno zaustaviti (apsorbovati).

**Meku komponentu** čini veliki broj čestica koje se umnožavaju počev od visokih slojeva atmosfere, gde se odigrala primarna interakcija, pa sve do površine zemlje. A to su lavina

elektronsko-pozitronskih parova, nastalih raspadom miona(2.5), i fotoni nastali u raspadu neutralnog piona ( $\pi^0$  mezona :  $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ ), kao i naglog zaustavljanja brzih elektrona, prilikom prolaska pored jezgra atoma vazduha. Vreme života neutralnog piona je veoma kratko,tako da se on raspada ubrzo nakon nastanka, a nastali visokoenergetski fotoni u polju neke druge čestice stvaraju elektronsko-pozitronske parove. Pozitron nakon anihilacije stvara novo gama zračenje, dok elektron može da emituje zakočno zračenje. Ovaj ciklus se odigrava sve dok energija  $\gamma$ -fotona ne postane nedovoljna za stvaranje parova.

Pošto prosečna energija čestica meke komponente sekundarnog kosmičkog zračenja nije velika, one se gotovo potpuno zaustavljaju olovom debljine desetak centimetara.

Primarna energija čestice kosmičkog zračenja se podeli na veliki broj sekundarnih čestica. Procena je da jedan proton energije  $10^8$  MeV nakon interakcije na jezgru na visini 20-25km stvara ukupno  $10^9$  čestica koje su se lavinski umnožile da bi se konačno na nivou mora raspodelile po površini na nekoliko kvadratnih kilometara. Međutim do površine zemlje stižu samo tvrda i meka komponenta kosmičkog zračenja a to su mioni, elektroni i fotoni.

### **2.3. Mioni**

Mion je negativno nanelektrisana elementarna čestica, slična elektronu. Nanelektrisanje miona je po apsolutno vrednosti jednak elementarnom nanelektrisanju.

Istorijsko ime miona,  $\mu$ -mezon, može dovesti do zabune jer nije reč o mezonu, već leptonu.

Mioni imaju masu:  $m_\mu = 206.7683(1)m_e$ ,

Vreme života miona iznosi:  $2.197 \times 10^{-6}$  s

Kvantni broj spina miona  $s\mu = 1/2$ , dakle mion je fermion.

Eksperimentalno je potvrđeno da se mion u osnovi ponaša kao teški elektron. Kasnjom klasifikacijom elementarnih čestica mion je svrstan među leptone, zajedno sa elektronom.

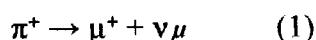
Kao i sve elementarne čestice, tako i mion ( $\mu^-$ ) ima odgovarajuću antičesticu suprotnog nanelektrisanja, ali iste mase i spina, takozvani antimion ( $\mu^+$ ). Mioni najveći deo energije gube jonizacijom pre raspada.

## **2.4. Stvaranje miona u kosmičkom zračenju**

Nakon interakcije primarnog kosmičkog zračenja sa jezgrima atoma gornjih slojeva stvaraju se  $\pi$  - mezoni ( $\pi^+$  i  $\pi^-$ ).

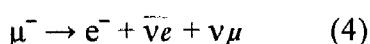
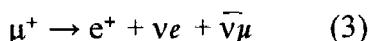
Zbog veoma kratkog vremenskog života ovi  $\pi$  – mezoni se brzo raspadaju, pa samo mali broj njih stigne do nivoa mora. Njihovim raspadom nastaju nove čestice:  $\mu$  - mezoni ili mioni koji čine prodornu komponentu sekundarnog kosmičkog zračenja.

Raspadom  $\pi$ - mezona u stanju mirovanja, emituju se mion sa energijom oko 4,1 MeV, kao i mionski neutrino. Raspad nanelektrisanih piona dat je relacijama (1) i (2).



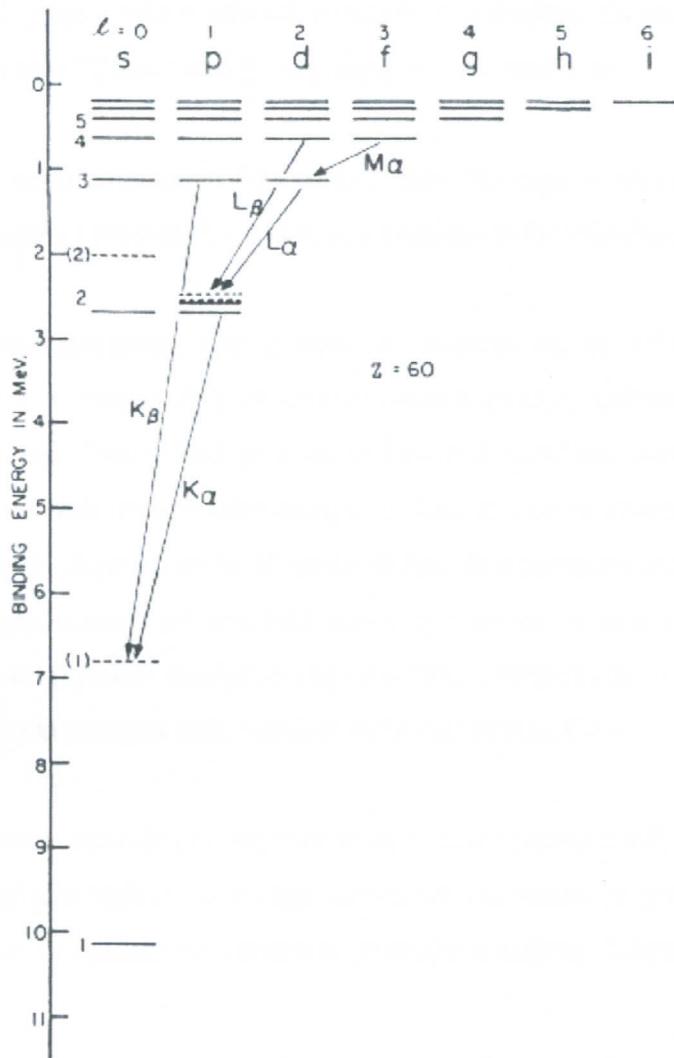
## **2.5. Interakcije miona sa jezgrom**

Mioni su nestabilne čestice i raspadaju se putem slabe interakcije, uz emisiju elektrona ili pozitrona i jednog mionskog antineutrina i elektronskog neutrina. Najveći broj miona se raspadne na ovaj način (98,6%).



Mion se ponaša kao teški elektron i postoji verovatnoća da bude zahvaćen od strane atoma. U tom slučaju mioni kao i elektroni zauzimaju mesta na orbitalama kvantizovane energije. Prilikom prelaska miona sa višeg na niži energetski nivo dolazi do emisije

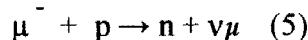
elektromagnetsnog zračenja, baš kao i u slučaju kada to rade elektroni. Jedina razlika je u tome da su energije miona, zbog njihove veće mase od mase elektrona znatno više na atomskim orbitalama pa prilikom njihovih prelazaka sa viših na niže nivoe biva emitovana energije u oblasti od nekoliko desetina pa do nekoliko stotina keV. Kolike se energije emituju prilikom mionskih prelaza u orbitama  $Z=60$ ( neodijuma) može se videti na slici 2.



Slika 2. prelazi miona na orbitalama neodijuma

Mioni uglavnom bivaju zahvaćeni od strane atoma i vezani za više energetske orbitale. Nakon sukcesivnih prelazaka ka nižim energetskim stanjima, mioni dospevaju do K orbitale, odakle mogu biti zahvaćeni od strane jezgra. Ovo je proces potpuno analogan elektronском zahvatu i odvija se pod dejstvom slabe interakcije.

Njegova masa je oko dvesta puta veća  $\left(\frac{m_\mu}{m_e} = 206,7683 (1)\right)$  od mase elektrona, pa samim tim orbitira bliže jezgru atoma, pa je verovatnoća za zahvat veća. Proces koji se dešava u jezgru je:



Najčešći je slučaj da jezgro nakon zahvata miona biva pobuđeno do visokih energije pa se viška energije rešava u najvećoj meri emisijom jednog ili više neutrona.

Ovi neutroni su predmet izučavanja diplomskog rada. Stvaraju se na svim mestima dokle mogu da dopru kosmički mioni i predstavljaju ozbiljan problem svih niskofonskih laboratorijskih.

U niskofonskim laboratorijskim gde je osnovni zadatak da se eliminišu svi mogući doprinosi fonskog zračenja, mionima je posvećena posebna pažnja. Laboratorijske na površini zemlje su izložene mionskom fluksu koji je i za sedam redi veličine veći od fluksa miona merenog u nekim dubokim podzemnim laboratorijskim, kao što se to može videti u tabeli 1. Prilikom prolaska kroz debele slojeve zemlje ili stena, dolazi do apsorpcije miona nižih energija. To znači da do dubokih podzemnih laboratorijskih dospevaju mioni veoma visokih energija. U tabeli 1. se može videti da na površini zemlje srednja mionska energija iznosi oko 4 GeV, dok je u podzemnim laboratorijskim ta energija reda veličine nekoliko stotina GeV.

Srednja energija miona ukazuje i na najverovatnije načine putem kojih mioni interagiju sa jezgrom. Mioni niskih energija uglavnom bivaju zahvaćeni od strane jezgra, dok mioni viših energija uspevaju da izazovu i spalacione nuklearne reakcije u kojima dolazi do cepanja jezgra na nekoliko fragmenata.

	Depth (cm <sup>-1</sup> )	$\sigma_L \left( \frac{\mu}{m^2 \cdot h} \right)$	$\langle E_L \rangle (\text{GeV})$
Sea level	0	$6,0 \times 10^5$	4
500mVe	500	610	100
Kamioka	2700	9,6	285
Gram Sasso	3800	1,2	320
SNOLab	6000	0,012	350

Tabela 1. Energije miona u zavisnosti od dubine

Jedan od ciljeva ovog rada je da se na osnovu energije neutrona stvorenih u gvozdenoj zaštiti detektora proceni koji je mehanizam njihovog stvaranja dominantan: zahvat miona ili neke druge direkthe nuklearne reakcije kojom prilikom nastaju neutroni znatno viših energija.

Energije neutrona emitovanih nakon mionskog zahvata su merene i ustanovljeno je da se kreću do nekoliko MeV-a. Tačan oblik energetskog spektra neutrona se može opisati relacijom:

$$\frac{dN(E)}{dE} \approx E^{5/11} \cdot e^{-E/\theta}$$

### **3. NEUTRON**

Neutroni, zajedno sa protonima predstavljaju osnovne čestice od kojih su izgrađena atomska jezgra. Zbog svojih osobina neutron je veoma značajan za nuklearnu fiziku. Lako prodire u atomska jezgra i izaziva razne nuklearne reakcije, kao i proces nuklearne fisije. Baš zbog ove činjenice neutronu je posvećena posebna pažnja. Mogućnost cepanja jezgra putem zahvata neutrona od strane teških jezgara je proces kome je u 20. veku verovatno posvećena najveća pažnja u nuklearnoj fizici. Znanja o neutronima i njihovom ponašanju igra bitnu ulogu u razvoju nuklearne tehnologije, nuklearnih reaktora ali i nuklearnog oružja.

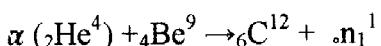
#### **3.1. Otkriće neutrona**

Postojanje neutra predviđao je Raderford 1922. godine svojim planetarnim modelom atoma. Nedugo zatim, 1931. godine u Nemačkoj izvođeni su eksperimenti u kojima je otkriveno da visokoenergetske alfa čestice, emitovane iz polonijuma, prilikom interakcija sa jezgrima nekih lakih elemenata kao što su berilijum (Be), bor (B), ili litijum (Li) dovode do stvaranja neobično prodornog zračenja. U početku se verovalo da je u pitanju gama zračenje, iako je bilo mnogo prodornije od bilo kog do tada poznatog gama zračenja.

Sledeći važan doprinos dogodio se 1932. godine, kada su Irena Žolio – Kiri i Frederik Žolio pokazali da ako ovo nepoznato zračenje padne na parafin ili bilo koje jedinjenje koje sadrži vodonik, dolazi do emisije protona veoma visokih energija. Ovo se nije moglo objasniti do tada poznatom prirodom gama zračenja.

Iste 1932. godine Džeјms Čedvik je izveo seriju eksperimenata kojima je pokazao da je hipoteza koja tvrdi da je u pitanju gama zračenje neodrživa. Pretpostavio je da se ovo zračenje sastoji od ne nanelektrisanih čestica, sa masama bliskim masi protona. Ove čestice kasnije su nazvane neutroni.

Eksperiment kojim je Čedvik detektovao neutron, sastojao se u bombardovanju berilijuma (Be) alfa česticama. Ova reakcija se može predstaviti na sledeći način:



Uspeh detekcije sastoji se u tome što je Čedvik na put „nevidljivim zracima“ u pravcu ka detektoru postavio lake elemente koji su sadržavali znatnu količinu vodonika. Neutroni, kako je danas poznato, imaju masu skoro jednaku masi protona. To znači da u sudarima sa protonima neutroni mogu da izgube svoju kompletну energiju, dok prilikom interakcija sa težim jezgrima predaju samo manji deo svoje energije. Protone koji su u Čedvigovom eksperimentu primili energiju od neutrona je bilo jednostavno detektovati pošto poseduju naveliktrisanje i interaguju sa materijom na način koji je fizici u to doba bio poznat.

Pokazano je merenjem da masa neutrona iznosi:

$$m_n = 1,0086654 \text{ ajm}$$

Masa protona je nešto manja i ima vrednost:

$$m_p = 1,0072766 \text{ ajm}$$

Pri čemu je  $\text{ajm}$  = atomska jedinica mase, definisana kao  $1/12$  mase jezgra  ${}^{12}\text{C}$ .

Neutroni su probudili veliko interes fizičara pošto su njihovim otkrićem dobili česticu kojom su mogli efikasnije da ispituju jezgro. Alfa čestice imaju pozitivno električno naveliktrisanje i kada bi se njima bombardovala atomska jezgra one bi bile odbijene, zbog pozitivnog naveliktrisanja jezgra. Kod teških elemenata Kulonovska barijera je još veća, pa alfa čestice nisu mogle da prodru u takva jezgra ni sa većim energijama bombardovanja. Neutroni su mogli da dođu do atomskih jezgara težih elemenata jer za njih nije postojala Kulonovska barijera, pošto su bez naveliktrisanja.

U prvim eksperimentima koji su ubrzo usledili ustanovljeno je da neutroni mogu izazvati razne procese u jezgrima, pa čak i razbiti jezgra najtežih nelemenata. Čedvikovo otkriće je predstavljalo malu revoluciju, jer je omogućilo stvaranje elemenata težih od uranijuma, a takođe

je inspirisalo Enrika Fermija da otkrije nuklearne reakcije sa sporim (termalnim) neutronima, kao i Lizu Majtner da otkrije nuklarnu fisiju. Čedvik je 1935. godine dobio Nobelovu nagradu za fiziku, za otkriće neutrona.

### **3.2. Osobine neutrona**

Neutron je subatomska čestica, pri čemu ovaj pojam obuhvata sve čestice manje od atoma, bez obzira na njihovu složenost.

Masa neutrona  $m_n = 1,00867 \text{ ajm} = 939,6 \text{ Mev} = 1838,6 \text{ me} = 1,6749 \times 10^{-27} \text{ kg}$

Spin neutrona je  $\frac{1}{2}$

Neutron je sastavni deo jezgra svakog atoma, osim najrasprostranjenijeg izotopa vodonika, čije se jezgro sastoји samo od jednog protona. Neutron je čestica koja ne sadrži električno nanelektrisanje, međutim u njegovoj unutrašnjosti postoji raspodela pozitivnog i negativnog nanelektrisanja, zbog čega neutron poseduje magnetni momenat, koji je negativan i iznosi:

$\mu_n = -1,9130427 (5)$  nuklearnih magnetona

a električni dipolni momenat:

$$\left| d_{n/c} \right| < 5 \times 10^{-25} \text{ m}$$

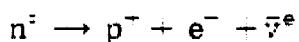
Antimaterijski ekvivalent neurona je antineutron.

Neutroni se klasificuju kao **barioni** i sastoje se od 3 kvarka, dva „*down*“ kvarka i jednog „*up*“ kvarka.

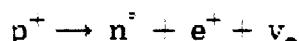
Neutrona nema slobodnih u prirodi, jer su van jezgra atoma nestabilni, sa vremenom poluraspada:

$$\tau = 885,7 \pm 0,8 \text{ s}$$

Slobodni neutron prelazi u proton emitujući elektron i antineutrino. Ovaj vid raspada naziva se beta raspad, koji možemo prikazati relacijom:



Proton takođe, može da se transformiše u neutron putem pozitronskog beta raspada. Ova transformacija je praćena emisijom pozitrona (antielektrona) i neutrina (umesto antineutrina):



Transformacija protona u neutron unutar jezgra je takođe moguća i odigrava se putem zahvata elektrona:



Beta raspad, elektronski i pozitronski, kao i zahvat elektrona su vrsta radioaktivnog raspada i sva tri se odvijaju pod dejstvom slabe interakcije.

Slobodni neutron na Zemlji traje mnogo kraće od njegovog vremena fizičkog poluraspada, reda dela sekunde, jer zbog svoje električne neutralnosti lako prodire u atomska jezgra okolnih supstanci izazivajući razne nuklearne reakcije u kojima nestaje.

Neutron učestvuje u svim oblicima i interakcija: elektromagnetnoj nuklearnoj slaboj, nuklearnoj jakoj i gravitacionoj interakciji.



Podela neutrona po energijama:

Naziv:	opseg energije	Naziv:	opseg energije
ultra hladni	$<2 \times 10^{-7}$ eV	rezonantni	(1-100) eV
veoma hladni	$(2 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-5})$ eV	srednje energije	(1-500) keV
hladni	$(5 \times 10^{-5} - 0,025)$ eV	brzi	(0,5-10) MeV
termalni	oko 0,025 eV	veoma brzi	(10-200) MeV
epitermalni	$(0,025-1)$ eV	ultrabrizi	$>200$ MeV

Tabela 2.: Raspodela neutrona po energijama

### 3.3. Izvori neutrona

U laboratorijskim uslovima, kada nisu potrebni ekstremno visoki fluksevi neutrona, mogu se koristiti dva osnovna izvora čiji se princip rada zasniva na nuklearnim reakcijama koje oslobađaju neutron.

#### A. Posebnu vrstu neutronskeih izvora omogućuje reakcija



To je egzoergična reakcija koja ima zadovoljavajući prinos i sa alfa česticama energije nekoliko MeV, kolika je energija alfa čestica emitovanih pri alfa radioaktivnom raspadu. Zbog toga se kao izvor alfa čestica za ovu reakciju koriste prirodni i veštački radioaktivni izotopi kao što su  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  i drugi.

$^9\text{Be}$  je jedini prirodni izotop berilijuma. Izvori neutrona sa ovom reakcijom se grade tako što se prah berilijuma i alfa emitera pomeša u odnosu 20:1 do 300:1 i zatvara u kapsulu koja stalno emituje neutrone i to oko 50 neutrona na svakih  $10^6$  alfa čestica. Emitovani neutroni imaju širok spektar energija od 0 do oko 10MeV.

B. Drugi tip izvora neutrona zasnovan je na reakciji gde je projektil foton.

U reakcijama ovog tipa X ( $\gamma$ , n) Y se kao meta najčešće koristi berilijum ili teški vodonik (npr. teška voda) pošto oni imaju malu energiju veze neutrona. To su endoergične reakcije za koje je potrebno utrošiti energiju jednaku energiji veze neutrona u jezgru X.

To su reakcije:



Kao izvor fotona se mogu koristiti radioaktivni izotopi, čije gama zračenje ima dovoljno visoku energijum kao npr.:

$$^{24}\text{Na} (E_\gamma = 2,8 \text{ MeV}, T_{1/2} = 15,0 \text{ h})$$

Zbog prodornosti gama zraka meta i izvor projektila se ne moraju fino mešati, već se u telo od materijala mete ubacuje kapsula sa radioaktivnim izvorom. Ako se raspolaže sa fotonima energije nekoliko MeV (dobijenih npr. u akceleratorima) mete za ovu reakciju mogu biti i drugi materijali.

Za slučaj kada su potrebni visoki fluksevi neutrona, neophodni su reaktori. U ovom slučaju neutroni nastaju u fisionoj reakciji. Najveći broj primena neutronskog zračenja je ostvarena baš upotreboom reaktora.

#### 4. FISIJA

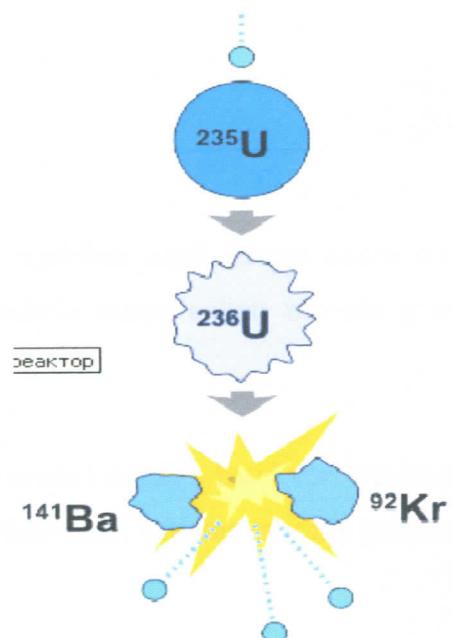
Danas je poznato da postoji više od 10.000 različitih nuklearnih reakcija od kojih svaka ima određeni naučni značaj.

Nuklearna fisija, takođe poznata i kao atomska fisija, je proces deljenja teških jezgara na dva ili više manjih jezgara ili fisionih fragmenata i obično još nekoliko čestica, kao što je pokazano na slici 3.

Čestice koje se osim fisionih fragmenata emituju u procesu fisije mogu biti neutroni, zatim fotonii (obično u obliku gama zraka), kao i alfa i beta čestice. Proces nuklearne fisije je egzoterna reakcija i tom prilikom se oslobađaju velike količine energije i to u dva oblika: kao energija gama zraka i kao kinetička energija fragmenata fisije.

Svoju praktičnu primenu fisija je ubrzo dobila u proizvodnji električne energije u nuklearnim reaktorima, kao i za iniciranje eksplozije u nuklearnom oružju.

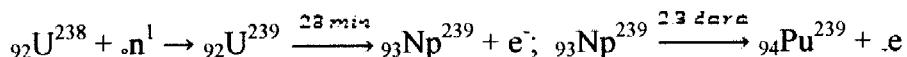
Kao izvor energije proces fisije se koristi u nuklearnim elektranama kada se određena teška jezgra, koja nazivamo nuklearnim gorivom, nakon zahvata termalnog neutrona dele na dva fragmenta i tom prilikom proizvode nove neutrone kao delove fisionog procesa. Ovi neutroni pod određenim uslovima započinju novu fisiju.



Slika 3. Zahvat neutrona i proces fisionog raspada jezgra  $\text{U}-236$  na dva lakša jezgra i neutrone.

Na taj način nuklearno gorivo može da bude deo samoodržavajuće nuklearne reakcije koja se obično naziva lančana reakcija. U ovim reakcijama se oslobađa energija kontrolisanom brzinom u nuklearnom reaktoru. Do oslobadjanja velikih iznosa fosione energije i to izuzetno velikom nekontrolisanom brzinom dolazi u nuklearnom oružju.

Na uraniju je prvi put primećena nuklearna fisija. Uranijum se i danas najčešće koristi kao gorivo u nuklearnim elektranama. Najznačajnija nuklearna goriva danas su pored uranijuma još i torijm i plutonijum. Od posebnog su značaja izotopi  $U^{235}$ ,  $U^{233}$ ,  $Pu^{239}$ , koji doživljavaju fisiju kada su pogodeni termalnim neutronima.  $U^{235}$  je prirodno fisiono jezgro, dok se ostala dva dobijaju iz obogaćenih goriva  $Th^{232}$ ,  $U^{238}$ .



Iznos slobodne ili raspoložive energije u nuklearnom gorivu je milion puta veća od slobodne energije koja se sadrži u istoj masi hemijskog goriva (benzin), zbog čega je nuklearna fisija veoma privlačan izvor energije. Međutim otpadni proizvodi nuklearne fisije su veoma radioaktivni i takvi ostaju hiljadama godina čime se uvećava problem nuklearnog otpada.

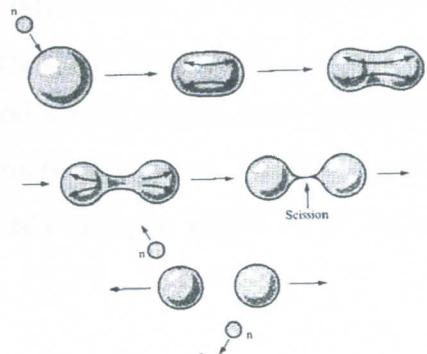
#### 4.1. Mehanizam odvijanja procesa fisije

Proces cepanja jezgra uspešno se može opisati *modelom kapi*. Prema ovom modelu jezgro, analogno kapi tečnosti, kada se dovede u pobuđeno stanje nakon zahvata neutrona započinje oscilacije oblika, kao što je pokazano na slici 4.

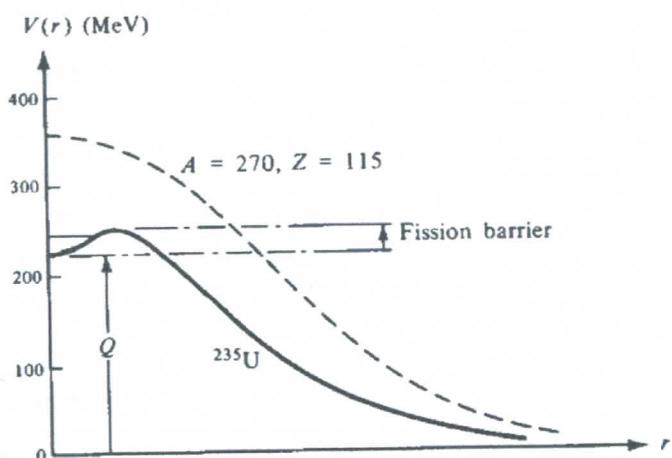
U nuklearnoj reakciji fisije neutron predaje jezgru svoju kinetičku kao i vezivnu energiju, usled čega se ono deformiše, u većoj ili manjoj meri u zavisnosti od veličine energije pobude.

Površinske sile teže da vrate jezgro u prvobitanski položaj minimuma potencijalne energije.

Ovim silama se suprotstavljaju odbojne Kulonove sile, koje pri jačim deformacijama jezgra i dovoljnim energijama pobude, razdvajaju dva fragmenta jedan od drugog.



Slika 4. Deformacije jezgra koje dovode do njegovog cepanja



Slika 5. Potencijalna energija fisionih fragmenata u zavisnosti od rastojanja među njima

Prepostavimo da su se nukleoni u jezgru podelili na dva dela. Porastom rastojanja između dva fisiona fragmenta raste njihova potencijalna energija usled dejstva jakih nuklearnih sila, i dostiže maksimum stvarajući potencijalnu barijeru. Za savlađivanje iste, jezgru je potrebno predati izvesnu količinu energije, koju nazivamo **aktivaciona energija**.

Za energije pobude veće od visine potencijalne barijere, jezgro će doživeti fisiju, međutim za manje energije, ono će se oslobođiti viške energije bez podele na dva jezgra manje mase.

Prema modelu kapi stabilnost teških jezgara zavisi od odnosa  $Z^2/A$ , pri čemu je  $Z$ -atomski broj(broj protona), a  $A$ -maseni broj(ukupan broj protona i neutrona u jezgru). Za vrednosti koje se kreću od 45 do 50, jezgra doživljavaju spontanu fisiju. Kod takvih jezgara kriva potencijalne energije, prikazana na slici br. 5., uopšte nema ni maksimuma ni minimuma. Što je odnos  $Z^2/A$  niži, viša je potencijalna barijera, pa je potrebno dovesti veću energiju jezgru da bi doživela fisiju.

Kada su postignuti uslovi za fisiju, dolazi do cepanja jezgra pri čemu se oslobođaju velike količine energije.

#### Raspodela energije oslobođene u fisionom procesu

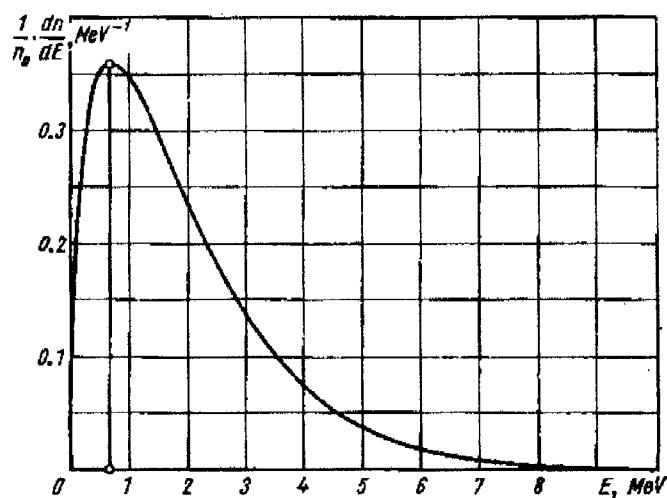
Nosilac energije	emitovana energija (MeV)
1. Fisioni fragmenti	168
2. Gama zraci iz fisije	7
3. Radioaktivni raspad fisionih fragmenta	
Beta zračenje	7
Gama zračenje	6
Neutrino	7
4. Fisioni neutroni	5
Ukupno (MeV)	$\approx 200$

*Tabela 3. Raspodela energije oslobođene u fisionom procesu*

#### 4.2. Fisioni neutroni

Neutroni emitovani u fisionim procesima nazivaju se fisioni neutroni. Od ukupne energije emitovane u fisiji od oko 200 MeV, neutroni nose u obliku kinetičke energije samo mali deo, oko 5 MeV (tabela 3.). Neutroni emitovani pri fisiji su znači brzi neutroni.

Njihova srednja energija iznosi oko 2 MeV, ali oni, statistički posmatrano, poseduju čitav spektar energija od 0 pa do oko 10 MeV, sa maksimumom na oko 0,85 MeV (slika 6).



Slika 6. Energetska raspodela neutrona iz fisije

Ovaj spektar se može opisati pomoću semiempirijske relacije:

$$r(E) = 0,453 e^{-103.6 E} \text{ sh} \sqrt{2,29 E} \quad E = \text{energija neutrona u MeV}$$

Ovi neutroni mogu biti usporeni do termalnih energija putem razmene kinetičke energije u sudarima sa objektima koji imaju sličnu masu neutrona. Najefikasniji moderatori su materijali koji imaju velik procenat vodonika u svom sastavu. Energetski spektar termalnih neutrona takođe se može opisati Maksvelovom distribucijom, ali na mnogo nižim energijama.

#### 4.3. Spontana fisija

Spontana fisija ili spontani raspad je oblik radioaktivnog raspada kod teških atoma. Jezgro se kao i kod fisije izazvane zahvatom neutrona raspade na dva manja fragmenta velike energije (tabela 3.) uz otpuštanje neutrona. Jezgra koja mogu da dožive spontanu fisiju ni ne poseduju fisionu barijeru. Proces fisije se odvija spontano usled deformacije fisionog jezgra bez prethodnog sudara sa neutronom ili bilo kakvog drugog spoljašnjeg faktora.

Matematički formulisan kriterijum za spontan raspad dat je kao:

$$Z^2/A \geq 45$$

Z – atomski broj = ukupan broj protona

A – maseni broj = ukupan broj protona i neutrona u jezgru

Prema pomenutom modelu kapi površinski efekat koji zadržava jezgro u prvobitnom stanju suprotstavlja se odbojnim kulanovim silama koje iniciraju fisiju jezgra. Aktivaciona energija koju je potrebno dovesti jezgru da bi došlo do fisije srazmerna je razlici ova dva efekta, a jednačina za to glasi:

$$E_a = A^{2/3} - \left( 14.1 - \frac{0.62}{Z} \frac{Z^2}{A^{1/3}} \right) \times \text{constant}$$

U cilju odigravanja spontane fisije aktivaciona energija mora biti jednaka nuli, odakle i dobijamo navedeni uslov za spontanu fisiju.

$$E_a = 0 = 14.1 A^{2/3} - \frac{0.62}{2} \frac{Z^2}{A^{1/3}} \Rightarrow \frac{Z^2}{A} = \frac{14.1}{0.62/2} \cong 45$$

U reakciji spontane fisije oslobađaju se neutroni, pa ona može da dovede do lančane reakcije.

Radioaktivni izotopi koji imaju spontanog raspada često se koriste kao neutronski izvori. U tu svrhu, najčešće korišćeni izvor neutrona je kalifornijum Cf – 252.

#### 4.4. Kalifornijum

Kalifornijum spada u grupu metalnih hemijskih elemenata.

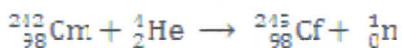
Simbol: Cf

Atomski broj: Z = 98

Standarna atomska težina: 251 gmol<sup>-1</sup>

Kalifornijum je radioaktivni transuranski element. Ovaj element je proizведен 1950. godine na univerzitetu u Berkliju.

Prvi izotop ovog elementa koji je otkriven je:

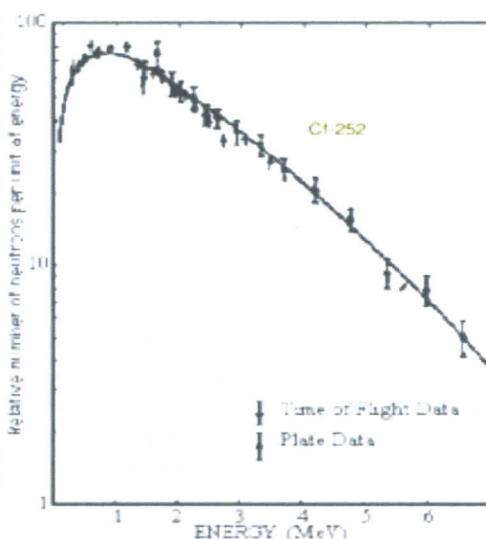


Do sada je otkriveno šesnaest izotopa kalifonijama sa masenim brojevima brojevima između 240 i 255.

Najstabilniji izotopi:

Izotopi	Zastupljenost u prirodi	Vreme poluraspada	Načini raspada
Cf-248	Veštački	333,5 dana	SF, $\alpha$
Cf-249	Veštački	351 godina	SF, $\alpha$
Cf-250	Veštački	13,08 godina	$\alpha$ , SF
Cf-251	Veštački	898 godina	$\alpha$
Cf-252	Veštački	2.645 godina	$\alpha$ , SF
Cf-253	Veštački	17.81 dana	$\beta^-$ , $\alpha$
Cf-254	Veštački	60.5 dana	SF, $\alpha$

Kao izvor neutronskog zračenja najčešće se koristi izotop Cf – 252 koji ima period poluraspada 2.645 godina. Energetski spektar neutrona emitovanih iz izotopa Cf-252 je pokazan na slici 7. Ovaj izotop se raspada alfa- raspadom sa 96,9%, dok sa preostalih 3,1% raspada podleže spontanoj fisiji.



Slika 7. Energetski spektar neutrona emitovanih iz Cf - 252

Svakim spontanim raspadom emituje prosečno 3,77 neutrona po fisiji. Jedan mikrogram spontano emituje 2,314 miliona neutrona u sekundi, a jedan gram emituje 39W topote.

Obrazac za energetski spektar fisionih neutrona je sledeći:

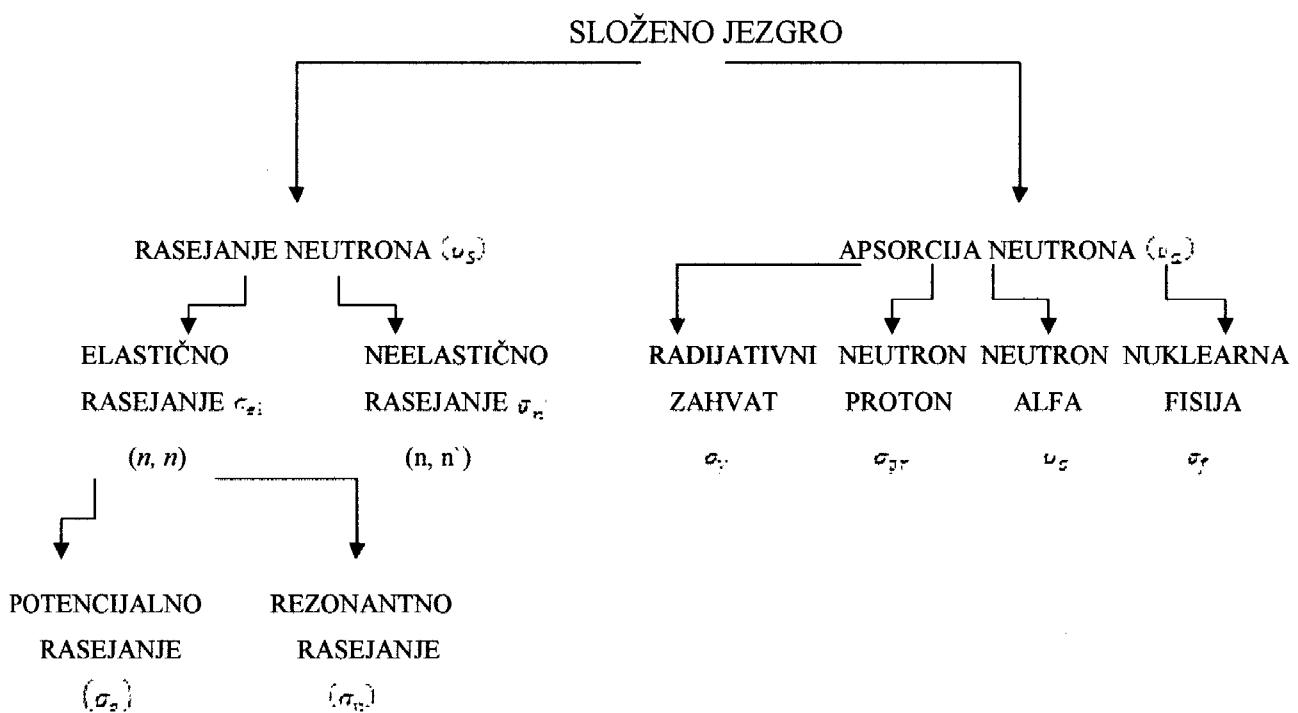
$$\chi(E) = 0.6680 \sqrt{E} \exp(-E/1.42),$$

pri čemu ova spektralna raspodela važi za energije do 6MeV.

## 5. INTERAKCIJE NEUTRONA

Interakcija slobodnog neutrona i atoma vrši se skoro isključivo preko interakcije neutrona sa atomskim jezgrom. Zbog svoje električne neutrona praktično ne interaguje sa atomskim omotačem, ali zato lako prodire u polje atomskog jezgra izazivajući razne nuklearne reakcije.

Sve reakcije između neutrona (energije od nekoliko MeV) i jezgra nastaju kao posledica stvaranja složenog jezgra. Neutron prodire u jedro  ${}^AX$  i vrlo kratko vreme, reda  $10^{-13}$ s, postoji sistem  ${}^{A+1}X$ , koji je pobuđen energijom veze neutrona i kinetičkom energijom koju je neutron uveo u jezgro. Ovo složeno jezgro se raspada a vrsta raspada određuje tip nuklearne reakcije. Verovatnoća za raspad složenog jezgra na dati način određuje efikasni presek za datu reakciju  $\sigma_r$ . Jedina reakcija gde ne dolazi do formiranja složenog jezgra je potencijalno rasejanje neutrona. Pri neelastičnom rasejanju neutrona dolazi do stvaranja složenog jezgra i u tom procesu se emisije neutron, ali rezidualno jezgo ostaje pobuđeno na nekom od svojih energetskih nivoa. Energetski prag ovog procesa je da neutron mora da poseduje kinetičku energiju jednaku najmanje energiji prvog energetskog nivoa jezgra sa kojim se sudara.



## 6. REZULTATI

### 6.1. Opis aparature

Eksperimentalni deo ovog rada je urađen na jednom od HPGe detektora laboratorije za nuklearnu fiziku u Novom Sadu.

Pomenuti germanijumski detektor (n-type, coaxial closed end) je smešten u pasivnu gvozdenu zaštitnu komoru. Kao najpogodniji zaštitni materijal je izabранo gvožđe (Fe), proizvedeno pre II svetskog rata, koje ne sadrži fisione produkte iz vazdušnih nuklearnih proba. Ukupna količina gvožđa oko detektora je 20 tona. Komora je izrađena u obliku kocke. Debljina zidova komore iznosi 25 cm, a korisna zapremina  $1 \text{ m}^3$ . Relativna efikasnost HPGe detektora je 25%. Aktivna zapremina je sam kristal germanijuma(Ge) i smešten je odprilike u centru komore. Detektor u gvozdenoj zaštiti je prikazan na slici 8.



*Slika 8. HPGe detektor u gvozdenoj zaštiti*

## 6.2. Merenje

Opisanim detektorskim sistemom je izvršeno snimanje fonskih spektara kao i spektara dobijenih u prisustvu izvora neutrona.

Mereni spektri su beleženi višekanalnim analizatorom „Genie“ proizvođača „Camberra“ u 16000 kanala. Intenziteti gama linija u izmerenim spektrima su određeni pomoću softvera za obradu spektara „Aptec“.

Posebna pažnja posvećena je detekciji i analizi gama linije od 846,8 keV, koja je najintenzivnija, a zatim i gama linijama od 1037,9 keV, 1238,3 keV, 1810,8 keV.

### **6.2.1. Fonski spektri**

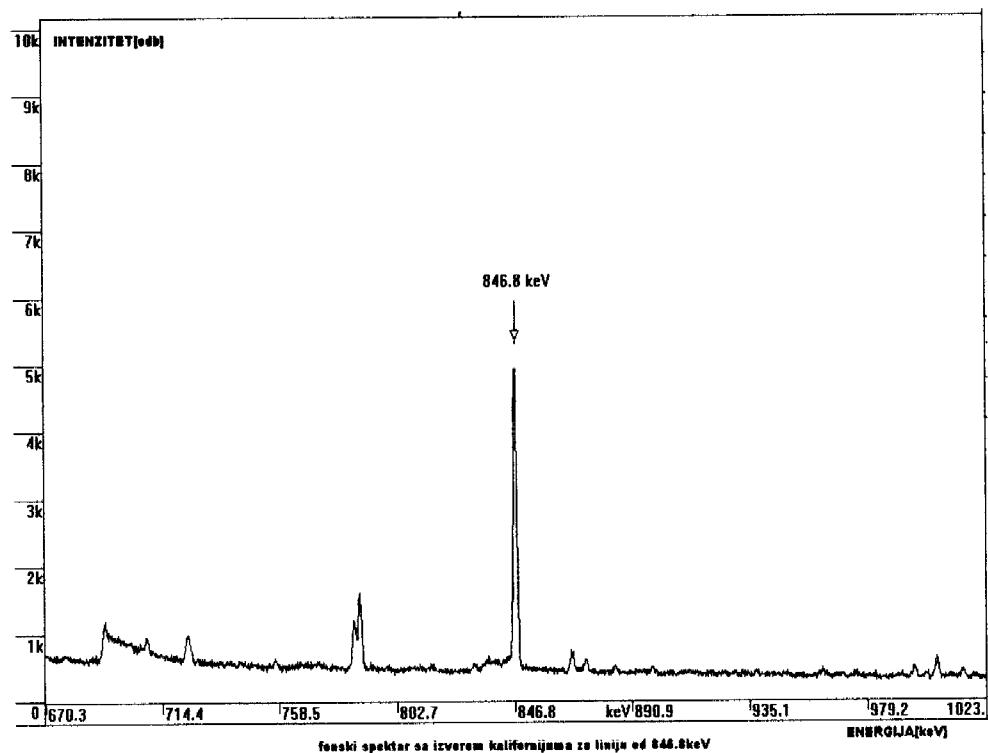
U cilju određivanja fona datog detektorskog sistema izvršeno je snimanje spektara u odsustvu bilo kakvog izvora zračenja u okolini detektora. U radu su analizirane pomenute gama linije za koje se smatra da se u spektrima javljaju usled interakcije kosmičkog zračenja sa gvožđem od koga je načinjena pasivna zaštita germanijumskog detektora. Spektri izmereni tokom jedne nedelje su sabirani da bi nakon toga za svaki od njih bio određen intenzitet gama linije od 846,8keV. Na taj način je analizirana vremenska promena intenziteta te linije.

### **6.2.2. Spektri mereni uz prisustvo izvora neutrona**

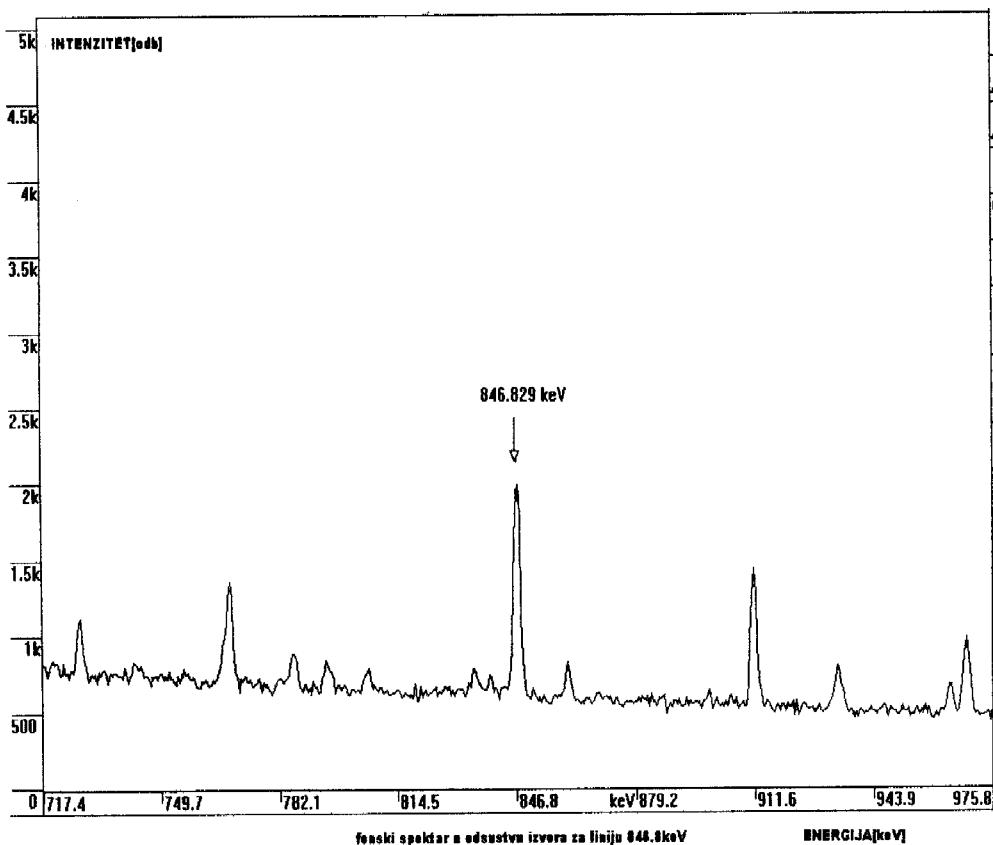
U sledećoj fazi eksperimenta je izvršeno snimanje spektra u prisustvu izvora neutrona. U tu svrhu, kao najpogodniji fisioni izvor, upotrebljen je kalifornijum  $^{252}\text{Cf}$ , čiji je energetski spektar veoma dobro poznat. Izvor je postavljen ispred samog detektora. Detektovane su i analizirane iste gama linije od 846,8 keV, 1037,9 keV, 1238,3 keV, 1810,8 keV. To su četiri najintenzivnije linije koje se pojavljuju nakon neelastičnog rasejanja nutrona na jezgrima  $^{56}\text{Fe}$ .

## **6.3. Rezultati merenja**

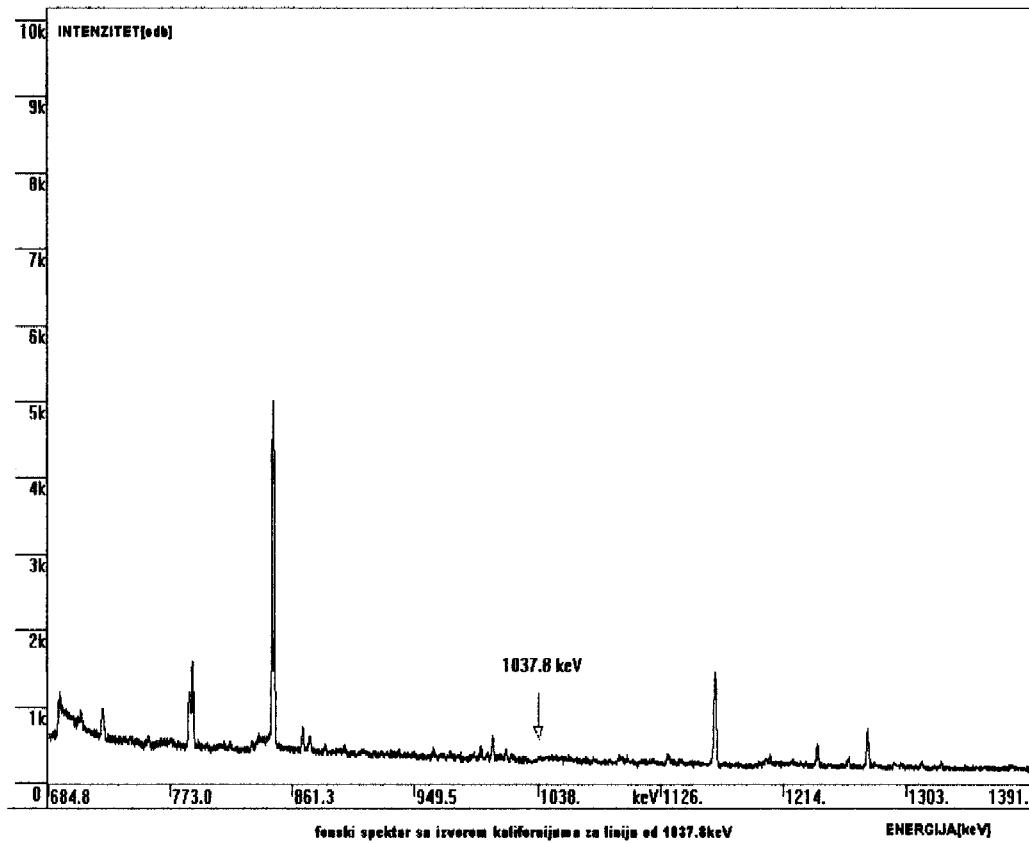
Prilikom interakcije kosmičkog zračenja sa gvozdenom zaštitom detektora dolazi do zahvata miona, pri čemu nastaju pobuđena jezgra, koja se viška energije oslobođaju emisijom neutrona. Neutroni se dalje neelastično rasejavaju na jezgrima gvožđa, kojom prilikom se jezgra gvožđa dovode na pobuđena energetska stanja. Gama linija koja nastaje detekcijom gama zračenja emitovanog sa prvog pobuđenog nivoa  $^{56}\text{Fe}$  ima energiju od 846,8 keV. Ova linija je dobijena u oba spektra (slika 9.) i najintenzivnija je.



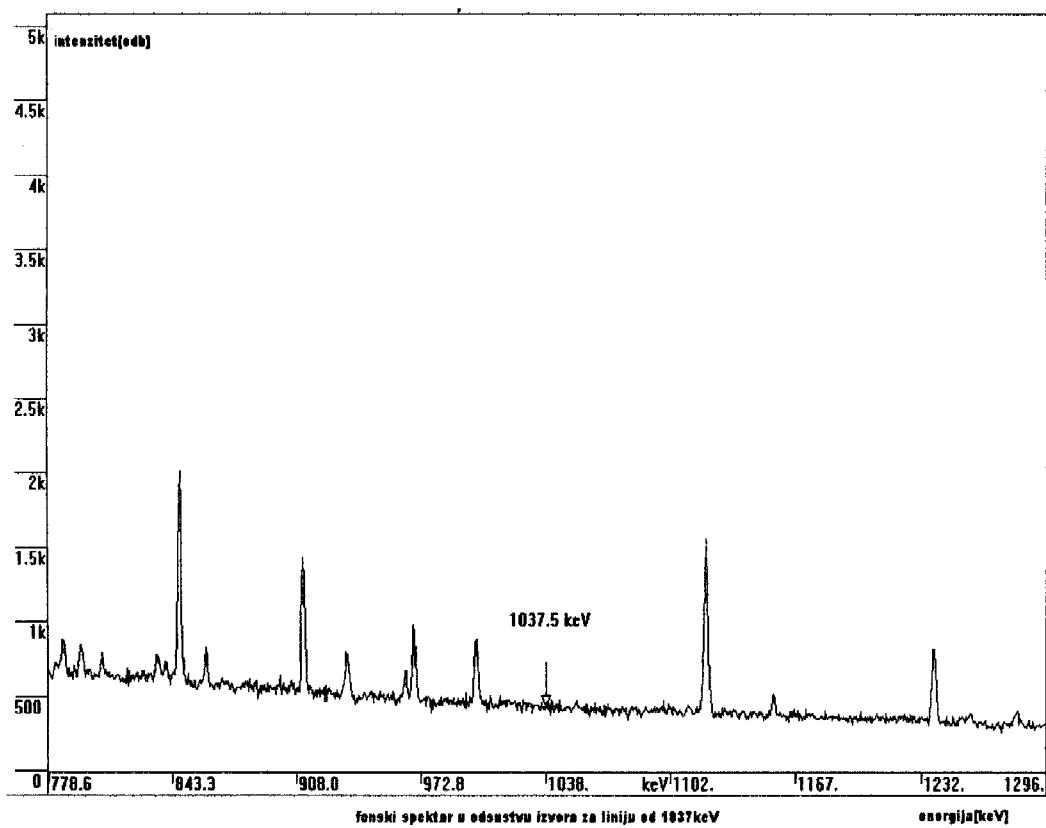
*Slika 9.a. Fonski spektar sa linijom od 846,8keV*



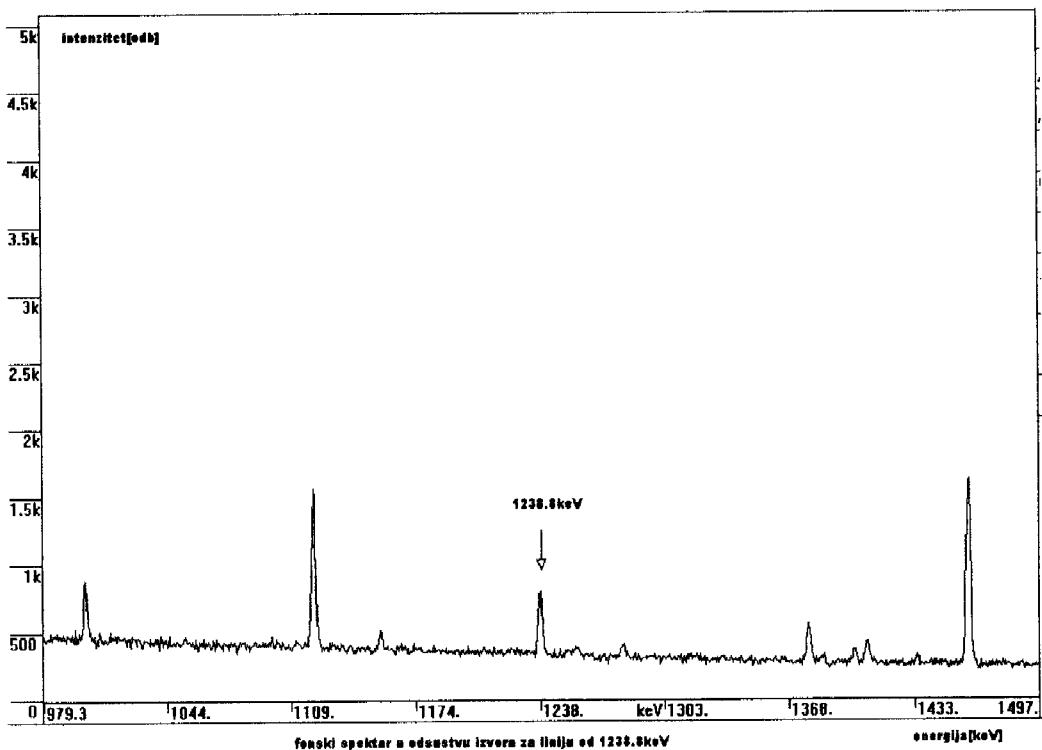
*Slika 9.b. Spektar sa izvorom kalifornijuma sa linijom od 846,8 KeV*



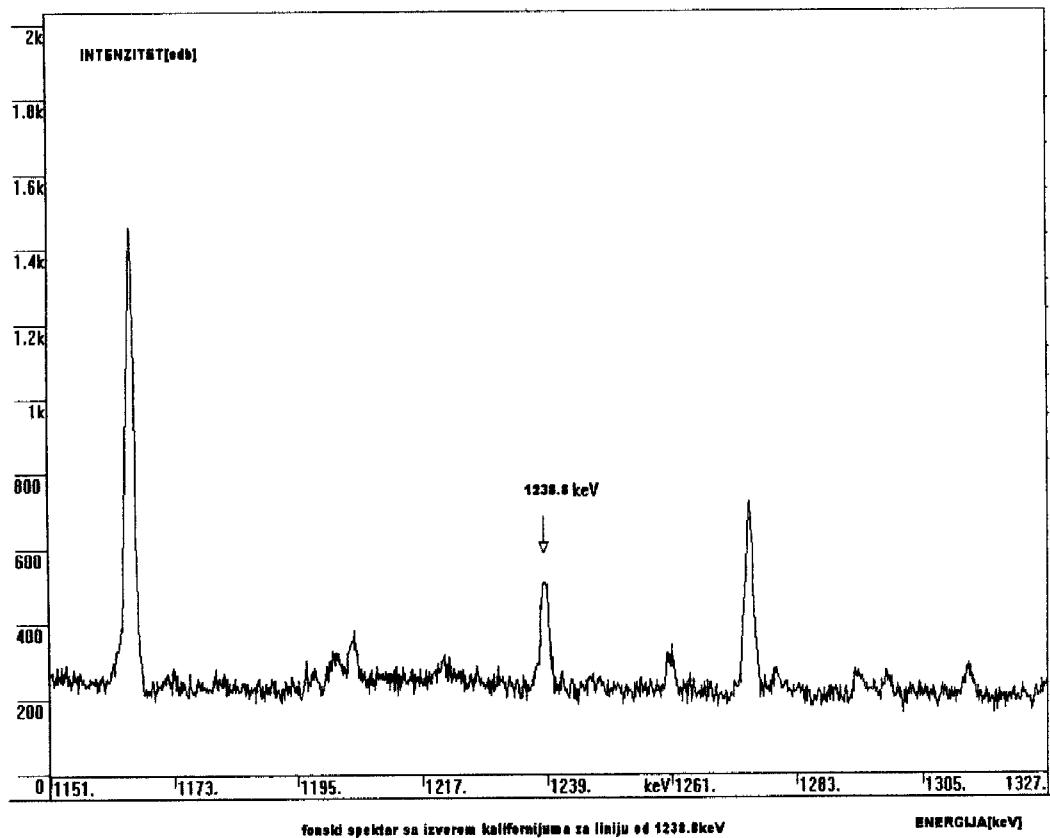
*Slika 10.a. Fonski spektar sa linijom od 1037,9 keV*



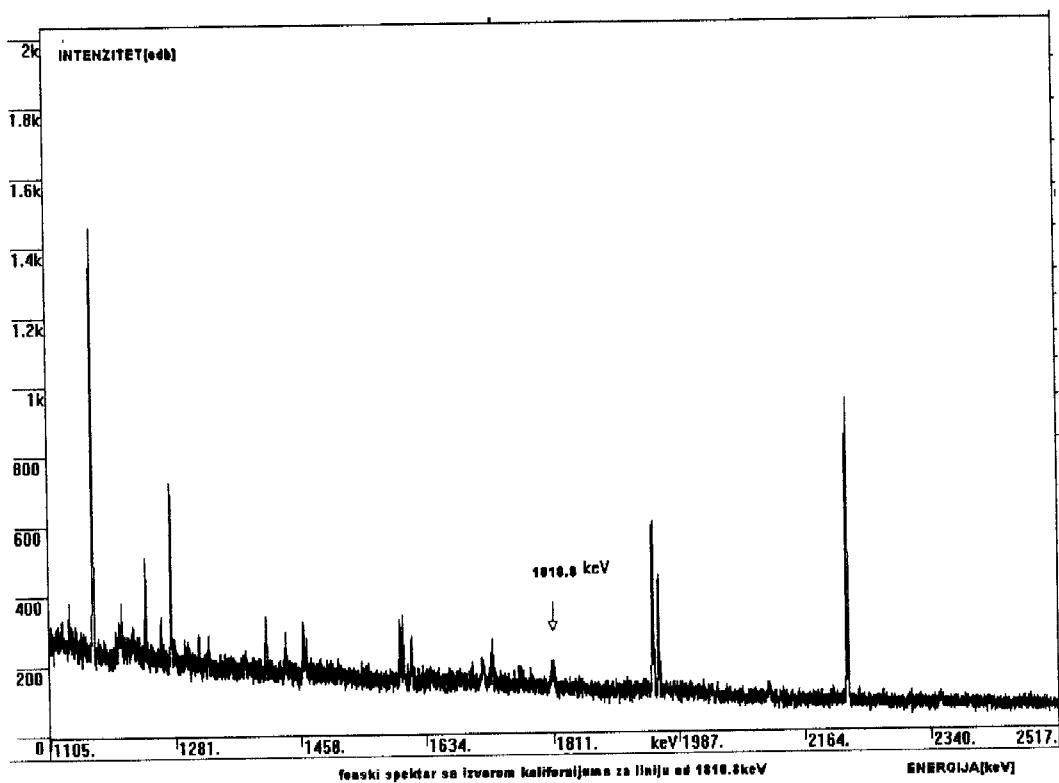
*Slika 10.b. Spektar sa izvorom kalifornijuma za liniju od 1037,9 KeV*



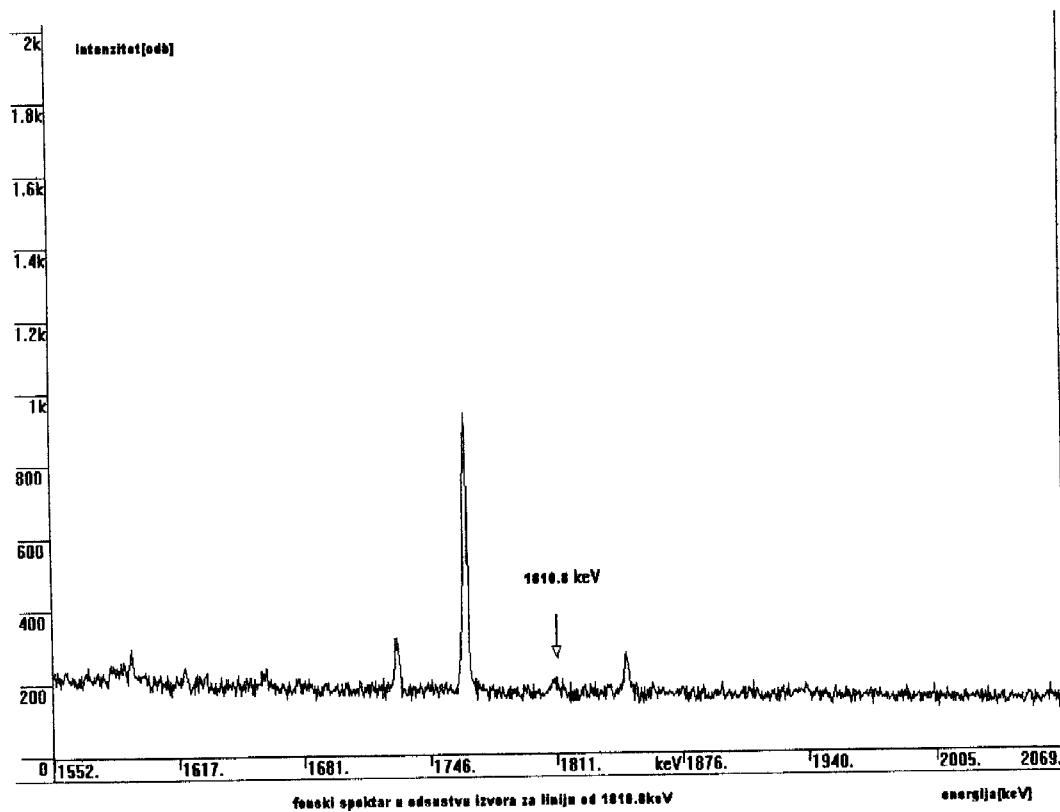
*Slika 11.a. Fonski spektar sa linijom od 1238,3 keV*



*Slika 11.b. Spektar sa izvorom kalifornijuma za liniju od 1238,3 KeV*

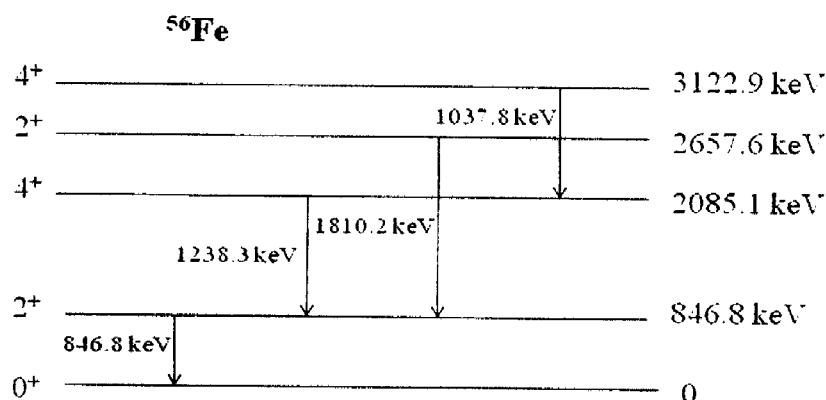


Slika 12. a. Fonski spektar sa linijom od 1810,8 keV.



Slika 12. b. Spektar sa izvorom kalifornijuma za liniju od 1810,8 KeV

Na osnovu dobijenih spektara uočavamo da nije dobijena gama linija od 1037,9 keV, ni u fonskom, niti u spektru sa izvorom kalifornijuma. Ova gama linija se emituje sa pobuđenog energetskog nivoa od 3122,9 keV kod gvožđa kao što je prikazano šemom na slici 13. Zaključujemo da neutroni nastali kosmičkim mionima u gvozdenoj zaštiti germanijumskog detektora nemaju dovoljnu energiju da pobude ovaj nivo.

Fig. 1. Part of levels scheme of  $^{56}\text{Fe}$ 

Slika 13. Energetski nivoi kod gvožđa

Na spektrima su identifikovane i slabe gama linije od 1238,3keV(slika11.) i 1810,8keV(slika12.).

U tabeli 4. su dati intenziteti ovih gama linija, izračunati na osnovu dobijenih spektara.

Energija (keV)	mFe – fon intenzitet [ $\text{s}^{-1}$ ]	mCfFe [ $\text{s}^{-1}$ ]	mCf – spolja [ $\text{s}^{-1}$ ]
846,8	0,001167(9)	0,081(2)	0,0030(5)
1037,9	0,00007(4)	0,00015(6)	0,0000099
1238,3	0,00006(5)	0,0053(5)	0,0009(4)
1810,8	<0,0000163	0,0018(4)	–

Tabela 4. Intenziteti detektovanih gama linija

Može se primetiti da su intenziteti linija kada se izvor Cf – 252 nalazi van gvozdene komore za red veličine manji nego kada se izvor nalazi unutar komore. To znači da neutroni koji

bi spolja pali na gvozdenu komoru proizvode gama zračenje koje ne uspeva da se probije kroz zid komore i dospe do detektora u značajnijoj meri.

#### 6.4. RELATIVNI INTENZITETI

Intenzitet najjače gama linije sa energijom od 846,8keV je uzet za određivanje relativnih intenziteta preostalih gama linija od 1037,9keV , 1238,3keV i 1810,8keV. Odnosno pomenuti relativni intenziteti su dobijeni normiranjem na liniju od 846,8keV. Njihove vrednosti su date u tabeli 6.2.

Energija neutrina				Gvozdena zaštita		
$E\gamma [keV]$	6,3 MeV	7,3MeV	14,2MeV	fon	$^{232}Cf$	$^{56}Mn$ raspad
1037,9	6,4	7,0	10,3	>2,5	>1,8	0,040
1239,3	28	29	50	8(6)	7,5(9)	0,10
1810,8	11,9	98	7,5	11(7)	5(3)	27,7

*Tabela 5. : Relativni intenziteti nekih linija iz spektra pobuđenog gvožđa  $^{56}Fe$*

Nuklearna reakcija neelastičnog rasejanja neutrona na prirodnom gvožđu je dobro izučena pošto gvožđe ulazi u sastav reaktorskih materijala. Gama zračenje koje se emituje u reakciji  $^{56}Fe(n,n')$  $^{56}Fe$  kao i relativni intenziteti karakterističnih gama prelaza do sada nisu često bili tema izučavanja tako da samo postoje podaci za merenja sa neutronima koji su imali energije od 6,3MeV, 7,3MeV i 14,2MeV. Gama linije prikazane u Tabeli 5. su detektovane i u ovim eksperimentima. Relativni intenziteti tri linije koje su analizirane u ovom radu izmerene sa neutronima pomenutih energija su date u Tabeli 5.

Na osnovu eksperimentalnih podataka koji su dobijeni sa neutronima energija 6,3MeV, 7,3MeV i 14,2MeV može se zaključiti da su relativni intenziteti gama linija, detektovanih nakon deekscitacije popunjениh nivoa u nuklearnoj reakciji neelastičnog rasejanja neutrona na jezgrima gvožđa, funkcije energija neutrona. Tako se na primer relativni intenzitet gama linije sa energijom 1238,3 keV meren u nekoliko pomenutih eksperimenata (tabela 5.) promeni za skoro 80% u energetskom intervalu neutrona između 6,3MeV i 14,2 MeV.

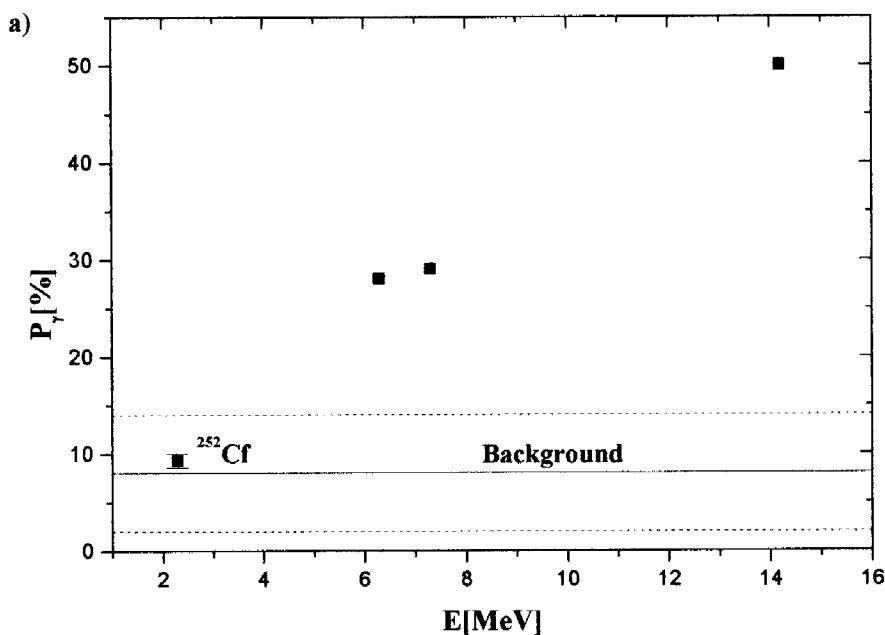
Rezultati dobijeni za relativne intenzitete gama linija u tabeli 5. pokazuju da su ove vrednosti male kako u slučaju fonskog spektra ,tako i u slučaju spektra dobijenog sa izvorom kalifornijuma.

Dobije relativni intenziteti za gama linije sa energijama 1238,3 keV i 1810,8keV, mereni u gvozdenoj zaštiti kao i oni dobijeni u eksperimentima sa snopovima neutrona, prikazani su na slici14. Tačke predstavljaju postojeće rezultate za relativne intenzitete gama linija sa standarnim neutronskim snopivima.

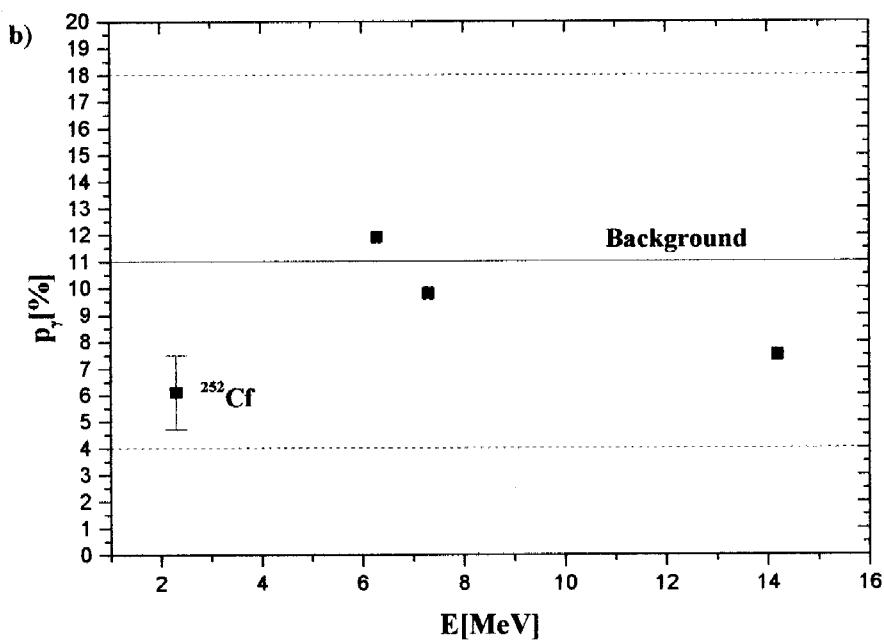
Naš rezultat dobijen korišćenjem kalifornijumskog izvora, takođe je predstavljen tačkom na slici 14.

Puna horizontalna linija predstavlja relativni intenzitet gama linije merene u fonskom spektru, dok je isprekidanom linijom prikazan koridor greške.

Analizom podataka prikazanih na Slici 14. se može videti da relativni intenzitet gama linije od 1238,3keV ima rastući tok, dok za gama liniju energije 1810,8 keV pokazuje opadajući trend. Za obe energije u fonskom spektru, kao i spektru dobijenom upotrebom kalifornijumskog izvora, relativni intenziteti gama linija imaju manje vrednosti nego što je to dobijeno u eksperimentima sa snopovima neutrona.



*Grafik 1.*



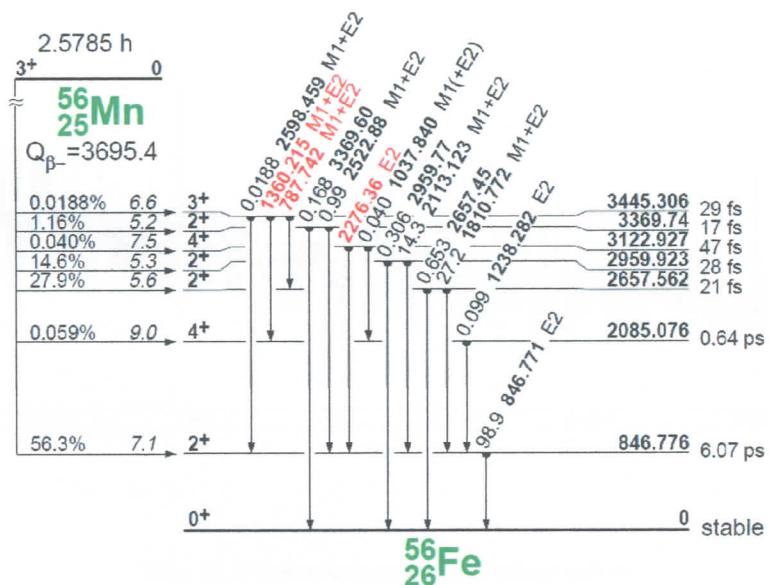
*Grafik 2.*

*Slika 14. Relativni intenzitet linije 1238,3 keV (grafik 1.), relativni intenzitet linije 1810,8 keV (grafik 2.)*

### 6.5. Uticaj mangana na merene linije fonskog spektra

Zahvat miona može da se dogodi bez emisije neutrona u reakciji  $^{56}\text{Fe}(\mu, \gamma_\mu)^{56}\text{Mn}$ . Ovim kanalom dešava se oko 15,67% zahvata miona u gvožđu. Ovim zahvatom nastaje  $^{56}\text{Mn}$  koji se raspada do  $^{56}\text{Fe}$  uz emisiju gama zraka karakterističnih za pobuđena stanja jezgra gvožđa  $^{56}\text{Fe}$ . Prilikom raspada  $^{56}\text{Mn}$  emituju se gama linije koje su ispitivane u ovom radu, a relativni intenziteti tih linija su dati u Tabeli 5.

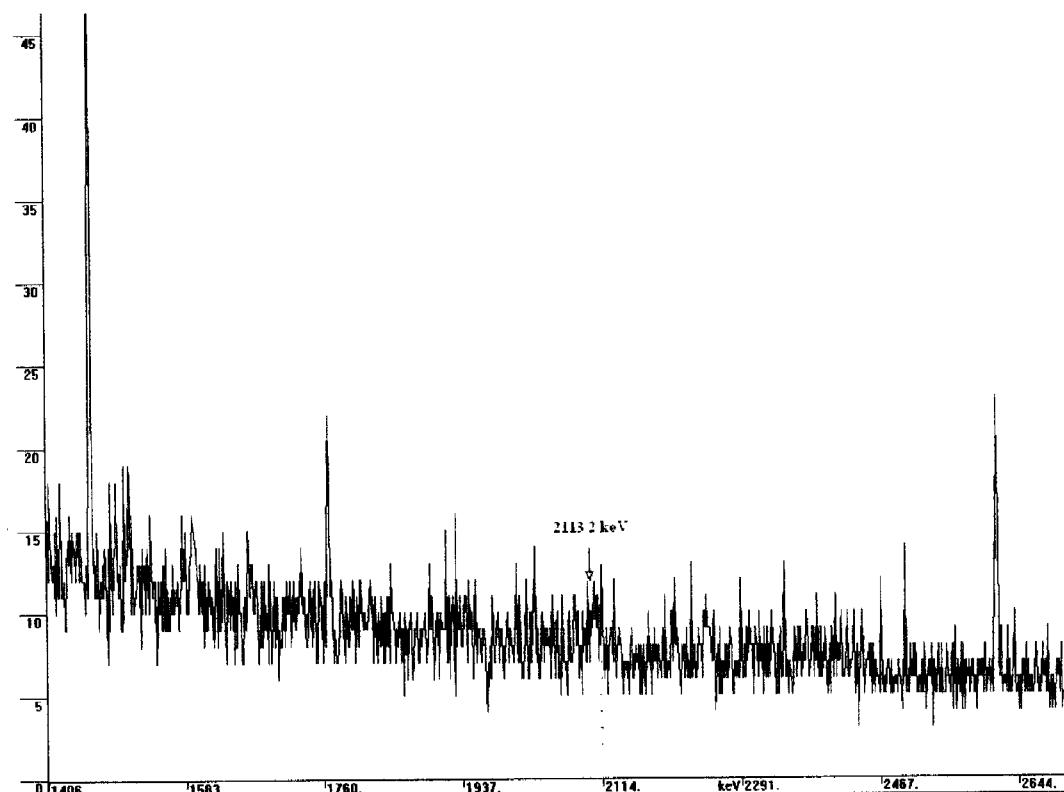
Emitovana gama linija 1238,3keV u raspadu  $^{56}\text{Mn}$  je veoma slaba, što znači da su gotovo svi fotoni ove energije emitovani nakon neelastičnog rasejanja neutrona na jezgrima gvožđa. Doprinos raspada  $^{56}\text{Mn}$  se u slučaju energije od 1238.3 kev ukupnom intenzitetu ove linije merene u fonskom spektru najverovatnije može zanemariti.



Slika 15. Šema raspada  $^{56}\text{Mn}$

Gama linija  $1810,8\text{keV}$  emitovana raspadom  $^{56}\text{Mn}$  je relativno jaka pa je moguće da i neelastično rasejanje i sam raspad  $^{56}\text{Mn}$  doprinese ukupnoj vrednosti pika u fonskom spektru. Da bi se objasnii mogući uticaj  $^{56}\text{Mn}$  na merene linije fonskog spektra, potrebno je poznavati šemu njegovog raspada na  $^{56}\text{Fe}$ .

Najintenzivnija gama linija u raspadu  $^{56}\text{Mn}$  je linija od 846,8 keV kao i kod  $^{56}\text{Fe}$ . Pored nje emituje se još jedna takođe intenzivna gama linija od 2113,2 keV, čiji je relativni intenzitet 14.3%. Ova se linija emituje sa nivoa od 2959,9 keV, kao što se može videti na Slici 15. S obzirom da gama linija 1037,9 keV emitovana sa nivoa 3122,9 keV, nije dobijena u fonskom spektru, s obzirom da neutroni nastali kosmičkim mionima nemaju dovoljnu energiju da pobude energetski nivo 3122,9 keV, može se očekivati da će i nivo 2959,9 keV biti slabo popunjeno. Tada linija od 2113,2 keV u fonskom spektru potiče samo od raspada  $^{56}\text{Mn}$ .



*Slika 16. Visokoenergetski deo fonskog spektra*

Gornja granica fonskog spektra u ovom radu je bila 2 MeV. Iz tog razloga je snimljen novi fotonski spektar kome je gornja granica bila preko 2.5 MeV. Dužina snimanja ovog fonskog spektra je bila  $1.04 \cdot 10^6$  s. Na Slici 16. se može videti da se linija od 2113 keV nije pojavila u ovom spektru. To ukazuje na činjenicu da se doprinos raspada  $^{56}\text{Mn}$  na linije emitovane sa pobuđenih nivoa  $^{56}\text{Fe}$  najverovatnije može zanemariti.

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu su analizirane gama linije, koje potiču od interakcije kosmičkog zračenja sa gvozdenom zaštitom HPGe detektora, merene u laboratoriji za nuklearnu fiziku, Departmana za fiziku u Novom Sadu.

U eksperimentu je izvršeno snimanje fonskih spektara, odnosno spektara u odsustvu bilo kakvog izvora zračenja u okolini detektora. U ovim spektrima je uočena jedna jaka gama linija od 846.8 keV kao i dve slabe gama linije od 1238.3 keV i 1810.8 keV. Ove gama linije potiču od prelaza sa pobuđenih nivoa  $^{56}\text{Fe}$ . Jezgra gvožđa se pobuđuju prilikom neelastičnih rasejanja neutrona stvorenih od strane kosmičkih miona. Prisustvo pomenute tri linije u fonskom spektru kao i potpuno odsustvo linije od 1037.8 keV ukazuju na činjenicu da fonski neutroni nisu u stanju da pobude jezgra  $^{56}\text{Fe}$  do nivoa viših od 3 MeV.

Iste linije, sličnih relativnih intenziteta su detektovane i kada je u gvozdenu komoru unesen izvor kalifornijuma. Dobijene vrednosti relativnih intenziteta (tabela 5.) za liniju energije 1238,3 keV merenih u fonskom spektru i spektru merenom sa izvorom kalifornijuma su uporedive. U oba spektra se ne pojavljuje linija sa energijom 1037,9 keV. Linija od 1810,8 keV ima dovoljan intenzitet da su za nju dobijeni relativni intenzitezi, ali u okviru velike statističke nesigurnosti. Intenziteti linije od 1810,8 keV mereni u fonskom spektru i spektru sa kalifornijumom se poklapaju, mada u okviru te velike eksperimentalne neodredjenosti. Ove činjenice upućuju na to da je energetska raspodela neutrona stvorenih mionskim zračenjem veoma slična energetskom spektru fisionih neutrona.

U poglavljiju 2.5 je pokazano kako izgleda energetska spektar neutrona koji nastaju nakon zahvata miona na jezgrima gvožđa. U poglavljiju 4.4 je pokazan energetska spektar fisionih neutrona koga emituje  $^{252}\text{Cf}$ . Ukoliko merenja relativnih intenziteta gama linija emitovanih sa pobuđenih nivoa  $^{56}\text{Fe}$  pokazuju da neutroni fonski i fisioni imaju slične energetske spektre, jasno je da fonski neutroni isključivo potiču od zahvata miona. U svim ostalim procesima u kojima

dolazi do stvaranja neutrona u interakciji jezgra i miona, emitovani neutroni imaju znatno više energije.

Merenja fonskog spektra u trajanju od  $1.04 \cdot 10^6$  s nisu pokazala prisustvo linije od 2113. keV koja bi poticala od raspada  $^{56}\text{Mn}$ . To znači da se uticaj ovog izotopa na intenzitete gama linija koje su analizirane u ovom radu može zanemariti.



## Literatura

- [1.] G. J. Majkišev, Elementarne čestice, Nolit, Beograd, 1979
- [2.] Lazar Marinkov, Osnove nuklearne fizike, skriptarnica PMF-A, Novi Sad
- [3.] J. Slivka, I. Bikit, M. Vesković, Lj. Čonkić, Gama spektrometrija, specijalne metode i primene, Novi Sad, 2000.
- [4.] K. N. Mukhin, Eksperimental nuclear physics, frst published 1987, revised from the 1983. Russian edition.
- [5.] Pavel P. Povinec, Analysis of environmental radionuclides Faculty of Mathematics, Physics and informatics. Comenus university, Bratislava, Slovakia, 2008.
- [6.] N. Jovančević, M. Krmar, D. Mrđa, J. Slivka, I. Bikit, Neutron induced bacgrouud gamma activity in Low – level. Ge – spectroscopy systems, Nuclear inst. And methods in physics research, A.
- [7.] Dragoslav Popović, Nuklearna energetika, Naučna knjiga, Beograd, 1977.
- [8.] C.D.Gregg King, Nuklear power systems the macmillan company, New York, 1964.
- [9.] Internet sajtovi:
  - [www.en.wikipdia.org/wiki/muonium](http://www.en.wikipdia.org/wiki/muonium)
  - [www.en.wikipedia.org/wiki/Cosmic\\_ray](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_ray)
  - [www.en.wikipedia.org/wiki/Fissia](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Fissia)
  - [www.yukawa.blogger.ba](http://www.yukawa.blogger.ba).

## Biografija kandidata:



Nataša Ostojić, rođena 05.05.1982. godine u Novom Sadu. Pohađala je osnovnu školu „Sonja Marinković“ u istom gradu. Srednju školu gimnaziju „Isidora Sekulić“ završila je 2001. godine.

Iste godine se upisala na Prirodno – matematički fakultet u Novom Sadu, smer diplomirani fizičar.

**UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO – MATEMATIČKI FAKULTET**

**KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA**

*Redni broj:*  
**RBR**

*Identifikacioni broj:*  
**IBR**

*Tip dokumentacije:* **Monografska dokumentacija**  
**TD**

*Tip zapisa:* **Tekstualni štampani materijal**  
**TZ**

*Vrsta rada:* **Diplomski rad**  
**VR**

*Autor:* **Nataša Ostojić 288/01**  
**AU**

*Mentor:* **Dr Miodrag Krmar, vanredni profesor**  
**MN**

*Naslov rada:* **Detekcija gama zračenja nastalog neelastičnim rasejanjem neutrona u gvozdenoj zaštiti HPGe detektora**  
**NR**

*Jezik publikacije:* **srpski ( latinica )**  
**JP**

*Jezik izvoda:* **srpski / engleski**  
**JI**

*Zemlja publikovanja:* **Srbija**  
**ZP**

*Uže geografsko područje:* **Vojvodina**  
**UGP**

*Godina:* **2010**  
**GO**

*Izdavač:* **Autorski reprint**  
**IZ**

*Mesto i adresa:* **Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 2**  
**MA**

*Fizički opis rada:* **( broj poglavlja / strana / lit. citata / slika / tabela / grafikona )  
( 7 / 41 / 9 / 16 / 5 / 2 )**  
**FO**

<i>Naučna oblas:</i>	Fizika
<b>NO</b>	
<i>Naučna disciplina:</i>	Nuklearna fizika
<b>ND</b>	
<i>Predmetna odrednica / ključne reči:</i>	Kosmičko zračenje, Niskofonski detektor
<b>PO</b>	
<b>UDK</b>	
<i>Čuva se:</i>	Biblioteka departmana za fiziku PMF-a u Novom Sadu
<b>ČU</b>	
<i>Važna napomena:</i>	nema
<b>VN</b>	
<i>Izvod:</i>	U radu su analizirane gama linije koje potiču od neelastičnog rasejanja
<b>IZ</b>	neutrona na jezgrima gvožđa, a nastaju usled zahvata miona u gvozdenoj zaštiti detektora, radi procene energetskog spektra ovako nastalih neutrona.
<i>Datum prihvatanja teme od strane NN veća:</i>	Mart 2010.
<b>DP</b>	
<i>Datum odbrane:</i>	31. Mart 2010.
<b>DO</b>	
<i>Članovi komisije:</i>	
<b>KO</b>	
<i>Predsednik:</i>	Dr Srđan Rakić,
<i>Član:</i>	Dr Nataša Todorović, docent

**UNIVERSITY OF NOVI SAD  
FACULTY OF NATURAL SCIENCES & MATHEMATICS**

**Key words documentation**

*Accession number:*

**ANO**

*Identification number:*

**INO**

*Document type:*

**DT**

Monograph publication

*Type of record:*

**TR**

Textual printed material

*Contents code:*

**CC**

Final paper

*Author:*

**AU**

Nataša Ostojić 288/01

*Mentor:*

**MN**

Dr Miodrag Krmar, associate professor

*Title:*

**NR**

Detection of gamma rays produced by inelastic neutron scattering in HPGe detector with iron shield

*Language of text:*

**LT**

Serbian

*Language of abstract:*

**LA**

Serbian / English

*Country of publication:*

**CP**

Serbia

*Locality of publication:*

**LP**

Vojvodina

*Publication year:*

**PY**

2010.

*Publisher:*

**PU**

Autor's reprint

*Publication place:*

**PP**

Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 2

*Physical description:*

**PD**

( chapters/pages/ literature/tables/pictures/ graphs)

( 7 / 41 / 9 / 16 / 5 / 2 )

*Scientific field:*

**SF**

Physic

*Scientific discipline:*

Nuclear Physics

**SD**

*Key wors:*

Cosmical radiations, Ultra –low backgraund

**SKW**

**UC:**

*Holding data:*

**HD**

Library of Department of Physics, Faculty of sciences,  
University of Novi Sad, 21000 Novi Sad, Serbia,  
Trg Dositeja Obradovica 2

*Note:*

**N**

*Abstract:*

In this paper are analyzed gamma lines which originate from inelastic scattering of neutrons on iron's core, which are produced by capture of muon in the iron shield of the detector for assessing os energetic spectrum of these neutrons.

**AB**

*Accepted by the Scientific Board on:*

March 2010.

**ASB**

*Defended:*

**DE**

31. March 2010.

*Thesis defend board:*

**DB**

*President:*

Dr Srđan Rakić, docent, Faculty of Science, University of Novi Sad

*Member:*

Dr Nataša Todorović, docent, Faculty of Science, University of Novi Sad

## **ZAPISNIK**

Sa javne odbrane diplomskog rada kandidata Nataše Ostojić apsolventa  
Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu.

Diplomski rad pod naslovom:

**Detekcija gama zračenja nastalog neelastičnim rasejanjem neutrona u  
gvozdenoj zaštiti HPGe detektora**

je ocenjen ocenom \_\_\_\_\_ (.....)

Odbrana rada je ocenjena ocenom \_\_\_\_\_ (.....)

Konačna ocena \_\_\_\_\_ (.....)

Novi Sad,

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

Članovi komisije:

1. \_\_\_\_\_

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

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