



**UNIVERZITET U NOVOM SADU**  
**PRIRODNO-MATEMATIČKI**  
**FAKULTET**  
**DEPARTMAN ZA FIZIKU**  
(Katedra za nuklearnu fiziku)



**Monitoring tricijuma u površinskim vodama u  
JP „Nuklearni objekti Srbije”**

- master rad -

Mentor:

Prof. dr Nataša Todorović

Kandidat:

Miloš Garabandić

Novi Sad, jul 2020.

*Ovim putem želeo bih da se zahvalim svim ljudima koji su bili uz mene tokom školovanja, profesorima, kolegama a najviše svojoj porodici, i jednom članu više koji tek treba da se pojavi.*

*Nema potrebe nabrajati sve te divne ljudе, prepoznaće se sami,  
još jednom velikо HVALA!*

## *Uvod*

*Izotop vodonika, tricijum, je radioaktivni izotop, u većini slučajeva se nalazi vezan za molekule koji zamenjuju vodonik. Može se naći u prirodi kao produkt interakcije kosmičkog zračenja sa molekulima vazduha odnosno atmosferskim azotom, takav tricijum je prirodni. Postoji i antropogeni tricijum koji doprinosi uvećanu nivoa prirodnog tricijuma. Veštački proizveden tricijum nastaje u probama nuklearnog oružja, u radu nuklearnih elektrana i preradom nuklearnog goriva. U ovom radu biće opisane metode detekcije tricijuma tečnim scintilacionim detektorom Quantulusom 1220 direktnom metodom u trajanju od 300min na katedri za nuklearnu fiziku. Uzorci površinske vode sa tricijumom uzete su sa lokacije JP Nuklearni objekti Srbije iz potoka Mlaka. Monitoringom je zabeleženo povećanje sadržaja tricijuma na dve lokacije, što nam ukazuje o propustima skladištenja nuklearnog otpada.*

## Sadržaj:

1.	Jonizujuće zračenje.....	5
2.	Radioaktivnost.....	5
2.1.	Prirodna radioaktivnost .....	5
2.2	Radionuklidi kosmogenog porekla.....	5
2.2.	Veštačka radioaktivnost .....	7
3.	<sup>3</sup> H Tricijum.....	8
3.1.	Opšte osobine .....	8
3.2.	Izotopski efekti.....	10
3.3.	Dobijanje tricijuma.....	10
3.4.	Biološki efekti tricijuma.....	11
3.5.	Primena tricijuma .....	13
3.5.1.	Hidrogeologija .....	13
4.	Zakonska regulativa.....	16
4.1.	Tricijum i zakonska regulative.....	16
5.	Nuklearni objekti Srbije.....	18
5.1.	Odlaganje nuklearnog i drugog radioaktivnog otpada .....	20
6.	Metode ispitivanja tricijuma.....	22
6.1.	GPC metoda .....	23
6.2.	Tečni scintilacioni detektori .....	23
6.2.1.	Podela.....	23
6.2.2.	Tečni organski scintilatori .....	26
6.2.3.	Quantulus 1220.....	26
6.2.4.	LSC metoda .....	33
1.	ASTM-standardna metoda za ispitivanje tricijuma.....	34
2.	Elektrolitičko obogaćenje.....	35
3.	Direktna metoda za ispitivanje tricijuma .....	36
7.	Rezultati merenja.....	37
8.	Zaključak .....	45
	Literatura.....	46

## 1. Jonizujuće zračenje

Sva nestabilna jezgra spontano se raspadaju u procesu radioaktivnosti prilikom čega dolazi do emisije radioaktivnog zračenja alfa, beta i gama zračenja. Na taj način prelaze u niža i stabilnija stanja. Radioaktivno zračenje spada u jonizujuće zračenje jer ionizuje atome materije sa kojom dolazi u kontakt tj. izbacuje elektrone iz njihovih atomskih omotača. Prema načinu interakcije sa materijom deli se na:

1. Čestično – ionizacija, ekscitacija i radijacioni efekti (kod lakih nanelektrisanih čestica),
2. Fotonsko – fotoefekat, Komptonov efekat i efekat stvaranja parova.

## 2. Radioaktivnost

### 2.1. Prirodna radioaktivnost

Prirodna radioaktivnost predstavlja emisiju ionizujućeg zračenja iz prirodnih radioaktivnih izvora čijem dejstvu su izložena sva živa bića na planeti. Ova vrsta radioaktivnosti primećena je kod nestabilnijih jezgara, kod onih na kraju tablice Periodnog sistema elemenata, prema tome prirodna radioaktivnost je pojava spontanog pretvaranja nestabilnih jezgara jednog hemijskog elementa u jezgra drugih elemenata uz emisiju alfa i beta čestica i gama zračenja.

Svi elementi čiji je atomski broj veći od 83 su radioaktivni. Ti elementi se grupišu u lance, tzv. radioaktivne nizove, u kojima dolazi do sukcesivnih raspada. Rodonačelnik niza je izotop koji stoji na vrhu niza i čijim raspadom nastaju svi članovi niza koji se nazivaju potomci.

U prirodi postoje četiri radioaktivna niza (Tabela 1), pri čemu su se članovi četvrtog,  $^{237}\text{Np}$  niza, odavno raspali zbog relativno kratkih perioda poluraspađa:

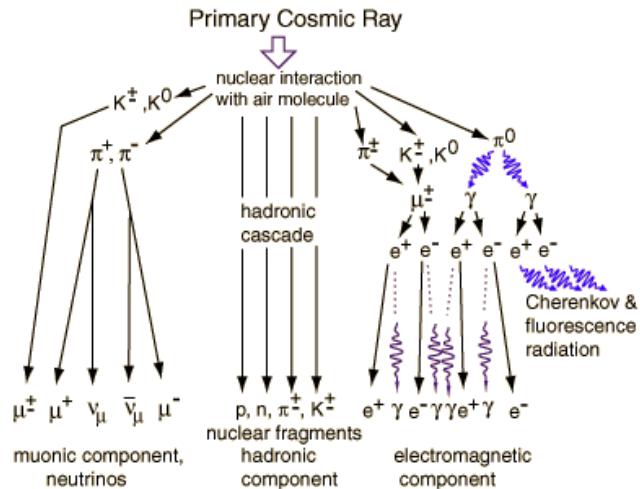
1. *Uranijumov ( $^{238}\text{U}$ ) niz*
2. *Torijumov ( $^{232}\text{Th}$ ) niz*
3. *Aktinijumov ( $^{235}\text{U}$ ) niz*
4. *Neptunijumov ( $^{237}\text{Np}$ ) niz*

### 2.2 Radionuklidi kosmogenog porekla

Brojni radionuklidi se proizvode kontinuirano interakcijom čestica kosmičkih zraka sa jezgrima gasova u zemljinoj atmosferi. Kosmogeni izotopi su stvoreni od strane interakcije visoko energetskih primarnih i sekundarnih čestica kosmičko zračenje sa jezgrima gasovitih molekula u atmosferi (npr.  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ , Ar, itd.)

Ovi procesi što rezultira fragmentacijom ciljnih jezgara ili zahvatom termalnih neutrona od naleta kosmičkog zračenja sa jezgrima gasova koji se nalaze u atmosferi.

Sekundarne čestice kosmičkog zračenja proizvode nuklearne reakcije po znatno smanjenoj stopi sa površinskim delovima Zemlje, uključujući hidrosferu, kriosferu i litosferu.



*Slika 1. Prikaz primarnog kosmičkog zračenja sa interakcijom molekula vazduha, prilikom čega nastaju elementarne čestice.*

Kosmogeni radionuklidi suproizvedeni u najvećoj meri u zemljinoj atmosferi. Tabela 2. sadrži spisak kosmogenih nuklida, njihovih vremena poluživota, stopa proizvodnje u atmosferi i globalnom masa tih prirodnih nuklida. Kratkotrajni radionuklidi nisu obuhvaćeni ovde. Jednom kada se proizvedu u atmosferi, radionuklidi, poput <sup>3</sup>H, <sup>7</sup>Be, <sup>10</sup>Be, <sup>26</sup>Al i <sup>36</sup>Cl, posle nekog vremena stignu na zemljinu površinu. Radionuklidi u gasovitom obliku, kao što su <sup>14</sup>CO<sub>2</sub>, <sup>37</sup>Ar, <sup>39</sup>Ar i <sup>81</sup>Kr, posle nekog vremena stignu u okeane i reke putem cirkulisanja vazduha.[16]

izotop	$t_{1/2}$
$^3H$	12.33 g
$^7Be$	53.3 d
$^{10}Be$	$1.51 \cdot 10^6$ g
$^{14}C$	5 730 g
$^{22}Na$	2.6 g
$^{26}Al$	$7.17 \cdot 10^5$ g
$^{32}Si$	172 g
$^{32}P$	14.26 d
$^{36}Cl$	$3.08 \cdot 10^5$ g
$^{39}Al$	269 g
$^{53}Mn$	$3.74 \cdot 10^6$ g
$^{59}Ni$	$7.6 \cdot 10^4$ g
$^{81}Kr$	$2.29 \cdot 10^5$ g

*Tabela 2. Prikaz kosmogenih radioizotopa i njihova vremena poluraspada.[16]*

## 2.2. Veštačka radioaktivnost

Radioizotpoi koji su veštačkog porekla, dobijaju se preko stabilnih izotopa koji se nalaze prirodi u nuklearnim reakcijama. Prilikom interakcije u nuklearnoj reakciji između neke čestice i jezgra, ili interakcije dva jezgra, stvara se jezgro koje ima drugačiji sastav i oslobođa se nova čestica, u tabeli su dati neki veštački radioizotopi sa vremenom poluraspada[15]:

$$X + a = Y + b \pm Q \quad (1.0)$$

Gde je: X – jezgro meta,

a – projektil čestica,

Y – novo jezgro,

b – nova čestica, i

Q – energija reakcije.

Kada je predznak negativan reakcije je endoenergetska, a kada je predznak pozitivan reakcija je egzoenergetska.

Kiseonik-15	$^{15}\text{O}$	2 m
Fosfor-32	$^{32}\text{P}$	14,3 d
Renijum-186	$^{186}\text{Re}$	90,6 h
Rubidijum-82	$^{82}\text{Rb}$	75 s
Selen-75	$^{75}\text{Se}$	118,5 d
Stroncijum-89	$^{89}\text{Sr}$	50,5 d
Tehnecijum-99m	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6,02 h
Talijum-201	$^{201}\text{Tl}$	73,1 h
Tricijum(vodonik-3)	$^3\text{H}$	12,3 g
Ksenon-127	$^{127}\text{Xe}$	36,41 d
Ksenon-133	$^{133}\text{Xe}$	5,25 d
Itrijum-90	$^{90}\text{Y}$	64,1 h

g - godina;                           d - dan;  
 h - sat;                               m - minut;  
 s - sekund                            $^{\text{m}}$  - metastabilno stanje

Tabela 1. Prikaz neki veštačkih radioizotopa i njiova vremena poluraspada.

### 3. $^3\text{H}$ Tricijum

#### 3.1. Opšte osobine

Koncentracija tricijuma na zemlji je veoma mala. Atmosfera ima samo količine u tragovima, nastale interakcijom njegovih gasova sa kosmičkim zracima. atomsko jezgro je nestabilno i raspada se sa jednim vremenom poluraspada od 12,32 godina po emisiji jednog elektrona u  $^3\text{He}$  (beta raspad), opšte osobine tricijuma date su u tabeli 3.

Tricijum opšte osobine	
Spin jezgra	$\frac{1}{2}+$
Period poluraspada	12.3 godine
Atomska masa	3.01605u
Tačka topljenja	-252,5 C
Tačka ključanja	-248.1 C

Tabela 3. [23]

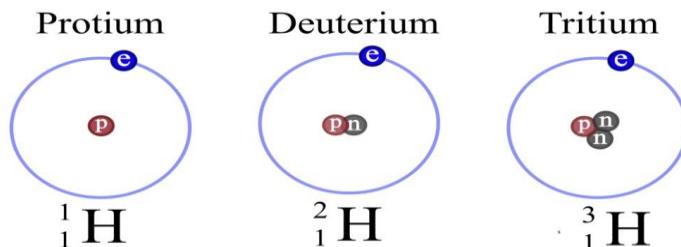
Tricijum je radioaktivran. Veštački proizvedeni tricijum je povisio nivo prirodnog tricijuma u atmosferi posebno posle nuklearnih proba od 1954. do 1962. godine, a kasnije i proizvodnjom nuklearnog oružja, kao i prilikom rada nuklearnih elektrana i reprocesuiranja nuklearnog goriva.

Tabela 4.

Način raspada	Energija	Produkt
Beta	18.6 keV	$^3\text{He}$ Os

Kako vodonik ima jedan proton vidi se da izotopi mogu nastati dodatkom neutrona. Ukoliko vodonikovo jezgro primi jedan neutron nastaje deuterijum, dok sa proširenjem vodonika sa dva neutrona stvara jezgro tricijuma[11]. Vidi se da su zajedno malo jezgro kao što je vodonik dva neutrona tako da se može intutivno zaključiti da nije stabilno. Raspadom se emituje mala količina beta zračenja.U prirodi postoje tri izotopa vodonika, to su elementi sa različitom atomskom masom, sa istim atomskim brojem, tako da razlikujemo[12]:

1. *Vodonik*  $^1H_1$
2. *Deuterijum*  $^2H_1$
3. *Tricijum*  $^3H_1$



Slika 2. Prikaz vodonikovih izotopa

Tricijum ili vodonik-3 ( $^3H$ ) je redak i radioaktivni izotop vodonika. Nukleus tricijuma (koji se ponekad naziva i triton) sadrži jedan proton i dva neutrona, dok jezgro uobičajenog izotopa vodonika-1 (protium) sadrži samo jedan proton, a vodonik-2 (deuterijum) sadrži jedan proton i jedan neutron .[1]

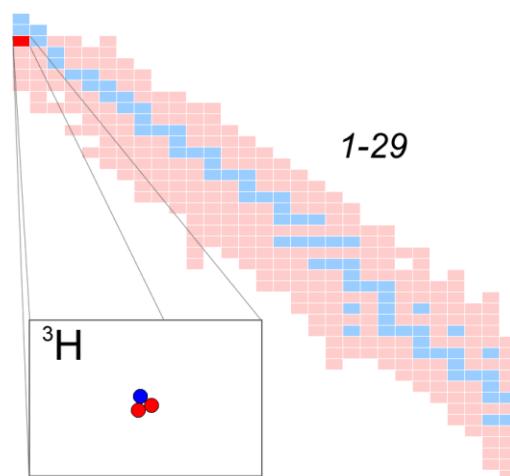


Tabela 5. Tabela nuklida (kompletna). Sadrži isotope poređane protonskim brojem levo nadesno I brojem neutrona odozgo prema dole, plava boja predstavlja stabilne izotope, a roze simbolizuje nestabilne izotope.[23]

Kritična temperatura	40,6 K
Kritična zapremina	$57,1 \text{ cm}^{-3} \text{ mol}^{-1}$
Kritični pritisak	18,1 atm
Temperatura trojne tačke	20,5 K
Pritisak trojne tačke	0,207 atm
Temperatura ključanja	24,9 K
Period poluraspada	12,32 god
Srednja energija zračenja	5,7 keV
Maksimalna energija zračenja	18,6 keV
Maksimalni domet $\beta$ -čestica u vazduhu	5,7 mm
Maksimalni domet $\beta$ -čestica u vodi	6 $\mu\text{m}$
Maksimalni domet $\beta$ -čestica u tkivu	6,5 $\mu\text{m}$

Tabela 6. fizičko-hemijske osobine tricijuma

### 3.2. Izotopski efekti

U fizičkoj organskoj hemiji, kinetički izotopski efekat (KIE) je promena brzine reakcije hemijske reakcije kada je jedan odatoma u reaktantima zamenjen jednim od njegovih izotopa. Ova promena brzine reakcije je kvantno mehanički efekat koji pre svega proizlazi iz težih izotopa koji imaju niže vibracione frekvencije u poređenju sa njihovim lakšim susedima. U većini slučajeva to podrazumeva veći energetski unos potreban da teži izotopologu dostignu prelazno stanje (ili, u retkim slučajevima, granicu disocijacije), a samim timi sporiju brzinu reakcije, podela izotopskih efekata prikazana je u tabeli 8.. [13]

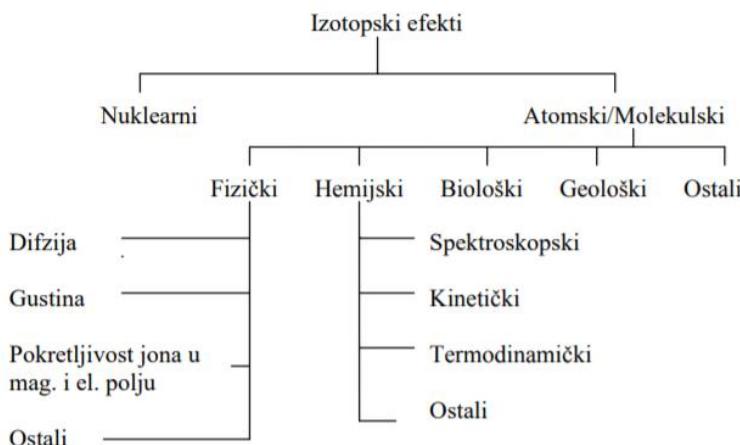
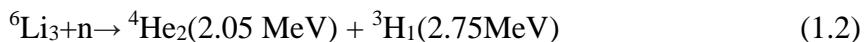


Tabela 7. [14]

### 3.3. Dobijanje tricijuma

1. Iz izotopa litijuma,  $^6\text{Li}$  litijuma-6, u nuklearnim reaktorima- Neutronsko zračenje litijuma (najčešće iz LiF) je jedna od osnovnih metoda dobijanja tricijuma (otkrili

Chadwick i Goldhaber). U reakciji učestvuju termalni neutroni, a ako se koriste brzi neutroni, pogodan je  $^7\text{Li}$  u takvom procesu stvaranja u keramici obogaćene ovim izotopom litijuma, moguća je sa neutronima bilo koje energije i predstavlja egzotermnu reakciju koja daje 4.8 MeV. Za poređenje, fuzija deuterijuma sa tricijumom oslobađa oko 17.6 MeV energije.[3]



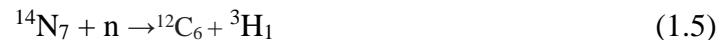
2. *Iz borona* - Ozračivanjem izotopa bora,  $^{10}\text{B}$  bora-10 visoko energetski neutronima.[4]



3. *Iz izotopa vodonika, deuterijuma* - kod reaktora sa teškom vodom kao moderatorom svaki put kada jezgro deuterijuma zahvati neutron. [6]
4. *Iz nuklearne fisije* - tricijum je nespecifičan produktnuklearne fisije sa  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{233}\text{U}$  pričemu se stvorи 1 atom na 10000 fisija.[7]
5. *Iz izotopa helijuma,  $^3\text{He}$  helijuma* 3- prireakciji  $^3\text{He}$  I termalnih neutrona, pri čemu se izbacuje proton I nastaje tricijum. [7]



6. *Iz kosmičkog zračenja* - Neutronskom iradijacijom azota stvara se tricijum, pod uslovom da postoji izvor visokoenergetskih neutrona. Prirodno nastaje kao posledica interakcije kosmičkih zraka sa gasovima u atmosferi, kada brzi neutroni čija energija mora biti veća od 4.0 MeV a interaguje sa azotom.[8][9]

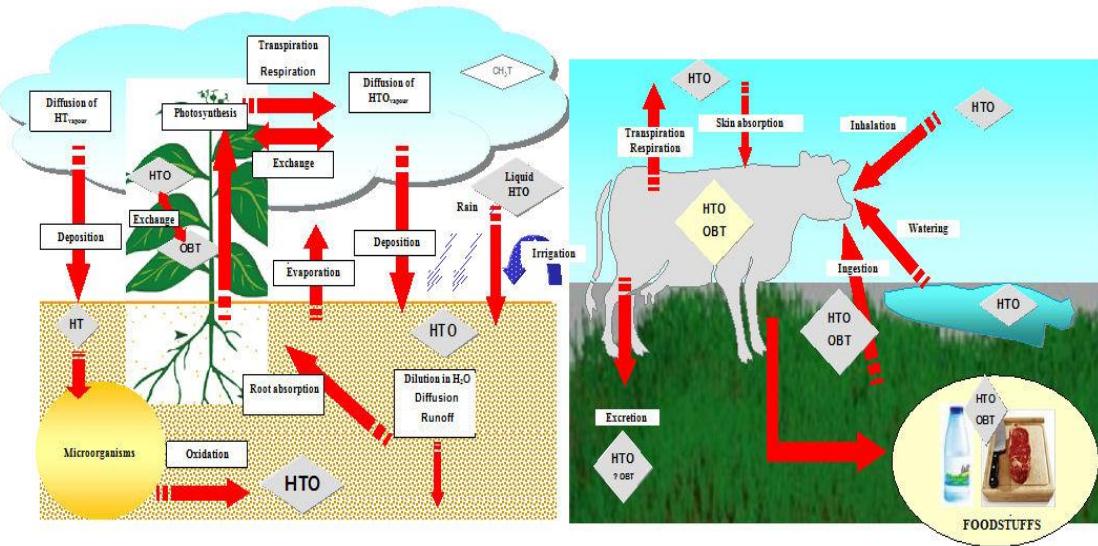


### 3.4. Biološki efekti tricijuma

Prolaz zračenja kroz živa bića izaziva promene na ćelijama, organima ili cielem tielu. Te promene koje zračenje izaziva na živim tkivima nazivamo biološkim efektima zračenja. Prolaskom kroz tielo zračenje jonizuje molekule što može dovesti do promena, oštećenja ili čak razaranja organskih makromolekula tiela. Ti fizičko-hemijski procesi u tkivima mogu izazvati celi lanac bioloških promena čiji je rezultat biološka reakcija na zračenje. Biološki efekti zračenja mogu se pojaviti na ozračenom pojedincu (somatski efekti), kao i u potomstvu ozračenog pojedinca ako se oštetio nasledni mehanizam (genetski efekti).

U zavisnosti uticaja radionuklida na organizam, određuju se doze koje organizam sme da primi a da pri tome ne bi došlo do oštećenja ćelija, tako su pored tricijuma  $^{59}\text{Ni}$  i  $^{55}\text{Fe}$  jedni od radionuklida sa najvećim dozvoljenim dozama od 37MBq, po preporuci Međunarodne komisije. Iako tricijum pri raspadu emituje beta zračenje niskih energija slabe ionizacione

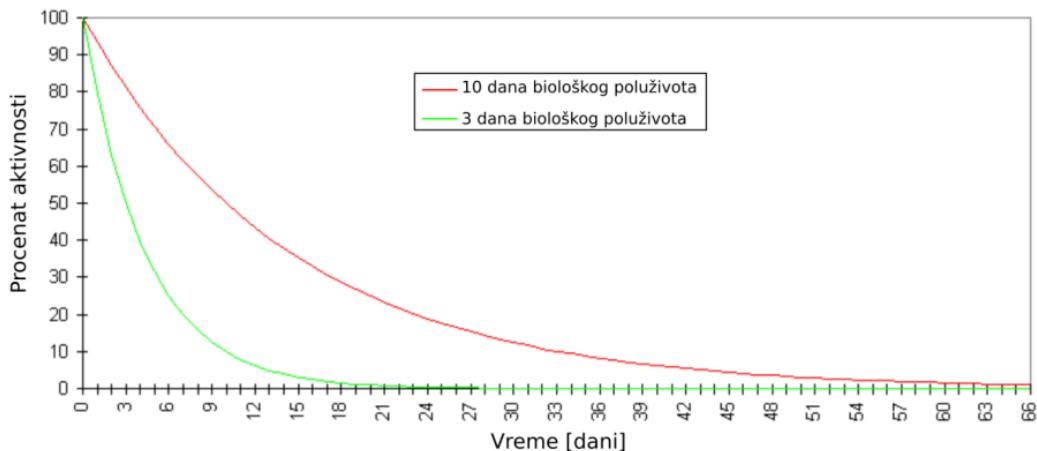
moći, voda HTO sa većim koncentracijama tricijuma, kao i u gasnom stanju u obliku pare, mogu da se difunduju kroz kožu čoveka. Pri udisaju i izdisaju gasa HT, samo se mala količina od 0.005% deponuje u plućima. Najveću opasnost predstavlja udisanje para ili gutanje tricijumske vode HTO. Pošto se vezuje za kiseonik u vodi, kretanje tricijuma kroz organizam je isto kao i kretanje vode. ICRP preporučuje da doze mogu biti i do 100 puta veće za tricijum u gasovitom stanju u odnosu na HTO.



Slika 3. Proces kruženja tricijuma u prirodi.

Pojam RBE- relativna biološka efikasnost kvantitativno opisuje efekte zračenja i relativne rizike. Kod tricijuma RBE je u intervalu od 1.0 do 2.0 jer zavisi od doze i referentnog zračenja.

Biološki period poluraspada je 9.4 dana odnosno efektivni period je od 10-12 dana, pri čemu unos većih količina vode ga redukuje za faktor 2 ili više. U zavisnosti od metabolizma pojedinaca, odnosno različitih brzina izlučivanja, temperature i unosa tečnosti, može biti skraćen na 2-3 dana ako je unos tečnosti povećan sa 21 na 201, ili čak na 4-8 sati dijalizom. Na grafiku dole, prikazana je brzina opadanja tricijuma u ljudskom organizmu. NCRP-Nacionalni savet za zaštitu od radijacije, je propisao godišnji limit maksimalnog unosa tricijuma u vrednosti od 2.96 GBq dok je efektivni ekvivalent unete doze u mekom tkivu  $1.7 \times 10^{-11} \text{ SvBq}^{-1}$ .[22]



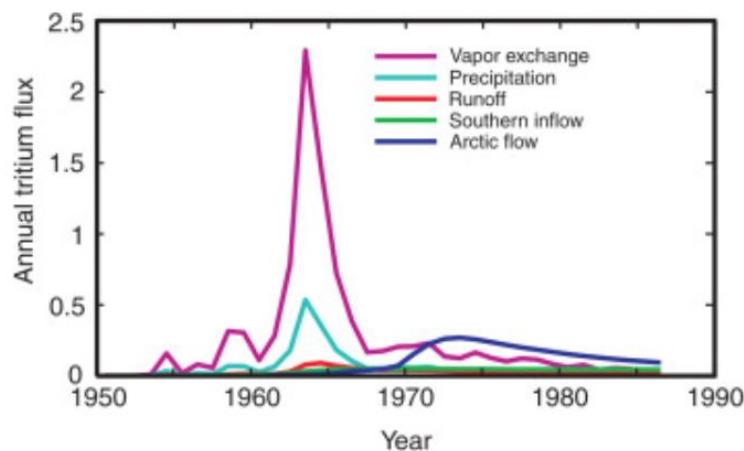
Grafik 1. Procenat aktivnosti u ljudskom organizmu, baziran na predviđanju biološkog poluživota tricijuma od 10 dana što važi za prosečnu vrednost za ljude, i od 3 dana prilikom povećanog unosa vode u organizam.[22]

### 3.5. Primena tricijuma

#### 3.5.1. Hidrogeologija

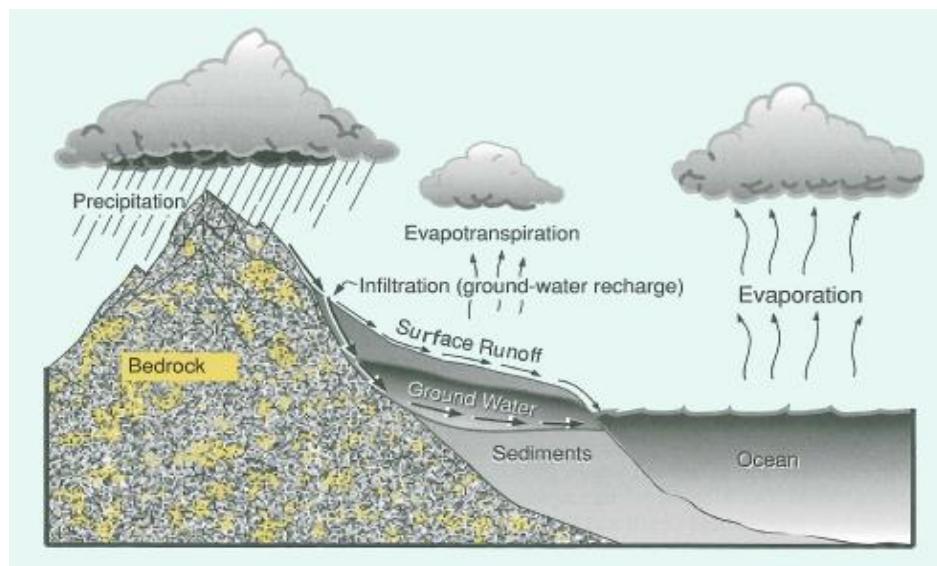
Tricijum postoji u globalnom okruženju prevashodno kao deo molekula vode. Stoga je potencijalno koristan *trejser* hidrološkog ciklusa i idealan trejser za praćenje strujanja vode unutar okeana.

Na primer, analiza koncentracije tricijuma za Severni Atlantski ocean, na primer, pokazuje da su promena vodene pare i direktne padavine bili dominantan doprinos tricijuma sredinom 1960-ih, kada se dogodio tritijumski 'pik'. Do 1970-ih, međutim, glavni doprinos postao je dotok vode sa Arktika sa slanom vodom. Značajan popis tricijuma od bombi dostavljen je i čuvan unutar arktičkog sistema slatke vode, da bi se postepeno puštao u subpolarne okeane, a potom i u severni Atlantik.[25]



Grafik 2. Prikaz najveće koncentracije tricijuma 1964 godine usled nuklearnih proba[25]

Nauka gde je tricijum pronašao jednu od najvećih upotreba je hidrogeologija, grana geologije koja se bavi kretanjem vode, daje principe za rešavanje problema kao što su podzemne vode. Ova nauka se bavi i istraživanjem ležišta mineralnih sirovina. Sama hidrogeologija i radioaktivnost vode su dva parametra koja su usko povezani u ovom radu. Iz hidrogeologije je nastala grana radiohidrogeologija koja se bavi ispitivanjem radionuklida u datoј vodi, kao i propisivanjem i definisanjem uslova koji su vezani za bezbednost radioaktivnih voda. Jedne od grana hidrogeologije su opšta hidrogeologija, regionalna hidrogeologija, dinamika podzemnih voda, kriohidrogeologija i druge.[14]



*Slika 4. Prikaz cirkulisanja vode u prirodi.*

## Režim cirkulisanja vode

Izmene nivoa vode kao i drugih elemenata tokom vremena mogu biti:

1. Dnevni:
  - promene slobodnog nivoa vode
  - relativno plitko
  - uticaj dnevnih izmena isparavanje i transpiracija
2. Sezonski:
  - sezonski ciklus meteoroloških faktora( temperatura vazduha,atmosferski pritisak i evapotranspiracije)
  - hidrogeološki(nivo vode i proticaj)
3. Godišnji:
  - ciklične promene u toku nekoliko godina
  - uticaj vlažnih i sušnih perioda u godini
4. Višegodišnji:

- ciklične izmene padavina, vodostaj i proticaj reka
- period duži od 10 godina

## 4. Zakonska regulativa

Ovim zakonom se uređuju mere radijacione i nuklearne sigurnosti i bezbednosti, uslovi za obavljanje delatnosti sa izvorima zračenja, postupanje u situaciji planiranog, postojećeg i vanrednog izlaganja jonizujućem zračenju u cilju obezbeđivanja zaštite pojedinaca, stanovništva i životne sredine od štetnog uticaja jonizujućeg zračenja, sada i ubuduće.[23]

### 4.1. Tricijum i zakonska regulative

Aktivnosti tricijuma u prirodnim vodama iznose:  $A(^3H)=0.6 \text{ Bql}^{-1}$ , vrednosti aktivnosti tricijuma danas :  $A(^3H)=1-2 \text{ Bql}^{-1}$ . Gornja dozovljena granica aktivnosti tricijuma u površinskoj vodi je  $A(^3H)=100 \text{ Bql}^{-1}$ .

Država	Maksimalne dozvoljene vrednosti[Bql <sup>-1</sup> ]
Australija	76103
Japan	60000
Finska	30000
Švajcarska	10000
Rusija	7700
Sjedinjene Američke države	790
Svetска здравствена организација	10000

Tabela 9. Maksimalne dozvoljene vrednosti aktivnosti tricijuma u pijaćoj vodi pojedinim državama[24]

Analizirajući prirodne površinske vode, prisutan je jedan atom tricijuma na  $10^{18}$  atoma vodonika. Parametar TU (Tritium Unit) odgovara aktivnosti od  $0.11911(21) \text{ Bql}^{-1}$ .

$$\underline{ITU=0.11911(21) \text{ Bql}^{-1}}$$

Treba uzeti u obzir vrednosti tricijuma pre nuklearnih testova koje su iznosile 5 TU, nakon stotine nuklearnih testova, najveća koncentracija tricijuma u Severnoj hemisferi je iznosila 5000 TU, 1963 godine u proleće. Nivoi tricijuma danas imaju vrednosti 5-10 TU i 10-15 TU za Severnu i Južnu hemisferu.

Tricijumska voda (super teška voda) je radioaktivni oblik vode u kojoj se uobičajeni atomi protiuma(uobičajeni, stabilni izotop vodonika, za razliku od deuterijuma i tricijuma) zamjenjuju tricijumom. U svom čistom obliku može se nazvati tricijum-oksidom ( $\text{T}_2\text{O}$  ili  $3\text{H}_2\text{O}$ ) ili super-teškom vodom. U razblaženom obliku se sastoji od vode  $\text{H}_2\text{O}$  sa dodacima HTO odnosno  $^3\text{HOH}$ .[22]

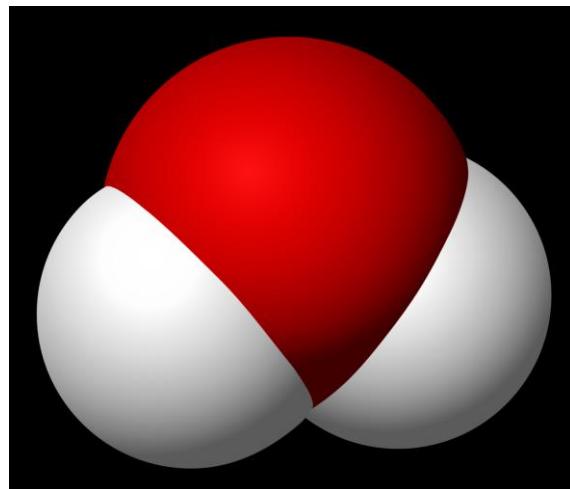
Procena usklađenosti rezultata merenja sa parametarskim vrednostima[23]

**1. Parametarske vrednosti za radon, tricijum i indikativnu dozu za vodu za piće.**

Tabela 10.

Parametar	Parametarska vrednost
Radon	$100 \text{ Bq l}^{-1}$
Tricijum	$100 \text{ Bq l}^{-1}$
Indikativna doza	$0.10 \text{ mSv}$

Povišeni nivoi tricijuma mogu ukazati na prisustvo drugih veštačkih radionuklida, ako koncentracija tricijuma prelazi parametarsku vrednost, treba izvršiti analizu prisustva drugih veštačkih radionuklida. Doprinos efektivnoj dozi koja potiče od unosa tricijuma, kalijuma, radona i torona, i radonovih potomaka vodom namenjenom za ljudsku potrošnju nije uračunat u graničnu vrednost efektivne doze od  $0.1 \text{ mSv god}^{-1}$ .

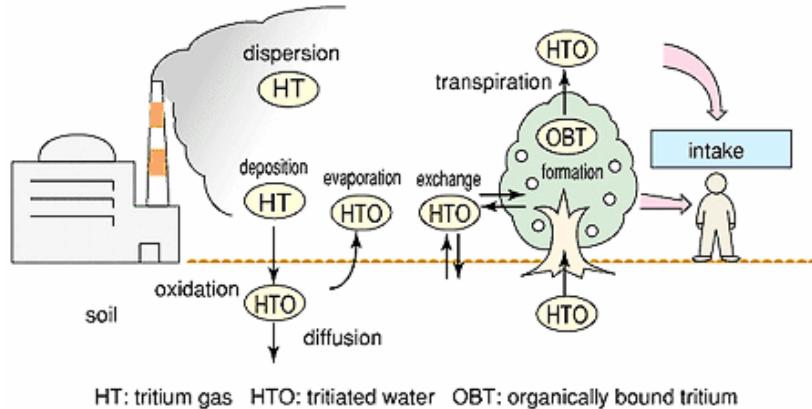


Slika 5. Molekul tricijum oksida (dva atoma tricijuma bela boja, jedan atom kiseonika crvena boja).

Tricijumska voda sadrži radioaktivni vodonik izotopski tricijum. Kao niskoenergetski beta emiter sa poluživotom od oko 12 godina, spolja nije opasan jer njegove beta čestice ne mogu da prodru u kožu. Međutim, opasnost od zračenja predstavlja ako se udiše, unese u hranu ili vodu ili apsorbuje kroz kožu. Disperziju i distribuciju tricijma u čovekovom okruženju prati kinetika voda u hidrosferi.

Inhalacija i ingestija HTO vode nosi rizik po zdravlje populacije, kao i difuzija HTO para, kroz kožu čoveka, biološki period je 9.4 dana. Koncentracija tricijuma je najveća u formi HTO:

1. Hidrosferi 90%
2. Stratosferi 9.7%
3. Troposferi 0.3%
4. Kao i drugi gasovi HT,  $\text{CH}_3\text{T}$  i vezani tricijum u organskim molekulima.



Slika 6. Proces kruženja tricijuma u prirodi.

## 5. Nuklearni objekti Srbije

Javno Preduzeće „Nuklearni objekti Srbije” osnovala je Vlada Republike Srbije, (Sl. Glasnik RS, br. 50/09), kao okosnicu i oslonac nuklearne radiacione bezbednosti i sigurnosti građana, objekata i čitave države Srbije.



Slika 7.[17]

Javno Preduzeće „Nuklearni objekti Srbije” je jedina institucija na teritoriji Republike Srbije koja je, u skladu sa odredbama Zakona o zaštiti od ionizujućih zračenja i o nuklearnoj sigurnosti , ovlašćena za obavljanje sledećih poslova u cilju održavanja neophodnog stepena nuklearne bezbednosti, zaštite ljudi i očuvanja životne sredine[17]:

1. Obavljanje radijacionih delatnosti koje se odnose na sigurno korišćenje izvora ionizujućih zračenja, kao i promet izvora ionizujućih zračenja, radioaktivnih i nuklearnih materijala
2. Preduzimanje mera radijacione i nuklearne sigurnosti na lokaciji nuklearnih objekata u skladu sa zakonom (operativna radijaciona dozimetrija, sistem kvaliteta, dekontaminacija ljudi, radne i životne sredine, sistematsko ispitivanje radioaktivnosti u životnoj sredini na lokaciji nuklearnih objekata, merenje interne radioaktivnosti, medicinski tretman profesionalno izloženih lica)
3. Obezbeđivanje propisanih uslova za lociranje, projektovanje, izgradnju, probni rad, puštanje u rad, korišćenje, trajan prestanak rada i dekomisiju nuklearnog objekta
4. Upravljanje radioaktivnim otpadom
5. Sprovođenje mera kojima se sprečava da radioaktivni otpad prouzrokuje kontaminaciju životne sredine
6. Obezbeđivanje fizičke zaštite, protivpožarne zaštite i drugih mera bezbednosti nuklearnog objekta, nuklearnog materijala i radioaktivnog otpada, uključujući i mere bezbednosti u toku transporta nuklearnog materijala
7. Dekontaminaciju radne i životne sredine
8. Sistematsko ispitivanje radioaktivnosti u životnoj sredini u okolini nuklearnog objekta.Vođenje evidencije o izvorima ionizujućih zračenja, o profesionalno izloženim licima i o radioaktivnom otpadu
9. Organizovanje studijsko-istraživačkih radova u oblasti razvoja nuklearnih tehnologija
10. Ostvarivanje saradnje sa Međunarodnom agencijom za atomsku energiju i drugim međunarodnim telima i nadležnim organima drugih država u saradnji sa nadležnim državnim organima, a u vezi sa delatnošću Javnog preduzeća
11. Poslove spoljnotrgovinskog prometa i usluge u spoljnotrgovinskom prometu iz okvira svoje delatnosti

Delatnosti od opštег interesa, u smislu ovog zakona, jesu delatnosti koje su kao takve određene zakonom u oblasti: rudarstva i energetike, saobraćaja, elektronskih komunikacija, izdavanja službenog glasila Republike Srbije i izdavanja udžbenika, nuklearnih objekata, naoružanja i vojne opreme, korišćenja, upravljanja, zaštite, uređivanja i unapređivanja dobara od opštег interesa i dobara u opštoj upotrebi (vode, putevi, šume, plovne reke, jezera, obale, banje, divljač, zaštićena područja i dr.), upravljanja otpadom i drugim oblastima.[17]

JK NOS nalazi se na 8 km od Begorada, i na toj lokaciji u blizini Dunava , nalazi se Istraživački reaktor RA koji je stavljen van pogona 1986 godine. Bez obzira na prestanak rada, i dalje se tretira kao potencijalni izvor tricijuma. Teška voda koja se koristila kao moderator, drenirana je i postavljena u rezervoare 1987 godine. Pošto se u hali nalazi sistem za ventilaciju moguće je ispuštanje tricijuma u obliku vodene pare. Iz samog ventilacionog dimnjaka RA, može doći do potencijalnog ispuštanja tricijuma u atmosferu što dovodi do povećanih atkvinosti tricijuma u padavinama u okolini JP NOS. U ovom radu je izvršen monitornig na tri lokacije u potoku Mlaka koji prolazi kroz objekat JP NOS.

## 5.1. Odlaganje nuklearnog i drugog radioaktivnog otpada

Sektor za upravljanje radioaktivnim otpadom poseduje neophodnu stručnost i opremu da obezbedi i sve aspekte i obavi sve delatnosti vezane za rukovanje radioaktivnim otpadom, što uključuje:

- sakupljanje radioaktivnog otpada
- čuvanje radioaktivnog otpada
- transport radioaktivnog otpada
- karakterizaciju i vođenje evidencije o radioaktivnom otpadu
- tretman i skladištenje radioaktivnog otpada
- demontažu izvora jonizujućih zračenja
- transport i kondicioniranje izvora jonizujućih zračenja
- bezbedno skladištenje izvora jonizujućih zračenja

Odgovorno upravljanje radioaktivnim otpadom zahteva vrhunsku stručnost i opremu, kao i doslednu primenu mera koje će obezbediti zaštitu zdravlja i životne sredine.[17]



*Slika 8. Prikaz hangara za odlaganje radioaktivnog materijala*



*Slika 9. Potok Mlaka sa povećanom koncentracijom aktivnosti tricijuma u JP Nuklearni objekti Srbije.*

## 6. Metode ispitivanja tricijuma

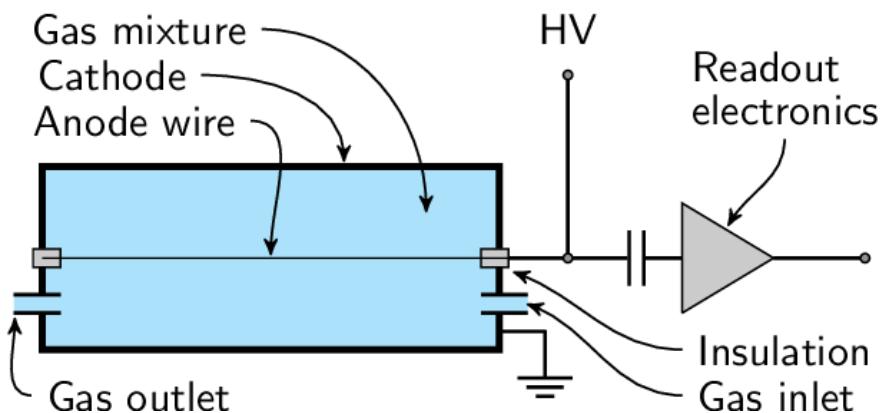
Pošto tricijum ima značajan uticaj na životnu okolinu, analiza i ispitivanje su pronašle značajnu ulogu u praćenju stanja nuklearnih objekata, javne zaštite, dozimetrije i hidrogeologije. Ispitivani tricijum koji se danas koristi za ispitivanje i analize nije u potpunosti kosmičkog porekla. Velika količina ovog izotopa nastala je kao posledica čoveka, nakon 40 tih godina, testovima nuklearnog oružja. Kao što smo naveli, tricijum je slab beta emiter sa energijom od  $E_{max}=18.6\text{keV}$ .

Postoji desetak metoda koje se koriste u merenju tricijumske vode iz uzoraka životne sredine. Većina ovih metoda se zasniva na tehnici destilacije. Jedna metoda koristi postupak alkalne destilacije, nakon čega sledi tečno scintilaciono brojanje destilata. Druge metode koriste tehnike sušenja zamrzavanjem, gde se tricijumska voda zadržava na niskoj temperaturi, a zatim destilovana u alkalnim uslovima.[18]

Pri detekciji tricijuma koriste se gasni proporcionalni i tečni scintilacioni detektori. U većini slučajeva koriste se tečni scintilacioni detektori zbog veće efikasnosti u odnosu na gasne, direktnih merenja i jednostavne pripreme uzorka.

## 6.1. GPC metoda

Gasni proporcionalni brojač-ova metoda koristi se za prebrojavanje tricijumskog gasa vodonika dobijenog hemijskim proizvodima iz smanjenog tricijumskog uzorka vode. Tricijumski uzorak vode je u potpunosti redukovani na gas vodonika pre njegovog postavljanja na proporcionalni brojač gasa. Ove metode redukcije obično koriste zagrejani magnezijum. Zbog visoke temperature redukciona reakcija ne stvara izotopičnost kod frakcionisanja. Novoformirani gas vodonika se postavlja u zamrznutom bočicu od nerđajućeg čelika koji sadrži ugljenik. Bočica u kojoj se nalazi vodonik je od nerđajućeg čelika. Temperatura vodonika koji se nalazi u bočici treba da se izjednači sa sobnom temperaturom, zatim *quenching* gas se postavlja zajedno sa izolovanim tricijumskim vodonikom na proporcionalni brojač.[20]



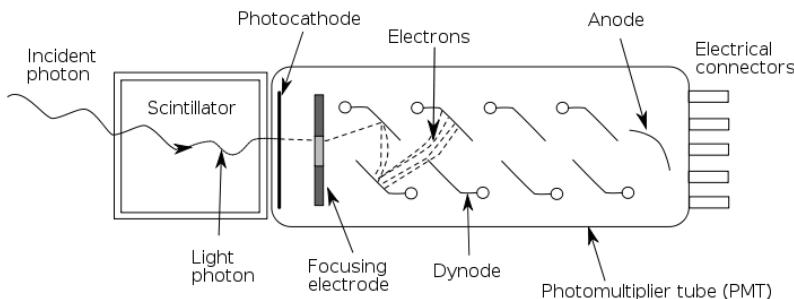
Slika 10. Princip rada proporcionalnog brojača.

## 6.2. Tečni scintilacioni detektori

### 6.2.1. Podela

Gajger i Marsden su prvi koristili ovaj tip scintilacionog detektora u eksperimentu gde su rasejane alfa čestice uočavane preko scintilacionog svetla koje su proizvodile na  $ZnS$  ekrานу. Različiti materijali su različito delovali na ionizujuće zračenje, kada su otkrili materijale koji su prozirni za sopstvenu svetlost, dobijena je mogućost da se naprave scintilacioni detektori kod kojih bi cela zapremina bila obuhvaćena ionizujućem zračenjem, a ne samo njihova površina. Ova vrsta detektora je bila neophodna za registrovanje beta i gama zračenja zbog velike prodrone moći (gama) jer je njima potrebna veća zapremina da bi doživeli interakcije.

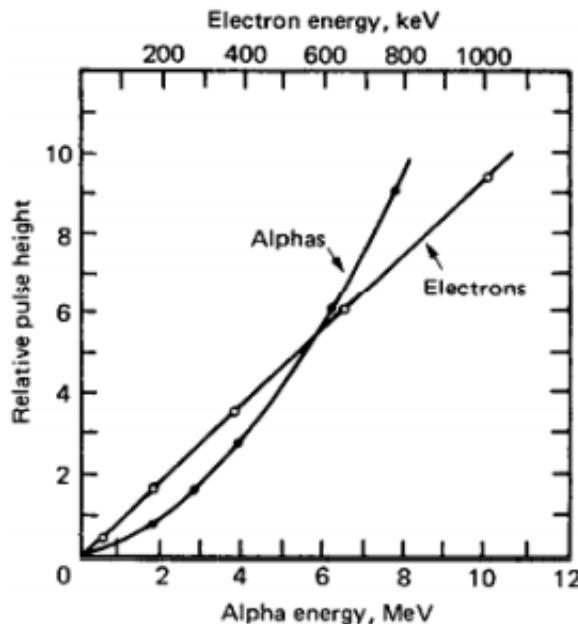
Princip rada ovih detektora bazira se na luminescenciji tečnih, čvrstih i gasovitih materijala pod dejstvom ionizujućeg zračenja. Luminescencija koja je izazvana dejstvom ionizujućeg zračenja, pretvara se pomoću fotomultiplikatora u odgovarajući električni impuls (slika 11), koji se dalje pomoću elektronskih uredjaja pojačava.



Slika 11. Fotomultiplikatorska cev.

Scintilacionibrojač se sastojiodsamogscintilatorakojimožebiti u oblikumonokristala, fotomultiplikatora I elekronskoguređaja za pojačavanje I obradusignalna. Deo ispitivanogzračenja se u scintilatorupretvara u kvantesvetlosti, čijibrojzavisiodtipazračenja I materijalascintilatora. Velika zastupljenost ovih uredjaja je posledica njihovih sledećih osobina:

1. Velikabrzina I kratkovremerazlaganja
2. Velikaefikasnost u odnosunagasnebrojače
3. Dva režima rada- spektrometri čestica i spektrometri odredjivanja energija zračenja



Grafik 3. Prikaz signala kod plastičnih scintilatora.

Scintilatori se dele na:

- Organske** - u oblikukristala, rastvaraju se u čvrstoj prozirnoj plastici(plastični scintilatori) kao i u organskim tečnostima (tečni scintilatori)

*Čvrsti organski* - monokristali organskih jedinjenja, gde se najčešće koriste antracen i stiben. Pristustvo aktivatora nije potrebno, pogodni za detekciju nanelektrisanih čestica i brzih neutrona preko uzmagnutog protona. Osetljivi na gama zrake, loša energetska rezolucija.

*Plastični organski* - sastoje se iz čvrstih rastvora i za detekciju gama, beta, alfa čestica i brzih neutrona. Slična svojstva kao tečni organski, ali je prednost u tome jer se ne stavljuju u merne viale, moguće ih je praviti u raznim oblicima i geometrijama (folije i vlakna) pokazuju intertност prema vodi, vazduhu, mnogim hemikalijama, pa mogu direktno da reaguju sa radioaktivnim uzorkom. Visina signala u zavisnosti od energije alfa i beta čestica kod ovih scintilatora prikazana je na slici 15.

- Neorganske** - monokristali alakalnih metala sa malom koncentracijom nečistoća

Transformacija izgubljene energije u svetlost se naziva konverzija, a definiše se kao odnos izgubljene energije čestice po jediničnom putu na izračenu svetlost I odgovarajuće izgubljene energije enajonizaciju, data je izrazom:

$$C = \frac{(\frac{dE}{dx})_{sv}}{(\frac{dE}{dx})_{jon}} \quad (1.6)$$

gde oznake *sv* i *jon* određuju tip transformacione energije.

Kvalitet samog scintilatora izražava se svetlosnim prinosom, što je svetlosni prinos veći, lakša je detekcija čestice. Sam prinos zavisi od vrste energije čestice. Kod većine scintilatora sam svetlosni prinos je u slučaju elektrona ili gama zraka proporcionalan energiji, dok se ova proporcionalost gubi kod teških čestica.

Vreme goreњa *t* – od trenutka kada nanelektrisana čestica zapali kristal-scintilator, posle  $10^{-12}$  s, emitovana svetlost dostiže maksimalnu vrednost. Posle vremena *t* koje je duže od  $t_0$  ( $10^{-12}$  s), emisija svetlosti opada po eksponencijalnom zakonu:

$$K = K_0 e^{-(\frac{t}{\tau})} \quad (1.7)$$

Talasna dužina emitovane čestice mora odgovarati maksimumu spektralne osetljivosti fotokatode fotomultiplikatora, zbog kvaliteta transformacije u struju.

*Tabela 11. Prikaz izgubljene energije(C) u procentima u zavisnosti od gustine materijala scintilatora (ρ) I talasne dužine zračenja(λ) za vreme goreњa (t)*

Scintilator	ρ [ $\frac{g}{cm^3}$ ]	λ[nm]	t[s]	C [%]
Antracen	1.25	440	$2.7 \times 10^{-8}$	4.2
Stilben	1.15	410	$(2-3) \times 10^{-8}$	2.8
NaI(Tl)	3.67	410	$2.5 \times 10^{-7}$	8
ZnS(Tl)	4.1	450	$1 \times 10^{-5}$	28

### 6.2.2. Tečni organski scintilatori

Rastvaranjem primarnih organskih scintilatora u odgovarajućim rastvaračima dobijaju se tečni organski scintilatori. Efikasan energetski transfer od molekula rastvarača (kao aktivatori u neorganskim scintilatorima) je ključan. Potrebno je držati ih u zatvorenim bocama, jer I malo pristustvo rastvorenog kiseonika, kod ovih tipova scintilatora deluje kao prigušivač, pri čemu znatno može smanjiti efikasnost detekcije. Otporniji su na intezivniju radijaciju od čvrstih I plastičnih scintilatora jer nemaju čvrstu rešetku (čak do 105 Gy). Primena im je u eksperimentima gde je potrebno koristiti detektore velike zapremine.

Sam proces rastvaranja radioizotopa u ovim scintilatorima, same emitovane čestice koje prolaze kroz ovaj scintillator mogu se detektovati sa efikasnošću do 99%, jer je obezbedjena  $4\pi$  geometrija. Imaju primenu kod merenja niskoenergetskih beta emitera, detekcije kosmičkih zraka i snimanja neutronskog energetskog spektra u opsegu do nekoliko MeV-a.

Idealan scintilacioni materijal trebalo bi da poseduje sledeća svojstva:

1. Pogodnost za interakciju sa nuklearnim zračenjem
2. Što bolju konverziju kinetičke energije u detektibilnu svetlost
3. Konverzija treba da bude linearna
4. Medijum trasnparentan
5. Vreme raspada što kraće
6. Dobre optičke karakteristike
7. Indeks refrakcije kao kod stakla
8. Scintilator da ima što bolju rastvorljivost i što manje osetljiv na supstance prigušivača

### 6.2.3. Quantulus 1220

Quantulus 1220 je tečni scintilacioni dektektor proizvođača Perkin Elmer, napravljen sa mogućnošću merenja izrazito niske energije veštačkih, kosmičkih i drugih prirodnih radionuklida. Upotrebljava se u svrhu detekcije  $\alpha$ -,  $\beta$ - i  $\gamma$ -zračenja, X-zraka, Čerenkovljevog zračenja, Auger-ovih elektrona i luminiscencije.

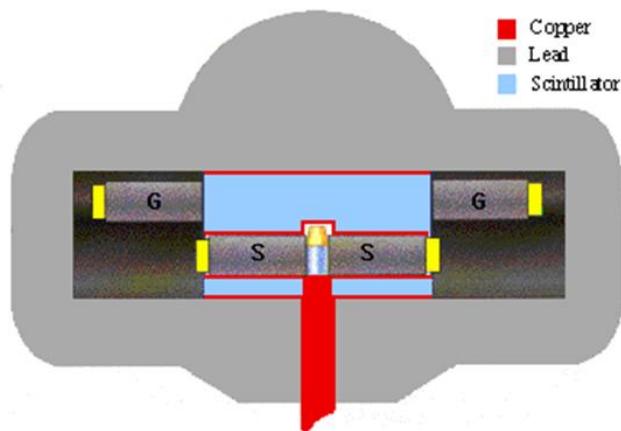
Uredaj je visine 156 cm, dužine 101 cm, dužine 92 cm, a težak je 1000 kg (slika 18). Frekvencije na kojima uređaj može da radi se kreću od 50-60 Hz, pod naponom od 100, 115, 120, 220, 240 V. Da bi Quantulus 1220 radio, potrebno je da budu ispunjeni optimalni spoljašnji uslovi, kao što je vlažnost vazduha od 75 % I temperatura od oko 30°C.



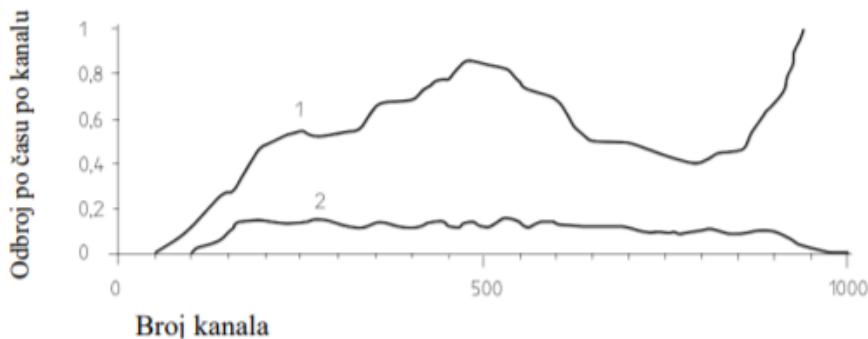
Slika 12. Izgled quantulusa 1220.

Uredaj poseduje zaštitu koja je podeljena na aktivnu i pasivnu , što je osnova izuzetno niskog fona prilikom merenja. Sloj olova niske radioaktivnosti i sloj bakra čine pasivnu zaštitu. Uloga olova jeste da atenuira veliku količinu  $\gamma$ -zračenja iz okoline, kao i kosmičko zračenje. Težina ovog sloja je 600 kg, a dimenzije su: širina 20 cm iznad komore za merenje, sa donje strane komore debljina je 15 cm, i sa bočnih strana 7-11 cm (olovna zaštita prikazana je i na slici 20). Sloj bakra atenuira termalne neutrone i X-zračenje stvoreno u olovnoj zaštiti i ne dozvoljava prolazak X-zraka do scintilacione tečnosti.

Quantulus poseduje dva fotomultiplikatora za koincidentno snimanje signala, kao i dva koja se koriste za detekciju pozadinskih efekata i rade u antikoincidenciji sa prvim parom PMT-a. Aktivna zaštita se sastoji od tečnog scintilatora na bazi mineralnih ulja, ona se nalazi oko merne komore sa uzorkom za analizu i čini je asimetrični štit koji funkcioniše kao beta detektor pozadinskog zračenja. Aktivna zaštita funkcioniše na sledeći način: ukoliko oba para fotomultiplikatora detektuju scintilacionu svetlost, ta svetlost se morala emitovati pri prolasku čestica background-a i kroz scintillator na bazi mineralnih ulja i kroz scintillator u mernom vialu; dakle, nakon prikupljanja i obrade signala, oduzimaju su svi signali koji su detektovani od strane oba para PMT-a kao fon pri merenju. To znači da dva para PMT-a rade u antikoincidentnom režimu. Aktivna zaštita, redukujući pozadinske efekte, daje informacije o gama i kosmičkom zračenju. To sve postiže bez gubitaka u efikasnosti detekcije.



*Slika 13. Princip pasivne i aktivne zaštite detektora: S-par fotomultiplikatora koji rade u koincidenciji i snimaju događaje iz uzorka, G-par fotomultiplikatora iz aktivne zaštite koji rade u antikoincidenciji sa S-parom fotomultiplikatora.*

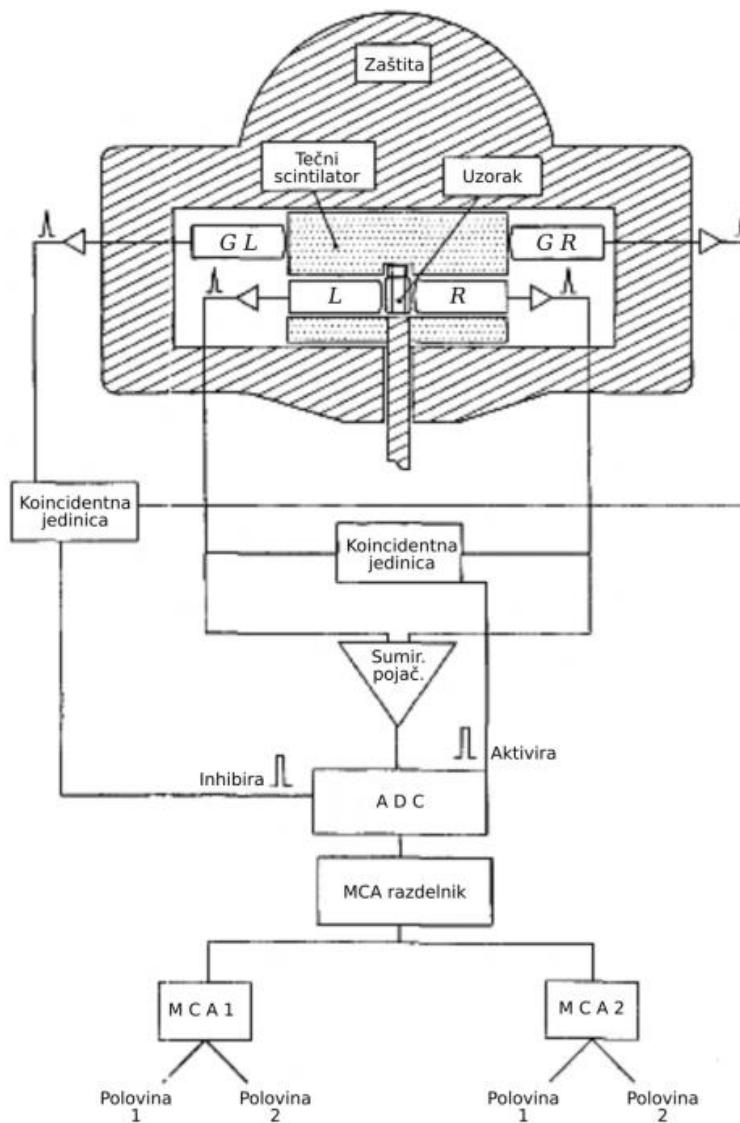


*Grafik 4. Prikaz razlika u signalu koji potiče od uzorka (kriva broj 1) i signala koji je dobijen snimanjem aktivne zaštite (kriva broj 2). Signal koji potiče od fona je konstantanduz merenja, ali nije beznačajan tako da se radi povećanja tačnosti merenja mora uzeti u obzir.*

### Princip rada

Kako bi se prikupili i obradili podaci na Quantulus-u, potrebno je podešiti nekoliko parametara i obezbediti adekvatne uslove merenja. Na pouzdanost dobijenih rezultata utiču statistika brojanja, stabilnost uzorka, promena efikasnosti detektora usled mogućeg prigušenja u uzorku (quench efekata), kao i podešavanje određenih optimalnih parametara koji su karakteristični za datu metodu merenja. Princip merenja (slika 12) se zasniva na korišćenju više MCA (MultiChannel Analyzer), kako bi se podaci što preciznije prikupili. Quantulus 1220 se sastoji od dva MCA, oba su podeljena na dve polovine, stoga se nakon merenja dobijaju četiri spektra od po 1024 kanala rezolucije. Prvi MCA sadrži spektar iz aktivne zaštite, a drugi beleži spekture dobijene iz uzorka. Analiza dva višekanalna analizatora pruža informaciju o broju događaja, kao i o energetskoj distribuciji merenog izotopa. Svaki kanal sadrži energetsку distribuciju, a broj događaja je ukupan broj odbroja po kanalima.

Time zaključujemo da višekanalni sistem podrazumeva sadržaj što većeg broja kanala i memorije koja može da skladišti što veću količinu podataka.



Slika 14. Princip merenja na Quantulus-u.

Za funkcionalnost ovog sistema potrebni su sledeći elementi: A/D konvertor, komparator amplitude impulsa PAC (Pulse Amplitude Comparator), analizator oblika impulsa PSA (Pulse Shape Analysis), kolo za korekciju na hemiluminiscenciju DCOS (Delayed Coincidence Circuit) kao i mnogi drugi.

Funkcija A/D konvertora jeste da odredi visinu pulsa, pozicionira I memorije, pri tome se podaci selektuju po odgovarajućim skalama. Pri ovako preciznom memorisanju, omogućena je analiza tačno određenih delova spektra, a s obzirom da prethodna merenja ostaju sačuvana, moguć je i prekid merenja u bilo kom trenutku. PSA, uz separaciju alfa i beta spektra, dodatno umanjuje pozadinske efekte.

On identificuje čestice ionizujućeg zračenja i smanjuje background. PAC funkcioniše kao discriminator, koji smanjuje pozadinsko zračenje, nastalo mešanjem elektromagnetskih signala u toku LSC merenja.

DCOS koriguje zakasne koïncidencije, a zatim ih šalje na višekanalni analizator, koji ga tretira kao hemiluminescentni spektar. Nakon toga se na preostale višekanalne analizatore šalje preostali signal i snima kao spektar uzorka.

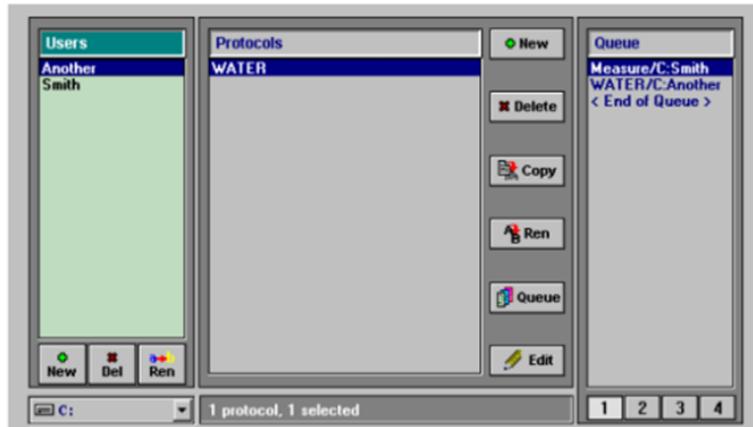
Uređaj sadrži tri tacne sa prostorom za bočice (slika 14), koje postavlja laborant. Materijal za izradu bočica, oblik i dimenzije su propisane i u skladu sa standardom predviđenim za rad Quantulus-a 1220. Zapremina svake bočice je 20 ml, a one mogu biti napravljene od stakla ili plastike.



*Slika 15. Tok premeštanja tacni sa bočicama i prostor za merenje*

Preko računara i programa WinQ se saopštava naredba koja tacna će biti povučena na analizu. Ovaj program daje i informacije o dužini merenja i broju tacne i bočice za analizu, koje Quantulus 1220 razlikuje po mestu postavljanja na tacni. Kada je tacna u centralnom delu uređaja, ona se namešta u položaj zadat programom i bočica sa uzorkom ulazi u centralni deo. Bočica se nakon isteka zadatog vremenskog trenutka vraća u prvobitni položaj, da bi sledeća istim postupkom došla na analizu.

Kada se pokrene program WinQ, otvara se prozor u koji se unose komande u vidu davanja naziva i definisanja protokola, (slika 15) U programu postoji opcija Queue, ona protokol uvrštava u posebnu kolonu (treću), to znači da je taj protokol zadat za analizu i prema definisanom nalogu u protokolu, uređaj pomera tacne i analizira bočice.



Slika 16. Izgled prozora u koji se unose komande za protokol.

Definisanje protokola: pokretanjem opcije New, otvara se prozor sa zaglavljem General Parameters, dobija se informacija o nazivu protokola, mesta gde će biti sačuvani merenjem dobijeni podaci i broj ponavljanja merenja za jedan uzorak (bočicu).

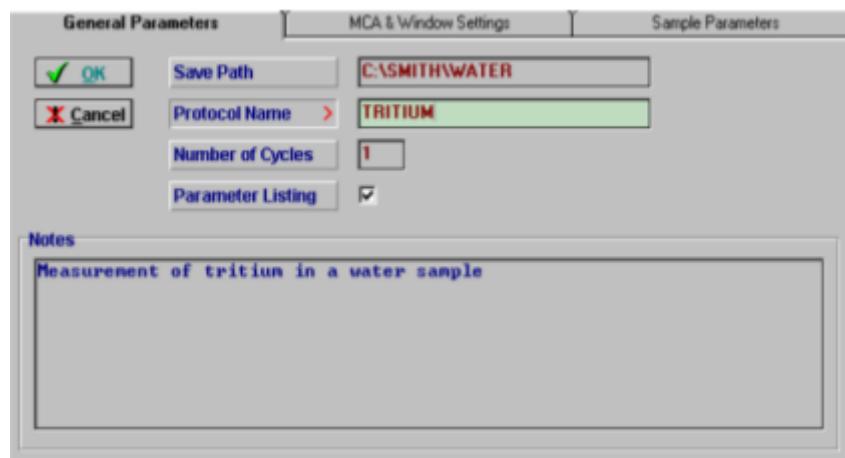
Nakon toga se potvrdi naredbom OK, a zatim se podešavaju parametri u drugom zaglavlu MCA & Window Settings. Signali se dodaju iz oba fotomultiplikatora oko uzorka (signal trigger L\*R), tada se istovremeno detektuje svetlost. Merenje se blokira kada se istovremeno detektuju i čuvaju (signal blokira G). Mesto gde se fotomultiplikatorima signali pojačavaju i registruju jeste višekanalni spektar (MCA).

Opcijom Send spectar vrši se selekcija spektra koji će biti sačuvan na disku. Zaglavje MCA se sastoji iz dve verzije – MCA1 i MCA2, obe verzije se dele na dva dela koja sadrže spektar, spektar je kodiran brojevima 11, 12, 21, 22.

Coincidence Bias se koristi za biranje pragova pri merenju. High Coincidence Bias – ima funkciju merenja beta čestica visoke energije, Low Coincidence Bias – generiše spektar i beta čestica niskih energija.

Na dodatnu analizu pulsa mogu da utiču i elektronski dodaci, kao što su: PAC (Pulse Amplitude Comparison), komparacija amplitude signala, analiza oblika signala i PSA(Pulse Shape Analyzer). Treće zaglavje, Sample Parameters, služi za unos podataka vezanih za poziciju, redosled i dužinu merenja bočica na tacnama.

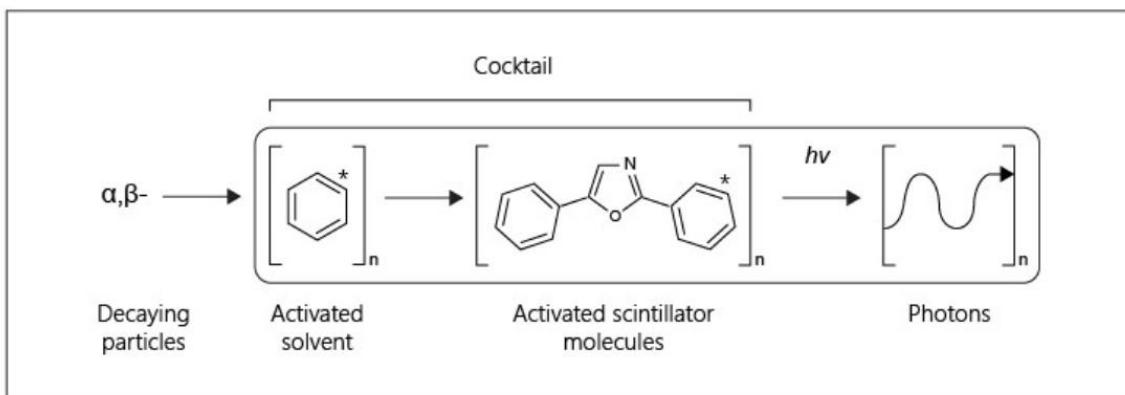
Definisanje protokola: opcijom New, otvara se prozor koji je prikazan na slici . U prvom zaglavlu General Parameters daju se informacije za naziv protokola, mesta gde će sesačuvati merenjem dobijeni podaci i o broju ponavljanja merenja za jedan uzorak (bočicu)



Slika 17. Podešavanje protokola za tricijum.

#### 6.2.4. LSC metoda

Prvo i najvažnije kod LSC metode, radioaktivni uzorak (na primer tricijumske voda posle sagorevanja) treba kombinovati sa scintilacijskim koktelom, tako da u direktnom je kontaktu sa supstancom koja poseduje sklonost ka fluorescenciji kada su atomi pobuđeni, stvarajući tako scintilacije, tj. fotone. Supstanca koja se obično označeno kao "fluor" pokazalo se prikladnim. Fluor je prikladan naziv zbog osobine supstance da vrši scintilacije odnosno svetli kada se pobude atomi, dakle ne misli se direktno na element fluor.[18]



*Slika 18.* Glavni princip na kojem se zasniva metoda LSC. Radioaktivni izotop koji se podvrgava ispitivanju pobudi molekule rastvarača koji se zatim de-ekscitiraju u prizemna stanja putem emisije svetlosti, tj. fotona. Ovi fotoni se registruju u PMT-u preko foto-elektrona koji daju električni izlazni signal koji je direktno proporcionalan oslobođenoj energiji početnog raspada

Tačno merenje prirodnih nivoa tricijuma nije jednostavan zadatak. Glavni problem je to da je tricijum je izuzetno slab beta-emiter, i dobro je poznato da je efikasnost detekcije najniža u regionu niske energije.

Drugi problem, ova merenja su za prilično niske aktivnosti tritijuma u uzorcima koji se analiziraju zbog brzog mešanja prirodno generisanog tricijuma sa velikim količinama vode i vodonika u atmosferi što zahteva dalje složenije metode pripreme uzorka. Napredovanje LSC tehnike kao i poboljšanje postojećih metoda pripreme uzorka, ova tehnika se pokazala dobrom u nadgledanju prirodnih koncentracije aktivnosti tricijuma u vodama.

Postoji nekoliko metoda ispitivanja tricijuma putem tečnih scintilacionih detektora, a one su:

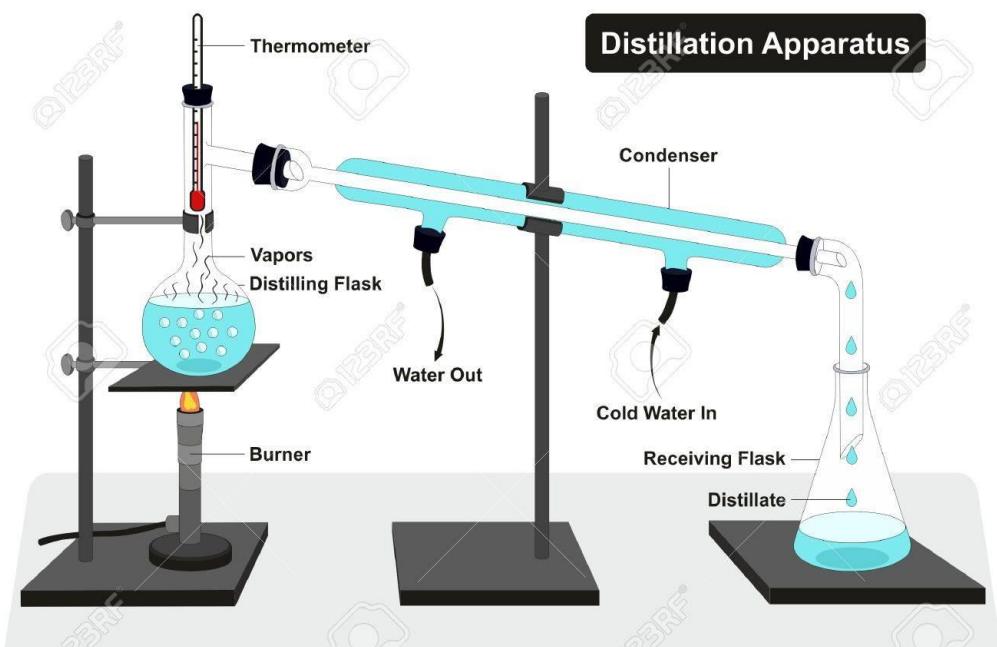
1. *ASTM- standardna metoda za ispitivanje tricijuma*
2. *Elektrolitičko obogaćenje*
3. *Direktna metoda*

## 1. ASTM-standardna metoda za ispitivanje tricijuma

Primenjuje se za određivanje koncentracije aktivnosti  $\alpha$ -emitera iznad  $0,037 \text{ Bql}^{-1}$  i  $\beta$ -emitera sa koncentracijom aktivnosti iznad  $0,150 \text{ Bql}^{-1}$ . Ovom metodom nije moguće utvrditi koji su alfa, odnosno, beta radionuklidi prisutni i u kojoj meri u analiziranom uzorku.

Odmah po uzorkovanju, najduže 5 dana nakon sakupljanja, uzorak vode se konzervira 2 M azotnom kiselinom (5-10 ml 2 M azotne kiseline po litru uzorka) da bi se pH vrednost dovela do , i da bi se eliminisao uticaj polimerizacije, stvaranja koloidnih formacija i prekoncentrovanja sporim uparavanjem. Uzorak vode se zatim filtrira kroz  $0,45 \mu\text{m}$  filter-papir. Zakišeljeni uzorak čuva se najmanje 16 h pre početka analiziranja (a najduže 4 dana nakon kojih je potrebno ponovo proveriti pH i eventualno ponoviti dodavanje 2 M azotne kiseline) i zatim polako uparava do zapremine 4-5 ml, nakon čega se prebací u scintilacionu bočicu i dopuni sa 0,1 M HNO<sub>3</sub> a zatim se uparava do suvog ostatka. Zapremina vode koja se uparava određuje se tako da masa suvog ostatka ne bude veća od najveće mase suvog ostatka kalibracionog standarda. Suvi ostatak uzorka koristi se kao parameter prigušenja, QIP, i rastvara sa 5 ml 0,1 M HNO<sub>3</sub> nakon čega mu se dodaje 15 ml scintilacionog koktela. Uzorak treba da bude bistar, homogeni rastvor, bez vidljive fazne separacije. Ukoliko se pojavi fazna separacija ili u mernoj posudi ostane suvi ostatak, uzima se manja zapremina uzorka za analizu i ponavlja se postupak pripreme uzorka. Ovako pripremljeni uzorci mere se u prethodno kalibrisanom tečnom scintilacionom brojaču. Merenja standarda i uzorka treba da se vrše na osnovu istih operativnih parametara instrumenta i na istoj temperaturi (pri hlađenju uzorka moguće je da se pojavi fazna separacija). Rezultat merenja zavisi od toga da li je uzorak meren odmah po pripremi, pri čemu se identificuju i kratkoživeći radionuklidi (npr.  $^{224}\text{Ra}$ ), ili se meri kasnije da bi se merili radionuklidi koji su u ravnoteži. Radionuklidi prisutni u uzorku mogu biti van ravnoteže sa svojim precima. Mnogi faktori, uključujući rastvaranje iz originalne matrice u kojoj se nalaze radionuklidi preci, mogu narušiti radioaktivnu ravnotežu. Ukoliko ti radionuklidi imaju period poluraspada reda veličine nekoliko dana ili kraće, potrebno je prema interesima I kvalitetu merenja definisati maksimalno vreme koje može da protekne od uzorkovanja do početka merenja

Prednost ASTM metode je u nižoj granici detekcije zbog procedure uparavanja uzorka koja za set uzoraka traje 10-14 dana, pa je ASTM metoda prihvaćena kao adekvatna u okviru kontinuiranog monitoringa uzorka u životnoj sredini.[22]



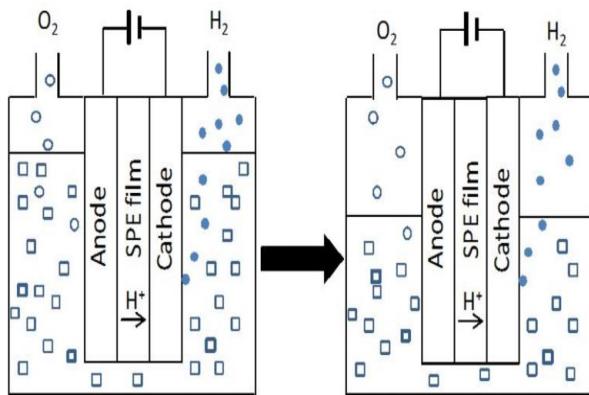
Slika 19. Aparatura za destilaciju.

## 2. Elektrolitičko obogaćenje

Jednačine na koje predstavljaju osnovni princip kod elektrolitičkog obogaćivanja tricijuma su:



Ove jednačine predstavljaju reakciju na anodi i katodi, odnosno celu reakciju elektrolize, respektivno. U vodi, deuterijum, tricijum I lak vodonik postoje u obliku THO, DHO i H<sub>2</sub>O, respektivno. To je eksperimentalno potvrđeno da se H<sub>2</sub>O elektrolizuje lakše nego DHO ili THO. Tako se tricijum i deuterijum obogaćuju u vodi nakon kontinuirane elektrolize.[21]



*Slika 20. Elektrolitičko obogaćivanje tricijuma u vodi. Plavi kvadratići predstavljaju  $H_2O$  molekule, a oni sa relativno debljom ivicom pokazuju THO i DHO. Otvoreni i napunjeni krugovi predstavljaju gas kiseonik, odnosno vodonik. Elektroliza potiče od leve strane do desne strane, odnosno broja THO or DHO molekula nisu tako smanjene iako se oni  $H_2O$  postepeno smanjuju u procesu elektrolize.[21]*



*Slika 21. Oprema za elektrolitičko obogaćenje vode tricijumom na Institutu Ruđer Bošković u Zagrebu, Hrvatska [22]*

### 3. Direktna metoda za ispitivanje tricijuma

Ova metoda se naziva direktna jer ne zahteva elektrolitičko obogaćenje, direktno se određuju vrednosti tricijuma. Metoda spada u brze testove, koristi se kao I metoda za ispitivanje graničnih vrednosti radionuklida u vodi za piće. Primjenjuje se I kod provere radijacije vode kod nuklearnih reaktora koja služi za moderaciju odnosno hlađenje.[22]

Metoda koristi scintilacioni detektor koji ima mogućnost detekcije malih vrednosti energija u čijem opsegu spada I emisija beta čestica koja prati raspad tricijuma.

Od aparature se koristi:

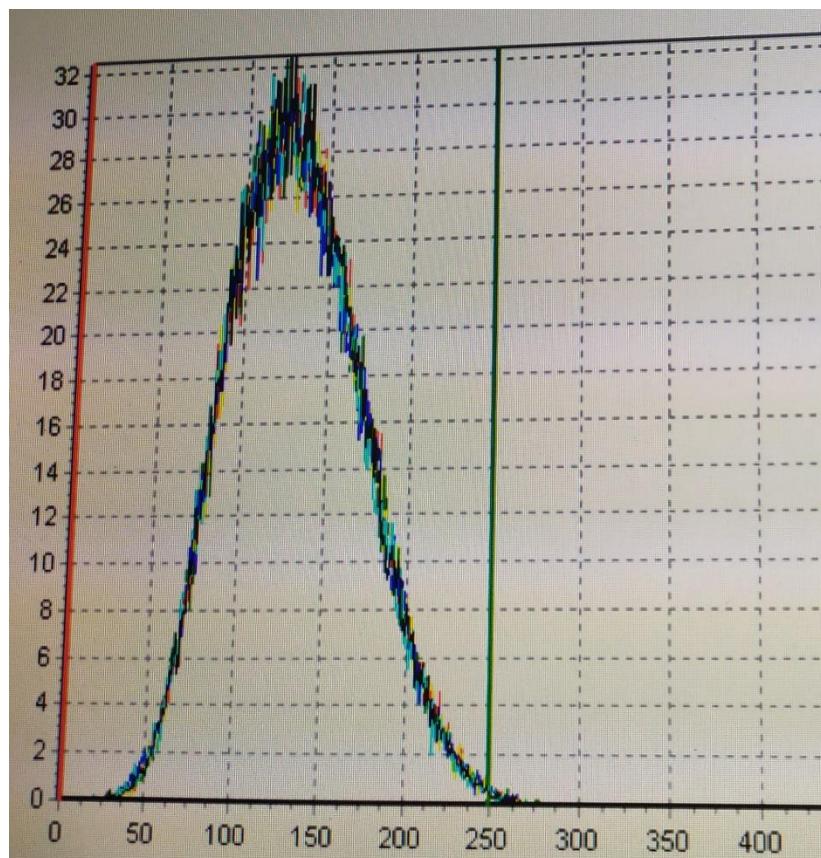
1. Tečni scintilacioni detektor
2. Bočice od 20ml (plastične)

3. Aparatura za filtraciju
4. Aparatura za destilaciju

## 7. Rezultati merenja

### Priprema uzorka

Merenje aktivnosti tricijuma je rađeno preko direktnе metode, tečnim scintilacionim detektorom Quantulus 1220. Uzorci iz padavina sa Zelenog brda kao referentne vrednosti i potoka Mlaka uzete sa tri lokacije u odnosu na recipient, zapremine 8 ml su pomešani sa 12 ml scintilacionog koktela i smešteni u plastične viale od 20 ml, nakon čega su ostavljeni da stoje 1 dan pre merenja radi eliminacije hemiluminescencije i fotoluminescencije. Specifično tricijumov spektar se čita na kanalu 1-250. U tom opsegu takođe možemo da vidimo odbroje uzokka  $r$ , backgrounda  $b$ , i standarda  $s$ . Dodatno za hemiluminescentni spektar  $rq$ , koji se nalazi na kanalu 1-250, te podatke je moguće očitati ako se merenja na Quantulusu pre toga definišu u posebnom setup-u.



Slika 22. Spektar tricijuma u opsegu 1-250

## Optimizacija

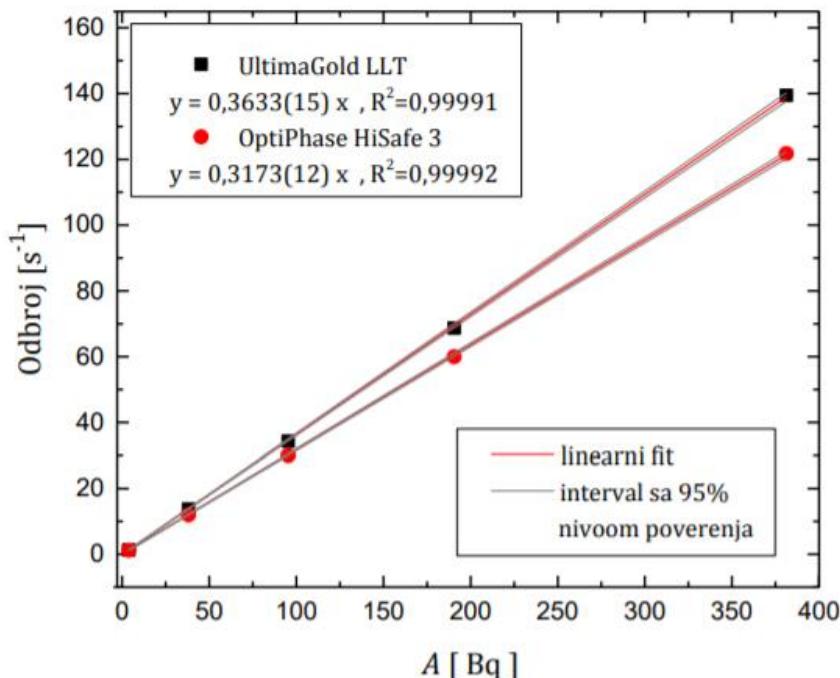
Efikasnost detekcije se određuje preko formule:

$$\varepsilon_t = \frac{s}{8A_r} \quad (2.1)$$

gde su:

- $A_r$ [Bq/l]-koncentracija aktivnosti  ${}^3\text{H}$  rastvora

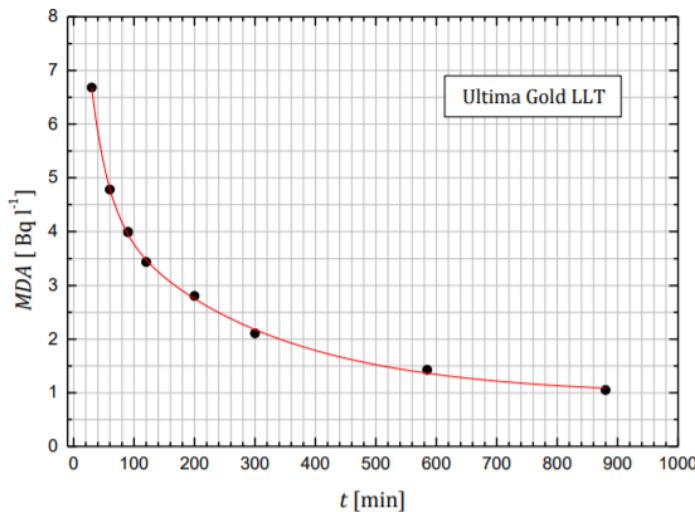
$$A = \frac{r - (b + r_q)}{60\varepsilon_t V} \quad (2.2)$$



Grafik 6. Efikasnost detekcije za Ultima Gold LLT i Optiphase, treba napomenuti da se u radu koristio Ultima Gold LLT.[27]

Minimalna detektibilna aktivnost tricijuma MDA koja je postignuta za vreme merenja od 300min računa se preko formule:

$$MDA = \frac{2.71 + 4.65 \sqrt{(b + r_q)T}}{60\varepsilon_t V} \quad (2.3)$$



Grafik 7. Prikaz minimalne detektibilne aktivnosti u zavisnosti od vremena merenja za Ultima Gold LLT.[27]

Parametizacija krive je data relacijom 3.2:

$$y = 0,95(11) + 6,8(8) \exp\left[-\frac{x}{28(5)}\right] + 3,8(3) \exp\left[-\frac{x}{262(43)}\right]; R^2 = 0,9984 \quad (2.4)$$

Pre merenja definišemo lokacije i referetne vrednosti.

Lokacije:

- *Mlaka 1*- Mesto bez ikakvih uticaja nuklearnih objekata na okolinu.
- *Mlaka 2*- Mesto uzorkovanja kod recipijenta.
- *Mlaka 3*-Mesto uzorkovanja nizvodno od recipijenta.



Slika 23. Lokacije uzorkovanja.

Za detekciju tricijuma u padavinama kao referentna vrednost je uzeto uzorkovanje sa lokacije Zeleno brdo koje se nalazi na 7km od JP NOS, dok je za detekciju tricijuma u površinskoj vodi uzeta Mlaka 1.

## Obrada rezultata

Na osnovu dobijenih rezultata koji su postignuti direktnom metodom u Ultima Gold LLT koktelu, za vreme merenja od 300min, u Quantulusu1220 preko programa WinQ dobijeni su sledeći rezultati:

WnD	Sp	C rate
1	s1 NOS_57-3	0.010
2	s2 NOS_52-1	0.039
3	s3 NOS_52-2	0.036
4	s4 NOS_52-3	0.039
5	s5 NOS_53-1	0.046
6	s6 NOS_53-2	0.043
7	s7 NOS_53-3	0.047
8	s8 NOS_54-1	0.026
9	s9 NOS_54-2	0.026
10	s10 NOS_54-3	0.025
11	s11 NOS_55-1	0.021
12	s12 NOS_55-2	0.020
13	s13 NOS_55-3	0.022
14	s14 NOS_56-1	0.019
15	s15 NOS_56-2	0.020
16	s16 NOS_56-3	0.018
17	s17 NOS_57-1	0.020
18	s18 NOS_57-2	0.021
19	s19 VINCA_I	0.019
20		

Slika 24. Tabela rezultata za mesec April 2018. Ubacivanjem vrednosti iz kolone C rate u program Microsoft Excel, gde je definisana formula za aktivnost.

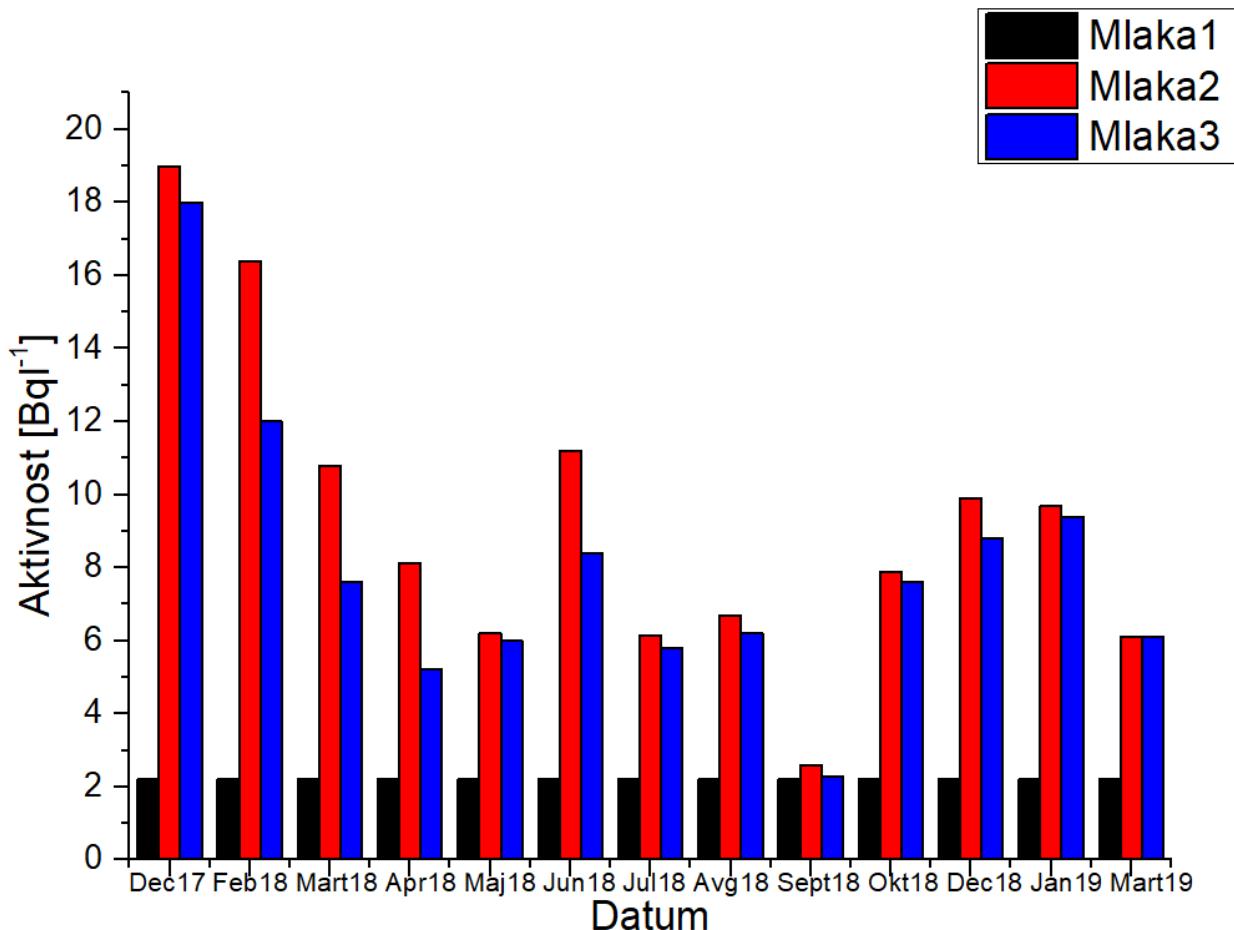
- NOS\_53-1 Lokacija Mlaka 2
- NOS\_52-1 Lokacija Mlaka 3
- NOS\_54-1 Lokacija Mlaka 1

Na osnovu prikupljenih i obrađenih podataka u periodu 19 meseci, aktivnosti tricijuma od decembra 2017 do juna 2019 su navedeni u tabeli 12:

<u>Lokacija</u>	<u>Datum</u>	<u>Aktivnost[Bql<sup>-1</sup>]</u>
Mlaka 1	<i>Decembar 2017</i>	<2.2
Mlaka 2		19±0.6
Mlaka 3		18±0.8
Zeleno brdo		<2.2
Mlaka 1	<i>Februar 2018</i>	<2.2
Mlaka 2		16±0.4
Mlaka 3		12±0.6
Zeleno brdo		<2.2
Mlaka 1	<i>Mart 2018</i>	<2.2
Mlaka 2		10.8±0.3
Mlaka 3		7.6±0.6
Zeleno brdo		<2.2
Mlaka 1	<i>April 2018</i>	<2.2
Mlaka 2		8.3±0.3
Mlaka 3		5.2±0.4
Zeleno brdo		<2.2
Mlaka 1	<i>Maj 2018</i>	<2.2
Mlaka 2		6.2±0.7
Mlaka 3		6±0.5
Zeleno brdo		<2.2
Mlaka 1	<i>Jun 2018</i>	<2.2
Mlaka 2		11.2±0.6
Mlaka 3		8.4±0.5
/		/
Mlaka 1	<i>Jul 2018</i>	<2.2
Mlaka 2		6.1±0.5
Mlaka 3		5.9±0.3
/		/

<b>Lokacija</b>	<b>Datum</b>	<b>Aktivnost[Bq l<sup>-1</sup>]</b>
<i>Mlaka 1</i>	<i>Avgust 2018</i>	<2.2
<i>Mlaka 2</i>		<i>6.7±0.4</i>
<i>Mlaka 3</i>		<i>6.2±0.3</i>
<i>Zeleno brdo</i>		<2.2
<i>Mlaka 1</i>	<i>Septembar 2018</i>	<2.2
<i>Mlaka2</i>		<i>2.6±0.6</i>
<i>Mlaka3</i>		<i>2.3±0.4</i>
<i>Zeleno brdo</i>		<2.2
<i>Mlaka 1</i>	<i>Oktobar 2018</i>	<2.2
<i>Mlaka 2</i>		<i>7.9±0.7</i>
<i>Mlaka 3</i>		<i>7.6±0.9</i>
<i>Zeleno brdo</i>		<2.2
<i>Mlaka 1</i>	<i>Decembar 2018</i>	<2.2
<i>Mlaka 2</i>		<i>9.9±0.3</i>
<i>Mlaka 3</i>		<i>8.8±0.3</i>
<i>Zeleno brdo</i>		<2.2
<i>Mlaka 1</i>	<i>Januar 2019</i>	<2.2
<i>Mlaka 2</i>		<i>9.7±0.6</i>
<i>Mlaka 3</i>		<i>9.4±0.9</i>
<i>Zeleno brdo</i>		<2.2
<i>Mlaka 1</i>	<i>Februar 2019</i>	<2.2
<i>Mlaka 2</i>		<i>8.9±0.7</i>
<i>Mlaka 3</i>		<i>8.3±0.7</i>
<i>Zeleno brdo</i>		<2.2
<i>Mlaka 1</i>	<i>Mart 2019</i>	<2.2
<i>Mlaka 2</i>		<i>6.1±0.8</i>
<i>Mlaka 3</i>		<i>6.1±0.5</i>
<i>Zeleno brdo</i>		<2.2
<i>Mlaka 1</i>	<i>April 2019</i>	<2.2
<i>Mlaka 2</i>		<i>6.6±0.9</i>
<i>Mlaka 3</i>		<i>6.6±0.6</i>
<i>Zeleno brdo</i>		<2.2
<i>Mlaka 1</i>	<i>Maj 2019</i>	<2.2
<i>Mlaka 2</i>		<i>6.8±0.5</i>
<i>Mlaka 3</i>		<i>4.53±0.3</i>
<i>Zeleno brdo</i>		<2.2
<i>Mlaka 1</i>	<i>Jun 2019</i>	<2.2
<i>Mlaka 2</i>		<i>6.3±0.7</i>
<i>Mlaka 3</i>		<i>6.6±0.9</i>
<i>Zeleno brdo</i>		<2.2

*Tabela 12 rezultata aktivnosti tricijuma za date lokacije u periodu od decembra 2017 do juna 2019.*



Grafik 7.(Origin 9.1) Prikaz specifične aktivnosti u periodu od godinu dana

Srednje vrednosti koncentracije tricijuma za Mlaku 2 Mlaku 3 u period od decembra 2017 do juna 2019 računate su preko formule:

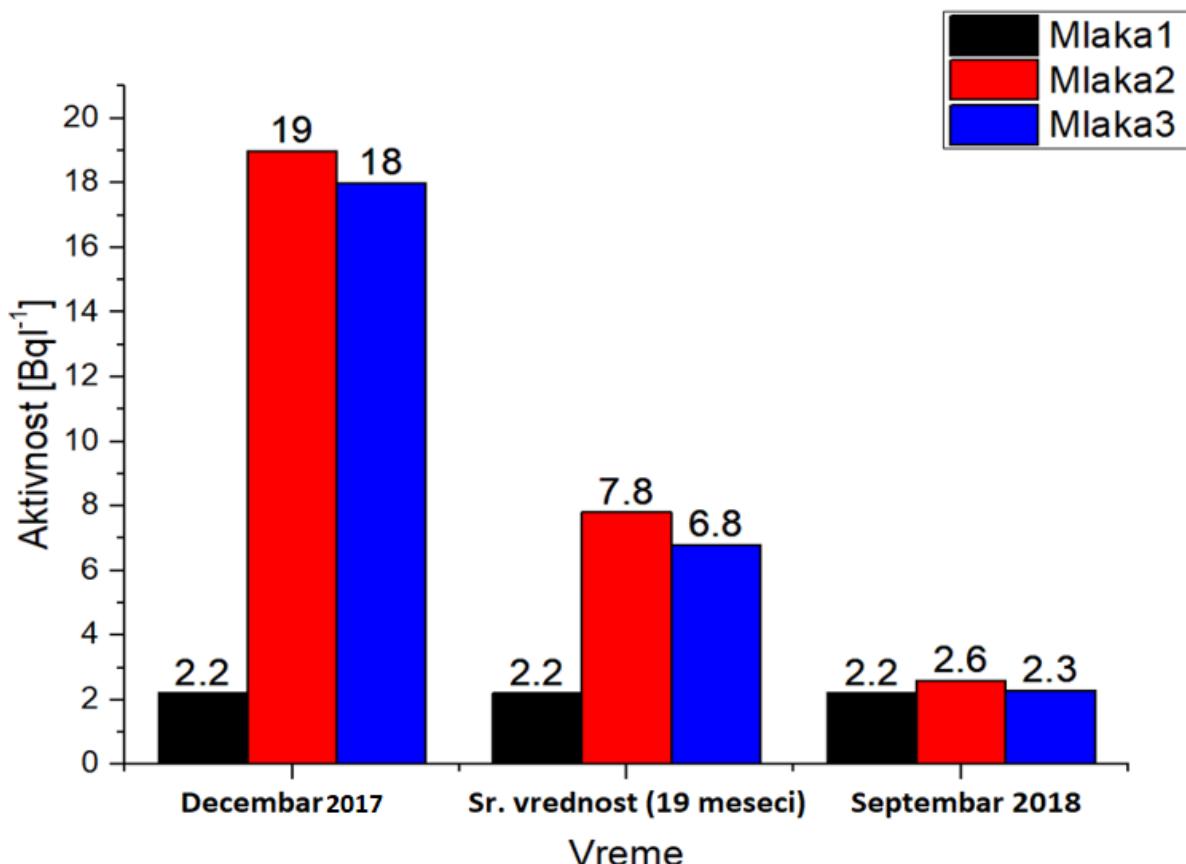
$$Asr(^3H) = \frac{A_1 + A_2 + A_3 \dots A_{19}}{19} \quad (2.4)$$

- Vrednosti dobijene za Mlaku 2:

$$A_{sr}(^3H)_{Mlaka2} = 7.84 \text{ Bql}^{-1}$$

- Vrednosti dobijene za Mlaku 3:

$$A_{sr}(^3H)_{Mlaka3} = 6.81 \text{ Bql}^{-1}$$



Grafik 8. Statistički prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrednosti aktivnosti tricijuma u periodu od 19 meseci.

## 8. Zaključak

Izotop vodonika, tricijum, je radioaktivni izotop vodonika, u većini slučajeva se nalazi vezan za molekule koji zamenjuju vodonik. Može se naći u prirodi kao produkt interakcije kosmičkog zračenja sa molekulima vazduha odnosno atmosferskim azotom, takav tricijum je prirodni. Postoji i antropogeni tricijum koji doprinosi uvećanu nivoa prirodnog tricijuma. Veštački proizveden tricijum nastaje u probama nuklearnog oružja, u radu nuklearnih elektrana i preradom nuklearnog goriva kao što je navedeno u radu.

Za ispitivanje sadržaja tricijuma u ovom radu je korišćena direktna metoda pripreme uzorka (mesanjem 8 ml uzorka vode sa 12 ml scintilacionog koktela UltimaGold LLT), posto je u vodi potoka Mlaka sadržaj tricijuma iznad granice detekcije za ovu metodu koja iznosi  $2.2 \text{ Bq l}^{-1}$ .

Tečni scintilacioni detektor Quantulus 1220 je „ultra-low-level“ brojač i kao takav je pogodan za merenje izuzetno niskih koncentracija aktivnosti alfa i beta emitera, pa kao takav pruža širok spektar mogućnosti za rad i merenja ne samo tricijuma već i drugih radionuklida. Kalibracija detektorskog Sistema Quantulus 1220 direktnom metodom za vreme od 300min preko LLT koktela iznosi  $2.2 \text{ Bq l}^{-1}$ , što zadovoljava granice detekcije. Za efikasnost detekcije je uzeta vrednost od 31.2%.

Monitoringom je utvrđeno da se povećane vrednosti tricijuma nalaze u okolini recipijenta.

Tokom obrade rezulata pokazano je da su maksimalne koncentracije tricijuma u potoku mlaka čak  $19 \text{ Bq l}^{-1}$  a minimalne skoro na granici minimalne detektibilne aktivnosti  $2.3 \text{ Bq l}^{-1}$ . Takođe ove vrednosti ne premašuju parametarne vrednosti u vodi za piće koje su definisane „Službenim glasnikom RS od  $100 \text{ Bq l}^{-1}$ . Sve izmerene vrednosti ne premašuju zakonom propisane vrednosti i daleko su ispod kritičnih.

Maksimalne vrednosti tricijuma koje su detektovane u potoku Mlaka mogu se pripisati remontu nuklearnog objekta, kao i načinu skladištenja nuklearnog otpada na koje bi trebalo da se obrati dodatna pažnja.

## Literatura

- [1] <https://www.britannica.com/science/tritium>
- [2] Hanaor, Dorian A.H.; Kolb, Matthias H.H.; Gan, Yixiang; Kamlah, Marc; Knitter, Regina (2015). “Solution based synthesis of mixed-phase materials in the Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub>–Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> system”. *Journal of Nuclear Materials.* 456: 151–161. arXiv:1410.7128. Bibcode:2015JNuM..456..151H. doi:10.1016/j.jnucmat.2014.09.028.
- [3] Zerriffi, Hisham (January 1996). “Tritium: The environmental, health, budgetary, and strategic effects of the Department of Energy’s decision to produce tritium”. Institute for Energy and Environmental Research. Retrieved 15 September 2010.
- [4] Jones, Greg (2008). “Tritium Issues in Commercial Pressurized Water Reactors”. *Fusion Science and Technology.* 54 (2): 329–332. doi:10.13182/FST08-A1824.
- [5] Sublette, Carey (17 May 2006). “Nuclear Weapons FAQ Section 12.0 Useful Tables”. Nuclear Weapons Archive. Retrieved 19 September 2010.
- [6] Whitlock, Jeremy. “Section D: Safety and Liability – How does Ontario Power Generation manage tritium production in its CANDU moderators?”. Canadian Nuclear FAQ. Retrieved 19 September 2010.
- [7] “Helium-3 Neutron Proportional Counters” (PDF). mit.edu. Archived from the original (PDF) on 21 November 2004.
- [8] Young, P.G. & Foster, D.G. Jr. (September 1972). “An Evaluation of the Neutron and Gamma-ray Production Cross Sections for Nitrogen” (PDF). Los Alamos Scientific Laboratory. Retrieved 19 September 2010.
- [9] “Radiation Information Network’s Tritium Information Section”. Idaho State University.
- [10] “Tritium in drinking water”. Canadian Nuclear Safety Commission. 3 February 2014. Retrieved 23 February 2017.
- [11] The WSRC Team, Health Effects of Tritium, Washington Savannah River Company USA, in press. (2005.)
- [12] Perišić-Janjić N., Opšta hemija, Beograd (1993.)
- [13] Atkins P, de Paula J (2006). Atkins’ Physical Chemistry (8<sup>th</sup> ed.). Oxford University Press. pp. 286–288, 816–818. ISBN 978-0-19-870072-2.
- [14] Merenjekoncentracijeaktivnostitricijuma u voditečnim scintilacionim detektorom  
MASTER RAD, Anja Begović.
- [15] <http://farfar.pharmacy.bg.ac.rs/bitstream/handle/123456789/435/433.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [16] L’Annunziata, M.F. “Handbook of Radioactivity Analysis”, Academic Press, 2012, 3<sup>rd</sup> edition. ISBN: 9780123848741

[17] [http://www.nuklearniobjekti.rs/?page\\_id=35](http://www.nuklearniobjekti.rs/?page_id=35)

[18] **Guidance on the measurement of tritium in environmental samples;** ENVIRONMENT AGENCY HEAD OFFICE – Rio House, Waterside Drive, Aztec West, Almondsbury, Bristol BS32 4UD; Published: 2005.

[20] Aurélie M. Soreefan; PhDDissertation -Development of an original laboratory prototype for a field tritium detector containing a PEM electrolyzer mounted in series with a gas flow proportional counter; UNITED STATES GOVERNMENT PRINTING OFFICE, Washington; Clemson University, USA; Published: 2009

[21] Takeshi Muranaka; **Electrolytic Enrichment of Tritium in Water Using SPE Film;** <https://www.intechopen.com/books/electrolysis/electrolytic-enrichment-of-tritium-in-water-using-spe-film>

[22] Nuklearne analitičke tehnike tečne scintilacione spektroskopije [Elektronski izvor] / Nataša Todorović, Jovana Nikolov, Ivana Stojković. - Novi Sad : Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku, 2018.

[23] <http://www.srbatom.gov.rs/srbatomm/wp-content/uploads/2019/11/Pravilnik-o-granicama-sadrzaja-r.pdf>

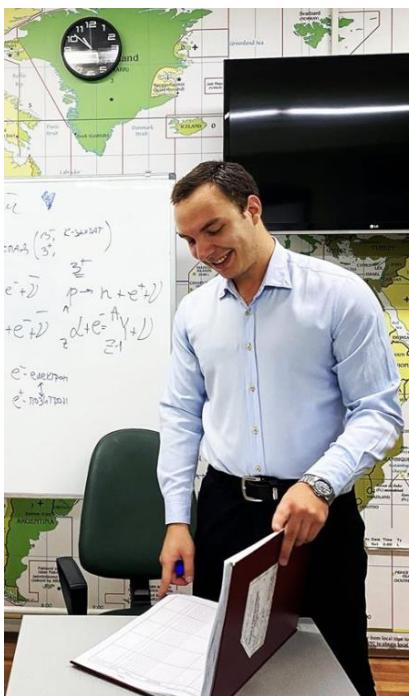
[24] <https://en.wikipedia.org/wiki/Tritium>

[25] <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/tritium>

[26] <https://www.scribd.com/doc/251116357/Fizi%C4%8Dke-Osobine-i-Hemijski-Sastav-Podzemnih-Voda>

[27] Optimizacija tečnog scintilacionog spektromетra za ispitivanja alfa i beta emitera u vodama/ Doktorska disertacija Ivana Stojković, Novi Sad 2015.

## **Biografija**



Miloš Garabandić, rođen 27.02.1993, u Novom Sadu. Osnovno obrazovanje stekao u školi „Dušan Radović” , završava je 2008 godine i upisuje Srednju medicinsku školu „7. April” u Novom Sadu. Dodatno pohađa seminare astronomije u Istraživačkoj stanici Petnica u periodu od 2 godine. Medicinsku školu zavšava 2012 godine. Iste godine upisuje Prirodno-matematički fakultet na Univerzitetu u Novom Sadu, smer medicinska fizika. Na studijama aktivno učestvuje na festivalima kao što su „Festival nauke” , „Noć istraživača” , „Budi student jedan dan”. Svoje veštine kao predavača usavršava na seminaru (2018 Tuzla-Neum) CONNECT 2.0 pod temom Promocija nauke. Godine 2018 počinje da radi u srednjoj privatnoj gimnaziji „e-gimnazija”, od septembra 2019 počinje sa radom u Osnovnoj školi „Vuk Karadžić” u Srbobranu, i privatnoj računarskoj gimnaziji „Smart” . Diplomirao na temu „Optimizacija tečnog scintilacionog spektromетра за ispitivanje  $^{210}\text{Pb}$  u vodi detekcijom Čerenkovljevog zračenja”, oktobra 2019 godine. Nakon odlaska iz navedene dve škole od januara 2020 godine počinje sa radom u gimnaziji „Isidora Sekulić” , u kojoj pored fizike predaje i predmet primenjen nauke.

UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

*Redni broj:*

**RBR**

*Identifikacioni broj:*

**IBR**

*Tip dokumentacije:* Monografska dokumentacija

**TD**

*Tip zapisa:*

**TZ**

*Vrsta rada:*

**VR**

*Autor:* Garabandić Miloš

**AU**

*Mentor:* Prof Nataša Todorović

**MN**

*Naslov rada:*

**NR**

*Jezik publikacije:* srpski (latinica)

**JP**

*Jezik izvoda:* srpski/engleski

**JI**

*Zemlja publikovanja:* Republika Srbija

**ZP**

*Uže geografsko područje:* Vojvodina

**UGP**

*Godina:* 2020

**GO**

*Izdavač:* Autorski reprint

**IZ**

<i>Mesto i adresa:</i>	Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
<b>MA</b>	
<i>Fizički opis rada:</i>	Broj poglavlja: 8 Broj strana: 51 Broj tabela: 12 Broj slika: 24 Broj grafika: 8
<b>FO</b>	
<i>Naučna oblast:</i>	Fizika
<b>NO</b>	
<i>Naučna disciplina:</i>	Nuklearna fizika
<b>ND</b>	
<i>Predmetna odrednica/ ključne reči:</i>	Nuklearna fizika, Tricijum, Monitoring, Spektroskopija, Tečni scinilacioni detektor
<b>PO</b>	
<b>UDK</b>	
<i>Čuva se:</i>	Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu
<b>ČU</b>	
<i>Važna napomena:</i>	nema
<b>VN</b>	
<i>Izvod:</i>	
<b>IZ</b>	
<i>Datum prihvatanja teme od NN veća:</i>	
<b>DP</b>	
<i>Datum odbrane:</i>	21.7.2020
<b>DO</b>	
<i>Članovi komisije:</i>	
<b>KO</b>	
<i>Predsednik: prof dr Nataša Todorović</i>	
<i>član: prof dr Jovana Nikolov</i>	
<i>član: dr Kristina Bikit Šreder</i>	
<i>član: dr Branka Radulović</i>	

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:* Final paper

**CC**

*Author:* Miloš Garabandić

**AU**

*Mentor/comentor:* Prof Dr Nataša Todorović

**MN**

*Title:* Tritium monitoring in surface water at NOS

**TI**

*Language of text:* Serbian (Latin)

**LT**

*Language of abstract:* English

**LA**

*Country of publication:* Serbia

**CP**

*Locality of publication:* Vojvodina

**LP**

*Publication year:* 2020

**PY**

*Publisher:* Author's reprint

**PU**

*Publication place:*

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

**PP**

*Physical description:*

5/182/32/0/71/0/3

**PD**

*Scientific field:*

**SF**

*Scientific discipline:*

**SD**

*Subject/ Key words:*

Tritium, Monitoring, Spectroscopy, Liquid scintillation detector

**SKW**

**UC**

*Holding data:*

Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

**HD**

*Note:*

none

**N**

*Abstract:*

**AB**

*Accepted by the Scientific Board:*

**ASB**

*Defended on:*

21.7.2020

**DE**

*Thesis defend board:*

**DB**

*President:*

prof dr Nataša Todorović

*Member:*

prof dr Jovana Nikolov

*Member:*

dr Kristina Bikit Šreder

*Member*

dr Branka Radulović