



UNIVERZITET NOVI SAD  
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
DEPARTMAN ZA FIZIKU

# Određivanje alfa i beta aktivnosti u vodi i procena rizika

---

## Master rad

Kandidat:

**Tanja Maličević**

Broj indeksa: 135m/13

Mentor:

**Prof. dr Nataša Todorović**

Novi Sad, oktobar 2014. godine

U toku izrade ovog rada sam imala svesrdnu podršku mentora, Prof. dr Nataše Todorović.  
Zahvaljujem se na velikoj pomoći bez koje ne bih uspela da napišem master rad.

Zahvaljujem se i članovima komisije, Prof. dr Oliveri Klisurić i Prof. dr Jovani Nikolov, pre svega što su pristali da budu članovi komisije, ali i na svim savetima i pomoći tokom studiranja.

*Posebnu zahvalnost dugujem mami Danici, tati Stamenku i bratu Željku na ljubavi, podršci i razumevanju tokom svih godina. Zahvaljujem se i bratanici Tijani jer je svojim postojanjem meni ulepšala život i snajki Milici na razumevanju, međusobnom poštovanju i uvažavanju.*

SADRŽAJ

|   | Str. |
|---|------|
| Spisak skraćenica   | 4    |
| Spisak slika  | 5    |
| 1. Istorijki uvod   | 6    |
| 2. Radioaktivnost   | 8    |
| 2.1 Zakon radioaktivnog raspada                                       | 9    |
| 2.2 Aktivnost   | 10   |
| 2.3 Period poluraspada  | 12   |
| 2.4 Alfa čestice  | 12   |
| 2.5 Beta čestice  | 13   |
| 3. Voda   | 15   |
| 3.1 Zakon o zaštiti od jonizujućeg zračenja i o nuklearnoj sigurnosti | 17   |
| 3.2 Uticaj povećane radioaktivnosti vode na živi organizam            | 18   |
| 4. Eksperimentalna metoda   | 20   |
| 4.1 Priprema uzorka   | 24   |
| 4.2 Detektor <i>Quantulus 1220</i>                                    | 26   |
| 4.3 Princip detekcije zračenja tečnim scintilacionim detektorom       | 31   |
| 4.4 Račun   | 33   |
| 4.4.1 Određivanje faktora preliivanja                                 | 34   |
| 4.4.2 Odbroj i merna nesigurnost                                      | 34   |
| 4.5 Kontrola kvaliteta  | 35   |
| 5. Rezultati merenja  | 37   |
| 5.1 Gamaspektrometrijska metoda                                       | 39   |
| 6. Zaključak  | 41   |
| Literatura  | 43   |

SPISAK KORIŠĆENIH SKRAĆENICA

| Skraćenica  | Puni naziv (original)                                 | Objašnjenje (na srpskom jeziku)                |
|-------------|---|--|
| <i>LSC</i>  | <i>liquid scintillation counting</i>                  | tečni scintilacioni brojač                     |
| <i>MCA</i>  | <i>multi-channel analyzer</i>                         | višekanalni analizator                         |
| <i>NIST</i> | <i>Nacionalni Institut za Standarde i Tehnologiju</i> | Nacionalni Institut za Standarde i Tehnologiju |
| <i>ROI</i>  | <i>the region of interest</i>                         | određeni region koji se želi posmatrati        |
| <i>PSA</i>  | <i>Pulse Shape Analysis</i>                           | analizator oblika impulsa                      |

SPISAK SLIKA

|             | Str.  |    |
|-------------|---|----|
| Slika 1.1   | Portret fizičara A. Bekerel-a   | 6  |
| Slika 1.2   | Portret fizičara Pjera i Marie Kiri   | 7  |
| Slika 3.1   | Šematski prikaz slojeva zemljišta i nalazišta arteškog bunara   | 16 |
| Slika 4.2.1 | Izgled <i>Quantulus-a</i> 1220  | 26 |
| Slika 4.2.2 | Prikaz pasivnog štita sa delovima koji čine sastavni deo uređaja <i>Quantulus</i> 1220  | 27 |
| Slika 4.2.3 | Prikaz pozicije viala u posudi u <i>Quantulus-u</i> 1220  | 28 |
| Slika 4.2.4 | Prikaz alfa i beta MCA u odnosu na broja kanala i odbroj  | 29 |
| Slika 4.3.1 | Slikovit prikaz šeme za pretvaranje svetlosnog impulsa u električni impuls, na kojoj je predstavljen uzorak, fotomultiplikatorne cevi, brojač, MCA i dobijeni spektar | 32 |
| Slika 4.3.2 | Šematski prikaz detekcije scintilacionim brojačem   | 32 |
| Slika 5.1   | Podešavanje PSA   | 37 |

*Reference:*

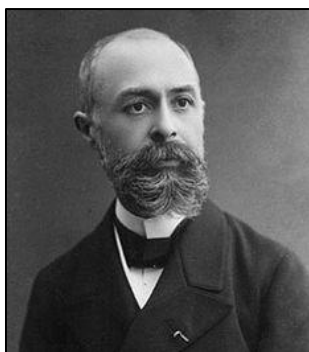
- Slika 1.1, slika 1.2 i slika 3.1 su preuzete sa sajta [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)
- Slika 4.2.2 je preuzeta iz literature *Instrument manual 2002. godina; Quantulus1220 – ultra low level liquid scintillation spectrometer; proizvođača PerkinElmer – internal software version 1.D*
- Slike 4.2.1 i slika 4.2.3 je preuzeta sa [www.iaea.org/noel/page.php?page=2204](http://www.iaea.org/noel/page.php?page=2204)
- Slika 4.2.4 je preuzeta iz literature *Liquid scintillation analysis: principles and practice; Michael F. L'Annuziata and Michael J. Kessler*
- Slika 4.3.1 je preuzeta sa [https://wiki.uio.no/mn/safe/nukwik/index.php/Introduction\\_Liquid\\_Scintillation](https://wiki.uio.no/mn/safe/nukwik/index.php/Introduction_Liquid_Scintillation)
- Slika 4.3.2 je preuzeta sa [en.wikipedia.org/wiki/scintillation\\_counter](http://en.wikipedia.org/wiki/scintillation_counter)

## 1. Istorijski uvod

„Šta je to naučnik na kraju krajeva? Naučnik je znatiželjan čovek koji gleda kroz ključaonicu prirode pokušavajući da shvati šta se događa.“ *J.Y. Cousteau*

*Anri Becquerel* (1896. godine) je zaslužan za otkriće radioaktivnosti. Godina otkrića radioaktivnosti se smatra godinom rođenja nuklearne hemije i nuklearne fizike.

Do velikih otkrića koja su promenila svet je došlo sasvim slučajno. Upravo tako je došlo i do otkrića radioaktivnosti.



sl. 1.1 A. Becquerel

*Becquerel* se u to vreme intenzivno bavio pojavom fluorescencije. Spletom okolnosti, u istoj fioci je držao fotografske ploče i razne minerale koje je nameravao kasnije da upotrebi. Fioka mu je služila za skladištenje i odlaganje materijala. Kasnije kada je želeo da iskoristi fotografske ploče, konstatovao je da su ploče jako zasenčene, iako su bile propisno umotane i sladištene. Daljom analizom je ustanovio da se radi o zračenju koje slabi prolazeći kroz materijale. sva jedinjenja uranijuma i čist metal emituju pomenuto zračenje.

U početku nije shvaćen značaj otkrića sve do momenta kada su *Pierre i Maria Curie* iz minerala uranijuma izdvojili radijum i polonijum, koji su bili daleko radioaktivniji od urana. Ispitivanjem osnovnih svojstava ovih radioaktivnih elemenata utvrđeno je da je emisija nuklearnog zračenja spontana i da se ne može ubrzati ili usporiti dodavanjem energije spolja. To je prirodna radioaktivnost. *Maria Curie* je predložila naziv radioaktivnost.

Kasnije je ustanovljeno da se ubacivanjem nekih stranih čestica (*protona, neutrona, deuterona,  $\alpha$ -čestice i* ) u jezgro atoma, mogu proizvesti jezgra koja imaju sva radioaktivna svojstva. Ta pojava se naziva indukovana ili veštačka radioaktivnost.



*Sl.1.2 Pierre i Maria Curie*

*1903. godine Nobelovu nagradu su podelili A. Bekerel (“za njegovo otkriće spontane radioaktivnosti”) i Pjer i Marija Kiri (“za njihov zajednički rad na problemima spontane radioaktivnosti”).*

*“Nauka je način da se razmišlja daleko više nego što to trenutno znanje obuhvata.” C. Sagan*

## 2. Radioaktivnost

*„Otkriće radioaktivnosti je po svojoj revolucionarnosti ravno otkriću vatre koje je učinio praistorijski čovek.” A.Ajnštajn*

Radioaktivnost je proces u kome dolazi do spontane transformacije jezgra kojom prilikom ono menja svoj sastav ili energetsko stanje. Sastav jezgra se menja ukoliko ono doživi alfa ili beta raspad.

Prilikom alfa raspada dolazi do emisije čestice koja se sastoji od dva protona i dva neutrona. Prilikom elektronskog beta raspada jedan neutron se transformiše u proton čime se menja struktura jezgra, a jedan od načina raspada nestabilnih jezgara iz grupe beta emitera je emisija negativne beta čestice, tj. elektrona.

Osnovna podela radioaktivnosti je na prirodnu i veštačku radioaktivnost. Do 1934. godine (otkriće veštačke radioaktivnosti, Irena i Frederik Žolio-Kiri) se smatralo da je jezgro u procesu raspada može da emituje samo alfa ili beta čestice (*elektrone*), i gama zračenje. Nakon radioaktivnog raspada stvoreno jezgro može biti u pobuđenom stanju, a na osnovno energetsko stanje se vraća emisijom gama zračenja. Međutim, Kirijevi su otkrili da jezgra dobijena u laboratoriji mogu da emituju i pozitrone. Vremenom je primećeno da u nuklearnim reakcijama se često dobijaju i vrlo nestabilni produkti. Nestabilna jezgra dobijena u nuklearnim reakcijama mogu da emituju protone, neutrone.

Okvirno je usvojeno, radioaktivnošću se ne mogu smatrati oni procesi u kojima do raspada dolazi za kraće vreme od            nakon što je jezgro stvoreno.

Prihvaćena je terminologija da se jezgro koje se raspada naziva predak, a jezgro koje putem radioaktivnog raspada nastaje se naziva potomak. Jezgro potomak nastalo alfa raspadom u odnosu na pretka ima dva protona manje, a maseni broj mu je manji za četiri. Prilikom emisije negativne beta čestice ne menja se maseni broj, ali potomak poseduje jedan proton više i jedan neutron manje u odnosu na pretka. Sa aspekta radioaktivnog raspada, sva se jezgra dele na stabilna i nestabilna, tj. radioaktivna. Međutim, i stabilna jezgra se mogu raspadati, ali se to ne može eksperimentalno odrediti jer je brzina tog raspada mala.

*Rutherford* i *Soddy* su zaključili izučavajući radioaktivnost da se ona može objasniti uz pretpostavku da su atomi urana i radijuma nestabilni, te se zbog toga, radioaktivnim raspadom formiraju atomi drugih elemenata.

Generalno, radioaktivna jezgra se mogu podeliti u dve grupe:

- prirodna radioaktivna jezgra
- veštačka radioaktivna jezgra

Veštačka radioaktivna jezgra ne postoje u prirodi, proizvedena su samo u laboratoriji. U prirodi se i danas može naći oko šezdeset koja su nestabilna i raspadaju se. [1]



Tri radioaktivna elementa imaju period poluraspada 4 do 4.5 milijarde godine, i oni se i danas raspadaju. To su uranovi izotopi:

- uran-235 ( )
- uran-238 ( )
- torijum-232 ( )

Skup radionuklida koji sukcesivno nastaje nakon raspada uran-238 se naziva niz uranovog izotopa uran-238. Postoje i radioaktivni nizovi uran-235 i torijuma-232 koji nakon određenog broja uzastopnih alfa i beta raspada se završavaju stabilnim izotopima olova. Osim pomenutih nizova, u prirodi postoji i nekoliko dugoživećih radioaktivnih izotopa koji još uvek nisu potpuno nestali, a ne pripadaju radioaktivnim nizovima. Najpoznatiji među njima je kalijum-40 koji ima period poluraspada,

U procesu radioaktivnog raspada moraju da važe neki osnovni zakoni, zakon održanja energije, impulsa, momenta impulsa, naelektrisanja, ... Pošto je radioaktivni proces spontan proces, to je vrednost energije uvek pozitivna, tj. u radioaktivnom raspadu se uvek oslobađa određena količina energije.

Zakon radioaktivnog raspada i postanak novih elemenata objasnili su *Crookes, Becquerel, Rutherford i Soddy*.

### 2.1 Zakon radioaktivnog raspada

Jezgro nije makroskopski objekat, te stoga se osobine jezgra ne mogu direktno posmatrati, tj. ne mogu se direktno meriti niti eksperimentalno pokazati. Zakon radioaktivnog raspada se može formulisati matematički, uz izvesne pretpostavke.

Broj atoma supstance, iako konačan, razmatra se kao kontinualna promenljiva. Pretpostavka je opravdana jer se radi o velikom broju atoma. U sistemu sastavljenom od velikog broja atoma, nikad se ne zna koji će se od atoma raspasti. Iz toga sledi da u vremenskom intervalu svaki atom ima šansu da se raspadne, pa je zato radioaktivni raspad slučajan događaj. Na ovakve sisteme se može primeniti račun verovatnoće. [2]

Ukoliko se recimo, posmatra neka količina kratkoživećeg radioaktivnog elementa, merenjem se može pouzdano ustanoviti kada će se raspasti polovina jezgara koja se u uzorku nalaze.

Prema računu verovatnoće, radioaktivni raspad ne zavisi od predistorije atoma, već od dužine intervala u kojem se posmatranje vrši. Verovatnoća radioaktivnog raspada može se predstaviti izrazom u kome figurišu vremenski interval, i faktor proporcionalnosti,  $\lambda$ :

Na brzinu raspada nekog radioaktivnog elementa ne može se uticati ni jednim spoljašnjim faktorom. To znači da je verovatnoća raspada nekog radioaktivnog jezgra određena određena isključivo prirodom procesa koji se u njemu odvijaju i može se za dati izotop smatrati konstantnim. Kao mera konstantnosti je

uvedena veličina koja se naziva konstanta radioaktivnog raspada koja predstavlja verovatnoću da se neko radioaktivno jezgro raspadne u jedinici vremena. Eksperimentalno se određuje pomoću relacije:

$N$  je ukupan broj radioaktivnih jezgara u posmatranom uzorku u početnom trenutku,  $N(t)$  je broj jezgara koji se raspao u vremenskom intervalu

Zaključujemo, svaki radioaktivni raspad potpuno jedinstven proces. Na osnovu uočenih pravilnosti koje su bez izuzetaka važile za sve posmatrane radionuklide, formulisan je zakon radioaktivnog raspada:

gde  $N$  predstavlja broj jezgara posmatranog radioaktivnog izotopa u trenutku

Zakon radioaktivnog raspada nam govori da se broj radioaktivnih jezgara u nekom uzorku  $N$  eksponencijalno smanjuje sa vremenom  $t$ .

### 2.2 Aktivnost

Kontinualna teorija radioaktivnog raspada omogućuje da se broj atoma nekog sistema prikaže kao kontinualna promenljiva i da se primeni infinitezimalni račun. Proizvod verovatnoće raspada jednog jezgra i ukupnog broja nestabilnih jezgara u nekom uzorku daje broj raspada. Ova veličina se naziva aktivnost radioaktivnog uzorka i obeležava se sa  $A$ . [1] Promena broja atoma  $N$  u vremenu  $t$  data je kao

gde  $A$  predstavlja brzinu radioaktivnog raspada ili aktivnost,  $A$ . Aktivnost se izražava kao

i naziva se apsolutna aktivnost.

Broj raspada u jedinici vremena za dati radioaktivni izotop okarakterisan je konstantom raspada  $\lambda$  koja zavisi jedino od količine radioaktivnog elementa, tj. od broja radioaktivnih atoma  $N$  koji se u njemu nalaze.

Jedinica za aktivnost je  $\text{Bq}$ . Jedan Bekerel je jednak aktivnosti nekog radioaktivnog izvora kome se svake sekunde raspadne tačno jedno jezgro.

Postoji, i upotrebljava se, još jedna jedinica, Kiri ( $1 \text{ Ci}$ ). Jedan Kiri je definisan kao aktivnost jednog grama radijuma ( $\text{Ra-226}$ ) i iznosi  $3.7 \times 10^{10}$  (raspada u jednoj sekundi).

Pored broja raspada, bitnu ulogu imaju i efekti koje radijacija u određenom vremenu po jedinici vremena proizvede. Biološki efekti izazvani nuklearnim radijacijama ne zavise samo od doze zračenja (količine),



### 2.3 Period poluraspada

Period poluraspada se obeležava sa  $T_{1/2}$  i predstavlja ono vreme za koje će se od početnog broja nestabilnih jezgara u nekom uzorku raspasti tačno polovina njih.

Aktivnost radioaktivnog uzorka je proporcionalna broju neraspadnutih radionuklida u merenom uzorku, što se vidi iz relacije

—

Uopšteno, za sve radioaktivne supstance karakteristične su tri veličine:

- konstanta raspada,  $\lambda$
- period poluraspada,  $T_{1/2}$
- srednji život atoma,  $\tau$

### 2.4 Alfa čestice

Pod teškim naelektrisanim česticama podrazumevaju se i alfa čestice. Alfa zračenje emituju prirodni radionuklidi. Osnovne karakteristike  $\alpha$ -raspada su verovaroća raspada  $\lambda$  i kinetička energija. Ustanovljeno je izučavanjem  $\alpha$ -raspada da se oko 200 jezgara raspadaju emitujući jednu česticu sa energijama između 4 i 9 MeV i da su  $\alpha$ -radioaktivna jezgra ona čiji je redni broj u periodnom sistemu veći od 82. Izuzetak čine samo jezgra koja se nalaze u deformisanoj oblasti tj. u oblasti retkih zemalja ( $^{148}\text{Sm}$ ).

Preciznim merenjem energija  $\alpha$ -čestica iz radioaktivnih raspada ustanovljena je fina struktura  $\alpha$ -spektra.

Alfa čestice imaju preko 7300 puta veću masu od elektrona. Ovako velika razlika u masama daje ograničenje po pitanju količine energije koja može biti predata jednom elektronu. Zbog velike razlike u masi, alfa čestica neće skretati, već će zadržati svoj prvobitni pravac kretanja. Jonizacija je osnovna interakcija koja se odvija prilikom prolaska alfa zračenja. Praćenjem tragova alfa čestica pomoću detektora tragova zapaža se da je putanja svake čestice jedna prava linija i da je broj alfa čestica u jednom snopu konstantan tokom najvećeg dela njihove putanje.

Svaka pojedinačna čestica postepeno gubi energiju, predajući je u malim porcijama okolnim elektronima. Gubitak energije alfa čestice je obrnuto proporcionalan energiji koju poseduje. Ukoliko su energije vezivanja  $\alpha$ -čestice poznate može se predskazati stabilnost jezgra na alfa raspad. Energija pri  $\alpha$ -raspadu raspoređuje se na kinetičku energiju  $\alpha$ -čestice i kinetičku energiju uzmarka jezgra

Osnovna veličina kojom se opisuje alfa zračenje je domet alfa čestice u nekom materijalu. Pod dometom se podrazumeva najmanja debljina sloja nekog materijala koja u potpunosti može da zaustavi određeno zračenje. Razlog za emisiju alfa čestice, a ne protona ili neutrona, objašnjava se defektom mase, jer kada je emisija alfa čestice moguća, emisija neutrona ili protona je zabranjena. Prodorna moć alfa čestice je

veoma mala, čak i u materijalima sačinjenim od lakih elemenata pa se iz tog razloga, u eksperimentima koriste mikrometarske debljine atenuatora.

### 2.5 Beta čestice

Pod pojmom „lake naelektrisane čestice“ podrazumevaju se elektroni i pozitroni. Razlika između elektrona i pozitrona je jedino u tome da kada elektron izgube svoju kompletnu kinetičku energiju bivaju zahvaćeni od strane nekog atoma, i pretvore se u običan orbitalni elektron dok pozitroni kada izgube svu svoju energiju, doživljaju anihilaciju sa jednim elektronom. Elektroni i pozitroni gube svoju energiju procesom jonizacije. Pri beta raspadu jezgro emituje  $\beta^-$ -česticu sa negativnim naelektrisanjem ili pozitivnim naelektrisanjem, ili zahvata orbitalni elektron. U procesu beta raspada neutron prelazi u proton i obrnuto, a  $\beta^-$ -čestica i antineutrino se formiraju u trenutku emisije, upravo kao i foton iz ekscitiranog atoma. Beta raspad se može prikazati:

Iz navedenih relacija se može zaključiti da se proton i neutron mogu tretirati kao različita stanja jedne iste čestice (nukleona), a  $\beta^-$ -čestica i antineutrino (neutrino) imaju ulogu kvanta leptonskog polja. *Chadwick* je ustanovio da se, prilikom radioaktivnog raspada, mogu naći elektroni koji po svojoj prirodi nastanka imaju različito poreklo. Jedni potiču iz jezgra i imaju kontinualnu energijsku raspodelu, a drugi su atomskog porekla i karakter im je strogo monoenergijski. Monoenergijski elektroni se nazivaju i konverzioni, a nastaju pri direktnoj interakciji jezgra i elektronskog omotača. Elektroni koji potiču iz jezgra nazivaju se  $\beta^-$ -zraci i neposredno su povezani sa prelazima u jezgru. Beta zračenje ima monoenergijski karakter. Najpodesniji kriterijum na osnovu koga se klasifikuje beta prelaz je vrednost komparativnog perioda poluraspada.

Beta raspad je doveo u pitanje zakon održanja energije i zakon održanja momenta impulsa, ali je rešen problem uvođenjem nove čestice, neutrina. Karakterističan je i po tome da za njega na važi zakon održanja parnosti. Neutrino je električno neutralan, masa i magnetni moment mu je zanemarljivo mali, a podleže Fermi-jevoj statistici, tj. ima spin  $-\frac{1}{2}$ . U beta raspadu neutrino odnosi razliku energija, što znači da važi zakon o održanju energije i zakon održanja momenta impulsa. Neodržanje parnosti se ogleda pri asimetriji pri ogledalskoj refleksiji kvadrata modula talasne funkcije.  $\beta^-$ -raspad se uvek događa između dva nuklearna stanja sa tačno određenom parnošću, budući da pri formiranju nuklearnih stanja slaba interakcija ima zanemarljivu ulogu. Neodržanje parnosti se javlja u procesu  $\beta^-$ -raspada, a ogleda se u neodržanju parnosti zračenja (leptona).

Prema standardnom modelu, materija je izgrađena od dve vrste čestica[3]:

- leptona
- kvarkova

Postoji simetrija između leptona i kvarkova. Leptoni su fermioni (karakteriše ih poluceli spin), ima ih 6 i dele se na dve podgrupe:

- naelektrisani leptoni (elektron, mion, -lepton)
- nanaelektrisani leptoni (elektronski neutrino, mionski neutrino, -neutrino)

Gubitak energije beta čestice po jedinici puta je direktno proporcionalan broju elektrona po jedinici zapremine. Kao i kod alfa čestice, gubitak energije beta čestice je obrnuto proporcionalan kvadratu brzine, pogotovo na nižim energijama. Alfa i beta čestice, ukoliko imaju istu brzinu, imaju približno jednake energije, jonizacioni gubici će im se znatno razlikovati jer alfa čestice mnogo brže gube energiju nego beta čestice iste energije. Poznato je i da alfa čestice imaju znatno kraći domet od beta čestica identične energije.

### 3. Voda

*„Voda je pokretačka snaga prirode.“ Leonardo Da Vinči*

Voda je hemijsko jedinjenje kiseonika i vodonika, sa hemijskom formulom  $H_2O$  i predstavlja prirodni resurs određene regije. Voda je supstanca bez mirisa, bez ukusa i bez boje. Ukoliko poseduje miris, ili ukus ili boju smatra se da je zagađena. Voda u potocima i rekama može biti zamućenija nego inače u periodu intenzivnih kiša ili topljenja snega. Karakterišu je temperatura ključanja na  $100^\circ C$  i temperatura mržnjenja na  $0^\circ C$ . Može postojati u tri agregatna stanja, čvrsto stanje (led), gasovito (para) i tečno stanje. Osnovna fizička svojstva vode su:

- boja
- izgled (zamućenost)
- miris
- ukus
- temperatura

Voda je svuda prisutna, u okeanima, u morima, u jezerima, u glečerima ili u obliku podzemnih voda i neprestano kruži, prelazeći iz jednog agregatnog stanja u drugo. Ne pojavljuje se u hemijski čistom obliku jer na svom toku dolazi u dodir, rastvara i prima različite materije. Od količine i vrste materija koje predstavljaju primese i nečistoće zavise karakteristike vode. Prema svojoj prirodi, [4] voda se deli na:

- atmosfersku vodu koja nastaje od padavina kao što su kiša, sneg ili led i karakteriše je manji sadržaj prašine, čađi i rastvorenih gasova
- površinsku vodu koja predstavlja vodu na površini zemlje i nastaje akumulacijom atmosferskih voda
- podzemne vode koje se nalaze ispod površine zemlje i nastaju prodiranjem padavina od površinskih vodenih tokova ka vodonepropusnim slojevima koje se nalaze dublje, ispod površine zemlje

Podzemne vode su najčistije, i kao takve se najčešće koriste za piće. Mogu se naći na dubinama do  $14km$  i rastvaraju minerale od kojih se sastoji zemljina kora. U slučaju da takva voda izbije na površinu koristeći prirodne pukotine, dobijaju se izvori mineralne vode.

Voda kruži i kroz živi svet, pa i samog čoveka. Pretpostavka je da je svakom čoveku neophodna količina vode od  $2l$  u vremenskom periodu od  $24h$ .

Za piće se koriste kopnene vode koje predstavljaju vodene površine koje se nalaze na kopnu i čine ih:

- tekuće vode (reke, izvori, potoci)
- stajaće vode (jezera, bare i močvare)

Znajući da svakom čoveku treba oko 2l vode svakog dana pomnoženo sa brojem ljudi na planeti, zaključuje se da se svakog dana koriste znatne količine vodenih zaliha. Uvidevši značaj ovog prirodnog resursa obeležava se Svetski dan voda 22. marta svake godine. Ovim danom Ujedinjene nacije podsećaju na važnost zaštite voda i nedostatak vode za piće.

*„Kad izvor presuši, tek onda shvatamo značaj vode.“ B. Frenklin*

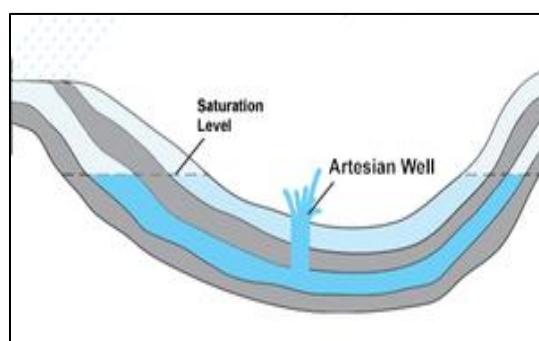
Osnovne uslove života u ekosistemima određuje kompleks ekoloških faktora:

- hemijski sastav vode (mala količina natrijum-hlorida što daje sladak ukus)
- temperatura vode (zavisi od geografskog položaja i nadmorske visine)
- strujanje vode (kretanje prividno mirujućih voda)
- pritisak vode (zavisi od mase tečnosti)
- potisak (manja gustina „slatke“ vode u odnosu na morsku vodu)

Nauka koja se bavi izučavanjem vodenih oblasti i vodenih oblika je hidrologija. Osim prirodnih izvora, mogu nastati i veštački izvori poput bunara koji predstavljaju konstantan izvor pijaće vode.

Bunar predstavlja vertikalni hidrogeološki objekat izveden u tlu čija je namena eksploatacija podzemnih voda. Prema tipu gradnje dele se na kopane ili bušene.

Najređi oblik bunara u Vojvodini su arteški bunari. Arteški bunar je izbušeni dubinski izvor vode pod hidrostatičkim pritiskom. Prvi takav izvor vode u Evropi datira iz XX veka iz provincije *Artoa*, odakle i potiče naziv samog tipa bunara. Arteška voda (na *sl. 3.1* predstavljena plavom bojom) se nalazi između dva vodonepropusna sloja tla (na *sl. 3.1* predstavljeno sivom bojom).



*Sl.3.1 Šematski prikaz arteškog bunara*

Da bi se došlo do vode buši se tlo na dubinama od nekoliko desetina metara do 2000m. Kod pozitivnih arteških bunara voda sama izlazi na površinu usled hidrostatičkog pritiska, a kod negativnih voda se pumpa pod pritiskom. Pogodno područje za ovaj tip bunara je oblast Panonske nizije gde se voda nalazi na dubinama između 40-600m. Izuzetno pogodni uzorci za metodu ispitivanja alfa i beta aktivnosti vode potiču iz arteških bunara.



Vojvodina, regija Republike Srbije, ima izuzetan hidrološki potencijal podzemnih voda i sastoji se od četiri podvodna sistema. Postoje i izvorišta termalnih voda, poreklom od prvog, drugog i trećeg podvodnog sistema koja imaju veliki potencijal za energetska iskorišćenje. Reke, koje svojim tokom prolaze kroz ovu pokrajinu su Tisa, Dunav, Sava,... Tisa se posebno ističe jer na svom toku kroz Bačku, ima izdvojeni deo, tzv. „mrtva“ ili „stara“ Tisa. Meandar kod naselja Čurug, južnobački okrug Vojvodine, nalazi se s desne strane današnjeg toka Tise i predstavlja najduži regulisan meander, prokopan kanalom od 7.2km i nasipom i 1858. godine odvojen od Tise. Dužina formirane mrtvaje iznosi 24.3km, širine korita oko 100m i dubine nekoliko metara. Smatra se da je voda iz Mrtve Tise veoma kvalitetna jer u blizini nema zagađivača, a nije u kontaktu sa rekom. Kao takva je pogodna za analizu alfa i beta aktivnosti vode.

Voda se može smatrati bezbednom za upotrebu ukoliko zadovoljava fizičke, hemijske i bakteriološke minimume ispravnosti vode propisane zakonom. Kvalitet i ispravnost vode kontrolišu nadležne ustanove.

### 3.1 Zakon o zaštiti od jonizujućeg zračenja i o nuklearnoj sigurnosti

Prirodne vode sadrže veliki broj alfa ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ) i beta emitera koji potiču iz prirodnog niza urana, torijuma i aktinijuma, kao i  $^{40}\text{K}$  i veštačke izotope,  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{137}\text{Cs}$ . Ingestija pijaće vode koji sadrži visoke koncentracije ovih radionuklida može da izazove ozbiljne zdravstvene probleme stanovništva[5].

Pravilnik o higijenskoj ispravnosti vode za piće, „Sl. glasnik RS, br. 44/99“; [6]

Član 14 - Utvrđivanje radioaktivnih materija u vodi za piće vrši se periodično ako je u odnosu na prirodni fon povećana vrednost radioaktivnosti, utvrđene za to područje, određivanjem ukupne alfa i beta-aktivnosti prema listi. Ako ukupna alfa i beta-aktivnost, uključujući i niskoenergetske čestice beta-emisije ("X" S) prelazi dozvoljeni nivo, određuje se i sadržaj pojedinih radionuklida, u skladu sa propisom o maksimalnim granicama radioaktivne kontaminacije životne sredine i o vršenju dekontaminacije.

Kao mera prevencije je donesen pravilnik kojim je uređen optimalni opseg dozvoljenih vrednosti alfa i beta emitera koji su bezbedni po zdravlje i okolinu.

„Sl. glasnik RS, br. 36/2009“ [5]

Član 1 - Ovim zakonom propisuju se mere zaštite života i zdravlja ljudi i zaštite životne sredine od štetnog dejstva jonizujućih zračenja i mere nuklearne sigurnosti pri svim postupcima u vezi sa nuklearnim aktivnostima i uređuju se uslovi za obavljanje delatnosti sa izvorima jonizujućih zračenja i nuklearnim materijalima, kao i upravljanje radioaktivnim otpadom.

Član 9 - Sistematsko ispitivanje radioaktivnosti u životnoj sredini vrši se radi utvrđivanja prisustva radionuklida u životnoj sredini i procene nivoa izlaganja stanovništva.

Član 12 - Voda za piće, životne namirnice, stočna hrana, lekovi, predmeti opšte upotrebe, građevinski materijal i druge robe ne mogu se stavljati u promet ako sadrže radionuklide iznad propisanih granica.

„Sl. glasnik RS, br. 100/2010“ Pravilnik o utvrđivanju programa sistematskog ispitivanja radioaktivnosti u životnoj sredini[7]

Ispitivanje nivoa spoljašnjeg zračenja i sadržaja radionuklida u životnoj sredini vrši se merenjem jačine ambijentalnog ekvivalenta doze gama zračenja u vazduhu, ambijentalnog ekvivalenta doze gama zračenja

u vazduhu, merenjem ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti, i merenjem aktivnosti radionuklida u uzorcima iz životne sredine. Merenje aktivnosti radionuklida u uzorcima iz životne sredine vrši se gamaspektrometrijskom metodom i specifičnim metodama za pojedine radionuklide, u skladu sa akreditovanim metodama prema preporukama Međunarodne agencije za atomsku energiju.

Merenje ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti u uzorcima iz životne sredine vrši se etaloniranim niskofonskim alfa i beta brojačima. Pod specifičnim metodama određivanja sadržaja radionuklida podrazumevaju se merenja aktivnosti, propisno etaloniranim alfa, beta i gama brojačima, odnosno odgovarajuće etaloniranim spektrometrima, uzoraka koji su prethodno pripremljeni, radiohemijom ili drugom standardnom metodom.

Uzorci površinskih voda za ispitivanje sadržaja radionuklida uzimaju se svakodnevno u sledećim rekama: Dunavu kod Bezdana, Zemuna, Vinče i Prahova, Savi kod Sremske Mitrovice i Beograda, Nišavi kod Pirota, Tisi kod Kanjiže, Timoku kod Knjaževca, Drini kod Loznice.

Uzorci vode za piće iz vodovoda koji služi za snabdevanje vodom naselja sa više od 100.000 stanovnika uzimaju se svakodnevno, i u zbirnim mesečnim uzorcima se vrši merenje ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti i gamaspektrometrijsko ispitivanje.

Zakon o zaštiti od jonizujućih zračenja i o nuklearnoj sigurnosti Srbije, *Službeni glasnik RS* 36/2009 i Pravilnik o granicama radioaktivne kontaminacije lica, radne i životne sredine i načinu sprovođenja dekontaminacije, *Službeni glasnik RS* 38/2011 propisuju granične vrednosti u pijaćim vodama za ukupnu alfa aktivnost iznose  $0.5 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$  i za beta aktivnost iznose  $1 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ .

Ukupna alfa aktivnost uključuje aktivnost svih alfa emitera, bez  $^{220}\text{Rn}$ , dok ukupna beta aktivnost obuhvata sve beta emitera izuzev  $^3\text{H}$ . Ukoliko izmerene vrednosti premašuju date granice, potrebno je odrediti koncentracije aktivnosti svakog pojedinačnog radionuklida.

Merenja ukupne alfa i beta aktivnosti uzoraka pijaće vode izvršena su na tačnom scintilacionom brojaču *Quantulus 1220* proizvođača *PerkinElmer* kojim je moguće meriti izuzetno niske aktivnosti prirodnih, veštačkih i kosmogenih radionuklida u čovekovom okruženju.

### 3.2 Uticaj povećanje radioaktivnosti vode na živi organizam

Svaki organizam se sastoji od ćelija kao osnovnih jedinica građe i funkcije svih živih organizama. Svaka ćelija se sastoji od jezgra, citoplazme i organela unutar citoplazme, kao i ćelijskog omotača. Sve ćelije nastaju od iste, a razlikuju se zbog diferencijacije. Informacioni molekuli razvića su zapravo RNK (ribonukleinske kiseline) koje nose informaciju za sintezu određenih proteina. Intrauterino razviće se sastoji od brazdanja, gastrulacije i organogeneze. Embrionalna indukcija se ogleda u indukciji uobličavanja i stvaranju organa.[8]

Međutim, da bi ćelija živela i sprovela svoj ciklus, neophodan joj je izvor energije i voda. Od kvaliteta vode koja neprestano kruži kroz ćeliju zavisi kvalitet i funkcija ćelije. Ukoliko voda ne zadovoljava propisane kriterijume za alfa i beta aktivnost, može doći do promena na ćeliji. Te promene se nazivaju mutacije.

Mutacija je nasledna promena genetičke informacije (latinski *mutatio* – promena). Mutacije mogu biti na nivou gena i na nivou hromozoma. Različite vrste zračenja izazivaju mutacije. Tipovi zračenja se razlikuju po energiji, što je manja talasna dužina to je energija veća. Čestice prolaze kroz neku materijalnu sredinu, interaguju uglavnom sa elektronima i tom prilikom vrše jonizaciju i ekscitaciju. Čak

i ultravioletna komponenta Sunčevog zračenja ima biološki značaj jer može da izazove oštećenje DNK. Dolazi do povezivanja susednih baza na istom lancu, a to menja prostornu organizaciju i ometa replikaciju DNK. Gama i x-zraci prodiru duboko u tkiva, jonizujući molekule, najčešće vode. Jonizujuća zračenja menjaju baze i izazivaju tačkaste mutacije.

Efekat zračenja zavisi i od faze ćelijskog ciklusa, ćelije su osetljivije jer su hromozomi kondenzovani.

Najčešća posledica mutacije je promena ćelije, njene građe i funkcije. Tkivo koje je izloženo povećanoj aktivnosti prolazi kroz četiri faze:

1. Prva faza se karakteriše električnom interakcijom, pri čemu nastaje slobodan elektron i pozitivan jon.
2. Druga faza se odlikuje fizičko-hemijskim promenama i nastankom novih molekula i veoma reaktivnih, slobodnih radikala.
3. Treća faza je odgovorna za hemijske reakcije i promene u ćeliji.
4. Četvrta faza su biološke posledice.

Zajedničko za sve faze je da:

- verovatnoća pojavljivanja mutagenih efekta raste sa povećanjem doze
- ne postoji sigurna granica, sigurna količina doze, ispod koje se može reći da neće doći do posledica

Koliko efekat zračenja može biti poguban za organizam, dovoljno govori tzv. radiobiološki paradoks. Radiobiološki paradoks pokazuje da je doza zračenja koja je potrebna da bi usmrtila čoveka iznosi  $3.5J$  do  $5J$ , koje po jednom kilogramu mase tela zračenje ostavi u tkivima. Ta je energija za par redi veličine manja od toplotne energije koju čovek primi nakon ispijanja jedne šolje čaja.

Efekat zračenja na tkiva prvenstveno zavisi od energije koju je zračenje ostavilo u njima što se predstavlja veličinom koja se naziva apsorovana doza,  $D$ .

Apsorbovana doza se definiše kao količina energije, koju zračenje preda jedinici mase tkiva :

—

Jedan od problema koji se javljaju prilikom preciznog utvrđivanja štetnosti radijacije je nemogućstvo preciziranja posledica. Posledice mogu biti :

- karcinogene, tj. mogu uzrokovati karcinom, maligni ili benigni
- teratogeni, dovode do urođenih deformacija novorođenčadi
- mutageni, dovode do mutacija na genetskom materijalu koji može doći do izražaja u nekoj od sledećih generacija

Činjenica da se štetni efekti ne ispoljavaju odmah, ne znači da neće kasnije, tokom vremena ili u kasnijim generacijama. Međutim, ako se sprovodi redovna kontrola vode, nema razloga za brigu. Treba imati na umu *ALARA* princip (*ALARA, as low as reasonably achievable*).

## 4. Eksperimentalna metoda

„ Nije bitno da je teorija lepa, bitno je da se slaže sa eksperimentom. Eksperiment je presudan.“

Ričard Fajnman

Određivanje ukupne alfa i beta aktivnosti u pijaćim vodama tečnim scintilacionim detektorom izvršava se u skladu sa standardnom metodom *ASTM D 7283-06, Standard Test Method for Alpha- And Beta-Activity in Water by Liquid Scintillation Counting, ASTM International.*[9]

Tečni scintilacioni brojač (*LSC, liquid scintillation counting*) je tehnika koja počinje intenzivno da se razvija posle 50-tih godina prošlog veka. Pokazala se veoma uspešnom i primenljivom u naukama poput fizike i hemije. Najveću primenu je *LSC* pronašao u kvantitativnim merenjima radionuklida.

Standardna metoda pokriva sva merenja ukupne koncentracije alfa i beta aktivnosti u homogenom vodenom uzorku. Vodeni uzorak može biti pijaća voda ili uzorak vode iz životne sredine. Primenjuje se za određivanje alfa aktivnost iznad  $0.037 \text{ Bq/l}$  i beta emitera sa koncentracijom aktivnosti iznad  $0.15 \text{ Bq/l}$ . Metoda se, takođe, može koristiti i za direktna merenja ukupne alfa i beta koncentracije aktivnosti u homogenim vodenim rastvorima sa koncentracijama aktivnosti za alfa emitera iznad  $1.8 \text{ Bq/l}$  i beta aktivnostima iznad  $3.7 \text{ Bq/l}$ . Ova metoda nije primenljiva za uzorke zemljišta, kiseline, niti za uzorke bilo koje supstance u čvrstom stanju.

U uzorku ponekad može da dođe do neravnoteže između radionuklida potomka i pretka. U slučaju kada je period poluraspada nekog radionuklida između par sati i nekoliko dana, vreme proteklo od momenta uzorkovanja do momenta merenja znatno utiče na vrednost dobijenog rezultata. Da bi se predupredila eventualna greška nastala iz ovog razloga, bira se maksimalno vreme između momenta uzorkovanja i momenta početka merenja. Na taj način je ekperimentator siguran da je u uzorku postignuta ravnoteža.

Merenje ukupne koncentracije alfa i beta aktivnosti se vrši istovremeno jer je scintilacioni detektor sposoban da razlikuje alfa i beta jer koristi merenje beta čestica u alfa višekanalnom analizatoru (*multi-channel analyzer, MCA*) i merenje alfa čestica u beta *MCA*. Pre početka merenja mora se izvršiti kalibracija. Za kalibraciju detektorskog sistema, kojim će biti izmereni uzorci predstavljeni u ovom radu, korišćeni su NIST (*Nacionalni Institut za Standarde i Tehnologiju*) standardni kalibracioni izvori  $^{241}\text{Am}$  i  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ . Aktivnost  $^{241}\text{Am}$  iznosi \_\_\_\_\_, dok je aktivnost  $^{90}\text{Sr}$

. Za merenje ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti tečnih uzoraka scintilacioni brojač mora se kalibrisati tako što se određuje efikasnost detekcije za alfa česticu u alfa regionu od interesa (*ROI*), efikasnost za detekciju alfa čestice u beta *ROI*, efikasnost detekcije beta čestice u beta *ROI* i efikasnost detekcije beta čestice u alfa *ROI* za različite mase suvog ostatka kalibracionog izvora u rasponu od 0 do 500 mg. *ROI* je skraćenica koja označava region od interesa (*the region of interest, ROI*) pri čemu odabir regiona od interesa obezbeđuje da se svi radionuklidi koji su bitni eksperimentatoru uvek uzmu u obzir prilikom merenja. Za alfa emitere može se uzeti kao *ROI* oblast između  $400\text{keV}$  do  $700\text{keV}$ , dok se za radionuklide koji su beta emiteri može reći da im je *ROI* od  $0\text{keV}$  do  $2000\text{keV}$ , konkretno prilikom

izvođenja ove metode prozori na detektoru za alfa emitere se podešavaju na kanalima između 500-800, a za beta emitere se prozori podešavaju od 1-1000.

Pored  $^{241}\text{Am}$  i  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ., za kalibraciju se mogu koristiti  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ . Ukoliko se koristi  $^{137}\text{Cs}$  za kalibraciju mora se izvršiti korekcija dobijenih vrednosti zbog prisutne elektronske emisije.

Optimalno podešavanje aparature pre početka merenja bi podrazumevalo minimalno mešanje alfa odbroja u beta MCA i beta obroja u alfa MCA.

Prilikom merenja ukupne koncentracije alfa i beta aktivnosti tečnim scintilacionim detektorom može doći do zamene, tj. može se desiti da se alfa čestica detektuje kao beta čestica, ili beta čestica kao alfa čestica. Ova karakteristika je nazvana prelivanje, ("spillover"). Da bi se omogućilo razlikovanje alfa od beta događaja u spektru, i redukovali pozadinski efekti, potrebno je pre početka merenja na detektoru podesiti analizator oblika impulsa PSA (*Pulse Shape Analysis*).

Dodatna promenljiva faktora prelivanja je tzv. "quenching", prigušenje, što donosi dodatnu nesigurnost rezultatima. Prigušenje nastaje usled prisustva specifičnih molekula koji u kontaktu sa mešavinom koktela koji se dodaje suvoj masi u vialu dovode do smanjenja intermolekularnog transfera energije. Prepoznaje se tako što uzorak u vialu dobija karakterističnu žutu boju. Poželjno je ovaj efekat svesti na minimum.

Pre početka merenja na detektoru podesi se analizator oblika impulsa, PSA, snimanjem krivi pomoću kalibracionih standarda  $^{241}\text{Am}$  i  $^{90}\text{Sr}$ .  $\tau_\alpha$  i  $\tau_\beta$  računaju se prema formuli:

$$\frac{\tau_\alpha}{\tau_\beta} = \frac{N_\alpha}{N_\beta} \frac{E_\beta}{E_\alpha}$$

Minimum interferencije između alfa i beta događaja u merenim uzorcima je kada je  $\tau_\alpha = \tau_\beta$ , pa se diskriminator postavlja na tu vrednost.

Efikasnost detekcije za sve alfa čestice je gotovo 100%, za beta čestice zavisi od energije i kreće se u intervalu (90 -100)% za energije raspada iznad 100 keV, i (10-60)% za niže energije.

Aparatura neophodna za eksperiment:

- viali zapremine 20ml
- peć
- čaše
- pipete za transfer
- tečni scintilacioni detektor

Svi uzroci koji dovode do smetnji prilikom analize tečnim scintilacionim brojačem se dele u šest velikih grupa:

- uticaj pozadinskog zračenja
- prigušenje (obojenost uzorka i jonizacija)
- postojanje više radionuklida u uzorku

- luminiscencija
- statistički efekti
- efekat zida

Uticaj pozadinskog zračenja se ogleda u tome da raste količina zračenja u smeru od izvora ka uzorku, i to usled uticaja okoline poput dejstva kosmičkog zračenja ili šuma samog aparata kojim se merenje izvodi. Ukupna vrednost odbroja koji potiče od pozadinskog zračenja se može tačno izračunati ukoliko se uzme prazan vial, bez suvog ostatka i u njega se sipa scintilacioni koktel sa svim hemijskim komponentama koje inače idu u vial. Trebalo bi da se dobije isti nivo prigušenja kao i kad se analizira radioaktivni uzorak. Kada se jednom odredi tačan uticaj pozadinskih efekata, moderni scintilacioni analizatori memorišu tu vrednost u kompjuterski program što omogućava da se automatski sa spektra koji se posmatra ( ) oduzima spektral pozadinskog zračenja ( ), korišćenjem izraza:

Ukupan uticaj pozadinskih efekata je mali, i iznosi  $0-5.0keV$  na spektru  $0-2000keV$ .

Uticaj efekata umnogome zavisi i od energije zračenja. Što je manja energija radionuklida, to je veći uticaj prigušenja. Najčešće metode za korekciju efekta prigušenja su:

- internacionalna standardizacija
- korekcija spektra analiziranog uzorka
- spoljašnja korekcija standarda za korekciju efekta prigušenja

Postojanje više radionuklida u uzorku dodatno komplikuje situaciju što zavisi da li se radi o alfa emiterima ili beta. Ukoliko su u pitanju dva beta emitera, konstatovaće se kontinualni spektar od nule do maksimalne energije, i širok spektar. Može doći i do superponiranja dva spektra u jedan, kompozitni spektar.

Luminiscencija je efekat koji se javlja u tečnom scintilacionom koktelu usled emisije fotona, kao posledica apsorpcije energije ili usled ekscitacije molekula sa osnovnog nivoa. Može se iskoristiti kao praktični pokazatelj u biohemijskim reakcijama ili kao pokazatelj uticaja različitih analiza tečnim scintilatorom.

1. Bioluminiscencija nastaje usled biohemijske reakcije pri proizvodnji fotona. Tečni scintilator se može iskoristiti radi brojanja svih luminiscencija u toku jedne biohemijske reakcije. Region energija u kom se mogu zabeležiti bioluminiscencije je od  $0-10keV$ .
2. Fotoluminiscencija i hemiluminiscencija su dva osnovna tipa luminiscencija koji imaju najveći uticaj na analizu radionuklida. Fotoluminiscencija nastaje kao posledica izloženosti scintilacionog koktela ultravioletnom zračenju. Može se ukloniti tako što se uzorak drži u mraku  $10-15 minuta$ . Hemiluminiscencija nastaje usled čestog mešanja radioaktivnog uzorka i tečnog scintilatora. Na ovaj efekat najviše utiče pH ( $8-14$ ) uzorka.

Luminiscencija koja se dešava u scintilacionom koktelu može se lako detektovati prilikom brojanja radionuklida, beta emitera, sa relativno visokom energijom ( ). Metode za detekciju luminiscencije su:

- pomoću spektra

- podešavanjem prozora, *ROI*
- instrumentalnom detekcijom i merenjem pomoću relacije:

---

Za metodu određivanje alfa i beta aktivnosti, luminiscencija se smatra štetnim faktorom. Ukoliko se detektuje ovaj problem, neophodno ga je korigovati ili redukovati.

Metode za otklanjanje luminiscencije su:

- tamna adaptacija uzorka (dva sata su dovoljna za otklanjanje fotoluminiscencije, a tri dana tamne adaptacije su neophodno za otklanjanje hemiluminiscencije)
- hemijske metode (u potpunosti sprečavaju hemiluminiscenciju neutralizacijom alkalne sredine)
- temperaturna kontrola (zagrevanje uzorka do  $40^{\circ}\text{C}$  pomaže da reakcija koja dovodi do hemiluminiscencije dođe do svog kraja; hlađenje uzorka koje bi omogućilo da se reakcija prvo uspori, a zatim ubrza pre kraja)
- podešavanje regije od interesa (nije neophodno vršiti za -emitere)
- odlaganje momenta kada će se meriti aktivnost određenog uzorka (posmatraju se dve vrednosti odbroja, jedan sa trenutnom vrednosti aktivnosti i drugi koji je izmeren posle nekog vremena, što onemogućava zamenu kanala *MCA*)

Statički efekti nastaju kao deo elektrostatičkog pražnjenja koje nastaje dejstvom protona prilikom merenja odbroja u tečnom scintilatoru. Pražnjenje statičkog elektriciteta je nasumičan događaj. Statički elektricitet nastaje kada se neprovodni materijal razdvoji na dva dela, od kojih je jedan deo naelektrisan pozitivno, a drugi negativno. Deo koji sadrži statički elektricitet je nestabilan. Nasumično pražnjenje može nastupiti bilo kada, pa i u momentu kontakta sa vialom u kom će se vršiti priprema uzorka za scintilaciju. Posедуje specifičnu karakteristiku da se može zadržati dug vremenski period na površini viala. Kada bi se vial sa statičkim elektricitetom na površini uneo u komoru za merenje *Quantulus*-a to bi se manifestovalo kao električne munje na površini viala. Ovi nepoželjni efekti se mogu preduprediti korišćenjem:

- antistatičkih plastičnih viala
- korišćenjem elektrostatičkog kontrolora (određenu komoru u kojoj bi se nalazile elektrode koje omogućavaju da postojanje električnog polja koje bi neutralisalo površinu viala za manje od 2s)
- povećanje vlažnosti prostorije u kojoj se priprema uzorak (pokazao se kao najpogodniji metod)

Efekat zida se može klasifikovati u dva tipa. Prvi tip se odnosi na organske rastvore koji mogu prodrati u zidove plastičnog viala, a drugi tip se odnosi na gubitak efikasnosti detekcije tečnog scintilacionog brojača usled interakcije beta čestica i zidova viala. Organski rastvori mogu prodrati u zidove viala jer tradicionalni scintilacioni kokteli sadrže toluene i ksilene. Problem nastaje zbog distorzije spektra što se manifestuje povećanjem greške merenja. Rešenje problema je upotreba koktela koji ne sadrži ova jedinjenja ili koristiti staklene viala kod kojih nema ovog efekta. Drugi tip se odnosi na gubitke u efikasnosti jer se pretpostavlja da postoji 10 sloj uz samu površinu viala koji ima samo 50% efikasnosti detekcije. Korekcije za ovaj efekat zavise od elementa koji je korišćen za kalibraciju (npr. za  $^{238}\text{Pu}$  0.25% se odnosi na efekat zida; 0.2% za  $^{210}\text{Pu}$ ).

Pored pomenutih faktora koji nepovoljno deluju, metoda *LSC* je veoma zastupljena jer sadrži mnogobrojne prednosti:

- automatska kompjuterska obrada podataka
- visoka efikasnost detekcije i sposobnost *LSC* da istovremeno meri više radionuklida
- stalna unapređenja na pripremi uzorka

### 4.1 Priprema uzorka

Svaki uzorak vode pre nego što bude spreman za merenje mora proći kroz hemijsku pripremu uzorka. Hemijska priprema se sastoji iz više etapa[10]:

- ceđenje
- zakišeljavanje
- sušenje
- uparavanje
- merenje mase suvog ostatka
- sjedinjavanje i homogenizacija suvog ostatka i scintilatora
- analiza u scintilacionom brojaču *Quantulus 1220*

Prvenstveno je neophodno uzorak uzeti, mehanički zahvatiti određenu količinu tečnosti (vode) sa mesta koje se želi analizirati. Potrebna je zapremina od *600ml* vode za analizu. Uzorak se može uzeti iz arteškog bunara, vodovoda ili izvorišta karakterističnog za neko područje i mora se doneti do laboratorije u periodu od pet dana od momenta uzimanja uzorka. Uzeti uzorak mora da zadovoljava određene propise o čistoći samog uzorka. Čistoća uzorka treba da spreči nepoželjno povećanje rezultata merenja usled prisustva pozadinskog („*background*“) zračenja. Međutim, ne može se izbeći prisustvo radioaktivnih elemenata ukoliko su oni karakteristika samog geografskog lokaliteta na kome se vrši uzorkovanje ili prisustvo organskih supstanci. Povećanje pozadinskog uticaja („*background*“) se eliminiše smanjenjem osetljivosti mernog uređaja.

Prvi korak je ceđenje. Ukupna zapremina vode od *600ml* se подели na tri jednaka dela, svaki od po *200ml* i ceđenje se izvodi za svaki od uzoraka od po *200 ml* posebno. Tečnost zapremine *200 ml* se cedi pomoću celulozno nitratnog filtera , prečnika . Prečnik pora od omogućava da se eliminiše svaka nečistoća koja bi eventualno mogla da se nađe u uzorku vode. Svaki uzorak od po vode se stavlja u različitu čašu.

Drugi korak je zakišeljavanje. Zakišeljavanje se izvodi dodavanjem *2M* azotne kiseline, koja je jaka kiselina. *2M* azotna kiselina se dobija mešanjem *128ml 16M* koncentrovane sa destilovanom vodom, s naznakom da se uvek kiselina sipa u vodu, a ne obrnuto. U *200ml* vode dodaje se *5ml* azotne kiseline. Na taj način se eliminiše uticaj polimerizacije, stvaranja koloidnih formacija i prekoncentrovanja sporim uparavanjem. Posuda sa ovako pripremljenim uzorkom se prekrije folijom i ostvavi da stoji minimum *16h*.

Treći korak je sušenje. Sušenja zakišljenog uzorka se odvija u peći. Peć je uređaj kome može da se zada određena temperatura i on zadatu temperaturu održava konstantnom. Zakišljeni uzorak se ostavi u peći u



kojoj je temperatura manja od temperature ključanja uzorka, tj. vode. Potrebno je oko 15h da se u posudama, čašama, dobije suvi ostatak. Kada se dobije suvi ostatak, neophodno je celokupnu dobijenu masu suvog ostatka koji se nalazi u čašama preneti u viala sa što manjim gubicima. Pre prenosa suvog ostatka se mora izmeriti masa praznog viala, bez mase poklopca viala, pomoću analitičke vage. Postupak prenosa suvog ostatka se izvodi pomoću azotne kiseline u tri etape tako što se u čašu sa suvim ostatkom prvo doda 5ml 1M azotne kiseline i pomoću kapalice se spere sav suvi ostatak iz čaše i prenese u vial. Ovaj postupak se ponovi tri puta. Na kraju trećeg koraka se u vial zajedno sa suvim ostatkom prenese 15ml 1M azotne kiseline.

Četvrti korak je uparavanje. Postupak uparavanja se izvodi pomoću pešćanog kupatila. Viali se postavljaju u pešćano kupatilo koje se podešava na temperaturu od - . Prethodno je potrebno vial umotati u foliju i skinuti poklopac sa viala da bi proces uparavanja mogao da počne i traje minimum 15h. Pešćano kupatilo je pogodno za ovu fazu pripreme uzorka jer ujednačeno greje, ne zamazuje niti oštećuje površinu viala, a, ujedno je i lak za rukovanje. Zapremina vode koja se uparava se određuje tako da masa suvog ostatka ne bude veća od najveće mase suvog ostatka kalibracionog standarda.

Peti korak je merenje mase suvog ostatka. Da bi izmerili masu suvog ostatka koji je dobijen posle uparavanja, neophodno je izmeriti ponovo masu viala, ali ovog puta sa suvim ostatkom bez poklopca viala pomoću analitičke vage. Dobijenu masu označimo sa . Masu praznog viala koji smo izmerili u trećem koraku označimo sa . Zatim se od mase punog viala oduzme masa praznog viala, , i dobijena vrednost je masa suvog ostatka. Očekuje se da se dobije vrednost za masu suvog ostatka do 500mg. Ovaj postupak se ponovi za svaki vial ponaosob. Viali služe za jednokratnu upotrebu, prečnika 28mm i visine 62mm, masa im se meri do na četvrtu decimalu radi bolje preciznosti u određivanju mase suvog ostatka. Neophodno je da viali budu čisti, da se njihova spoljašnja površina ne dodiruje prstima i da se na njih ne lepe nikakva obeležja. Nalepnice koje služe za obeležavanje se postavljaju na spoljašnju stranu poklopca. Za svaki uzorak dobijaju se tri mase suvog ostatka i pomoću toga se može pratiti i proveriti hemijska priprema uzorka. Trebalo bi da sve tri vrednosti mase suvog ostatka za isti uzorak bude iste ili približno iste.

Šesti korak je sjedinjavanje suvog ostatka i scintilatora. U vial u kome se nalazi suvi ostatak se dodaje 5ml 1M azotne kiseline i 15ml scintilacionog koktela *Optiphase HiSafe3* proizvođača *Perkin Elmer*. Uzorak treba da bude bistar, homogeni rastvor bez vidljive fazne separacije. Ukoliko se pojavi fazna separacija ili ostane suvog ostatka u mernoj posudi, uzima se manja zapremina uzorka za analizu i ponavlja se postupak pripreme uzorka. Iz tog razloga je poželjno da se prilikom sakupljanja uzorka sa lokaliteta uzme veća količina vode od 600ml, radi uštede vremena ukoliko je neophodno ponoviti postupak pripreme uzorka.

Ovako pripremljeni uzorci se mere se u tečnom scintilacionom brojaču *Quantulus 1220*. Uzorci se mogu odmah meriti ili nakon izvesnog vremenskog perioda pri čemu kvalitet pripremljenog uzorka ne opada. Dužina merenja se određuje tako da greška bude manja od 1%, (minimum 10000 odbroja). Ukoliko se uzorak odmah po pripremi meri moguće je registrovati i kratko-živi radionuklidi, dok je prednost kasnijeg merenja u tome što se tada mere uzorci koji su u ravnoteži. Bez obzira šta se želi registrovati, posle završetka šestog koraka, a pre početka merenja u tečnom scintilacionom brojaču neophodno je da prođe minimum tri sata tokom kojih bi vial bio u potpunom mraku, tzv. tamna adaptacija. U tečnom

scintilacionom brojaču se mere i kalibracioni standard i neaktivni uzorak. Neaktivni uzorak se priprema tako da sadrži masu suvog ostataka kao i za alfa i beta kalibracione standarde.

### 4.2 Detektor Quantulus 1220

*Quantulus 1220* je skraćena za tečni scintilacioni detektor (*ultra low level liquid scintillation spectrometer*) proizvođača *PerkinElmer*. [11] Preporuka samog proizvođača je da se aparatura pravilno instalira i da se rukuje aparaturom prema propisima kako ne bi došlo do grešaka prilikom merenja.



Sl. 4.2.1. Izgled Quantulus-a 1220

Uključivanje detektora se sastoji od tri etapa:

- napajanja (200V za uređaj i 350V za jedinicu za hlađenje)
- jedinice za hlađenje (sastoji se od bakarne cevi kroz koju cirkuliše voda za hlađenje; temperatura se podešava pomoću potenciometra; dozvoljena je temperaturna razlika do 12<sup>o</sup>C u odnosu na sobnu temperaturu, ali u opsegu između )
- uključivanje uređaja (sastoji se od uključivanja kompjutera i *Quantulusa*)

U cilju uspešnog merenja, neophodno je obratiti pažnju na sve faktore koji bi mogli da utiču na merenje, što se postiže totalnom optimizacijom. Procenjuje se efikasnost rada detektora za <sup>3</sup>H 66%, a za <sup>14</sup>C 95%.

Totalna optimizacija podrazumeva:

- optimalna redukcija pozadinskih efekata

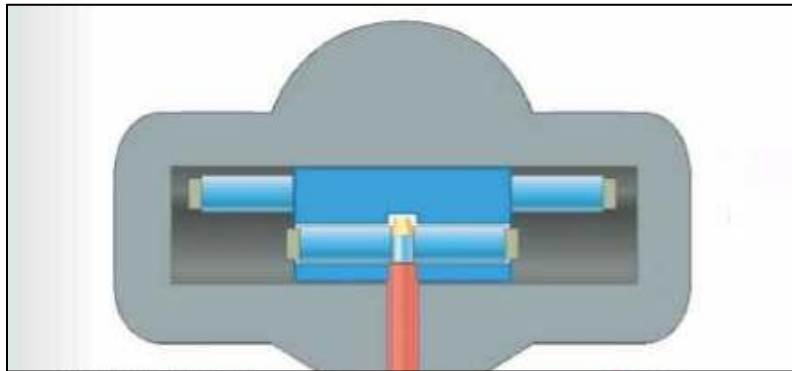
- merenje zasnovano na *MCA* tehnologiji
- mogućnost proizvoljnog redosleda merenja uzoraka
- eliminacija uticaja buke koju proizvodi sam uređaj
- korišćenje kompjutera velike memorije

Koncept totalne optimizacije je postavljen u cilju predupređenja eventualnih grešaka merenja i dobijanju što tačnijih rezultata.

Zaštitu od pozadinskih efekata omogućuje štiti od olova koji se postavlja asimetrično, tzv. pasivni štiti i aktivni štiti. Dodatna mera zaštite je postavljanje laboratorije na pažljivo odabranim mestima, u podrumima ili izdvojenim delovima zgrade.

### 1. Pasivni štiti

Koristi se olovni štiti, težine *630kg*, koji se postavlja *20cm* iznad mesta na kome se vrši merenje. Ovakav vid zaštite je neophodna prvenstveno zbog kosmičkog zračenja. Zato se i postavlja iznad mesta merenja jer se intenzitet kosmičkog zračenja smanjuje kako se približava površini Zemlje. Debljina zaštitnog sloja sa strane je između *7-11cm*, ispod komore za merenje je *15cm*, što je dovoljno da zaustavi gama zračenje. Asimetričan oblik omogućava istovremenu i podjednako efikasnu zaštitu od kosmičkog zračenja i zračenja koje nastaje kao rezultat interakcije kosmičkog zračenja i materijala od koga je načinjen sam zaštitni sloj.



*Sl.4.2.2. Prikaz pasivnog štita (crvenom bojom predstavljen je bakarni deo, sivom bojom predstavljen je olovni sloj i plavom bojom predstavljen je tečni scintilator)*

Zaključujemo da pasivni štiti ima namenu grube, spoljašnje zaštite. Nasuprot njemu, aktivni štiti koristi konvertor pomoću koga prevodi analogni u digitalni signal ili pomoću višekanalnog analizatora „deli“ signal.

### 2. Aktivni štiti

Zaštitni sloj koji predstavlja aktivnu zaštitu je cilindar u koji je smešten beta detektor u obliku cevi. Cev je postavljena van ose što omogućava da bude veća debljina scintilatora iznad komore za detekciju i fotomultiplikatorne cevi. Aktivni element koji čini zaštitni sloj je mineralno ulje na kome je baziran scintilator. Koriste se dve zaštitne fotomultiplikatorne cevi za detekciju. Domen aktivne zaštitne čini zaštita od jonizujućeg, gama i kosmičkog zračenja koje može da prolazi kroz određene materijale

ostavljajući trag za sobom u vidu ekscitovanih atoma ili molekula. Ekscitovani atomi ili molekuli dovode do scintilacije koje bivaju detektovane u fotomultiplikatornim cevima kao signal. Može se desiti da tako dobijeni signal bude identičan signalu iz beta detektora što dovodi do inhibicije prelaska analognog u digitalni signal.

Dodatna mera prevencije je i monitoring intenziteta uticaja pozadinskog zračenja tokom merenja. Sprovodi se pomoću dve metode:

- a) *MCA 2* se koristi za monitoring spektra
- b) mogućnosti da se podeli signal na *MCA 1*, zatim *MCA1, half 1* koji sadrži snimak spektra bez slučajnih događaja i *MCA 1, half 2* koji sadrži spektar uključujući podatke sa beta detektora

Drugi činitelj totalne optimizacije je merenje zasnovano na *MCA* tehnologiji. *Quantulus 1220* sadrži dva višekanalna analizatora. Istovremeno mere 4 spektra svaki sa 1024 kanalnom rezolucijom. Po logaritamskoj skali konvertuju analogne u digitalne signale.[12] Analogni signal može imati bilo koju vrednost u određenom intervalu, a ta se vrednost izražava u jedinicama za odgovarajuću fizičku veličinu. Generalno, prilikom merenja se po pravilu mere analogni signali. Da bi se takvi signali mogli sakupiti, analizirati, obrađivati i slati, moraju se pretvoriti (konvertovati) u digitalni oblik signala koji je pogodan za takve primene. Digitalne signale generišu odgovarajuća digitalna kola ili računari. Prilikom pretvaranja jednog signala u drugi oblik istog signala uvek se čini određena greška koja se naziva greška pretvaranja (kvantizacije). Kolo koje pretvara analogni u digitalni signal se naziva A/D konvertor. Prikaz spektra u logaritamskoj skali omogućuje da se razlikuju pikovi koji potiču od izmerenog uzorka i oni koji su nastali uticajem pozadinskih efekata, ali i omogućuje da se spektar „raširi“ preko velikog broja kanala što omogućuje bolju preglednost spektra sa energetske opsegom 1-2000keV (za beta). Bilo koji od snimljena četiri spektra mogu biti izdvojeni i prikazani na ekranu spoljašnjeg kompjutera koji je dodatno priključen.

Mogućnost proizvoljnog redosleda pri merenju uzorka daje slobodu izbora redosleda po kom će uzorci biti izmereni, ne vezano za poziciju (redni broj viala u posudi) na koju je smeštene uzorak u *Quantulus-u*.



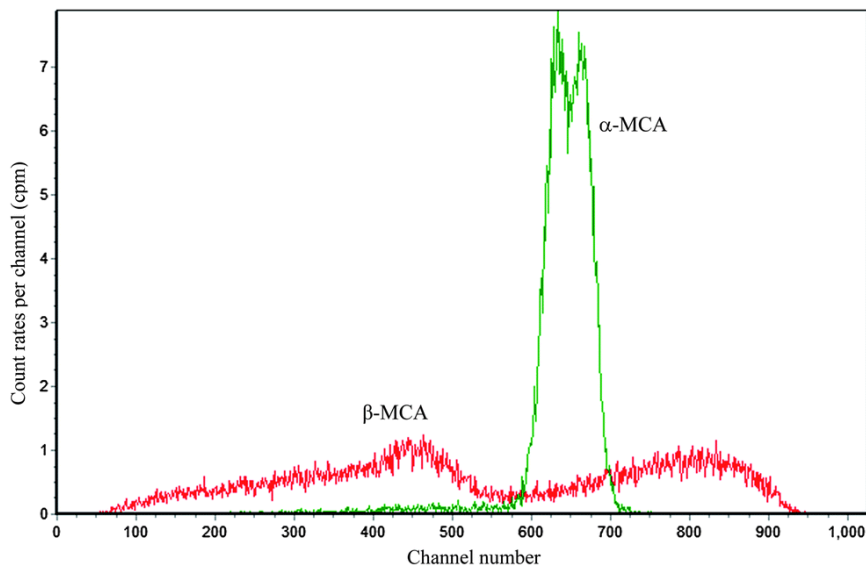
Sl. 4.2.3. Prikaz pozicija viala u posudi u *Quantulus-u 1220*

Kao što je prikazano na slici 4.2.3. svaka posuda se sastoji od 20 mesta za viala sa uzorcima za merenja (4 reda 5kolona), maksimalan broj uzorak koji se istovremeno mogu meriti je 60 (3 posude sa po 20 uzoraka). Uzorak se može postaviti na bilo koje mesto (od 1-20) npr. na poziciju broj 1, a zadati da se

meri kao npr. 19 po redu. Jedino se mora voditi računa o poziciji na posudi, jer se uvek broji s leva na desna po redovima. Posle svakog merenja, površina svake posude se prebriše alkoholnim rastvorom.

Na eliminaciju uticaja buke poreklom od samog uređaja se obraća pažnja još pri samoj konstrukciji uređaja, kao i poziciji laboratorije i instalaciji uređaja u laboratoriji. Dozvoljeno je jačina buke 50-60Hz.

Veliki uticaj na rad samog uređaja ima kompjuter. *Quantulus* se povezuje sa personalnim kompjuterom pomoću *hard drive*, *floppy* diska i štampača. Tastatura kompjutera se koristi i pokretanje rada samog detektora i zadavanja radnih zadataka. Mikroprocesor kontroliše odbroj, prikaz i analizu rezultata. Softver (*software*) je organizovan u tri programska moda označenih sa 1, 2 i 6. Programski mod 1 je daje mogućnost CPM/DPM programa, mod 2 prikazuje spektre, a mod 6, (*Quasi Simultaneous, QS*), omogućuje da se svakom uzorku zadaju specifični uslovi, specifični protokol, što ga čini izuzetno pogodnim za merenja tricijuma. Programski mod 1 - CPM/DPM omogućuje da se snimi beta odbroj korišćenjem MCA 1, half 1 gde CPM prikazuje rezultate za 8 prozora. MCA 1, half 2 se koristi za merenja alfa tipa. Postoji mogućnost podešavanja i MCA 2, half 1 i MCA 2, half 2.



Sl.4.2.4. Prikaz alfa i beta MCA u odnosu na br.kanala i odbroj

DPM prikazuje rezultate efikasnosti koji su korigovani za vrednosti efekta prigušenja i vrednost faktora prelivanja. DPM program proračunava korekcije pomoću tri postupka:

- metoda jednog uzorka (svakom izmerenom uzorku se progresivno dodaje agens prigušenja )
- metoda jednog uzorka kalibrisanog *HatTrick* (agens prigušenja se dodaje difuzijom u scintilacioni koktel; ne koristi se od 1996. godine)
- standardna metoda (automatsko merenje)

Programski mod 2 je pogodan za determinaciju, tačno pozicioniranje i određivanje kanala određene regije koji se žele predstaviti.

Sam *Quantulus* poseduje dva radna modula i treću mogućnost zadavanja slobodnih parametara:

- konfiguracija za ugljenik,  $^{14}\text{C}$  (može se koristiti za sve spektre na visokim energijama, pod uslovom da nema hemiluminiscencije)
- konfiguracija za tricijum,  $^3\text{H}$  (može se iskoristiti za bilo koji beta emiter niske energije, pod uslovom da nema hemiluminiscencije)
- mogućnost slobodnog podešavanja (za alfa čestice niske energije ili neke druge specifične slučajeve)

Prilikom svakog merenja je prisutna greška merenja. U ukupnu grešku koja se dobija na kraju merenja je uračunat i određeni procenat greške koja nastaje pri pripremi uzorka. Takođe je predviđena greška zbog razlike u aktivnosti radioizotopa. Greška nastaje jer nije ista vrednost koja se očitava za prvi uzorak koji se meri i poslednjeg izmerenog uzorka jer je nemoguće meriti ih sve istovremeno. Aktivnost opada ekponencijalno. Iz tog razloga se kao nulto vreme uzima vreme početka odbroja, a ne vreme merenja prvog uzorka, tzv. „poluživot“ (*half-life*) korekcija. Dodatna mera kontrole rada samog uređaja i njegove stabilnosti je mogućnost ponovljenog merenja (merenje se može ponavljati do 99 puta). Greška može biti teorijska i eksperimentalna. Teorijska greška predstavlja ukupnu grešku koja se očekuje usled statističkih podataka, a eksperimentalna greška je standardna devijacija svakog pojedinačnog merenja. Za  $n$  merenja očekuje se greška:

---

Dodatni faktor koji doprinosi grešci je faktor verovatnoće slučajnog događaja, ali je njegov doprinos mali, manji od 2%. Najveći uticaj na reprezentativnost i kvalitet dobijenih uzoraka ima:

- varijacije u temperaturi
- pojava drifta
- efekti na površini fotomultiplikatorne cevi

Kao nepoželjan efekat na površini fotomultiplikatorne cevi pojavljuje se Čerenkovljev efekat.

Dopunska mera provere kvaliteta rada i bezbednosti uređaja je postojanje tzv. spoljašnjeg standarda radioizotopa Europijum-152 ( $^{152}\text{Eu}$ ) koji poseduje maksimalnu aktivnost  $37\text{kBq}$  ( $1\ \mu\text{Ci}$ ) i period puluraspada od  $13.5$  godina. Standard  $^{152}\text{Eu}$  je čini originalnu postavku (*Wallac Oy, Finland*) samog uređaja u vidu rastvora koji je homogeno apsorbovan i raspoređen u sintetizovanom kristalu zeolita.

### 4.3 Princip detekcije zračenja tečnim scintilacionim detektorom

Pod terminom „detektori zračenja“ [1] podrazumevaju se svi uređaji koji detektuju jonizujuće ili neutronske zračenje. U užem smislu, pod ovim terminom se podrazumeva objekat u kome se dešava interakcija zračenja sa materijom. Kao rezultat interakcije dobija se neki signal ili slika, a zatim se taj signal ili slika obrađuju na odgovarajući način da bi se dobila informacija o nekom svojstvu samog zračenja ili tela koje ga emituje. Najprostiji detektori samo daju informaciju da li postoji zračenje ili ne, dok malo komplikovaniji uređaji mogu meriti jednu ili više karakteristika zračenja.

Na osnovu neke najopštije podele, detektori se mogu podeliti u dve grupe:

- integralni detektori – mere ukupan efekat prolaska zračenja
- diferencijalni detektori – imaju sposobnost da registruju pojedinačne čestice

U zavisnosti koji tip informacija nude, detektori se dele na:

- električne detektore – proizvode neki električni signal, kratkotrajan, koji nastaje kao rezultat interakcije zračenja sa osetljivom efikasnom zapreminom detektora
- optičke detektore – mogu da prikažu putanju kojom se kretala neka čestica

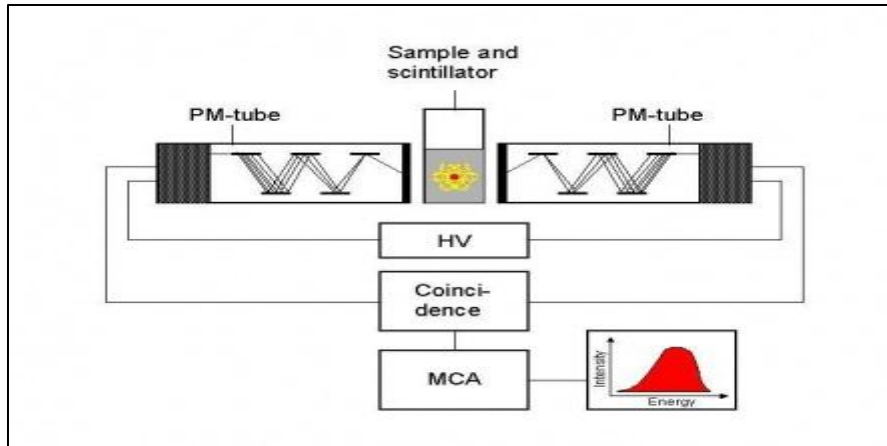
Postoji određen broj zahteva koji detektor treba da ispuni, i ti zahtevi određuju kvalitet samog detektora, poput:

- efikasnost – sposobnost detektora da registruje što je moguće veći broj čestica
- energetska rezolucija – sposobnost detektora koji radi u diferencijalnom režimu da registruje dve čestice što bliže energije
- vremenska rezolucija – poželjno je što manja vrednost „mrtvog vremena“
- efikasna zapremina
- osetljivost – sposobnost da registruje i male vrednosti intenziteta nekog zračenja
- masena ili električna rezolucija
- jednostavnost rukovanja detektorom
- cena detektora

Kao primer dobrog i efikasnog detektora pokazao se scintilacioni detektor. Na osnovu gore navedenih podela zaključujemo da je scintilacioni detektor diferencijalni detektor, električnog tipa što se objedinjeno naziva brojač.

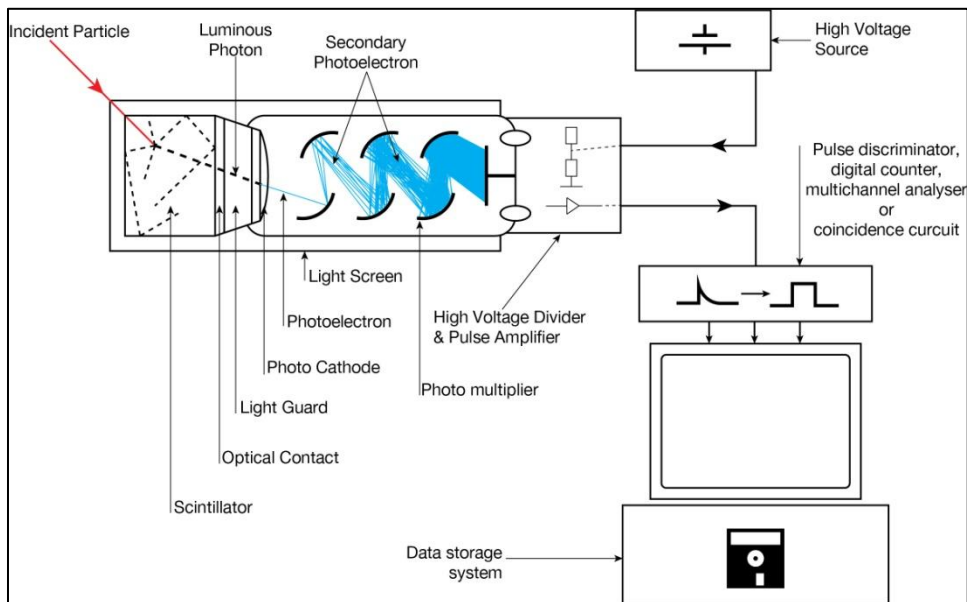
Prvi scintilator je konstruisao *Rendgen* kada je primetio da rendgensko zračenje može pobuditi neke materijale na svetlućanje. Kroz istoriju najveći problem koji je stojao na putu detekcije je činjenica da se radilo o materijalima koji su neprozirni za svoju svetlost. Talasna dužina koju telo apsorbira jednaka je talasnoj dužini koju telo emituje. Tek kada je pronađeno rešenje za ovaj problem, bilo je moguće konstruisati detektor pri čemu se može iskoristiti cela radna zapremina, a ne samo površina detektora.

Da bi se od nekog scintilacionog materijala 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 mogu lako obrađivati. Najjednostavniji način je da se ti impulsi pretvore u električne impulse i to se postiže pomoću fotomultiplikatora.



Sl.4.3.1 Slikovit prikaz šeme za pretvaranje svetlosnog impulsa u električni impuls

Scintilacioni detektor se može napraviti ostvarivanjem optičkog kontakta između scintilacionog materijala i prozora fotomultiplikatora (prikazano na sl. 4.3.1). Veza između scintilatora i fotomultiplikatora treba da bude ostvarena tako da spoljašnja svetlost ne može da prodre do fotokatode tako da signali koji se dobiju na izlazu fotomultiplikatora potuču samo od svetlosti stvorene interakcijom zračenja sa materijom. Signali dalje idu do brojača.



Sl. 4.3.2 Šematski prikaz detekcije scintilacionim brojačem

Diferencijalni režim rada je jedini način putem koga se upotrebljavaju proporcionalni brojači. Iz fotomultiplikatora signal se dalje šalje *PSA* i *MCA* gde se signal obrađuje i završava u računaru (prikazano na sl.4.3.2). Dalje se korišćenjem kompjuterskih programa dobijeni podaci obrađuju.

Organski scintilatori su nenadmašni u merenju velikog broja događaja. Često se koriste u sistemima koji detektuju brze sukcesivne događaje. Organski scintilatori imaju mali efektivni redni broj  $Z$ , tako da se



detekcija fotona u najvećem broju događaja odvija putem Komptonovog efekta. Iz ovog razloga su veoma pogodni za detekciju beta čestica. Komptonov efekat objašnjava da se prilikom rasejanja, uporedo sa upadnim zracima jedne talasne dužine, pojavljuju i zraci veće talasne dužine.

#### 4.4 Račun

Za svaki preparat u vialu izračunava se efikasnost detekcije[13] alfa čestica u alfa  $ROI$ , i efikasnot detekcije alfa čestica u beta  $ROI$ , koristeći relacije:

$$\frac{C_{\alpha}}{C_{\beta}} = \frac{E_{\alpha}}{E_{\beta}} \cdot \frac{A_{\beta}}{A_{\alpha}}$$

predstavlja odbroj alfa čestica u sekundi u alfa  $ROI$ ; predstavlja odbroj alfa čestica u sekundi u beta  $ROI$ ; je odbroj u sekundi u alfa  $ROI$  praznog matriksa koji sadrži ostatak masa približno jednak kalibracionom standardu; je odbroj u sekundi u beta  $ROI$  praznog matriksa koji sadrži ostatak masa približno jednak kalibracionom standardu; je aktivna koncentracija referentnog alfa standarda u  $Bq/mL$ ; je zapremina referentnog standarda dodatog u vial.

Postupak za izračunavanje efikasnosti detekcije beta čestica u beta  $ROI$ , i efikasnost detekcije beta čestica u alfa  $ROI$ , je po principu računa sličan prethodnom postupku, ali koriste se nove relacije:

$$\frac{C_{\beta}}{C_{\alpha}} = \frac{E_{\beta}}{E_{\alpha}} \cdot \frac{A_{\alpha}}{A_{\beta}}$$

je odbroj beta čestica po sekundi u beta  $ROI$ ; je odbroj beta čestica po sekundi u alfa  $ROI$ ; je odbroj u sekundi praznog matriksa u alfa  $ROI$ ; je odbroj u sekundi praznog matriksa u beta  $ROI$ ; je aktivna koncentracija referentnog beta standarda u  $Bq/mL$ ; je zapremina referentnog beta standarda dodatak u vial.

Jednačine verovatnoće detekcije u tačkama zavise od matematičkog modela za svaku krivu efikasnosti detekcije.

#### 4.4.1 Određivanje faktora preliivanja („spillover factor“)

Faktor preliivanja alfa-u-beta se i nesigurnost alfa-u-beta faktora preliivanja se može izračunati pomoću relacije:

$$\alpha_{\beta} = \frac{\sigma_{\alpha}^2}{\epsilon_{\alpha}^2} \cdot \frac{1}{\beta_{\alpha}}$$

gde je  $\alpha_{\beta}$  faktor mešanja alfa-u-beta;  $\sigma_{\alpha}$  standardna nesigurnost za faktor mešanja; efikasnost detekcije alfa čestica u alfa ROI,  $\epsilon_{\alpha}$ ; efikasnosti detekcije beta čestica u beta ROI,  $\beta_{\alpha}$ .

Analogno, faktor preliivanja beta-u-alfa i merna nesigurnost beta-u-alfa faktora preliivanja računa se prema formulama:

$$\beta_{\alpha} = \frac{\sigma_{\beta}^2}{\epsilon_{\beta}^2} \cdot \frac{1}{\alpha_{\beta}}$$

gde je  $\beta_{\alpha}$  faktor preliivanja beta-u-alfa;  $\sigma_{\beta}$  je standardna merna nesigurnost faktora preliivanja beta-u-alfa; efikasnosti detekcije beta čestica u beta ROI,  $\epsilon_{\beta}$ ; efikasnost detekcije beta čestica u alfa ROI,  $\alpha_{\beta}$ .

#### 4.4.2 Odbroj i merna nesigurnost odbroja

Odbroj i merna nesigurnost odbroja u alfa ROI i beta ROI, računa se prema relacijama:

$$N_{\alpha} = \frac{N_{\alpha\beta}}{\epsilon_{\alpha}} \cdot \frac{1}{\beta_{\alpha}}$$

$$N_{\beta} = \frac{N_{\alpha\beta}}{\epsilon_{\beta}} \cdot \frac{1}{\alpha_{\beta}}$$

gde je  $N_{\alpha}$  ukupan odbroj uzorka po sekundi u alfa ROI;  $N_{\beta}$  je ukupan odbroj uzorka po sekundi u beta ROI;  $N_{\alpha\beta}$  je odbroj u sekundi alfa čestica u alfa kanalima,  $N_{\beta\alpha}$  je odbroj u sekundi beta čestica u beta kanalima;  $\epsilon_{\alpha}$  je odbroj, koji uključuje pozadinske efekte, u sekundi u alfa ROI;  $\epsilon_{\beta}$  je odbroj po sekundi koji uključuje pozadinske efekte u beta ROI;  $t_{\alpha}$  je vreme merenja uzorka;  $t_{\beta}$  je vreme merenja uticaja pozadinskih efekata izraženo u sekundama.

Korekcije vrednosti alfa i beta odbroja (korekcije uključuju efekat preliivanja) su date relacijama:

$$\alpha_{\beta} = \frac{N_{\alpha\beta}}{N_{\alpha}} \cdot \frac{1}{\beta_{\alpha}}$$

Dalje se kombinacijom standardne merne nesigurnosti korekcijama vrednostima odbroja dobija:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - C_{cor})}{n} \pm \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Bitan parametar svakog merenja je i minimalna detektabilna koncentracija (*MDC*) koja se može izračunati i za alfa i za beta aktivnost.

Za alfa aktivnost se računa po formuli:

$$MDC_{\alpha} = \frac{1.645 \cdot s}{V} + C_{cor}$$

gde je  $t$  vreme odroja uzorka;  $t_{cor}$  je vreme korekcije zbog pozadinskih efekata;  $C_{cor}$  je specifična vrednost beta aktivnosti u uzorku (nenegativna);  $V$  je zapremina uzorka.

Analogno se izračuva MDC za beta aktivnost:

$$MDC_{\beta} = \frac{1.645 \cdot s}{V} + C_{cor}$$

gde je  $t$ ,  $t_{cor}$  i  $C_{cor}$

#### 4.4 Kontrola kvaliteta

Prilikom svakog merenja neophodno je sprovesti kontrolu kvaliteta. Kontrola se postiže tako što se u svakoj seriji vrši nadzor. Svaka serija merenja, partija, mora da sadrži najviše 20 uzoraka pored onih uzoraka koji se koriste za kontrolu kvaliteta. Sigurni smo da je metoda pouzdana ukoliko se dobijeni podaci kreću u opsegu limita same metode. Dozvoljena su odstupanja od poznate vrednosti. Ukoliko se dobiju vrednosti koji nisu u okviru limita, zaustavlja se dalje merenja i neophodno je utvrditi razloge takvog odstupanja i rešiti problem.

Standardi koji se koriste u metodi moraju biti odobreni od strane Nacionalne laboratorije za standarde, poput *NIST* ili *NPL*.

Kao mera preciznosti analize uzorka, izrađuje se i laboratorijski duplikat za svako od 20 punjenja. Izračunava se statistička vrednost između dva dobijena rezultata, *DER* („duplicate error ratio“). Izračunata vrednost sadrži i mernu nesigurnost svakog dobijenog rezultata. Trebalo bi da se dobije vrednost za *DER*

---

gde je                      originalna koncentracija aktivnosti u uzorku;                      predstavlja duplikat koncentracije aktivnosti uzorka;                      je merna nesigurnost originalne vrednosti uzorka;                      je merna nesigurnost vrednosti duplikata.

U odsustvu pomenutih metoda za proveru kvaliteta analize uzoraka, može se primeniti *IRM* (*Independent Reference Material*). *IRM* propisuje *NIST* za svaku metodu ponaosob. Za svaki uzorak referentnog materijala, *RM* može se izračunati relativna razlika, *R* dobijene vrednosti (                      i poznate vrednosti (                      :

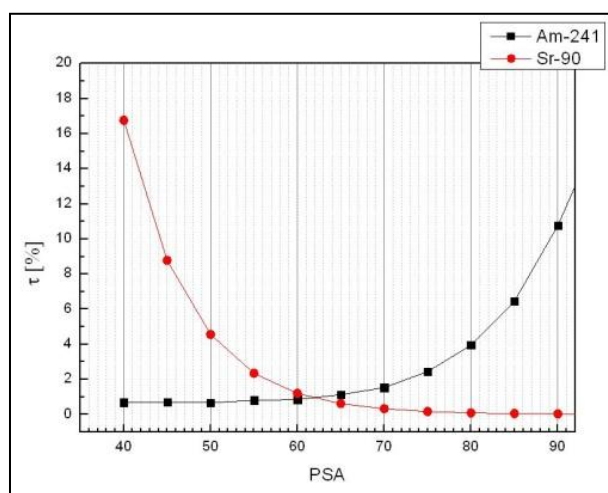
---

gde je                      merna nesigurnost dobijene vrednosti i                      merna nesigurnost poznate vrednosti. Izračuna vrednost za *R* bi trebalo da je                      , ukoliko se dobije veća vrednost od pomenute moraju se istražiti uzroci koji su doveli do takve vrednosti.

## 5. Rezultati merenja

„Svaki problem koji sam rešio je postao pravilo koje mi je kasnije pomoglo u rešavanju drugih problema.“ Rene Descartes

Pre početka merenja na detektoru je podešen analizator oblika impulsa *PSA*, snimanjem krivi pomoću kalibracionih izvora  $^{241}\text{Am}$  i  $^{90}\text{Sr}$ . Dobljene vrednosti su predstavljene grafički na sl. 5.1.



Sl. 5.1 Podešavanje *PSA*

Diskriminator se postavlja na vrednost kada je minimum interferencije između alfa i beta događaja u merenim uzorcima, tj. kada je . U konkretnom slučaju sa sl.5.1 iznosi  $PSA=63$ . Dalje se može pristupiti merenju prema objašnjenjima u prethodnim poglavljima.

Uzorci koji su mereni su uzorkovani iz arteškog bunara u Čurugu (selo u južno-bačkom okrugu, AP Vojvodina, R Srbija), oznaka ČBC, i iz meandra Tise, kod Čuruga sa oznakom ČTS. Dobljeni rezultati su karakteristični za lokalno geografsko područje.

Rezultati merenja su predstavljeni u odnosu na *MDA*, minimalnu detektabilnu aktivnost koja za alfa koncentraciju aktivnosti iznosi , dok za beta koncentracije aktivnosti iznosi za uzorke početne zapremine  $200\text{ml}$ .

Konkretno, na uzorcima su izvršena po tri merenja što je prikazano u Tabeli 5.1. Prema zakonskoj regulativi, vrednost za koncentraciju alfa čestica ne sme da prelazi , a za beta čestice ne sme da prelazi  $1\text{Bq/l}$ .

Tabela 5.1 Rezultati merenja

| Uzorak | Ukupna alfa aktivnost (Bq/l) | Ukupna beta aktivnost (Bq/l) |
|--------|------------------------------|------------------------------|
| 9151-1 |                              |                              |
| 9151-2 |                              |                              |
| 9151-3 |                              |                              |
| 8908-1 |                              |                              |
| 8908-2 |                              |                              |
| 8908-3 |                              |                              |
| 8909-1 |                              |                              |
| 8909-2 |                              |                              |
| 8909-3 |                              |                              |
| 9443-1 |                              |                              |
| 9443-2 |                              |                              |
| 9443-3 |                              |                              |
| ČBC-1  |                              |                              |
| ČBC-2  |                              |                              |
| ČBC-3  |                              |                              |
| ČBS-1  |                              |                              |
| ČBS-2  |                              |                              |
| ČBS-3  |                              |                              |

Analizirajući rezultate iz tabele zaključujemo da je zakonska regulativa propisane vrednosti prevaziđena samo kod uzoraka koji su obeleženi serijskim brojevima 9443-1 i 9443-3, te se dalje upućuje na gamaspektrometriju.

Kao parametar ispravnosti i kvaliteta rada uvek se vrši kontrola kvaliteta rada upoređivanjem dobijenih rezultata merenja različitih laboratorija za isti uzorak u okviru IAEA (*International Atomic Energy Agency*). Uzorci koji su mereni u pomenutu svrhu su obeleženi sa M I<sub>1,2</sub>; M II<sub>1,2</sub>; M III<sub>1,2</sub> i predstavljeni su u Tabeli 5.2.

Tabela 5.2 Rezultati merenja uzoraka IAEA

| Uzorak  | Ukupna alfa aktivnost (Bq/l) | Ukupna beta aktivnost (Bq/l) |
|---------|------------------------------|------------------------------|
| M I-1   |                              |                              |
| M I-2   |                              |                              |
| M II-1  |                              |                              |
| M II-2  |                              |                              |
| M III-1 |                              |                              |
| M III-2 |                              |                              |

### 5.1 Gamaspktrometrijska metoda

Gamaspektrometrijska analiza [14] podrazumeva gama-spektrometriju korišćenjem *HPGe* spektrometar, proizvođača *Canberra*, koji ima efikasnost detekcije 36% i rezoluciju 1.9 keV. Detektor je postavljen unutar 12cm debelog sloja olova i 3mm Cu unutrašnjeg sloja. Spektri se sakupljaju i analiziraju pomoću *Canberra Genia 2000 software*. Ova metoda zahteva da se uzorak vode sakupi u kanistere velike zapremine, pri čemu se dodaje *HCl* radi postizanja *pH* vrednosti 2 i . Zatim se menja *pH* vrednost uzorka dodavanjem radi dostizanja vrednosti *pH* od 8-9 i, istovremeno, se dodaje što dovodi do mogućnosti povećanja koncentracije jona vodonika što rezultira promenom optimalne vrednosti *pH*. U takvim slučajevima se dodaje uzorku još uzorkovane vode što omogućuje postizanje vrednosti *pH* od 8-9. Suspenzija se ostavlja da odstoji 2-3h radi eliminacije vazдушnih mehurića. Radionuklidi obrazuju talog sa . Talog se rastvara pomoću *HCl* i što omogućuje da se nataloženi materijal prebaci u plastične boce i analizira pomoću gamaspektroskopske analize.

Generalno, mali je udeo u ukupnoj totalnoj ekspoziciji pijaće vode i sastoji se u prisustvu radionuklida koji su pripadnici torijumovog i uranijumovog niza (*World Health Organization, 2004*). Zakonski je propisano je da je *TIV* (vrednost totalne indikativne doze) radona, tricijuma i <sup>40</sup>K .

Nivo radionuklida *GL* (*guidance level*) u pijaćoj vodi se računa prema relaciji:

—

gde je *IDC* (*individual dose criterium*) individualni kriterijum za dozu ekvivalentan ;  
 je koeficijent doze koju unese odrasla osoba ingestijom ( ); *q* je prosečna zapremina koju čovek unese u organizam u toku jedne godine, .

Tabela 5.1.1 Nivo radionuklida u pijaćim vodama (*World Health Organisation, 2004. year*)

| <i>Radionuklid</i>       |    |
|--------------------------|----|
| <sup>238</sup> <i>U</i>  | 10 |
| <sup>226</sup> <i>Ra</i> | 1  |
| <sup>232</sup> <i>Th</i> | 1  |
| <sup>137</sup> <i>Cs</i> | 10 |

Uz uslov — ; izmerena koncentracija aktivnosti radionuklida, nivo referentnog radionuklida (Tabela 5.1.1)

Totalna doza je doprinos pojedinačne doze svakog radionuklida, ( ) što predstavlja sumu koncentracije aktivnosti, ( ), faktora koji predstavlja dozu koju unese odrasla osoba ingestijom i *KM*, što predstavlja zapreminu vode koju odrasla osoba popije u toku godine, .

## Određivanje alfa i beta aktivnosti u vodi i procena rizika

Tabela 5.1.2 Vrednosti pojedinačnih doza radionuklida prema *World Health Organisation, 2004. godini*

| Radionuklid       |
|-------------------|
| <sup>238</sup> U  |
| <sup>226</sup> Ra |
| <sup>232</sup> Th |
| <sup>137</sup> Cs |

Gamaspektrometrijski su obrađeni rezultati zavedeni pod brojevima 9442, 9443 i 9444. Dobijene vrednosti su prikazane u Tabeli 5.1.3.

Tabela 5.1.3 Izmerene vrednosti

| Uzorak | <sup>137</sup> Cs (Bq/l) | <sup>226</sup> Ra (Bq/l) | <sup>232</sup> Th (Bq/l) | <sup>40</sup> K (Bq/l) | <sup>238</sup> U (Bq/l) |
|--------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|
| 9442   |                          |                          |                          |                        |                         |
| 9443   |                          |                          |                          |                        |                         |
| 9444   |                          |                          |                          |                        |                         |

Prvenstveno se proverava da li je ispunjen uslov, — , pri čemu su vrednosti za predstavljene u Tabeli 5.1.1. Proverava se svaki uzorak pojedinačno. Rezultati su predstavljeni u Tabeli 5.1.4.

Tabela 5.1.4

| Uzorak | <sup>137</sup> Cs (Bq/l) | <sup>232</sup> Th (Bq/l) | <sup>226</sup> Ra (Bq/l) | <sup>238</sup> U (Bq/l) |
|--------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 9442   |                          |                          |                          |                         |
| 9443   |                          |                          |                          |                         |
| 9444   |                          |                          |                          |                         |

Na osnovu rezultata prikazanih u Tabeli 5.1.4 zaključujemo da je uslov ispunjen za svaki uzorak. To omogućava dalji proračun doze za *GD* za svaki pojedinačni uzorak, predstavljeno u Tabeli 5.1.5.

Tabele 5.1.5 Vrednosti totalne doze, *GD*, na godišnjem nivou koju odrasla osoba unese ingestijom

| Uzorak | <sup>137</sup> Cs ( ) | <sup>232</sup> Th ( ) | <sup>226</sup> Ra (mSv ) | <sup>238</sup> U (mSv ) |
|--------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|
| 9442   |                       |                       |                          |                         |
| 9443   |                       |                       |                          |                         |
| 9444   |                       |                       |                          |                         |



## 6. Zaključak

*„Naša je odgovornost da učinimo ono što možemo, naučimo koliko možemo, unapredimo moguća rešenja i prenesemo znanje.“ R. Fajman*

Poslednjih decenija XX veka kao veliki problem i još veća obaveza nameće se pitanje zaštite životne sredine. Nakon velike ekspanzije industrije, nakon industrijske revolucije krajem XIX veka, dolazi do povećanog uticaja čoveka na okolinu i razne ekosisteme. Uticaj je vremenom postao toliki da je danas, početkom XXI veka, čovek najveći faktor koji utiče na okolinu. Problem bi ostao nezapažen da je uticaj jednostran, ali postoji i povratna informacija uticaja životne sredine na čoveka. Kao jedan od glavnih činilaca životne sredine je voda.

Vodene površine postoje isti vremenski period kao i postojanje planete Zemlje. Prirodno sadrže određen broj materija, poput radionuklida, koji čine sastavni deo kvaliteta vode. Neophodno je očuvati taj kvalitet vode. Zakonom je propisana maksimalna dozvoljena aktivnost koncentracije alfa i beta emitera koja je dozvoljena za piće.

Ukoliko se ne sprovodi kontinuirana provera aktivnosti, stanovništvo može biti izloženo povećanim koncentracijama alfa i beta emitera. Efekti takvog izlaganja se ne mogu sa sigurnošću predvideti. Najverovatniji ishod su mutacije ćelija koje sačinjavaju živi organizam ili mutacije genetskog materijala. Posledice mutacija mogu proći nezapaženo, neznatno, u vidu različitih patoloških procesa ili se mogu ispoljiti u nekoj od sledećih generacija. Međutim, ukoliko se sprovodi redovan monitoring pijaće vode i pridržava zakonskih okvira o maksimalnoj i minimalnoj dozvoljenoj aktivnosti, sigurno neće doći do štetnih efekata. Naime, uvek treba imati na umu i *ALARA* princip.

Postoje razne metode kojima se provera aktivnost vode, a kao najpouzdanija i najpogodnija pokazala se metoda merenja alfa i beta aktivnosti vode metodom tečnog scintilacionog brojača. Tečni scintilacioni brojač je pogodan jer ispunjava uslove poput efikasnosti, energetske rezolucije, vremenske rezolucije,...., i jednostavnosti rukovanja aparatom. Kao predstavnik scintilacionih brojača pogodnih za merenja aktivnosti izdvaja se *Quantulus 1220*. Veoma je pogodan jer omogućava merenja za tritijum, ugljenik-14, ali pruža i mogućnost slobodnog podešavanja za specifična merenja. Jedina otežavajuća okolnost prilikom upotrebe *Quantulus-a 1220* je vremenski zahtevna hemijska priprema uzorka kome se treba meriti aktivnost.

Kao najbitniji ekosistem za svakog čoveka izdvaja se mesto stanovanja i okoline. Vojvodina je zbog svojih specifičnih uslova za poljoprivredu, za razvoj infrastrukture, velikog hidrogeološkog potencijala, pogodnosti reljefa,...., dom velikom broju ljudi. Zbog velike koncentracije stanovništva i potencijalno velikog uticaja povećane aktivnosti vode čini se posebno pogodnom za ispitivanja aktivnosti vode. Konstatovano je da je od ukupnog broja uzoraka, samo na jednom nalazištu primećena veća aktivnost

vode od one koja je zakonom propisana. Dozvoljena koncentracija za alfa koncentraciju aktivnosti iznosi \_\_\_\_\_, dok za beta koncentracije aktivnosti iznosi \_\_\_\_\_ za uzorke početne zapremine 200ml. Kao konkretan predstavnik južno-bačke regije Vojvodine izdvaja se Čurug na kome su uzorkovana dva uzorka na kojima je sprovedeno merenje. Zabeleženi su rezultati koji jasno pokazuju da su vrednosti koncentracije alfa i beta čestica ispod granice detekcije. Jedini uzorak na kome je zabeležena povećana koncentracija je obeležen sa 9443-1 u vrednosti za alfa čestice \_\_\_\_\_ Bq/l i beta čestice \_\_\_\_\_ Bq/l. Takođe, kod uzorka serijskog broja 9443-3 je zabeležena povećana koncentracija alfa čestica, \_\_\_\_\_ Bq/l. Uzorak je dalje prosleđen na gamaspektroskopiju.

Gamaspektroskopskom analizom je utvrđeno da totalna doza radona-226, cezijuma-137, urana-238 i torona-232 koja se unese u organizam ingestijom na godišnjem nivou nije veća od \_\_\_\_\_ i ne postoji opasnost po zdravlje stanovništva (ALARA princip).

Zaključujemo da su metode određivanja alfa i beta koncentracije i gamaspektroskopske analize nadopunjuju i nadograđuju. U cilju očuvanja sredine i zdravlja pojedinca neophodna je sinteza različitih naučnih grana poput fizike, hemije, zaštite životne sredine i neprestano unapređenje rada, metoda i merne tehnike. *Quantulus 1220*, kao predstavnik merne tehnike, je pogodan i za merenja u budućnosti jer omogućuje širok spektar delatnosti i dopuna već postojećih radnih zadataka.

## Literatura

- Skripta iz savremene eksperimentalne fizike*; M. Krmar
- [2] *Osnovi nuklearne fizike*; L. Marinkov
- [3] *Fizika elementarnih čestica*; I.B.Okunj
- [4] „Establishment of a method for measurement of gross alpha/beta activities in water from Vojvodina region“; Nataša Todorović, Jovana Nikolov, Branislava Tenjović, Ištvan Bikit, Miroslav Vesković
- [5] *Zakon o zaštiti od jonizujućih zračenja i o nuklearnoj sigurnosti* („Sl. glasnik RS“, br. 36/2009)
- [6] *Pravilnik o higijenskoj ispravnosti vode za piće* („Sl. list SRJ, br. 42/98 i 44/99“)
- [7] *Pravilnik o utvrđivanju programa sistematskog ispitivanja radioaktivnosti u životnoj sredini* („Sl. glasnik RS“, br. 100/2010)
- [8] *Review of radiation Oncology Physics*; Ervin B. Podgorsak
- [9] *Liquid scintillation analysis: principles and practice*; Michael F. L'Annuziata, Michael J. Kessler
- [10] *Određivanje ukupne alfa i beta aktivnosti u pijaćim vodama metodom tečnog scintilacionog brojanja*; Nataša Todorović, Jovana Nikolov, Ištvan Bikit, Branislava Tenjović
- [11] *Instrument manual 2002. godina; Quantulus1220 – ultra low level liquid scintillation spectrometer; proizvođača PerkinElmer – internal software version 1.D*
- [12] *Osnovi elektronike i digitalne elektronike*; Z. Mijatović, S. Đurović
- [13] *Određivanje ukupne alfa i beta aktivnosti u pijaćim vodama metodom tečnog scintilacionog brojanja*; Nataša Todorović, Jovana Nikolov, Ištvan Bikit, Branislava Tenjović
- [14] „Applied Radiation and Isotopes“, Public exposure to radon in drinking water in Serbia; Nataša Todorović, Jovana Nikolov, Sofija Forkapić, Ištvan Bikit, Dušan Mrđa, Miodrag Krmar, Miroslav Vesković



## *Biografija*

Tanja Maličević je rođena 20.04.1987. godine u Novom Sadu. Osnovnu školu „Đura Jakšić“ u Čurugu je završila 2002. godine. Zatim je upisala medicinsku školu „7. april“ u Novom Sadu, smer medicinska sestra- tehničar koju je završila 2006. godine. Sledeće godine, 2007. godine, upisala je studije fizike, smer medicinska fizika, na Prirodno-matematičkom fakultetu u Novom Sadu koje je završila 2013. godine.

Iste godine upisala je master akademske studije fizike (fizičar istraživač) na Prirodno-matematičkom fakultetu u Novom Sadu.