



Univerzitet u Novom Sadu
Prirodno-matematički fakultet
Departman za fiziku

ISPITIVANJE ^{90}Sr U VODI DETEKCIJOM ČERENKOVLJEVOG ZRAČENJA

MASTER RAD

Kandidat:

Suzana Dovijarski

Mentor:

Prof. dr Nataša Todorović

Novi Sad, 2016

SADRŽAJ

Spisak slika	3
Spisak tabela	4

Uvod

1. Radioaktivnost. Zakon radioaktivnog raspada.....	8
1.1. Aktivnost.....	10
1.2. Radioaktivna ravnoteža.....	12
2. Interakcija beta zračenja sa materijom.....	15
3. Čerenkovljevo zračenje.....	17
4. Stroncijum.....	19
5. Scintilacioni detektori.....	22
5.1. Tečna scintilaciona spektrometrija.....	23
5.2. Analiza signala.....	25
5.3. Quantulus 1220.....	26
5.4. Kako radi Quantulus 1220?.....	28
5.5. Tok rada.....	29
6. Eksperiment-Detekcija Čerenkovljevog zračenja u tečnom scintilacionom brojaču.....	33
6.1. Kalibracija tečnog scintilacionog spektrometra Odredjivanje efikasnosti.....	35
6.2. Odredjivanje aktivnosti stroncijuma u vodi.....	37
6.3. Procena merne nesigurnosti MDA.....	38
6.4. Evaluacija rezultata.....	39
7. Difuzija.....	43
8. Zaključak.....	59
9. Literatura.....	60

Spisak slika

Br	Str
Slika 1. Grafički prikaz radioaktivnog raspada	11
Slika 2. Radioaktivna ravnoteža	13
Slika 3. Zavisnost broja elektrona od debljine sloja materijala kroz koji elektoni prolaze	15
Slika 4. Talasni front Čerenkovljevog zračenja	17
Slika 5. Šema raspada ^{90}Sr i ^{90}Y	19
Slika 6. Fotomultiplikator	24
Slika 7. Histogram	25
Slika 8. Quantulus 1220	26
Slika 9. Pasivna zaštita kod detektora Quantulus 1220	27
Slika 10. Princip prenošenja tacni sa bočicama	29
Slika 11. Prostor za merenje	29
Slika 12. Prozor programa WinQu	30
Slika 13. MCA & Window Setting- drugo zaglavje	31
Slika 14. MCA Sample Parametars	32
Slika 15. Kalibracija ^{90}Sr merenja u vodi	34
Slika 16. Kalibracija ^{90}Sr merenja u 20ml vode u plastičnim bočicama	35
Slika 17. Spektar generisan Čerenkovljevim zračenjem $^{90}\text{Sr} / ^{90}\text{Y}$	37
Slika 18. MDA	38
Slika 19. Odredjivanje aktivnosti nepozantih uzoraka	42
Slika 20. Septembar 2014.	44
Slika 21. Septembar 2015.	45

Spisak tabela

Br	Str
Tabela 1. WinQu konfiguracija za detekciju Čerenkovljevog zračenja	31
Tabela 2. Efikasnosti za bočice od različitih materijala	34
Tabela 3. Optimalna podešavanja prozora za određivanje ^{90}Sr	36
Tabela 4. Rezultati statističkih vrednosti	41
Tabela 5. Aktivnosti izračunate preko izraza 6.1.	42
Tabela 6. 20 ml vode + 1 ml standarda stroncijuma	47
Tabela 7. 20 ml vode + 0,5 ml standarda stroncijuma	48
Tabela 8. 20 ml vode + 0,1 ml standarda stroncijuma	49

Veliku zahvalnost dugujem svim članovima katedre za nuklearnu fiziku na saradnji i pomoći:
Prof. dr Dušanu Mrđi, Prof. dr Ištvanu Bikitu, Prof. dr Miroslavu Krmaru, msc Kristini Bikit.

Veliku zahvalnost dugujem Prof. dr Jovani Nikolov, na možda i najvećoj saradnji od svih članova katedre za nuklearnu fiziku, na vedrini, posvećenosti i vedrom duhu.

Prof. dr Sonji Skuban, pre svega što je pristala da bude član komisije, ali i na korektnosti i poštovanju tokom studija.

Posebnu zahvalnost dugujem svom mentoru, Prof. dr Nataši Todorović, najiskrenije se zahvaljujem na savetima prilikom odabira teme koja mi se izuzetno svidela, na velikoj pomoći pri realizaciji rada, divnoj saradnji i svim korekcija, ispravkama i dopunama istog.

Hvala.....

Mami

....na velikoj podršci i razumevanju, druženju i opuštanju i kad je najteže;

Tati

....na najkorisnim savetima, jer samo ti znaš da posavetuješ kad je najbitnije...

veliko hvala na finansiskoj pomoći,

bez koje i dalje ne bih lako mogla;

Bratu

....na svim upadima u sobu;

Dejanu

....na podšci.... svim prevodima vezanim za rad...

Hvala za svu ljubav koju mi pružate....

Bili ste velika podrška.

Autor

Uvod

Radioizotop (^{90}Sr), ima vreme poluraspada od 28,8 godina, proizvod je nuklearne fisije i prisutan je u nuklearnom gorivu i radioaktivnom otpadu iz nuklearnih reaktora, kao i u padavinama koje nastaju nuklearnim probama.

Maksimalna dozvoljena granica kontaminacije vode stroncijumom ^{90}Sr iznosi 125 Bq l^{-1} dok je granica u vodi za piće 300 mBq l^{-1} , a u našoj zemlji je propisana granica $4,9 \text{ Bq l}^{-1}$.

Detekcija $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ se zasniva na detekciji Čerenkovljevog zračenja u vodi fotomultiplikatorskim sistemom u LS brojaču *Quantulus 1220*. Ova metoda je brza, ne zahteva hemijsku pripremu, jednostavna je i jeftina. Najpogodna je za određivanje ^{90}Sr pri radijacionim akcidentima, kada je potrebno dobiti validan rezultat za kratko vreme. Konvencionalne metode ^{90}Sr merenja u vodi su vremenski uslovljena i zahtevaju sofisticirane tehnike radiohemijske separacije.

U ovom radu je najpre prikazana kalibracija tečnog scintilacionog detektora *Quantulus 1220*, sa postupkom rada kao i principom obrade rezultata uz pomoć programa WinQu. Detaljnije je opisana jedna od metoda detektovanja ^{90}Sr u vodi, detekcijom Čerenkovljevog zračenja, kao i difizija kroz plastične bočice.

1. Radioaktivnost

Radioaktivnost je proces u kome dolazi do spontane transformacije jezgra kojom prilikom ono menja svoj sastav ili energetsko stanje.

Promena koja nastaje može biti detektovana kao promena sastava jezgra ili energetskog stanja (emisija čestica). Sastav jezgra se menja ako ono doživi alfa ili beta raspad.

Sva jezgra se mogu podeliti na dva tipa, radioaktivna i stabilna. Ne postoji tačno utvrđena granica između ova dva tipa jezgara, ali se može reći da su stabilna jezgra, jezgra sa veoma velikim periodom poluraspada, koji se praktično ne može eksperimentalno izmeriti. Postoji prirodna i veštačka radioaktivnost.

Zakon radioaktivnog raspada

Verovatnoća raspada radioaktivnog jezgra je određena prirodom samog jezgra i može se smatrati konstantnom za dato jezgro, pošto na brzinu raspada ne utiču spoljašnji faktori. Konstanta radioaktivnog raspada λ , predstavlja verovatnoću da se neko radioaktivno jezgro raspada u jedinici vremena. Ova konstanta omogućava dobijanje informacije o srednjem životu nestabilnog jezgra τ (1) što je dato izrazom 1.1.

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad 1.1.$$

λ – konstanta radioaktivnog raspada,

τ – srednji život jezgra.

Analizom brzine raspada velikog broja jezgara uočene su neke pravilnosti koje su dovele do nastanka zakona radioaktivnog raspada , što je dato izrazom 1.2.

$$dN = -\lambda N dt \quad 1.2.$$

dN – promena broja jezgara,

N – početni broj radioaktivnih jezgara,

λ – konstanta radioaktivnog raspada,

dt – vremenski interval

Integracijom jednačine dobija se eksponencijalna zavisnost kod zakona radioaktivnog raspada prikazana izrazom 1.3. (1)

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad 1.3.$$

N – broj radioaktivnih jezgara nakon

t – vremena,

λ – konstanta radioaktivnog raspada,

N_0 – početni broj jezgara.

Period poluraspada predstavlja vreme za koje se početni broj jezgara smanji za pola. Što znači da će za isto vreme i aktivnost uzorka pasti za pola. Veza perioda poluraspada i zakona radioaktivnog raspada data je jednačinom 1.4. (1)

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad 1.4.$$

$T_{1/2}$ – period poluraspada

λ – konstanta radioaktivnog raspada.

1.1. Aktivnost

Broj raspada jezgra u jedinici vremena daje informaciju o broju raspada, odnosno aktivnosti uzorka, izraz 1.5.

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N \quad 1.5.$$

A – trenutna aktivnost,

dN – promena broja jezgara,

dt – vremenski interval

λ – konstanta radioaktivnog raspada,

N – broj preostalih radioaktivnih jezgara.

Broj raspada u jedinici vremena za dati izotop predstavljen je konstantom raspada λ . Ova konstanta zavisi samo od broja radioaktivnih atoma N . Jedinica za aktivnost je Bekerel (Bq), a predstavlja aktivnost radioaktivnog izvora u kojem se u jedinici vremena raspadne jedno jezgro.

Ukoliko se nekom radioaktivnom uzorku zna masa, broj jezgara, i molarna masa, tada se aktivnost određuje pomoću formule 1.6. (1), (2)

$$A = \lambda \cdot N = \lambda \frac{m \cdot N_{av}}{M} \quad 1.6.$$

A – trenutna aktivnost,

λ – konstanta radioaktivnog raspada,

m – masa,

M – molarna masa,

N_A – Avogadrovo broj.

Formula 1.6. za računanje aktivnosti , u eksponencijalnom obliku data je izrazom 1.7.

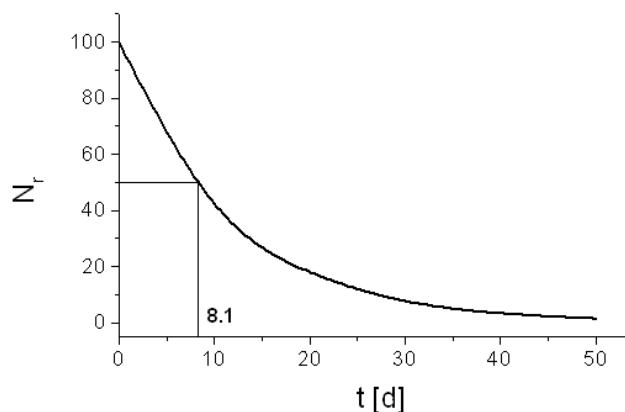
$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad 2.7$$

A - trenutna aktivnost,

A_0 - početna aktivnost,

t – vreme koje je prošlo od A_0 do A

λ – konstanta radioaktivnog raspada.



Slika 1. Grafički prikaz zakona radioaktivnog raspada.

1.2. Radioaktivna ravnoteža

Kao što je rečeno u prirodi postoje radioaktivne supstance koje nastaju jedna iz druge radioaktivnim raspadom, čiji je krajnji potomak stabilan član. Odredjivanje broja atoma, perioda poluraspada, konstante radioaktivnog raspada bilo kojeg člana se rešava razmatranjem samog procesa, koji se opisuje diferencijalnim jednačinama. Ovo može da se primeni i na radioaktivni niz od n članova. Takav proces se opisuje sa n diferencijalnih jednačina datih sledećim relacijama (2.8.).

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

2.8.

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3$$

....

$$\frac{dN_n}{dt} = \lambda_{n-1} N_{n-1} - \lambda_n N_n$$

Ove relacije opisuju raspad radioaktivne familije od n članova u kojoj n-ti član nije radioaktivran.

Kada se na ove članove primeni uslov dat izrazom 2.9., pokazuje se da broj atoma bilo kojeg člana niza ostaje isti.

$$\frac{dN}{dt} = 0$$

2.9.

U tom trenutku vremena raspadne se onoliko atoma koliko se i stvori. Strogo matematički, ovi uslovi nisu u potpunosti ispunjeni, pa se govori samo o stanjima koja su bliska radioaktivnim ravnotežama. To je slučaj kada period poluraspada pretka teži beskonačnosti, ili je znatno veći od perioda poluraspada potomka. Takav je primer ^{90}Sr . Njegov period poluraspada iznosi 28,8 godina, a period poluraspada njegovog potomka ^{90}Y je 64h, pa se N_1 može smatrati konstantnim, a $\lambda \rightarrow 0$, čime je, uslov za radioaktivnu ravnotežu ispunjen (2.10.).

$$\frac{dN_2}{dt} = 0$$

Za ovaj tip ravnoteže važi sledeći uslov:

$$\lambda_1 \ll \lambda_2$$

2.11.

Pa je tada

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots = \lambda_n N_n$$

2.12.

Ili

$$\frac{N_1}{t^1} = \frac{N_2}{t^2} = \dots = \frac{N_n}{t^n}$$

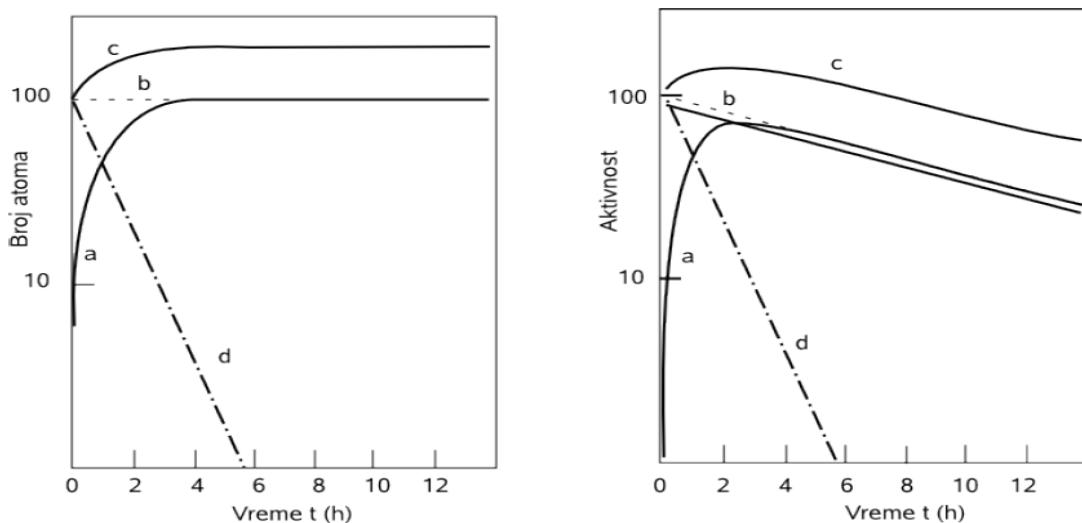
2.13.

Korišćenjem izraza 2.13. i uslova radioaktivne ravnoteže dolazi se do izraza za aktivnost potomka (2.14.)

$$A = \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_0 (1 - e^{-\lambda_2 t})$$

2.14.

Ova jednačina predstavlja aktivnost potomka u funkciji vremena, a ovakva ravnoteža se naziva trajna.



Sl. 4.3. Trajna i prelazna ravnoteža:

- a) a - Narastajuća aktivnost potomka; b - Aktivnost pretka ($T \rightarrow \infty$); c - Totalna aktivnost; d - Raspad potomka
- b) a - Narastajuća aktivnost potomka; b - Aktivnost pretka ($T = 8.0$ h); c - Totalna aktivnost; d - Raspad potomka; e - Totalna aktivnost potomka u frakcijama pretka i potomka

Slika 2.Ravnoteža

Drugi tip radioaktivne ravnoteže sledi iz uslova 2.15.

$$\lambda_1 < \lambda_2$$

2.15.

Ili kada je period poluraspada pretka veći od perioda poluraspada potomka. U ovom slučaju kada se jednom uspostavi radioaktivna ravnoteža, absolutna aktivnost opada sa periodom poluraspada pretka.

Ovaj tip ravnoteže naziva se tranzitna ravnoteža.

2. Interakcija beta zračenja sa materijom

Beta-zraci su elektroni visoke energije i brzine ili pozitroni koje emituju neki beta-emiteri i oni na gotovo identičan način interaguju sa materijom. Jedina bitna razlika se sastoji u tome da elektroni kada izgube svoju kompletну energiju bivaju zahvaćeni od strane nekog atoma i pretvaraju se u orbitalni elektron, a pozitron kada izgubi energiju doživi anhilaciju sa jednim elektronom. Tada obe čestice prestaju da postoje uz stvaranje dva gama kvanta.

Elektron prolazeći kroz materiju, reaguje putem Kulonove interakcije sa orbitalnim elektronima i jezgrom atoma. Putem ovih interakcija on može da izgubi deo kinetički energije, gde se energetski gubitak opisuje energijom kočenja ili da zbog svoje male mase promeni pravac kretanja pri čemu se energetski gubitak opisuje energijom rasejanja.

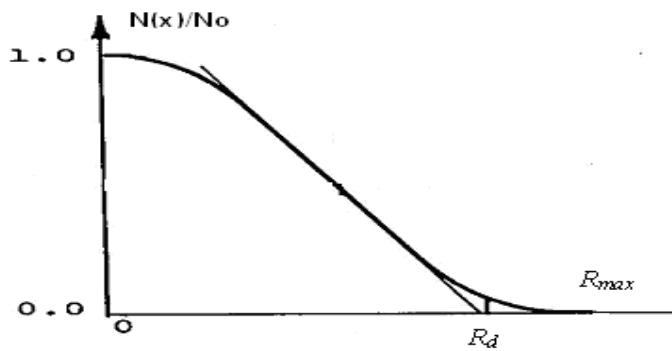
Interakcija izmedju pobudjenog i orbitalnog elektrona ili jezgra se odvija putem elastičnog ili neelastičnog sudara. Elastičnim sudarom elektron skreće sa prvo bitne putanje i ne gubi energiju, a prilikom neelastičnog sudara elektron skreće sa prvo bitne putanje i gubi energiju koja se prenosi na orbitalni elektron ili se javlja u vidu zakočnog zračenja.

Interakcija elektrona sa orbitalnim elektronom putem Kulonove interakcije rezultuje na dva načina

- Jonizacijom
- Ekscitacijom.

Domet beta čestica

Kada snop elektrona prolazi kroz materijal, njihov broj se zbog čestog skretanja znatno osipa. Minimalna debljina sloja nekog materijala koja u potpunosti zaustavlja ovo zračenje se razlikuje od dužine njegovog traga. Srednji put koji elektroni predju u nekom materijalu je dvostruko duži od dometa. Maksimalni domet elektrona se može odrediti kao presek atenuacione krive prikazane na slici 3. i apscise.



Slika 3. Zavisnost broja elektrona od debljine sloja materijala

Korišćenjem činjenice da je atenuaciona kriva beta čestica delimično eksponencijalna, atenuacija se prikazuje eksponencijalnim zakonom, na osnovu kojeg se može proceniti način na koji slabi snop beta zračenja, kada prolazi kroz neki atenuator.

Jonizacioni gubici

Jonizacija je kao što je gore pomenuto jedan od osnovnih mehanizama putem kojeg zračenje interaguje sa materijom kroz koju prolazi. Prilikom svake pojedinačne jonizacije čestica predaje elektronu deo svoje energije, a vezivne energije elektrona se kreću od par eV, koliko iznose vezivne energije spoljašnjih elektrona strednje teških elektrona, pa do 115,6 keV što odgovara energiji kojom su vezani K elektroni uranijuma. Do ove razmene energija dolazi putem električnog polja beta čestica koja deluje Kulonovom silom na orbitalni elektron, tokom kratkom vremenskog intervala. Gubitak energije beta čestice po jedinici puta je direktno proporcionalan broju elektrona po jedinice zapremine n, a obrnuto proporcionalan kvadratu brzine.

Radijacioni gubici

Gubici energije beta čestice na radijaciju su kao i jonizacioni gubici, direktno proporcionalni broju atoma po jedinici zapremine. Za razliku od jonizacionih, radijacioni gubici su direktno proporcionalni energiji beta čestice i rastu sa kvadratom rednog broja materijala sredine kroz koju se kreću beta čestice (2.1.).

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_{rad} \sim n Z^2 E_0 \quad 2.1.$$

Ovi gubici su dominantniji na višim vrednostima energije. To znači da na radijaciju lake nanelektrisane čestice po jedinici svoga puta gube više energije nego na jonizaciju.

Sledeća relacija (2.2.) predstavlja poređenje radijacionih i jonizacionih gubitaka. (1)

$$\frac{(dE/dx)_{rad}}{(dE/dx)_{ion}} \approx \frac{E_e Z}{800} \quad 2.2.$$

3. Čerenkovljevo zračenje

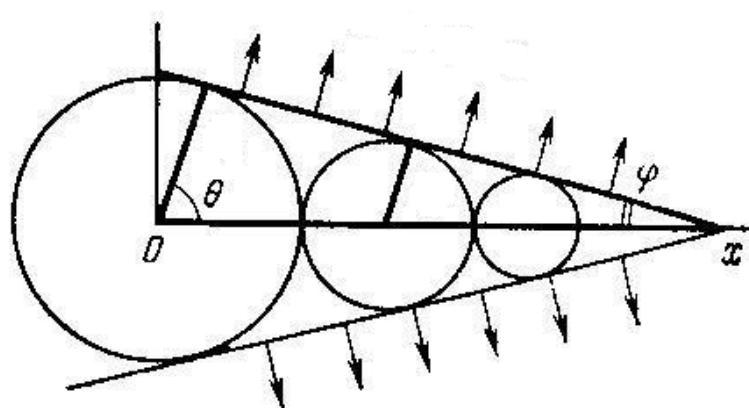
Kada nanelektrisana čestica prolazi kroz neku sredinu, ona svojim električnim poljem deluje na orbitalne elektrone i stvara kratkotrajne dipole. Kada čestica prodje, dolazi do depolarizacije prilikom čega se emituje elektromagnetno zračenje. Ako je brzina čestice manja od granične, prostorna raspodela polarizacije oko nje je potpuno simetrična, pa se emitovano zračenje poništava. Ukoliko je brzina čestice dovoljno velika, električno polje uspeva da polarizuje atome koji se nalaze iza, i to dovodi do asimetrične polarizacije. U ovom slučaju neće se svo elektromagnetno zračenje poništiti, već će doći do remisije nekog rezultujućeg elektromagnetnog zračenja.

Ovo zračenje je otkrio Pavel Cherencov, pa je po njemu i dobilo ime. Emisija ovog zračenja se vrši na račun kinetičke energije nanelektrisane čestice, što znači da ona biva manja za iznos ukupne energije emitovanog Čerenkovljevog zračenja. Da bi došlo do emisije Čerenkovljevog zračenja nanelektrisana čestica mora da ima veću brzinu od fazne brzine svetlosti u toj sredini. Fazna brzina svetlosti c' , ili brzina svetlosti u nekoj sredini dobija se kada se brzina svetlosti u vakuumu podeli sa indeksom prelamanja svetlosti u toj sredini.

$$c' = c/n$$

3.1.

Rezultujuće zračenje emitovano nakon depolarizacije asimetrično polarizovanih atoma se prostire samo pod određenim uglom u odnosu na pravac kretanja nanelektrisane čestice i stvara talasni front iza čestice.



Slika 4. Talasni front Čerenkovljevog zračenja

Ugao Čerenkovljevog zračenja je dat izrazom:

$$\cos \theta = \frac{c}{vn} \quad 3.2.$$

v – brzina čestice (1)

Otkrićem Čerenkovljevog zračenja znatno je povećan broj mogućnosti za detekciju relativističkih čestica. Čerenkovljevo zračenje predstavlja kontinualni spektar talasnih dužina u UV i vidljivom području sa maksimumom na 420 nm. Poznavanje intenziteta emitovanih fotona od posebnog je interesa u slučaju merenja Čerenkovljevog zračenja radi identifikacije i analize radionuklida. (3)

Za detekciju potrebno je samo detektovati emitovanu svetlost što ne zahteva komplikovam metod, pa je na bazi ovog efekta konstruisan velik broj različitih detektora za merenje svojstava relativističkih čestica.

4. Stroncijum Sr-90

Stroncijum je hemijska supstanca koja ima radioaktivna svojsta i ima 23 izotopa. ^{90}Sr je veštački radioizotop, koji nastaje fisijom teških jezgara. Pored ovog izotopa u prirodi se oslobadajuju i nestabilni izotopi stroncijuma, ^{89}Sr ($T_{1/2} = 50,53$ d), ^{91}Sr ($T_{1/2} = 9,6$ h), ^{92}Sr ($T_{1/2} = 2,7$ h), ^{91}Y ($T_{1/2} = 58,5$ d), čiji su periodi poluraspada znatno kraći, pa nisu toliko opasni. (3)

Istorija nastanka Sr - 90?

Radioaktivnost stroncijuma je prvi put otkrivena 1790. godine u Škotskoj, u mineralu pod imenom stroncijanit, od strane naučnika Adair Cravford i Vilijam Cruikshank. Međutim, Sir Humphry Davy¹ je bio prva osoba koja je odvojila metal stroncijuma (^{90}Sr) 1940.godine.

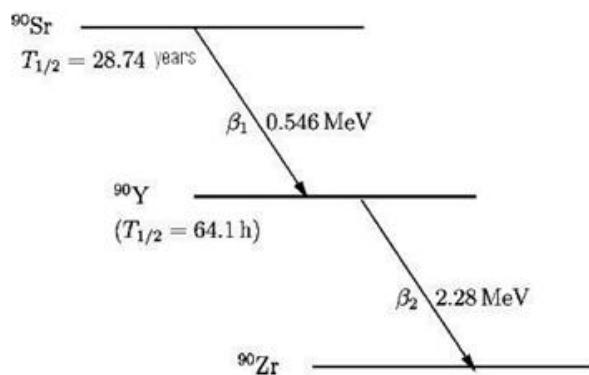
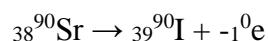
To je bio jedan od mnogih radioaktivnih izotopa otkrivenih tokom nuklearnih eksperimenata izvedenih u toku razvoja nuklearne bombe, a velike količine ovog izotopa su proizvedene i tokom isprobavanja nuklearnog oružja 50-ih i 60-ih godina 20.veka. (5)

Vreme poluraspada Stroncijum-90 i jednačina Beta raspada

^{90}Sr ima vreme poluraspada od 28,8 godina ili 907921024 sekundi. Raspadanjem ^{90}Sr , formira se ^{90}Y , ili Itrijum-90 koji ima poluraspad od 64 sata. Raspadom ^{90}Y dobija se stabilna supstanca pod nazivom cirkonijum (Zr). (4)

^{90}Sr je čist beta emiter koji prelazi u ^{90}Y , koji je takođe čist beta emiter.

Jednačina Beta raspada ^{90}Sr je data kao:



Slika 5 . Šema raspada ${}^{90}\text{Sr}$ i ${}^{90}\text{Y}$

Kako stroncijum-90 zagađuje životnu sredinu?

50-ih i 60-ih godina 20 veka, zbog nuklearnih proba, ova supstanca se slučajno proširila svetom. Zbog svog dugog vremena poluraspada, potrebno je mnogo vremena da prođe da bi se potpuno uklonila iz okoline.

^{90}Sr je proizvod nuklearne fisije i prisutan je u nuklearnom gorivu i radioaktivnom otpadu iz nuklearnih reaktora, kao i u padavinama koje nastaju nuklearnim probama. Velika količina ^{90}Sr je puštena u atmosferu za vreme nuklearne katastrofe u Černobilju, zatim katastrofe u Fukušimi u Japanu 2011. godine.

Efekat Stroncijuma- 90 na zdravlje

Neželjena dejstva na zdravlje ljudi:

- ✓ Ova radioaktivna supstanca je jedna od najopasnijih fisionih produkata i može imati opasne posledice po zdravlje ljudi .
- ✓ Najopasnija je kada se slučajno proguta sa vodom ili hranom, ali takođe može da izazove zdravstvene probleme i u slučaju udisanja.
- ✓ Kada uđe u telo, lako se lepi za zube i kosti, sjedinjuje sa kalcijumom zbog svojih sličnih osobina. Apsorbovan u kostima ^{90}Sr oštećuje ljudsko telo za dug vremenski period, jer ima dug period poluraspada..
- ✓ Radioaktivni stroncijum izaziva rak kostiju, leukemiju i omekšavanje tkiva koja se nalaze oko kostiju i koštane srži.

Stroncijum-90 u ljudskom telu

Iz zemljišta ^{90}Sr može naći svoj put do ljudskog tela kroz žitarice i povrće dobijeno gajenjem iz kontaminiranog zemljišta. 70- 80% ^{90}Sr prolazi kroz ljudsko telo, ali preostali deo ostaje i akumulira se u kostima. Samo 1% ostaje u krvi, mekom tkivu, ekstracelularnim tečnostima i u kostima.

Medicinska upotreba

- ✓ Njegovo radioaktivno zračenja se koristi u lečenju (lečenje kancera kontrolisanjem malignih ćelija).
- ✓ Koristi se u kontrolisanoj količini za lečenje raka kostiju.

Industrijska upotreba

- ✓ Koristi se kao radioaktivni izvor u industrijskom procesu (merenje težine ili debljine materijala kao što su papir, plastika itd., uz pomoć slabljenja beta čestica).

- ✓ Pošto raspad ${}^{90}\text{Sr}$ proizvodi značajnu količinu toplotne koristi se i u mnogim "Radioisotope Thermoelectric" generatorima (obično kao stroncijumske fluoride) - uglavnom u Rusiji. U ovim generatorima, toplota generisana raspadom se pretvara u električnu energiju. Činjenica da je jeftinija od drugih sličnih proizvoda, povećava svoju korisnost.
- ✓ Termo generator može se smatrati kao vrsta baterije i koristi se kao dugotrajan i prenosiv izvor struje. Koristi se u svemirskim letelicama, navigacionim i meteorološkim stanicama u udaljenim područjima.
- ✓ Takođe se koristi za merenje brzina hemijskih reakcija.
- ✓ Kontrolisana količina ovog izotopa može biti veoma korisna u različitim oblastima. Ali, to može biti fatalno za ljude u slučaju preteranog ili slučajnog gutanja i unošenja u organizam. (5)

5. Scintilacioni detektori

Scintilatori spadaju u jedne od najstarijih tipova detektora zračenja. Jednu od prvih upotreba scintilacionog detektora izvršili su Gajger i Marsdenov u eksperimentu gde su rasejane α – čestice uočavane preko scintilacionog svetla koje su proizvodile na ZnS ekranu. (2)

Tek kada su pronadjeni materijali koji su prozirni za sopstvenu svetlost, dobijena je mogućnost da se naprave scintilacioni detektori kod kojih bi cela zapremina mogla biti upotrebljena za detekciju ionizujućeg zračenja, a ne samo njihova površina. Ovakvi detektori su bili neophodni za registrovanje beta i gama zračenja, pošto imaju veliku prodornu moć i potrebna je veća zapremina da bi doživeli interakcije. (1)

Sve scintilatore možemo podeliti na organske, neorganske i gasne.

Neorganski scintilatori su monokristali alkalnih metala koji sadrže malu koncentraciju nečistoća.

Organski scintilatori se mogu pojaviti u kristalnoj formi, mogu biti rastvoren u čvrstoj prozirnoj plasti (plastični scintilatori) kao i u organskim tečnostima (tečni scintilatori).

Čvrsti organski scintilatori su monokristali organskih jedinjenja, najčešće u upotrebi antracen i stilben. Kod ovih scintilatora nije potrebno prisustvo aktivatora, da bi se povećala luminescencija i pogodni su za detekciju nanelektrisanih čestica i brzih neutrona preko uzmaknutog protona. Osetljivi su i na γ -zrake, ali im je energetska rezolucija loša.

Plastični organski scintilatori su čvrsti rastvori koji se koriste za detekciju γ -zraka, β - i α -čestica i brzih neutrona. Imaju slična svojstva kao i tečni organski scintilatori, uz pogodnost da ih nije potrebno stavljati u merne viale, i da ih je moguće praviti u raznim oblicima i geometrijama (vlakna, folije). Pokazuju intertnost prema vodi, vazduhu, mnogim hemikalijama pa se mogu dovoditi u direktni kontakt sa radioaktivnim uzorkom. (1), (2), (8)

5.1. Tečni organski scintilatori

To su scintilatori koji se dobijaju rastvaranjem primarnih organskih scintilatora u odgovarajućim rastvaračima. Među rastvaračima najviše su u upotrebi: ksilen, toluen, benzen, fenilcikloheksan, trietilbenzen i dekalin.

Iako je scintilacioni proces isti kao i kod kristalnih organskih scintilatora, mehanizam apsorpcije energije je drugačiji. U rastvorima, ionizacionu energiju uglavnom upija rastvarač i potom je prosleđuje rastvorenom delu rastvora. Ovaj prenos je veoma brz i efikasan, što ovu vrstu detektora čini nenadmašnim u merenju velikog broja dogadjaja. Dakle, odlikuje ih veoma dobra vremenska rezolucija, a koriste se

u merenjima aktivnosti niskoenergetskih β -emitera, zatim u detekciji kosmičkih zraka, ili snimanju neutronskog energetskog spektra u MeV opsegu. Jedna od odlika tečnih scintilatora je i ta da su veoma osetljivi na nečistoće u rastvaraču.

Efekat prigušenja (quench) nastaje usled postojanja nečistoća unutar rastvora koji se analizira u detektoru. Kao prigušivač (*quencher*) u ovom scintilatoru deluje i rastvoreni kiseonik, pa je potrebno držati ih u zatvorenim bocama kako ne bi došlo do redukcije efikasnosti fluorescencije. Prilikom emisije svetlosti ukoliko unutar rastvora postoje nečistoće tokom merenja scintilacionim detektorom, doći će do reapsorpcije zračenja. Praktično „*quench*” smanjuje realnu količinu zračenja koju bi rastvor emitovao, što će uticati na rezultate (dobiće se manje vrednosti). Pre svakog merenja se radi standardni test na prisustvo materija koje bi moglo prouzrokovati prigušenje (*quench*) pri analizi scintilacionog detektora. Ukoliko je test na prisustvo prigušenja (Standard Quenching Parametar – SQP) negativan, uzorak je spreman za merenje. (2)

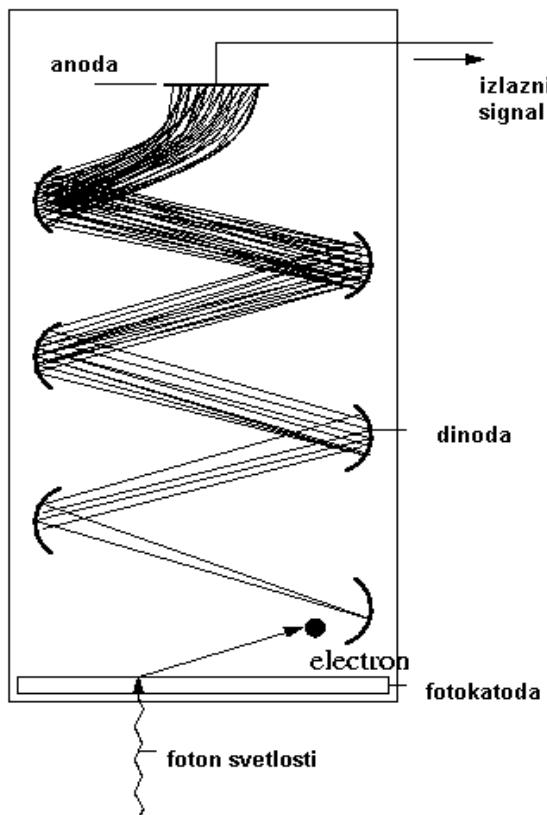
Najveća razlika razlika između organskih i neorganskih je u svetlosnom odzivu i brzinu. Neorganski imaju veliki svetlosni odziv, ali su dosta spori, a organski imaju mali svetlosni odziv, ali veću brzinu.

Tečni scintilacioni brojač se sastoji od scintilatora, fotomultiplikatora i elektronskog uređaja za pojačavanje i obradu impulsa.

Da bi se sa nekim scintilacionim materijalom napravio detektor, neophodno je svetlosne impulse koji se emituju prilikom prolaska zračenja kroz aktivnu zapreminu na neki način pojačati i transformisati u signale koji se kasnije lako mogu obradjivati. To se ostvaruje fotomultiplikatorima. (3)

Fotomultiplikator je elektronska cev cilindričnog oblika, na čijem se jednom kraju nalazi prozor transparentan za svetlost koju emituje scintilator ispod koga se nalazi fotokatoda. Nadolazeći foton udara u fotokatodu, koja je napravljena od fotoemisivnog materijala i koja izbacuje elektron putem photoelektričnog efekta. Tako nastali elektoni se ubrzavaju putem električnog polja nakon čega se usmeravaju na prvu od 10 do 20 dinoda, koje su poredjane od prozora ka suprotnom kraju fotomultiplikatora. Broj izbijenih elektrona zavisi od potencijalne razlike između dinoda, kojih ima 9 – 12 (multiplikacioni faktor milion). Dinode su elektrode napravljene od materijala koji takođe kao i fotokatoda, ima mali izlazni rad za emisiju elektrona. Svaka sledeća dinoda je na višem potencijalu od prethodne, a to se postiže razdelnikom napona. Tipični scintilacioni detektor je na naponu od 1000 V ili više, sa razlikama od 100 V između svake dinode.

Elektroni ubrzani sa prve dinode poseduju dovoljnu energiju da se sa njene površine izbiju novi elektroni. Ti elektroni putem rastućeg električnog polja izbijaju nove elektrone, pa se ukupan broj elektrona umnožava za nekoliko redi veličine. Iza poslednje dinode se nalazi anoda koja je na najvišem potencijalu i čija je uloga da prikupi sve elektrone. (1), (3), (7)



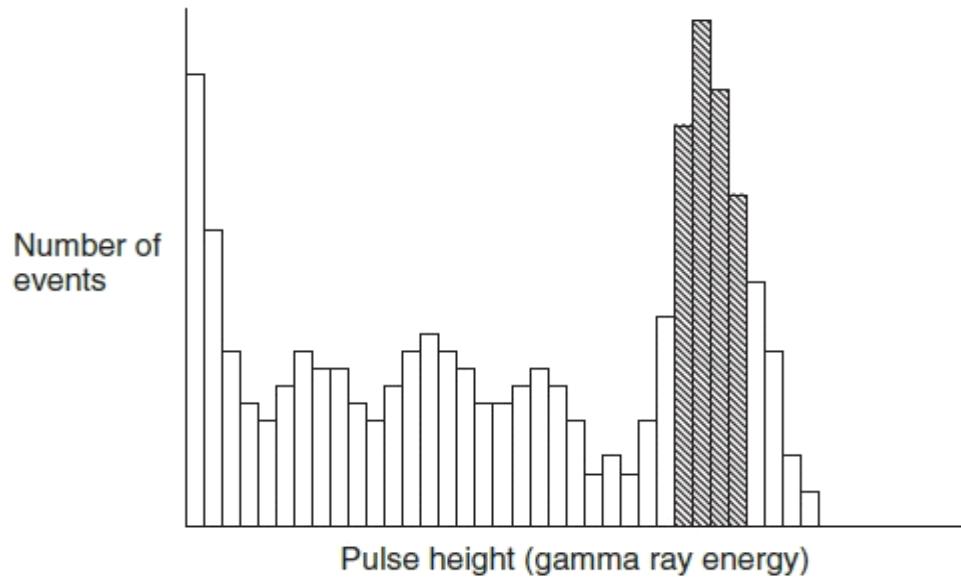
Slika 6. Fotomultiplikator

5.2. Analiza signala

Pre nego što bude reči o samom Quantulusu, ovde će ukratko biti objašnjena analiza i obrada signala kod scintilacionih detektora.

Signal sa fotodetektora se prvo šalje u (pred)pojačavač, pa u A/D konvertor (pretvarač analognog u digitalni signal), koji određuje veličinu signala i prebacuje ga u broj. Ti brojevi se potom histogramiraju (svaki broj je povezan sa po jednim brojačem, koji se oglašava kada se pojavi njegova vrednost). Svaka ADC (*analog – digital converter*) vrednost naziva se kanalom, a vrednost brojača naziva se sadržaj kanala. Ceo skup sadržaja kanala je spektar. Kad se crta histogram, na x – osu idu ADC vrednosti, a na y – osu ide sadržaj kanala. Ovaj proces vrši MCA (*multi channel analyzer*).

PHA, *pulse height analyzer*, ili analizator visine signala, može biti SCA (*single channel analyzer*) ili MCA, već pomenut. Princip rada jednokanalnog analizatora vrlo je jednostavan: on ima diskriminator za donje nivoe (LLD, *lower level discriminator*) i diskriminator za gornje nivoe (ULD, *upper level discriminator*). Kada se pojavi signal sa amplitudom većom od LLD, a nižom od ULD, analizator proizvodi signal (svodi se na 0/1). MCA se svodi na mnoštvo povezanih SCA. (3)



Slika 7. histogram

5.3. Tečni Scintilacioni detektor -Quantulus 1220

Quantulus 1220 je tečni scintilacioni detektor proizvodjača Perkin Elmer (*Perkin Elmer Life Sciences*) koji može da meri izrazito niske energije veštačkih, kosmičkih i drugih prirodnih radionuklida. Koristi se za detekciju α- i β- zračenja, Čerenkovljevog zračenja, X-zraka, Auger-ovih elektrona, luminescencije i γ-zračenja.

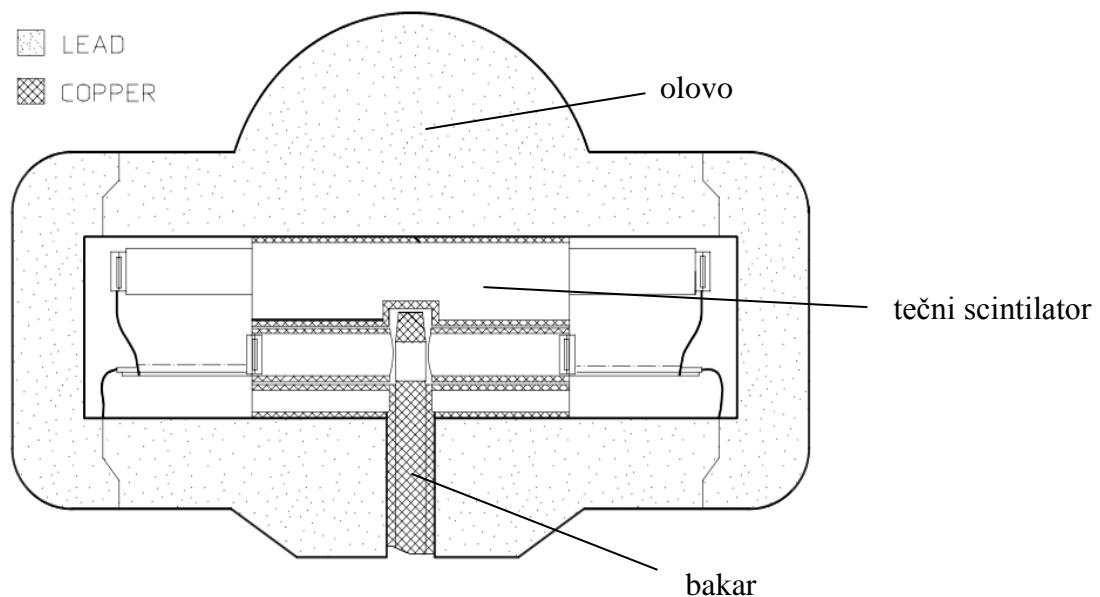
Visina uređaja je 156 cm, dužina 101 cm, dužina 92 cm a težina 1000 kg. Uredjaj je moguće prikopčati na napon od 100, 115, 120, 220, 240 V , a frekvencije na kojima radi su u opsegu 50-60 Hz. Optimalni spoljašnji uslovi za rad *Quantulusa 1220* su vlažnost vazduha od 75% i temperatura od oko 30 0C. (12)



Slika 8. Quantulus 1220 (Begović, 2015)

Zaštita detektora je podeljena na aktivnu i pasivnu, i one zajedno čine veoma moćnu celinu koja daje mali fon.

Pasivnu zaštitu čine sloj olova niske radioaktivnosti i sloj bakra. Sloj olova tzv štit atenuira veći deo γ -zračenja iz okoline i kosmičko zračenje. Ovaj sloj ima širinu do 20 cm iznad same komore za merenje, dok je sa donje strane komore debljina 15cm, a sa bočnih strana 7 – 11cm. Ukupna težina je 600 kg. Sloj bakra služi da atenuira X zračenje i termalne neutrone i da spreči prolazak X zraka do scintilacione tečnosti.



Slika 9. Pasivna zaštita kod detektora Quantulus 1220

Aktivna zaštita se nalazi oko posude sa uzorcima za analizu i sastoji se od mineralnih ulja. Ovu zaštitu čini asimetrični štit u čijem centru se nalazi beta detektor. U aktivnoj zaštiti dolazi do detekcije na principu scintilacione svetlosti koja se emituje pri prolasku čestica i detektuje fotomultiplikatorom. Ti signali se prikupljaju, obradjuju i oduzimaju kao fon od merenja. Pored dva fotomultiplikatora koji se koriste za "hvatanje" signala, kod Quantulusa se koriste još dva koja služe za detekciju pozadinskog efekta. Aktivna zaštita zapravo daje informacije o gama i kosmičkom zračenju redukujući pozadinske efekte bez gubitaka u efikasnosti detekcije. (2), (11),

5.4. Kako radi Quantulus 1220 (višekanalna analiza)?

Kod prikupljanja i obrade podataka na Quantulus-u koriste se razni parametri počevši od statističkog brojanja, stabilnosti uzoraka, promene efikasnosti detektora pa sve do parametara koji opisuju okruženje instrumenta. Da bi se postigla tačnost u prikupljanju princip merenja se zasniva na korišćenju više MCA (*MultiChannel Analyzer*). *Quantulus 1220* ima dva MCA, koji su podeljeni na dve polovine pa imaju četiri spektra od po 1024 kanala rezolucije. Uloga prvog MCA je aktivna zaštita, a drugi je tu da beleži spekture. Spajanjem dve duple analize dobija se umnožena višekanalna analiza koja daje informaciju o broju događaja i enegetskoj distribuciji izotopa koji se meri. Broj događaja je ukupan broj odbroja po kanalima, a energetska distribucija sadržaj svakog kanala. Dakle, višekanalni sistem analize podrazumeva postojanje što većeg broja kanala i memorije koja će da skladišti što veću količinu informacija.

Kako bi ovaj sistem funkcionisao koriste se sledeći elementi: A/D konvertor, analizator oblika impulse PSA, komparator oblika impulse PAC, kolo za korekciju na hemiluminiscenciju DCOS I mnogi drugi.

A/D konvertor određuje visinu pulsa, pozicionira i memoriše, pri čemu se broj podataka selektuje po odgovarajućim skalama. Ovako precizno memorisanje daje mogućnost analize tačno određenih delova spekta, ali i prekid merenja u bilo kom trenutku, nakon čega ostaju sačuvana prethodna merenja.

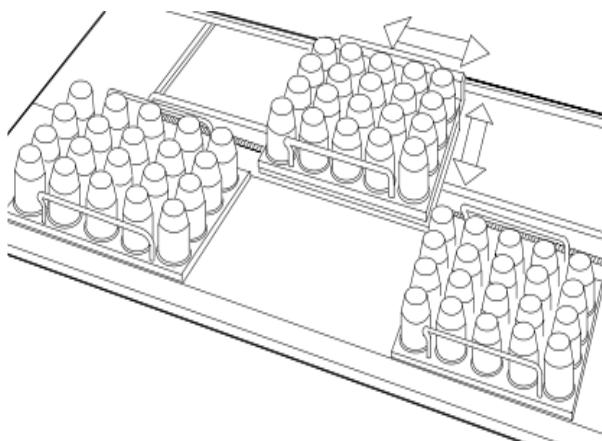
PSA vrši separaciju alfa i beta spektra i dodatno redukuje pozadinske efekte. Takođe omogućava identifikaciju čestica jonizujućeg zračenja i smanjuje background

PAC spanjuje komponentu pozadinskog zračenja koja je izazvana mešanjem elektromagnethih signala u toku LSC merenja. Ovo kolo radi kao diskriminator.

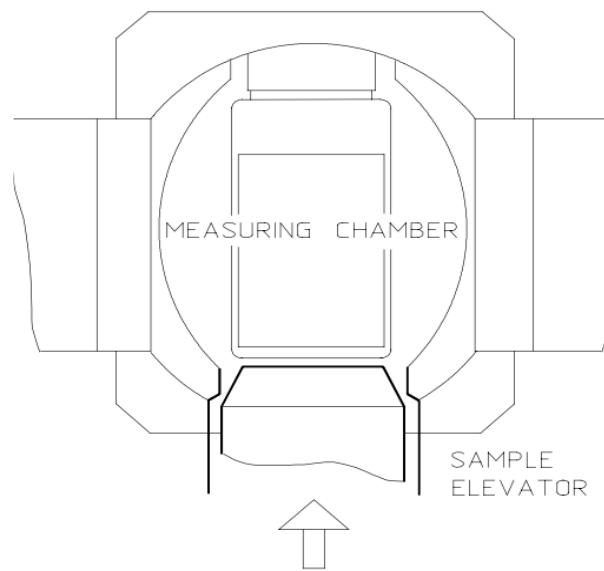
DCOS vrši korekciju na zakasnele koincidencije koje zatim šalje na višekanalni analizator. Višekanalni analizator ga tretira kao hemiluminescentni spektar. Na preostale višekanalne analizatore se usmerava sav drugi signal i snima kao spektar uzorka.

5.5. Tok rada:

Merenje na Quantulus-u je automatizovano. U uređaju postoje tri tacne sa prostorom za bočice koje postavlja laborant. Dimenzije, oblik kao i materijal za izradu boćica su propisane i u skladu sa standardom predviđenim za rad *Quantulus-a 1220*. Boćice su napravljene od stakla ili plastike, a zapremina svake je 20 ml. U ovom eksperimentu korišćene su plastične boćice zbog scintilacije na staklu.



Slika 10. Princip premeštanja tacni sa boćicama.



Slika 11. Prostor za merenje

Koja tacna će biti povučena na analizu zavisi od naredbe koja se saopštava uređaju preko računara i programa *WinQ*. Preko ovog programa se takodje saopštavaju informacije o dužini merenja i broju tacne i boćice koja će biti podvrgnuta analizi. *Quantulus 1220* razlikuje boćice po mestu postavljanja na tacni. Kada tacna stigne u centralni deo uređaja, namešta se u položaj koji je zadat programom i boćica sa uzorkom se uvlači u centralni deo. Analiza se vrši sve do trenutka kada istekne zadati vremenski trenutak, posle koga se boćica vraća u prvobitni položaj, a sledeća istim postupkom dolazi na analizu. (11), (12)

Pri pokretanju programa otvor se prozor (Slika 12.) u koji se upisu komande u vidu davanja naziva i definisanja protokola.

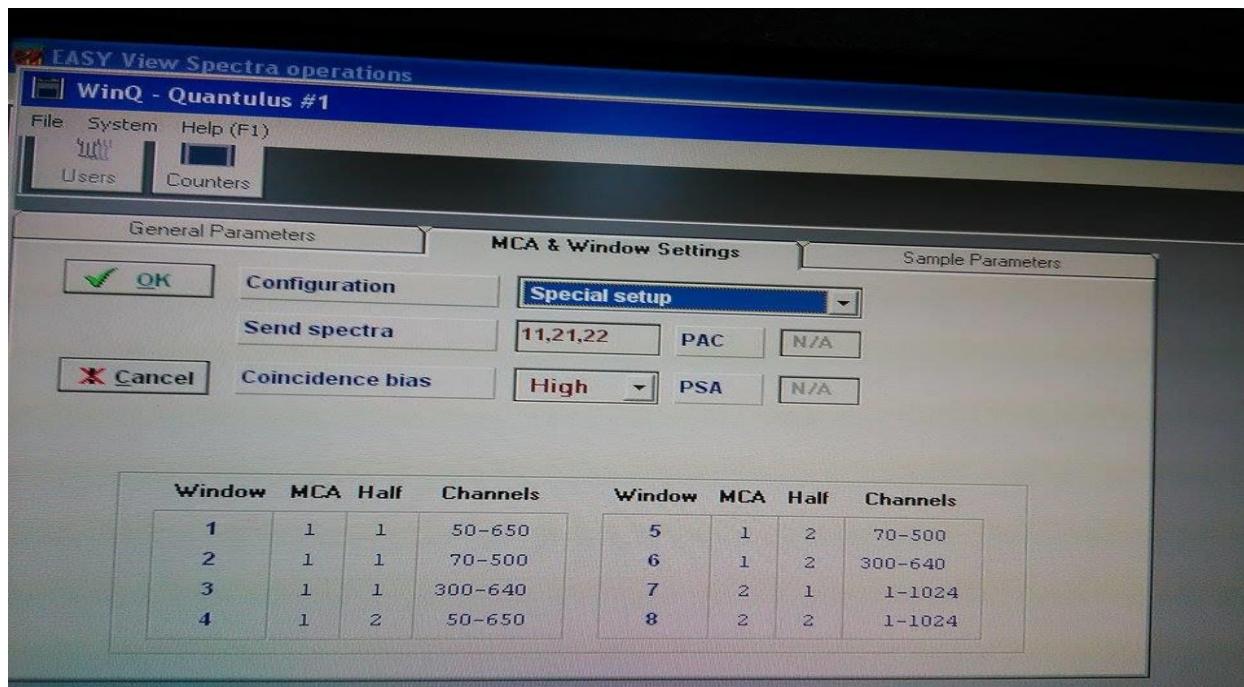


Slika 12. Prozor programa WinQu

Nakon toga se opcijom Queue protokol koji je napravljen uvrštava u posebnu kolonu (treću) što znači da je taj protokol zadat za analizu i uređaj pomera tacne i analizira bočice prema definisanom nalogu u protokolu.

Definisanje protokola: opcijom *New*, otvara se prozor koji u prvom zaglavlju *General Parameters* daju se informacije za naziv protokola, mesta gde će se sačuvati merenjem dobijeni podaci i o broju ponavljanja merenja za jedan uzorak (bočicu).

Potvrđivanje se vrši naredbom *OK*, nakon čega se podešavaju parametri u drugom zaglavlju *MCA & Window Settings* prikazanom na sledećoj slici (Slika 13.).



Slika 13. MCA & Window Settings-drugo zaglavlje (Perkin Elmer, 2000.).

Podešavanje konfiguracije za merenje ^{90}Sr je prikazano u Tabeli 1.

Signal *trigger L*R* (dodavanje signala iz oba uzorka fotomultiplikatora kada su istovremeno detektuju svetlost) i signal blokira *G* (merenje se blokira ako se istovremeno detektuju i čuvaju fotomultiplikatorima.) Fotomultiplikatorima se signali pojačavaju i registruju u višekanalnom spektru (MCA). Čerenkovljev spektar u Quantulus memoriji je sačuvan u SP11, SP21 I SP22 spektru. (6), (7)

	ADC Input	ADC Trigger	Inhibit	Memory Split
MCA 1	LRSUM	L*R	G	N
MCA 2	LRSUM	L*R	N	G

Table 1. WinQ konfiguracija za detekciju Cerenkovljevog zracenja

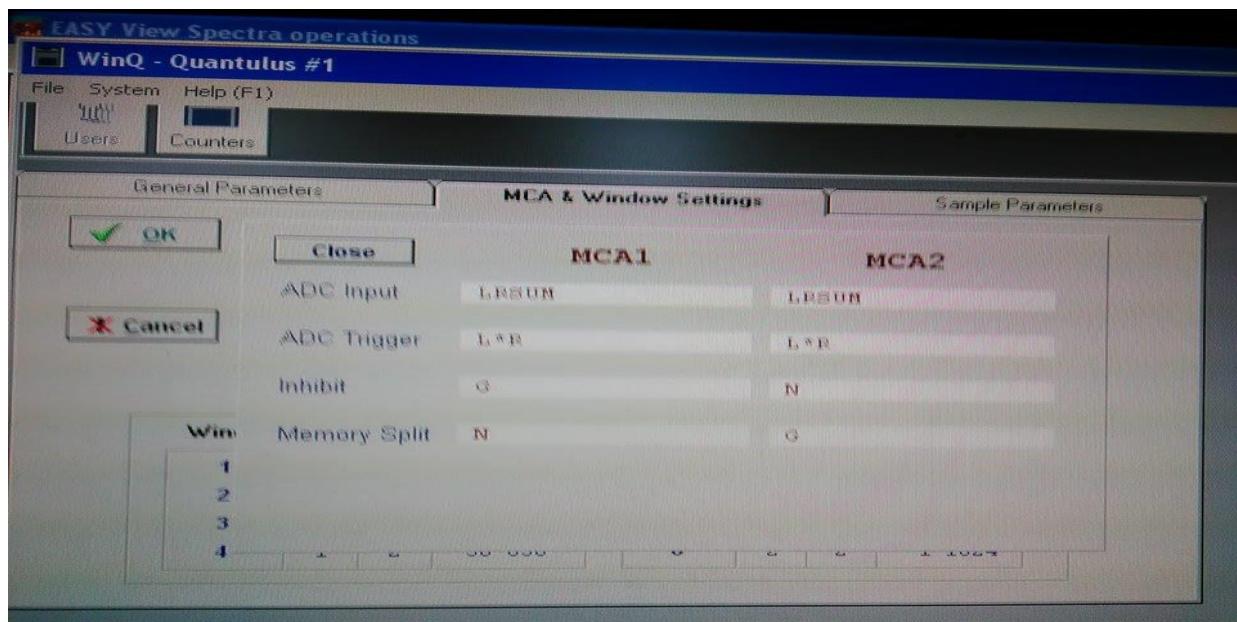
Send spectar vrši selekciju spektra koji će biti sačuvan na disku.

Opcija *Coincidence Bias* predstavlja biranje pragova pri merenju.

High – se koristi kod merenja beta čestica visoke energije.

Zaglavljne MCA imaju dve verzije *MCA1* i *MCA2*, obe imaju po dve polovine koje sadrže spektar, tako da je spektar kodiran brojevima 11, 12, 21, 22. *PAC* (*Pulse Amplitude Comparation*), komparacija

amplitude signala, i *PSA* (*Pulse Shape Analyzer*), analiza oblika signala, su elektronski dodaci koji mogu da utiču na dodatnu analizu pulsa. (Slika 14.)



Slika 14. MCA Sample Parameters

U trećem zaglavlju, *Sample Parameters*, unose se podaci vezani za redosled, poziciju i dužinu merenja bočica na tacnama.

Program *Win Q* daje mogućnost relativno jednostavne manipulacije tečnim scintilacionim detektorom *Quantulus 1220*. Dobijeni rezultati su pregledni i lako dostupni. Sama upotreba programa *Win Q* nije zahtevna za izvršioca. (2)

6. Detekcija Čerenkovljevog zračenja u tečnom scintilacionom brojaču

Kao detektor za merenje aktivnosti $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ koristi se niskofonski alfa/beta spektrometar Quantulus 1220 proizvođača PerkinElmer. Za akviziciju spektra se koristi pomenuti softver WinQ, a spektri se obrađuju pomoću EASYView softvera. Najčešće korišćene metode izdvajanja ^{90}Sr su: oksalna metoda, ekstrakciona metoda, jonoizmenjivačka metoda izdvajanja Sr od Ca. Merenja ^{90}Sr se vrše u gasnim proporcionalnim brojačima, tečnim ili plastičnim scintilacionim brojačima. Postoje dva pristupa merenjima, merenje ^{90}Sr aktivnosti odmah nakon izolacije izotopa, ili čekanje da se dostigne ravnoteža sa potomkom ^{90}Y i merenje aktivnosti $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$.

Kako je ^{90}Y takodje beta emiter sa maksimalnom energijom emitovane beta čestice $E=2280 \text{ keV}$ i periodom poluraspada od 64h, on je u ravnoteži sa jezgrom ^{90}Sr . I u slučaju kada ova dva radionuklida nisu u ravnoteži, u kratkom vremenskom intervalu se postiže ravnotežno stanje (već nakon 18 dana). Dakle, merenjem aktivnosti ^{90}Y zapravo se određuje i aktivnost ^{90}Sr , što je prednost zbog velikih brzina elektrona emitovanih iz ^{90}Y koje generišu Čerenkovljevo zračenje u medijumima kao što su voda, mleko itd. Čerenkovljevo zračenje je usmereno, intenzitet mu zavisi od indeksa prelamanja sredine u kojoj se prostire. (3), (6), (7)

Uzorci zapremine 20 ml odmere se u plastične bočice, nakon čega su spremni odmah za merenje. Fonski uzorci pripremaju se odmeravanjem 20 ml destilovane vode. Efikasnost detekcije i fon zavise od LS brojača, protokola brojanja i tipa bočice.

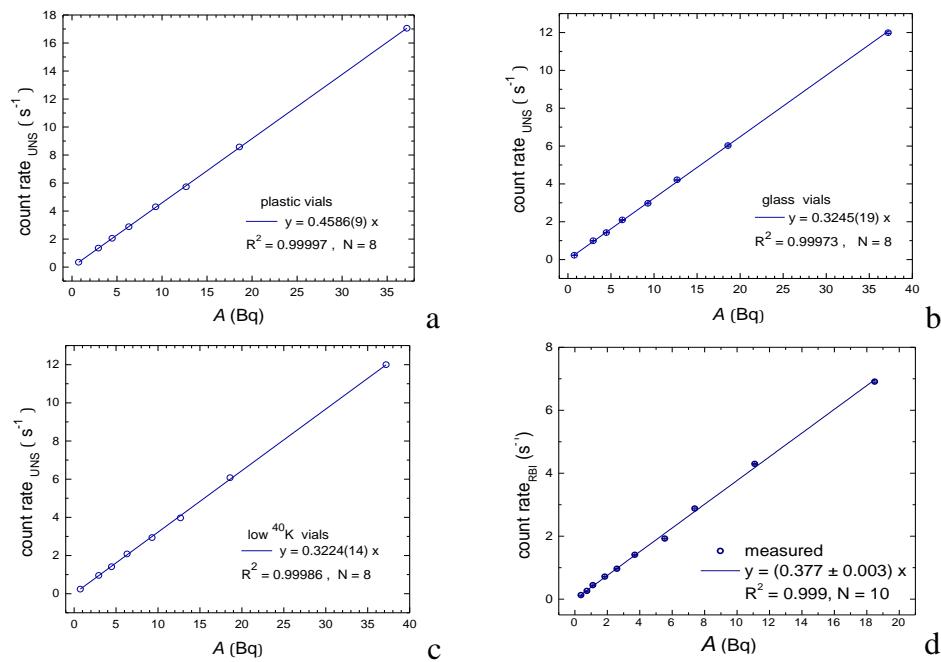
Uvek je potrebno izmeriti i fon i standard radi postizanja istih uslova merenja. Pre određivanja koncentracije aktivnosti $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ u nepoznatom uzorku, potrebno je sistem kalibrirati, tj. odrediti efikasnost detekcije za dati tip bočica i zapreminu uzorka merenjem kalibracionih standarda poznatih aktivnosti. Da bi se procenila efikasnost za merenje aktivnosti $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ u vodi, koriste se plastične bočice zapremine 20 ml, a za kalibraciju dektorskog sistema korišćen je standardni radioaktivni materijal (vodeni rastvor $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$) proizveden od strane Češkog Metrološkog Instituta, Inspektorijat za Jonizujuće zračenje, sertifikovane aktivnosti $A(^{90}\text{Sr}) = 38.18 \text{ Bq} \cdot \text{ml}^{-1}$ sa kombinovanom mernom nesigurnošću 0.5%, na dan 1/10/2013.

Plastične bočice su se pokazale kao najbolje pri detekciji ^{90}Sr . Odabrane su zbog toga što ne sadrže kalijum, koga ima u staklu i koji može da doprinese pozadinskim efektima. (3)

Ovo se može videti u rezultatima koje je dobila laboratorija za fiziku (Laboratorija za nisku radioaktivnost na Katedri za fiziku Univerziteta u Novom Sadu (UNS) u Srbiji) detektujući ^{90}Sr na istoj vrsi detektoru i korišćenjem različitih vrsta boćica. Pripremljena su kalibraciona rešenja utvrđena mernim uslovima, a efikasnost merenja ε je u oba slučaja određena linearnim fitom. Iz sledeće tabele se vidi da plastične boćice daju veću efikasnost od staklenih, ali isto tako da se vrednosti dobijene za plastične boćice razlikuju.

Vrsta boćica	odbroj (ch)	$\varepsilon [\%]$	$R_b [\text{s}^{-1}]$	$DL [\text{Bq L}^{-1}]$
Plastic UNS	130-430	45.86 ± 0.09	0.008	0.32 (300 min)
Glass	130-430	32.45 ± 0.19	0.021	-
Low ^{40}K glass	130-430	32.24 ± 0.14	0.014	-

Tabela 2. Efikasnosti za boćice različitih materijala



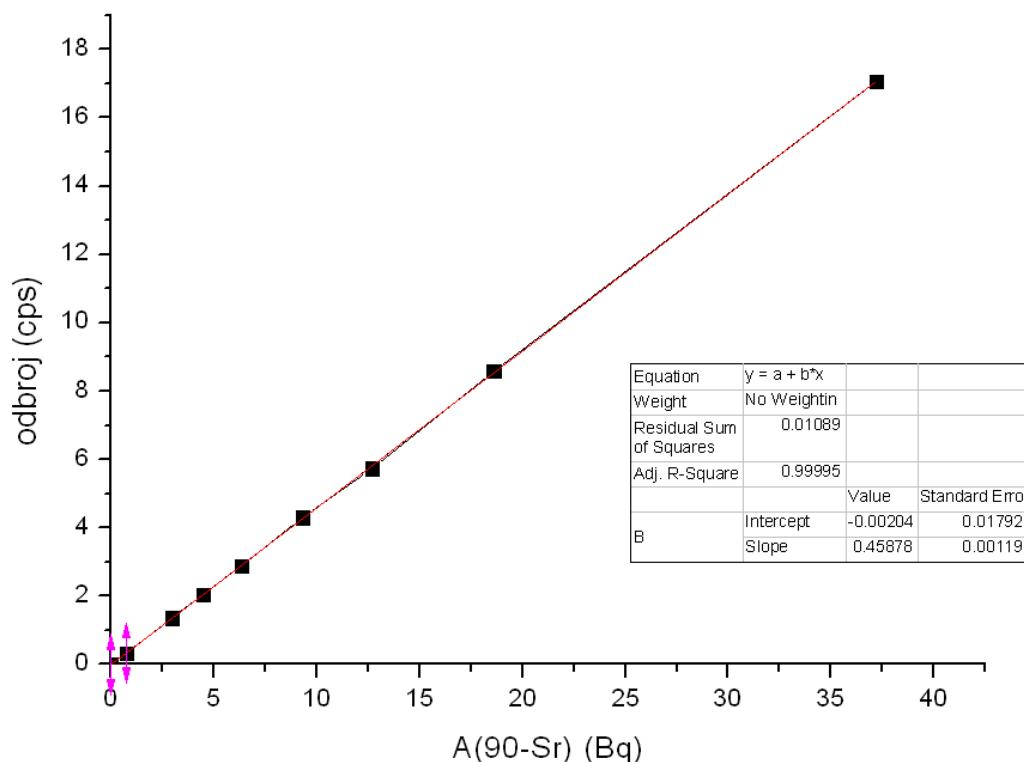
Slika 15. Kalibracija ^{90}Sr merenja u vodi, $V = 20 \text{ ml}$

a) plastične boćice, b) High- performance staklene boćice, c) nisko-kalijum staklene boćice

6.1. Određivanje efikasnosti detekcije

Za određivanje efikasnosti detekcije za određivanje aktivnosti ^{90}Sr korišćen je set kalibracionih referentnih standarda $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, aktivnosti $A_1 = 0.744 \text{ Bq}$, $A_2 = 2.94 \text{ Bq}$, $A_3 = 4.463 \text{ Bq}$, $A_4 = 6.322 \text{ Bq}$, $A_5 = 9.298 \text{ Bq}$, $A_6 = 12.682 \text{ Bq}$, $A_7 = 18.595 \text{ Bq}$ i $A_8 = 37.190 \text{ Bq}$ sa kombinovanom mernom nesigurnošću 0.5%.

Za blank je korišćena dejonizovana vode ukupne zapremine 20 ml. Da bi se umanjile statističke greške, tipično vreme merenja blanka iznosi 60.000 s.



Slika 16. Kalibracija ^{90}Sr merenja u 20 ml vode u plastičnim vialima

Na osnovu kalibracione prave y (cps) = $a \cdot x$ (Bq) određuje se efikasnost detekcije pri opimalnom prozoru određenom na osnovu vrednosti FOM.

$$\varepsilon = 45,88 (11) \%$$

Optimalan prozor pri određivanju aktivnosti $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ određuje se na osnovu najveće vrednosti FOM (Figure of Merit) koja se izračunava kao:

$$\text{FOM} = \frac{\text{efficiency}^2}{\text{background}}$$

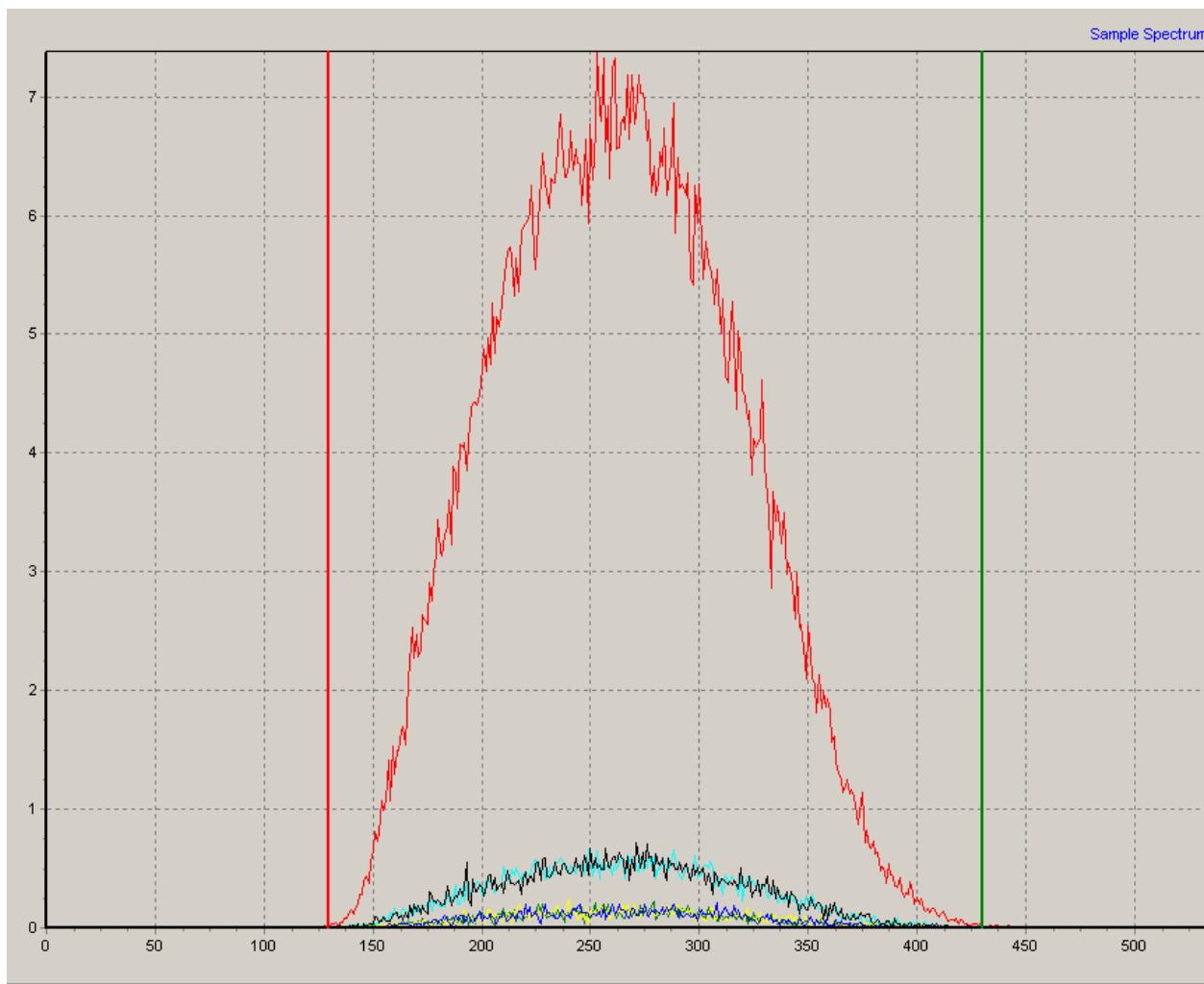
Rezultati dobijeni za FOM prikazani su u Tabeli 3:

Kanal	Efikasnost [%]	Fonski odbroj [cps]	FOM
100-450	45.88(10)	0.008	26.31
130-438	45.86(8)	0.008	26.28
180-370	42.56(7)	0.007	25.90
190-360	40.35(6)	0.007	23.32

Tabela 3. Optimalna podešavanja prozora za određivanje aktivnosti ^{90}Sr (korišćene su plastične bočice)

Za optimalan prozor pri određivanju aktivnosti ^{90}Sr , na osnovu vrednosti Fom, odabranisi su kanali koji pokrivaju ceo spektar (Slika 16.).

Iz ovih rezultata zaključeno je da se za razne vrste bočica dobijaju različite efikasnosti. Dobijeni rezultati ukazuju na važnost pri izboru bočica. Bolje performanse (veća efikasnost) su dobijene za plastične bočice nego za staklene. Veća efikasnost detekcije Čerenkovljevog zračenja je zbog efekata disperzije ili rasejanja anizotropnih (usmerenih) fotona u plastici, zbog kojih njihova raspodela postaje izotropna, pa raste i efikasnost brojanja (verovatnoća detekcije) fotona u fotomultiplikatorskim cevima.



Slika 17. Spektar generisan Čerenkovljevim zračenjem $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (EasyView)

6.2. Određivanje aktivnosti ^{90}Sr u vodi detekcijom Čerenkovljevog zračenja

Aktivnost stroncijuma u uzorku $A [\text{Bq L}^{-1}]$ se određuje korišćenjem izraza:

$$A = \frac{R_s - R_b}{\epsilon V} \quad 6.1.$$

gde su R_s i R_b odbroji u [cps] uzorka i blanka, V [mL] je zapremina analiziranog uzorka vode, i ϵ efikasnost detekcije.

6.3. Procena merne nesigurnosti u_c i granice detekcije MDA

Kombinovana merna nesigurnost $u_c(A)$ određuje se korišćenjem izraza:

$$u_c(A) = A \sqrt{\frac{u_{RN}^2}{R_N^2} + \frac{u_\epsilon^2}{\epsilon^2} + \frac{u_V^2}{V^2}} \quad 6.2.$$

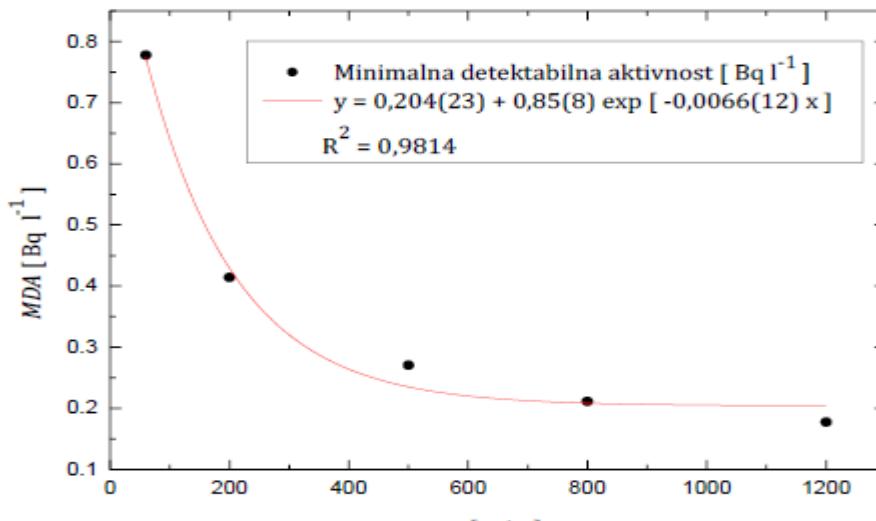
gde je $R_N = R_g - R_b$ neto brzina brojanja uzorka (cps), u_{RN} je kombinovana merna nesigurnost pri izračunavanju neto brzine brojanja i izračunava se kao $u_{RN} = (u_{Rg}^2 + u_{Rb}^2)^{1/2}$ gde su u_{Rg} i u_{Rb} standardne nesigurnosti pri merenju ukupne i brzine brojanja blanka, ϵ i u_ϵ su efikasnost i odgovarajuća merna nesigurnost, i V i u_V su zapremina uzorka i odgovarajuća merna nesigurnost.

Granica detekcije MDA za uzorak aktivnosti A se određuje kao:

$$DL(A) = 3.29 \frac{u_{Rb} \sqrt{2}}{\epsilon V} \quad 6.3.$$

i zavisi od merne nesigurnosti sa kojom se određuje odbroj blanka u_{Rb} . Zapremina uzorka je $V = (20.0 \pm 0.1)$ mL.

Povećavanjem vremena merenja smanjuje se $u(Rb)$, pa se i postignuta donja granica detekcije koncentracije aktivnosti stroncijuma smanjuje. (9)



Slika 18. Postignuta granica minimalne detektibilne ^{90}Sr koncentracije aktivnosti

6.4. Evaluacija rezultata

Za potrebe kontrole kvaliteta i pouzdanosti merenja, izvršeno je merenje četiri uzorka sa različitom nepoznatom aktivnošću ^{90}Sr (Tabela) i izvršena je statistička obrada rezultata merenja.

Dobijeni rezultati su transformisani u statističke veličine radi njihove lakše interpretacije i omogućavanja poredjenja. U daljem tekstu su date sledeće statističke veličine:

1. z-vrednost

Osnovna ideja *z-vrednosti* je da omogući poređenje dobijenih rezultata pojedinačnih laboratorijskih učesnica, bez obzira na princip koji se nalazi u osnovi merenja i prirodu predmeta ispitivanja. *z-vrednost* se izračunava na osnovu sledeće jednačine:

$$z\text{-vrednost} = \frac{A_{lab} - A_{ref}}{U_{lab}} \quad (6.4.)$$

gde je:

A_{lab} - rezultat laboratorije učesnice u međulaboratorijskom poređenju,

A_{ref} - referentna vrednost i

U_{lab} - merna nesigurnost rezultata laboratorije učesnice.

Predznak z-vrednosti ($-/+$) ukazuje na negativno ili pozitivno odstupanje u odnosu na referentnu vrednost.

- Ukoliko je $|z\text{-vrednost}| \leq 2$, z-rezultati se smatraju **prihvatljivim (P)**.
- Ukoliko je $|z\text{-vrednost}| \geq 3$, z-rezultati se smatraju **neprihvatljivim (N)**.
- Ukoliko je $2 \leq |z\text{-vrednost}| \leq 3$, z-rezultati se smatraju **diskutabilnim (D)**.

2. *u-test*

Vrednost parametra u predstavlja tačnost rezultata merenja i određuje se na osnovu jednačine (6.5.):

$$u = \frac{|A_{ref} - A_{lab}|}{\sqrt{u_{ref}^2 + u_{lab}^2}} \quad 6.5.$$

gde je:

A_{ref} , A_{lab} i u_{lab} - isto značenje kao u jednačini (6.4.), a

u_{ref} - merna nesigurnost referentne vrednosti.

- Ukoliko je u -vrednost $\leq 2,58$, rezultati se smatraju **prihvatljivim (P)**.
- Ukoliko je u -vrednost $> 2,58$, rezultati se smatraju **neprihvatljivim (N)**.

3. *Biasrel (relativni bias)*

Relativno odstupanje između rezultata laboratorije učesnice i referentne vrednosti naziva se procena *biasa* laboratorije. Procena *relativnog biasa* određuje se na osnovu jednačine (6.6.):

$$bias_{rel} = \frac{A_{lab} - A_{ref}}{A_{ref}} \times 100\% \quad 6.6.$$

4. Ur (proširena relativna merna nesigurnost)

Proširena relativna merna nesigurnost ili proširena relativna nesigurnost (***Ur***) jednaka je relativnoj kombinovanoj standardnoj mernoj nesigurnosti (***uc***) pomnoženoj koeficijentom obuhvata ili pokrivanja (***k***). Merna nesigurnost rezultata laboratorijskih podataka je za $k=1$, što u slučaju normalne raspodele daje nivo poverenja od 68 %. Relativna kombinovana standardna nesigurnost izračunata je prema jednačini (6.7.):

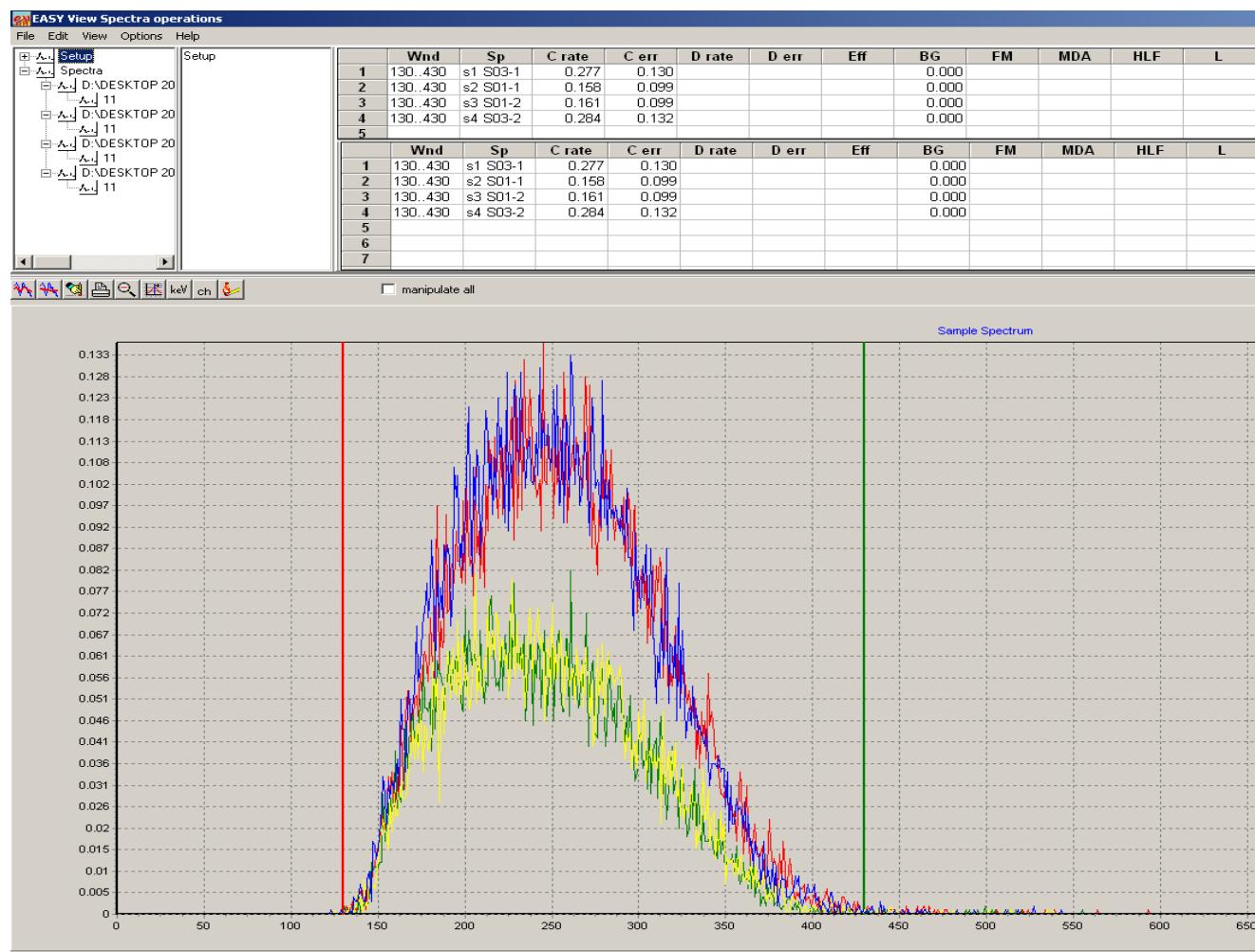
$$u_c = \sqrt{\left(\frac{u_{ref}}{A_{ref}}\right)^2 + \left(\frac{u_{lab}}{A_{lab}}\right)^2} \times 100\% \quad 6.7.$$

- Ukoliko je $|bias_{rel}| \leq Ur$, rezultati za preciznost se smatraju **prihvatljivim (P)**.
- Ukoliko je $|bias_{rel}| \geq Ur$, rezultati za preciznost se smatraju **neprihvatljivim (N)**.

Sample No.	A_{sp} (Bq L ⁻¹)	UNS rezultati				
		<i>A</i> [Bq L ⁻¹]	<i>z</i>	<i>u</i>	<i>bias_{rel}</i>	<i>Ur</i>
1	37.2 ± 0.5	38.5 ± 0.6	2,16	1,66	216	2,05
2	74.4 ± 0.8	76.3 ± 2.4	0,80	0,75	80	3,32
3	111.6 ± 2.0	112.6 ± 1.3	0,77	0,42	77	2,07
4	148.8 ± 2.0	149.6 ± 0.5	1,70	0,39	170	1,39
5	185.9 ± 2.5	187.9 ± 2.4	0,80	0,58	80	1,85

Tabela 4. Rezultati statističkih vrednosti

Na osnovu dobijenih rezultata (z, u, Ur i bias vrednosti) može se zaključiti da su dobijeni rezultati tačni i precizni, čime je potvrđena kompetentnost određivanja ⁹⁰Sr u uzorcima vode. (da je detektor dobro kalibriran). (15)



Slika 19. Određivanje aktivnosti nepoznatih uzoraka

	uzorci	A(Bq)
1.	s1 s03-1	16,02±2,94
2.	s2 s01-1	12,97±0,11
3.	s3 s01-2	6,76±6,32
4.	s4 s03-2	16,57±3,49

Tabela 5. Aktivnosti izračunate preko izraza 6.1.

Na osnovu dobijenih rezultata (z , u , Ur i bias vrednosti) može se zaključiti da su dobijeni rezultati tačni i precizni, čime je potvrđena kompetentnost određivanja ^{90}Sr u uzorcima vode. (da je detektor dobro kalibriran).

7. Ispitivanje difuzije ^{90}Sr kroz plastične bočice

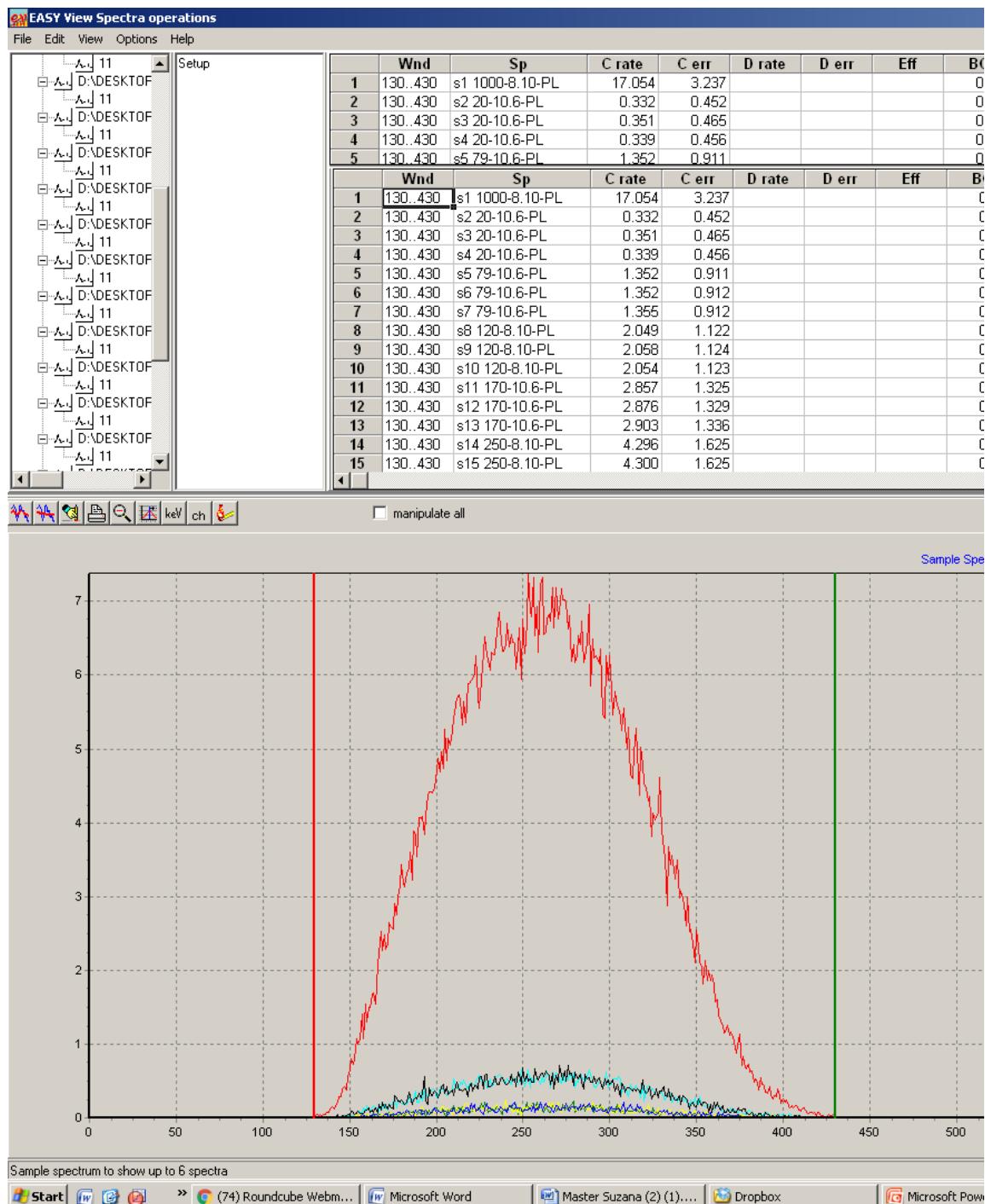
Prilikom rutinske provere efikasnosti detekcije, primećeno je da je oblik spektra kalibracionih uzoraka ^{90}Sr pripremljenih u plastičnim bočicama u septembru 2014. godine, posle izvesnog vremena pokazao odstupanje od početnog. Naime, spektar je izlazio van gornjeg opsega kanala (130-430), pri čemu je došlo i do smanjenja ukupnog odbroja u datim kanalima, što utiče na efikasnost detekcije.

Ova pojava može najverovatnije da se pripše difuziji ^{90}Sr kroz zidove plastične bočice. Da bi se ispitala ova pojava, i da bi odredili vremenski period u kome pripremljeni standard ^{90}Sr može da se koristi za kalibraciju sistema, urađen je niz merenja odbroja uzorka sa različitom spajkovanim aktivnošću stroncijuma (1ml, 0,5 ml, 0,1 ml).

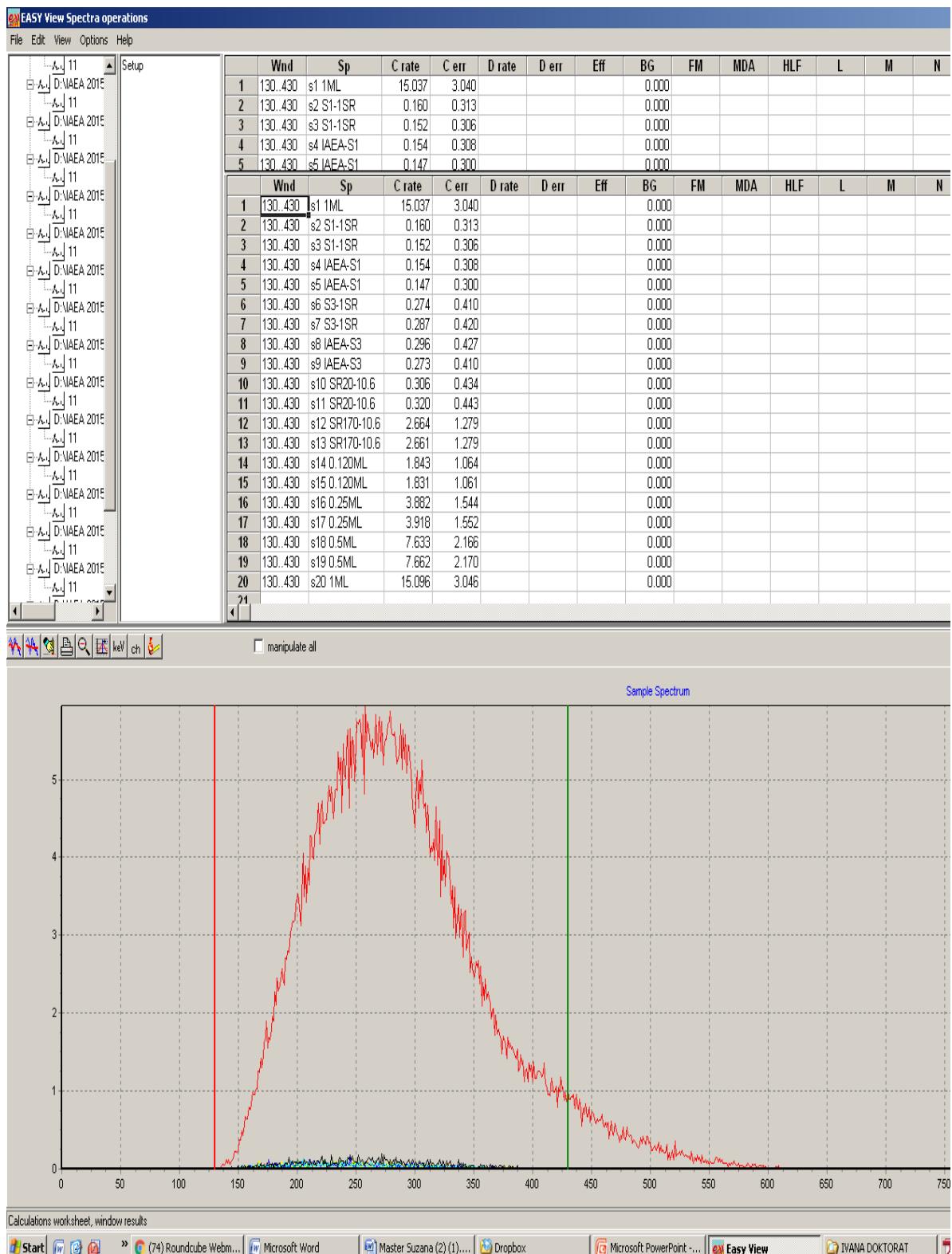
Merenja su izvršena u periodu Novembar 2015. –Januar 2016.

Rezultati su prikazana u Tabelama 6., 7., 8.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da uzorci koji stoje u plastičnim bočicama u toku 2 meseca nisu pokazala odstupanja od referentnih vrednosti, i da se uzorci i posle dva meseca stajanja mogu korisiti za kalibraciju i merenja.



Slika 20. Septembar 2014



Slika 21. Septembar 2015.

Ispitivanje stabilnosti uzorka u toku dva meseca.

U plastične bočice 20 ml vode + 1 ml standarda stroncijuma, 20 ml vode + 0,5 ml stroncijuma i 20 ml + 0,1 ml standarda stroncijuma.

Uzorci u plastičnim bočicama su pripremljeni 18.11.2015. godine. U uzorak destilovane vode zapremine 20 ml spajkovane su različite aktivnosti standarda ^{90}Sr (1ml, 0,5 ml i 0,1 ml). Praćena je promena u odboru (cps) i obliku spektra u toku dva meseca (do 21.1.2016.). Rezultati su prikazani na Slikama od 22- i Tabeli 6, 7 i 8.

Tabela 6 . Promena u odboru (cps) za uzorak vode u kojoj je spajkovan 1 ml stroncijuma u plastičoj bočici

Datum	cps (^{90}Sr)	kanali
18.11.2015.	16,352	130-430
20.11.2015.	16,092	130-430
21.11.2015.	16,092	130-430
22.11.2015.	16,139	130-430
23.11.2015.	16,110	130-430
24.11. 2015.	16,261	130-430
25.11. 2015.	16,080	130-430
26.11. 2015.	16,344	130-430
27.11. 2015.	16,141	130-430
28.11. 2015.	16,178	130-430
1.12. 2015.	16,049	130-430
2.12. 2015.	16,213	130-430
4.12. 2015.	16,171	130-430
5.12. 2015.	16,194	130-430
16.12. 2015.	16,070	130-430
18.12.2015.	16,163	130-430
21.01.2016.	16,107	130-430

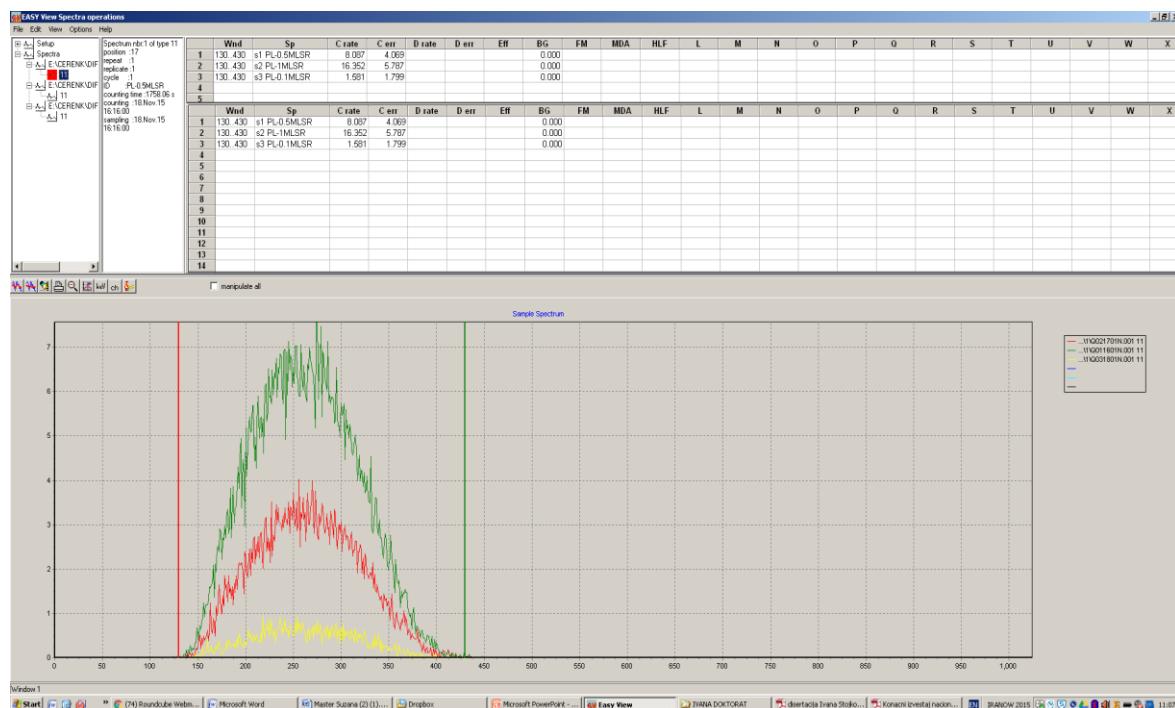
Tabela 7. Promena u odboru (cps) za uzorak vode u kojoj je spajkovan 0.5 ml stroncijuma u plastičnoj bočici

Datum	cps (^{90}Sr)	kanali
18.11.2015.	8,087	130-430
20.11.2015.	8,055	130-430
21.11.2015.	8,066	130-430
22.11.2015.	7,885	130-430
23.11.2015.	7,998	130-430
24.11. 2015.	8,092	130-430
25.11. 2015.	7,970	130-430
26.11. 2015.	7,958	130-430
27.11. 2015.	7,994	130-430
28.11. 2015.	7,993	130-430
1.12. 2015.	8,057	130-430
2.12. 2015.	8,180	130-430
4.12. 2015.	8,183	130-430
5.12. 2015.	8,176	130-430
16.12. 2015.	8,186	130-430
18.12.2015.	8,133	130-430
21.01.2016.	8,097	130-430

Tabela 8. Promena u odboru (cps) za uzorak vode u kojoj je spajkovan 0.1 ml stroncijuma u plastičoj bočici

Datum	cps (^{90}Sr)	kanali
18.11.2015.	1,581	130-430
20.11.2015.	1,626	130-430
21.11.2015.	1,636	130-430
22.11.2015.	1,651	130-430
23.11.2015.	1,696	130-430
24.11. 2015.	1,701	130-430
25.11. 2015.	1,624	130-430
26.11. 2015.	1,611	130-430
27.11. 2015.	1,631	130-430
28.11. 2015.	1,645	130-430
1.12. 2015.	1,657	130-430
2.12. 2015.	1,649	130-430
4.12. 2015.	1,632	130-430
5.12. 2015.	1,604	130-430
16.12. 2015.	1,642	130-430
18.12.2015.	1,702	130-430
21.01.2016.	1,668	130-430

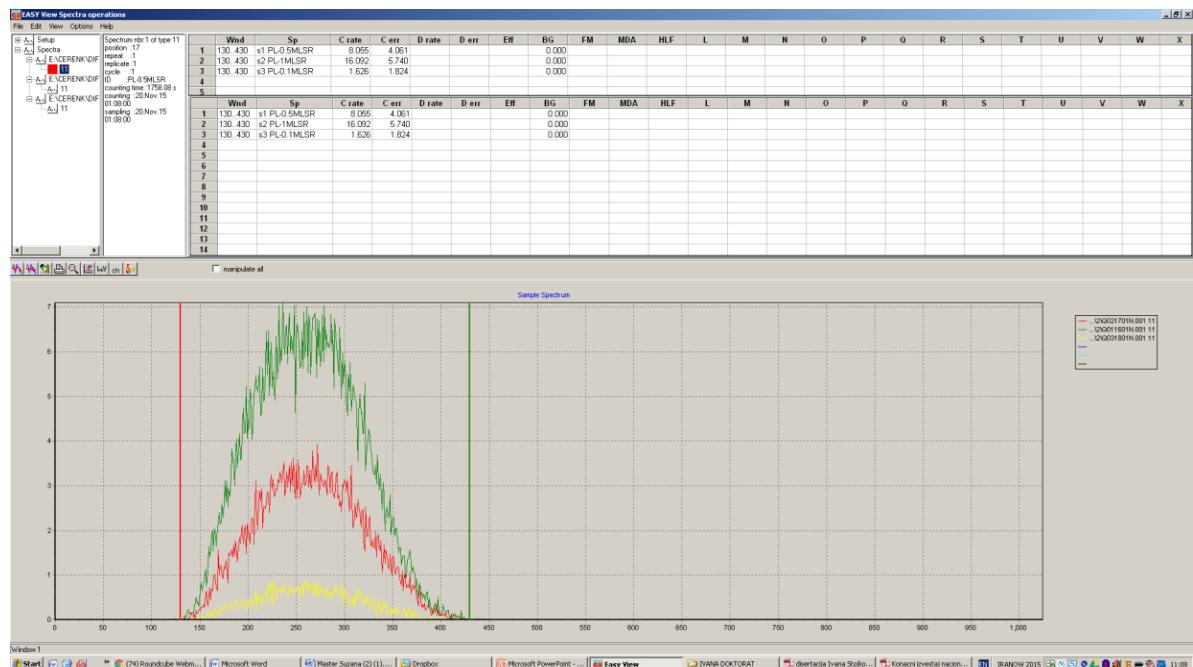
18.11.2015. (Slika 22.)



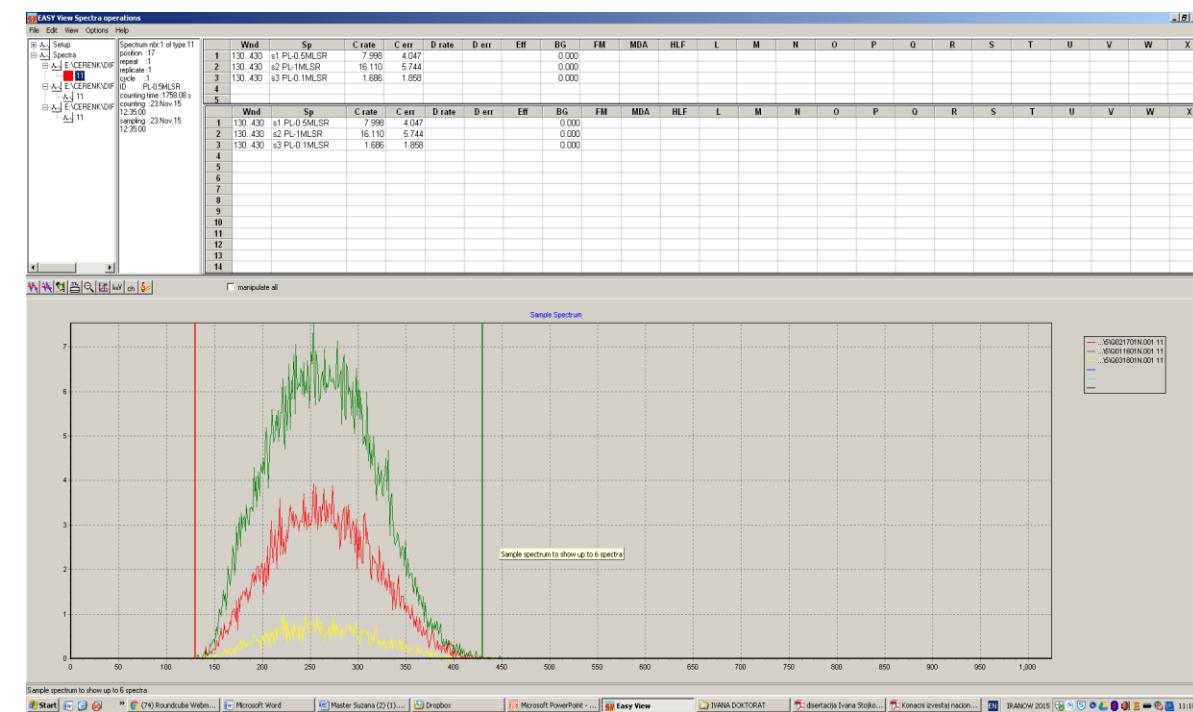
20.11.2015. (Slika 23.)



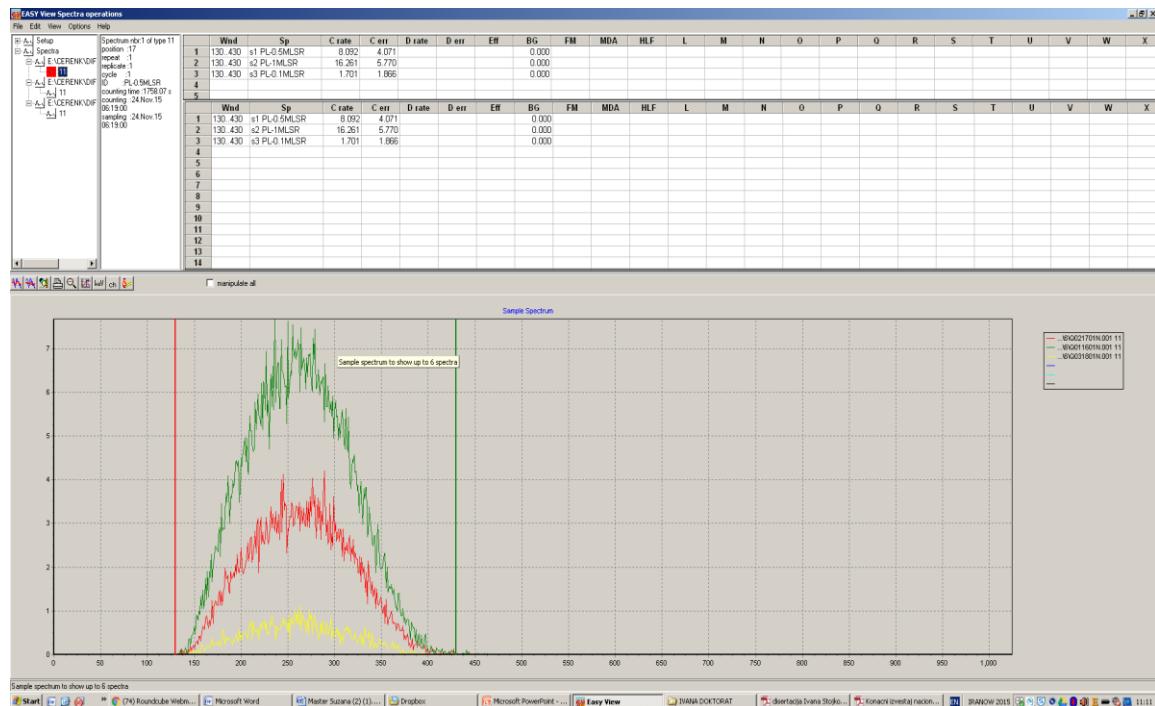
21.11.2015. (Slika 24.)



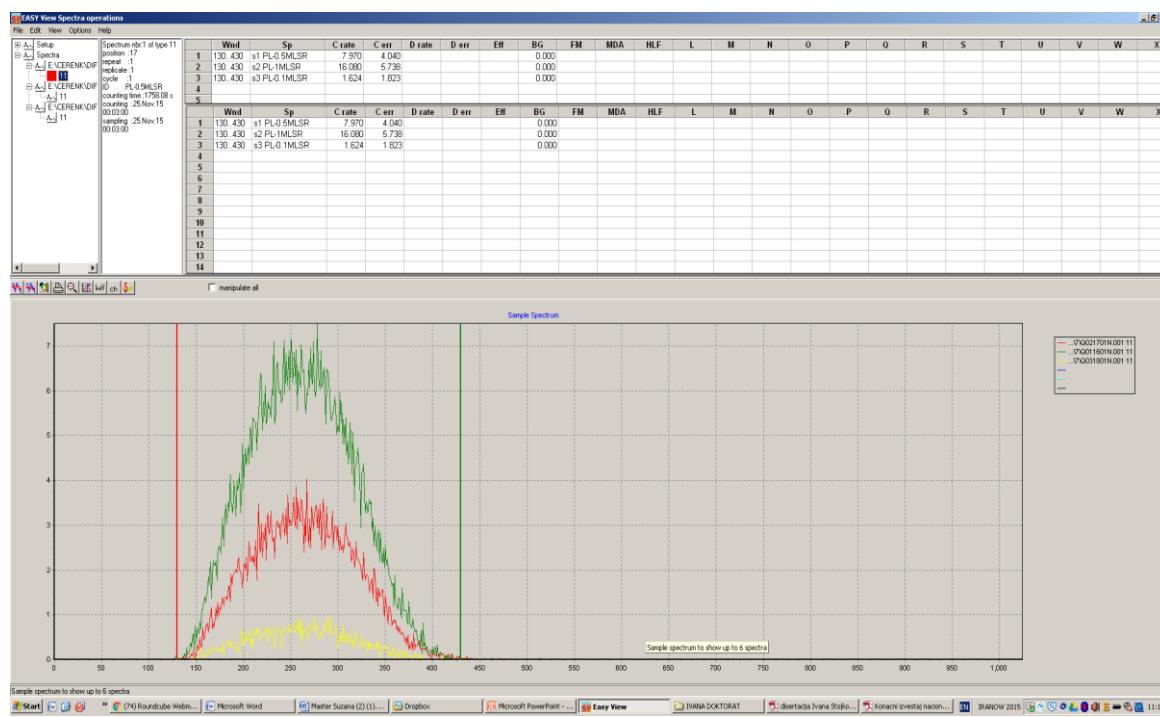
23.11.2015. (Slika 25.)



24.11.2015. (Slika 26.)



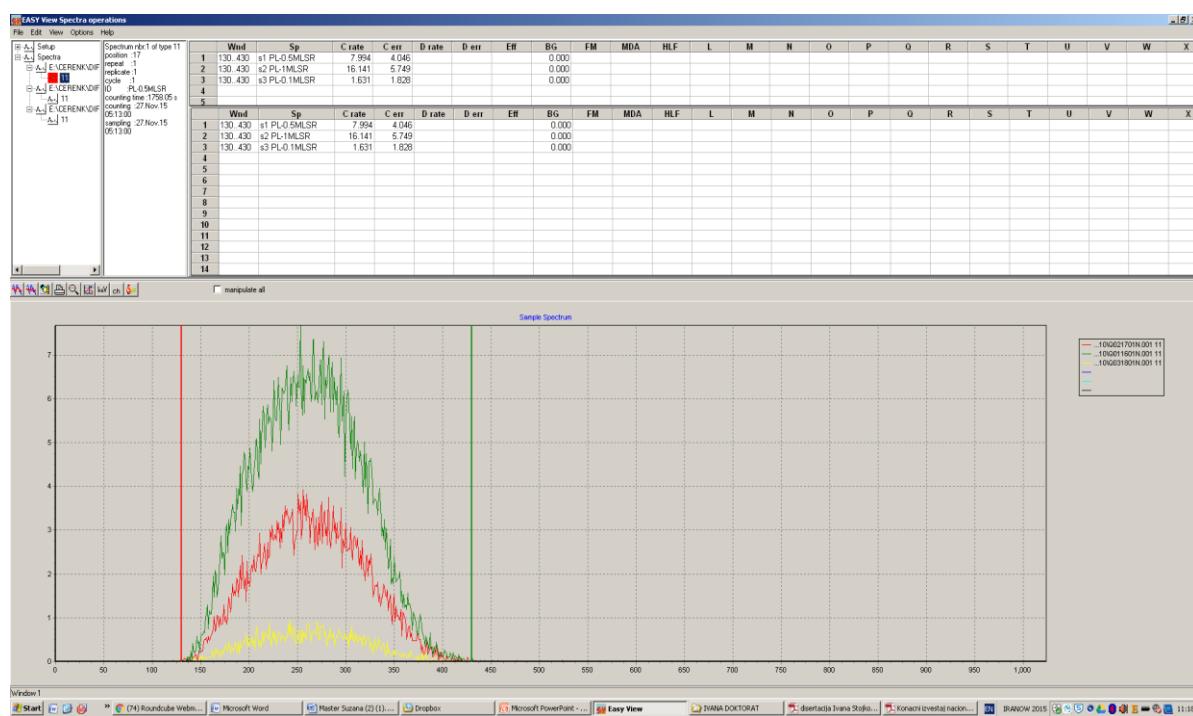
25.11.2015. (Slika 27.)



26.11.2015. (Slika 28.)



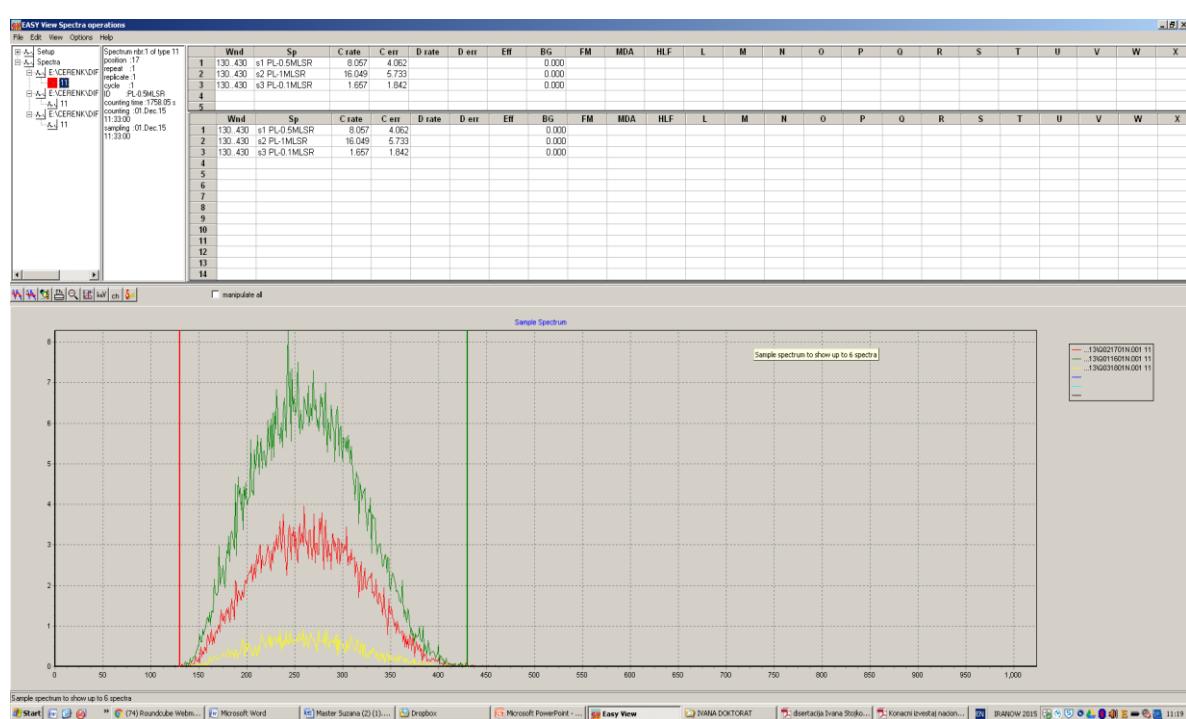
27.11.2015. (Slika 29.)



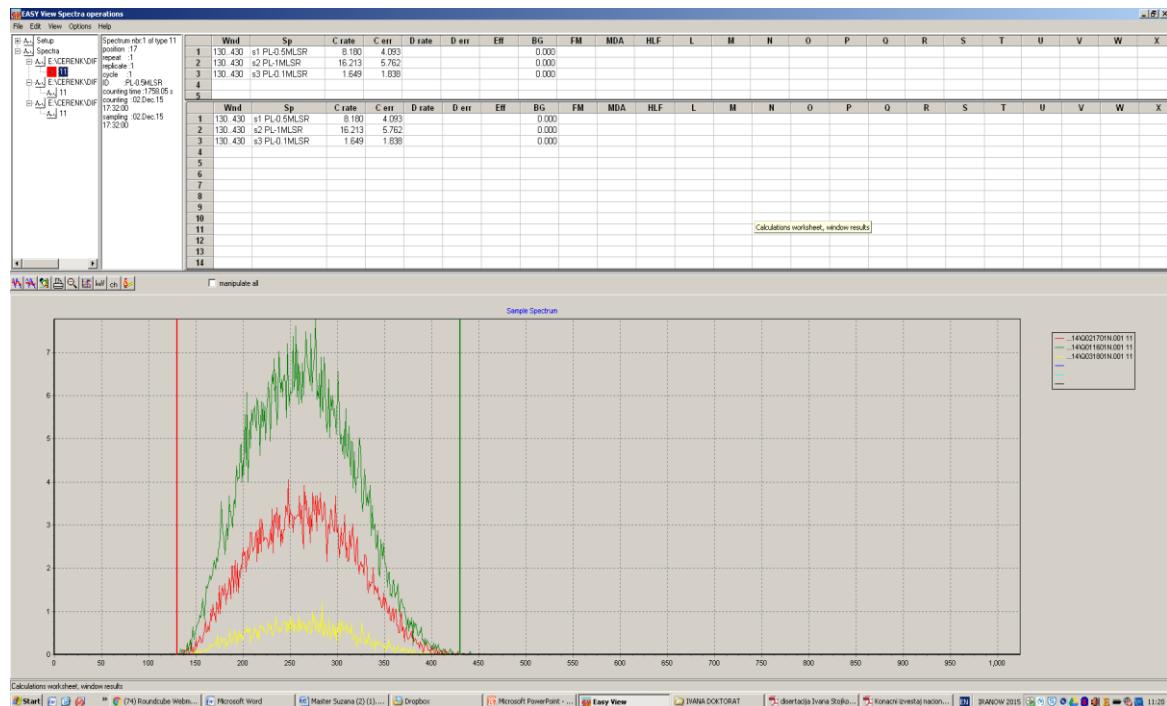
28.11.2015. (Slika 30.)



1.12.2015. (Slika 31.)



2.12. (Slika 32.)



4.12. 2015. (Slika 33.)



5.12. 2015. (Slika 34.)



16.12. (Slika 35.)



18.12.2015. (Slika 36.)



21.1.2016. (Slika 37.)



8. Zaključak

Kao što je i predstavljeno u radu, ^{90}Sr jedan od najtoksičnijih i najopasnijih radioizotopa koji u životnu sredinu dospeva tokom nuklearnih akcidenata ili atmosferskim padavinama posle testova nuklearnih oružja. Prikazana je najjednostavnija metoda detektovanja stroncijuma detekcijom Čerenkovljevog zračenja pomoću tečnog scintilacionog detektora. Kako ova metoda ne zahteva hemijsku pripremu uzorka, njena osnovna prednost je brzina dobijanja rezultata. Time je ova metoda nenadmašna kada su u pitanju akcidentne situacije u kojima je poželjno što pre dobiti nivo potencijalne kontaminacije u životnoj sredini. S obzirom da nema hemijske separacije, izmerena koncentracija aktivnosti uzorka predstavlja ukupnu aktivnost $^{89,90}\text{Sr}$, izotopa koji se mogu naći u površinskim vodama u slučaju nuklearnog akcidenta. Metoda je jeftina, baš zbog toga što ne zahteva skupe i kompleksne metode separacije uzorka. Odlikuje je i veoma nizak prag detekcije, pa omogućava detekciju i do $0,32 \text{ Bq l}^{-1}$ za 300 minuta merenja.

Što se tiče samog detektora *Quantulusa 1220*, on ima stabilnu i visoku efikasnost za detekciju α , β i niskoenergetskih β -čestica, kao i nizak i stabilan fon pa je pogodan za niskofonska merenja i postizanje niskih granica detekcije.

Pošto je ispitivana i difuzija kroz plastične boćice, zaključujemo da će spektar ostati stabilan u toku dva meseca, a što se tiče dužeg vremenskog perioda, ne možemo biti sigurni šta će se dešavati sa spektrom. Ovu pojavu pomeranja spektra smo za sada pripisali difuziji, a na ovom polju će se raditi još mnoga istraživanja i provere i sigurni smo da će to dovesti do novih rezultata i pravilnosti.

9. Literatura

- 1) Kmar M., *Nuklearna fizika*, Novi sad. (2012.)
- 2) Anja Begović - master rad, *Merenje koncentracije aktivnosti tricijuma u vodi tečnim scintilacionim detektorom*, Novi Sad (2014.)
- 3) Ivana Stojković- doktorska disertacija,
- 4) Krmar M., Laboratorijske vežbe (2012.)
- 5) (<http://www.chemistrylearner.com/strontium-90.html>)
- 6) Journal of Environmental Radioactivity 48 (2000) 49}57, Application of Cherenkov radiation counting for determination of 90Sr in environmental samples
- 7) Rao, D.D., Baburajan, A., Chandramouli, S., Iyer, R.S., & Hegde, A.G. (1996). *Rapid estimation of 89Sr and 90Sr by Cherenkov counting in Liquid Scintillation Analyser*. Proceedings of xfh national symposium on environment, Calcutta, India (pp. 203}208).
- 8) *Environmental Liquid Scintillation Analysis* (2013)
- 9) Factor of merit and minimum detectable activity for 90Sr determinations by gas-flow proportional counting or Cherenkov counting
- 10) Nemchenok I., *Organski scintilatori*, International Seminar of Low-level Counting in Environmental Radioactivity Monitoring, London, 232-237, 360-375. (2009.)
- 11) Perkin Elmer, *Easy view*, user manual, Finland (1998.)
- 12) Perkin Elmer, *Order Guide*, hardwer manual, Finland (2002.)
- 13) Perkin Elmer, *Wallac Quantulus 1220, Ultra Low Level Liquid Scintillation Spectrometer*, software manual, Finland (2002.)
- 14) Perkin Elmer, *Windowa software for controlling Wallac 1220 Quantulus*, software manual, Finland (2000.)
- 15) International Atomic Energy Agency (IAEA), 2015. Report on the IAEA-TEL-2015-03 World-Wide Open Proficiency Test on the Determination of Anthropogenic and Natural Radionuclides in Water, Rice and Soil Samples. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.

Biografija

Suzana Dovijarski rođena je u Vrbasu 07.04.1989. godine. Osnovnu i srednju školu završila je u Srbobranu. Prirodno-matematički fakultet u Novom Sadu, Departman za fiziku, smer medicinska fizika upisala je 2008. godine. U toku studija polagala je i predmete sa smera profesor fizike. Diplomske-master studije na matičnom fakultetu, modul-fizičar istraživač, nuklearna fizika, upisala je 2013. godine. Trenutno radi u dve Osnovne škole kao nastavnik fizike, a u slobodno vreme se bavi košarkom.



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:

Master rad

VR

Autor:

Suzana Dovijarski

AU

Mentor:

Prof. Dr Nataša Todorović

MN

Naslov rada:

Ispitivanje ^{90}Sr u vodi detekcijom Čerenkovljevog zračenja

NR

Jezik publikacije:

srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda:

srpski/engleski

JI

Zemlja publikovanja:

Republika Srbija

ZP*Uže geografsko područje:*

Vojvodina

UGP*Godina:*

2016.

GO*Izdavač:*

Autorski reprint

IZ*Mesto i adresa:*Prirodno – matematički fakultet,
Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad*Fizički opis rada:*

Broj poglavlja: 9
Broj strana: 65
Broj lit. citata:
Broj tabela: 8
Broj slika: 37
Broj grafika:
Broj priloga:

Naučna oblast:

Fizika

NO*Naučna disciplina:*

Nuklearna fizika

ND*Predmetna odrednica/ključne**reči:*

Radioaktivnost, radioizotopi, interakcija beta zračenja sa materijom, stroncijum, tečni scintilacioni detektor, Quantulus 1220

PO**UDK***Čuva se:*

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

ČU*Važna napomena:*

Nema

VN

Izvod:

U ovom master radu opisano je merenje ^{90}Sr u vodi detekcijom Čerenkovljevog zračenja na tečno scintilacionom spektrometru. Kao tečni scintilacioni detektor korišten je *Quantulus 1220*, koji spada u „*ultra-low-level*“ brojače koji su pogodni za merenje izuzetno niskih koncentracija aktivnosti kao što je slučaj sa tricijumom. Dobijeni rezultati su u saglasnosti sa predviđenim očekivanjima koja su potvrđena u literaturi i analizama izvršenim za određivanje 90 stroncijuma u vodi.

IZ

*Datum prihvatanja teme od NN
veća:*

DP

Datum odbrane:

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik: Dr Nataša Todorović, Vanr. Prof. Mentor

Član: Dr Sonja Skuban, Vanr. Prof.

Član: Dr Jovana Nikolov, Doc.,

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

Monograph publication

DT

Type of record:

Textual printed material

TR

Content code:

MSc thesis

CC

Author:

Suzana Dovijarski

AU

Mentor/comentor:

Nataša Todorović professor

MN

Title:

Testing of 90Sr in the water by detection of radiation Cerenkov

TI

Language of text:

Serbian (Latin)

LT

Language of abstract:

English

LA

Country of publication:

Serbia

CP

Locality of publication:

Vojvodina

LP

Publication year:

2016.

PY

Publisher:

Author's reprint

PU

Publication place:

Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja
Obradovica 4, Novi Sad

Physical description:

PD

Chapters: 9

Pages: 65

Literature:

Tables: 8

Figures: 37

Graphics:

Appendix:

Scientific field:

Physics

SF

Scientific discipline:

Nuclear physics

SD

Subject/ Key words:

Radioactivity, radionuclides, beta radiation interaction with matter, strontium, liquid scintillation detector, Quantulus 1220

SKW

UC

Holding data:

HD

Library of Department of Physics, Trg Dositeja
Obradovića 4

Note:

N

None

Abstract:

In this master paper describes the measurement of ^{90}Sr in water Cerenkov radiation detection liquid scintillation spectrometer. As for liquid scintillation detector is use *Quantulus 1220*, which belongs to the "ultra-low-level" counters which are suitable for the measurement of very low concentrations of the activities, such as is the case with tritium. These results are in agreement with the predicted expectations are confirmed in the literature and in analysis which was performed to determine the activity concentration of tritium in water.

AB

Accepted by the ScientificBoard:

ASB

Defended on:

DE

Thesis defend board:

DB

Member: Sonja Skuban, PhD, Associate Professor

Member: Jovana Nikolov, PhD, Associate Professor

President: Nataša Todorović, PhD, Associate Professor, mentor

