



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



# **PROCENA RADIJACIONE BEZBEDNOSTI ZAPOSLENIH U ZAVODU ZA NUKLEARNU MEDICINU**

-Diplomski rad-

Mentor:

Prof. dr Nataša Todorović

Kandidat:

Jasmina Jakonić

Novi Sad, 2011.

## **PREDGOVOR**

Diplomski rad je urađen pod mentorstvom dr Nataše Todorović, vanrednog profesora Prirodno-matematičkog fakulteta, Univerziteta u Novom Sadu. Merenja brzina apsorbovanih doza zračenja su vršena na Institutu za onkologiju Vojvodine u Zavodu za nuklearnu medicinu u Sremskoj Kamenici radi procene radijacione bezbednosti radnih mesta. Brzine apsorbovanih doza su izmerene instrumentima: LB 123 D-H10 Gamma Dose Rate Monitor i Radiation Alert Inspector, Internal G-M LND7317.

Zahvaljujem se prof. dr Nataši Todorović za pomoć i podršku tokom izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem se svojim roditeljima, Petru i Dušici, na razumevanju koje su mi pružili tokom studiranja, bez čije podrške i pomoći ovaj rad ne bi bio ostvarljiv. Zahvaljujem im se što su me sa puno ljubavi bodrili na svakom koraku. Na kraju, želim da se zahvalim svojoj sestri Jeleni koja je uvek bila uz mene...

Jasmina Jakonić

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b>	6
<b>2. OSNOVE JONIZUJUĆEG ZRAČENJA</b>	7
2.1. RADIOAKTIVNOST	7
2.1.1. Prirodna radioaktivnost	7
2.1.2. Vrste radioaktivnih raspada	7
2.1.3. Indukovana radioaktivnost	9
2.1.4. Zakon radioaktivnog raspada	9
2.1.5. Karakteristične veličine radioaktivnog raspada	9
2.2. INTERAKCIJA RADIOAKTIVNE ČESTICE I MATERIJE	10
2.2.1. Teška čestica	11
2.2.2. Laka čestica	11
2.2.3. Elektromagnetno zračenje	12
<b>3. DETEKCIJA JONIZUJUĆEG ZRAČENJA</b>	14
3.1. DOZIMETRIJA	14
3.2. DOZIMETRI	14
3.2.1. Gajger-Milerov brojač	16
3.3. DOZIMETRIJSKE VELIČINE I JEDINICE	17
3.3.1. Ekspoziciona doza jonizujućeg zračenja	17
3.3.2. Apsorbovana doza	18
3.3.3. Linearni energijski transfer	18
3.3.4. Ekvivalentna doza	19
3.3.5. Efektivna doza	12
3.4. LIČNI MONITORING	22
3.4.1. Termoluminescentni dozimetri	23

3.4.2. Film dozimetri	24
3.4.3. Direktno-očitavajući lični dozimetri	25
<b>4. RADIOIZOTOPI U NUKLEARNOJ MEDICINI</b>	<b>26</b>
4.1. NUKLEARNA MEDICINA	26
4.1.1. Dijagnostičke tehnike u nuklearnoj medicini	26
4.1.2. Terapija radionuklidima	27
4.1.3. Biohemijska analiza	28
4.2. RADIOIZOTOPI	28
4.2.1 Proizvodnja radioizotopa	29
4.3. RADIOFARMACEUTICI U DIJAGNOSTICI	34
4.3.1. Tehnicijum-99m	35
4.3.2. $^{99}\text{Mo}$ - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ generator	37
4.3.3. Fluorodeoksiglukoza	38
4.4. RADIOFARMACEUTICI U TERAPIJI	39
4.5. APLIKACIJA I ČINIOCI BIODISTRIBUCIJE	39
4.6. NUKLEARNA FARMACIJA	40
4.6.1. Testovi kvaliteta	41
4.7. VREMENA POLURASPADA RADIOFARMACEUTIKA	42
<b>5. BEZBEDNOST U RADU SA RADIOAKTIVNIM MATERIJALOM U NUKLEARNOJ MEDICINI</b>	<b>44</b>
5.1. OSNOVNI PRINCIPI RADIOBIOLOGIJE	44
5.1.1. Biološki efekti	44
5.1.2. Podela bioloških efekata	46
5.1.2.1. Deterministički i stohastički efekti	46
5.1.2.2. Genetički i somatski efekti	46

5.1.3. Faktori radijacionih efekata	46
5.2. RIZIK OD RADIJACIJE	47
5.3. RADIJACIONA ZAŠTITA I SIGURNOST	48
5.3.1. ALARA princip	48
5.3.2. Osnovni principi zaštite od zračenja	49
5.3.3. Organizacije zadužene za zaštitu od zračenja	49
5.4. RADIJACIONA ZAŠTITA NA NUKLEARNOJ MEDICINI	50
5.4.1. Zaštitne mere od spoljašnjeg zračenja	50
5.4.2. Zaštitne mere od unutrašnjeg zračenja	51
5.4.3. Ostale mere zaštite	52
5.5. GRANICE DOZE	53
<b>6. MERENJE APSORBOVANIH DOZA ZRAČENJA NA INSTITUTU ZA ONKOLOGIJU VOJVODINE NA ZAVODU ZA NUKLEARNU MEDICINU</b>	55
6.1. UVOD U MERENJE	55
6.2. REZULTATI DOZIMETRIJSKIH MERENJA	55
6.3 OPIS RADNIH MESTA NA ZAVODU ZA NUKLEARNU MEDICINU I PROCENA RADIJACIONE BEZBEDNOSTI	59
<b>7. ZAKLJUČAK</b>	64
<b>8. LITERATURA</b>	65
<b>9. BIOGRAFIJA</b>	66

## 1. UVOD

Na Zavodu za nuklearnu medicinu na Institutu za onkologiju Vojvodine u Sremskoj Kamenici postoje sledeća radna mesta: hemičar, lekar specijalista nuklearne medicine, lekar opšte medicine, laboratorijski tehničar, i administrativni radnik. Ovo osoblje je svakodnevno izloženo otvorenim izvorima  $^{99m}\text{Tc}$  i  $^{131}\text{I}$  izuzetno visoke aktivnosti, kao i izvoru FDG-a aktivnosti 4000 MBq dva puta nedeljno. Zaposlena lica primenjuju ovo radioaktivno zračenje u dijagnostičke i terapijske svrhe pacijenata u skladu sa Zakonom o zaštiti od jonizujućeg zračenja i o nuklearnoj sigurnosti, i Pravilnikom o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima.

Ovlašćene institucije vrše dozimetrijske kontrole pomenutih radnih mesta. Dozimetrijska kontrola podrazumeva merenje apsorbovanih doza zračenja odgovarajućim monitorima zračenja, objavljivanje rezultata i poređenje rezultata radi procene bezbednosti radnog mesta sa granicama doza zračenja profesionalno izloženih lica zračenju.

## 2. OSNOVE JONIZUJUĆEG ZRAČENJA

U sledećem poglavlju su istaknute osnove radioaktivnosti i interakcije radioaktivnog zračenja sa materijom kao vrsta uvoda ili eventualnog podsetnika za razumevanje radioaktivnog zračenja koje se koristi u nuklearnoj medicini.

### 2.1. RADIOAKTIVNOST

#### 2.1.1. PRIRODNA RADIOAKTIVNOST

Pojavu radioaktivnosti otkrio je Anri Bekerel (*Henri Becquerel*) 1896. godine proučavajući uranove soli. Desetak godina kasnije Radeford (*Rutherford*) i Sodi (*Soddy*) su objasnili radioaktivnost kao proces transmutacije nestabilnog u stabilan element emisijom radioaktivnog zračenja. U prirodi postoji ograničeni broj radioaktivnih izotopa-radionuklida i neki od njih formiraju radioaktivne nizove u kojima se jedan radionuklid raspada u sledeći i to sve dok se ne formira stabilno jezgro [1].

Pojava prirodne radioaktivnosti vezana je za proces sinteze jezgra. Prirodna radioaktivnost je spontana i ne može se ubrzati dodavanjem energije spolja. Prva jezgra formirana su pre nekoliko milijardi godina. Najveći broj nestabilnih jezgara koji je ušao u Zemljin sastav se do sada raspao. Do današnjih dana preživeli su neki dugoživeći izotopi sa periodom poluraspada većim od 500 miliona godina. Postoje tri prirodna radioaktivna niza i to su uranijum-radijumski, uranijum-aktinijumski i torijumski niz, a na kojima se nećemo zadržavati s obzirom da se prirodni radioizotopi neprihvatljivi za medicinsku primenu jer ih nema u prirodnim metabolitima, takođe imaju i veliko vreme poluraspada i nisu čisti  $\gamma$ -emiteri. Stoga je nužno proizvoditi veštačke radioaktivne izotope koje ćemo moći ugraditi u metabolite.

#### 2.1.2. VRSTE RADIOAKTIVNIH RASPADA

Nestabilan predak (roditelj), X, sa atomskim rednim brojem, Z, i masenim atomskim brojem, A, prelazi u svoj potomak, Y, jednim od radioaktivnih raspada:  $\alpha$ ,  $\beta^+$ ,  $\beta^-$ , elektronski zahvat,  $\gamma$  ili interna konverzija.

1.  **$\alpha$  raspad.** Kod  $\alpha$  raspada iz jezgra radioaktivnog predaka izbacuje se čestica koja se sastoji od dva protona i dva neutrona, identična jezgru helijuma, a zove se  $\alpha$  čestica ili  $\alpha$  radioaktivno zračenje. Nastaje izotop elementa koji ima redni broj, Z, manji za 2, a maseni, A, za 4:



2.  **$\beta^-$  raspad.** Kada je u jezgru višak neutrona u odnosu na protone, neutron se transformiše u proton uz emisiju elektrona koji se naziva  $\beta^-$  čestica ili  $\beta^-$  radioaktivno zračenje i čestice antineutrina,  $\bar{\nu}$  (čestica bez naelektrisanja i nulte mase u mirovanju):



Od radioaktivnog predaka dobija se potomak, izotop elementa čiji je redni broj, Z, veći za jedan, a maseni broj, A, ostaje isti:



3.  **$\beta^+$  raspad.** Kada je u jezgru višak protona u odnosu na neutrone, proton se transformiše u neutron uz emisiju pozitrona, čestice iste mase kao elektron ali suprotnog naelektrisanja, koja se ovde zove  $\beta^+$  čestica ili  $\beta^+$  radioaktivno zračenje, i neutrino,  $\nu$  (čestica bez naelektrisanja i mase koja je manja od hiljaditog dela mase elektrona, dakle nulte mase, kao i antineutrino):



$\beta^+$  radioaktivnim raspadom od radioaktivnog predaka dobija se izotop elementa čiji je redni broj, Z, za jedan manji, a istog masenog broja, A, kao radioaktivni izotop:



4. **Elektronski zahvat.** Kod ovog procesa jezgro zahvata jedan od svojih orbitalnih elektrona iz K ljuske, proton se transformiše u neutron, a neutrino se izbacuje. U K ljusci nastaje šupljina koja se popunjava elektronom sa nekog višeg nivoa i energija prelaza je emitovana u vidu karakterističnog fotona ili Augerovog elektrona.



Elektronskim zahvatom od radioaktivnog predaka se dobija izotop čiji je atomski redni broj za jedan manji, dok atomski maseni broj ostaje nepromenjen.

5. **Gama prelaz.** Ekscitovano, odnosno pobuđeno jezgro potomka nastalo  $\beta^+$  ili  $\beta^-$  raspadom se deekscituje, tj vraća u svoje osnovno stanje emisijom jednog ili više gama-fotona.



Metastabilno jezgro  $X^*$  sa atomskim rednim i masenim brojem, Z i A,  $\gamma$  raspadom prelazi u osnovno stanje pri čemu nema promene A i Z.

6. **Unutrašnja konverzija.** Umesto emitovanja gama fotona, pobuđeno jezgro može svoju energiju pobuđivanja i predati elektronu iz K ljuske, koji će biti izbačen sa kinetičkom energijom jednakoj razlici energije ekscitacije i energije vezivanja elektrona. Nastala šupljina u K ljusci se popunjava elektronima sa viših energijskih nivoa, uz emitovanje fotona ili Augerovog elektrona energije jednake energiji prelaza.



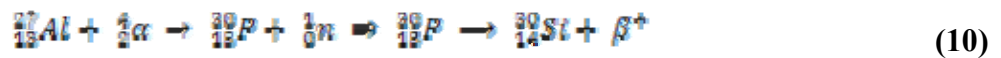


### 2.1.3. INDUKOVANA RADIOAKTIVNOST

Veštačka (indukovana) radioaktivnost podrazumeva ubacivanje nekih čestica (neutrons, protona, deutrons,  $\alpha$ -čestica,  $\gamma$ -zraka) u jezgro atoma, pri čemu nastaju nova jezgra koja imaju sva radioaktivna svojstva. Proces proizvodnje veštačkih radioaktivnih jezgara jeste nuklearna reakcija. Prvu nuklearnu reakciju uzrokovao je Ernest Raderford (*Ernest Rutherford*) 1919. godine, i tada je otkrio da se bombardovanjem azota  $\alpha$ -česticama dobijaju kiseonik i proton:



1934. godine bračni par Irena i Frederik Žoliot-Kiri (*Irene i Frederic Joliot-Curie*) su pronašli da se ovim procesom, odnosno nuklearnom reakcijom mogu proizvesti i veštački radioaktivni izotopi. Bombardovanjem aluminijuma  $\alpha$ -česticama proizveli su radioaktivni fosfor koji se  $\beta^+$  raspadom transformisao u silicijum:



Veštački radioaktivni izotopi koji se koriste u medicini se proizvode bombardovanjem stabilnih jezgara neutronima, protonima, deutronima ili  $\alpha$ -česticama. Ove čestice ulaze u jezgro pri čemu se menja broj protona i/ili neutrona pa jezgra postaju nestabilna [3].

### 2.1.4. ZAKON RADIOAKTIVNOG RASPADA

Radioaktivan događaj je slučajan događaj. U nekoj supstanci postoji velik broj atoma i nikad se ne zna koji će se atom raspasti. Možemo smatrati da je broj atoma kontinualna promenljiva. U nekom vremenskom intervalu  $\Delta t$  svaki atom ima šansu da se raspadne. S obzirom na račun verovatnoće, radioaktivni događaj ne zavisi od predistorije atoma već od dužine trajanja intervala  $\Delta t$  u kojem se posmatranje vrši. Zakon radioaktivnog raspada je izveden na osnovu eksperimenta, ali se može izvesti i matematičkim putem. Zakon radioaktivnog raspada ima sledeći oblik:

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (11)$$

gde je  $N_t$  broj atoma koji nije pretrpeo radioaktivni raspad za vreme  $t$ ,  $N_0$  broj atoma u početnom trenutku vremena posmatranja ( $t=0$ ), i  $\lambda$ , konstanta radioaktivnog raspada koja je karakteristična za svaki element. Dakle, zakon radioaktivnog raspada govori o tome koliki će broj atoma početnog radioizotopa ostati neraspadnut u izvoru po isteku vremena  $t$  merenog od početnog trenutka posmatranja.

### 2.1.5. KARAKTERISTIČNE VELIČINE RADIOAKTIVNOG RASPADA

1. **Brzina radioaktivnog raspada – aktivnost.** Aktivnost,  $A$ , predstavlja apsolutni broj atoma koji se raspao u jedinici vremena:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N, \text{ ili } A = A_0 e^{-\lambda t}, \quad (12)$$

gde je  $A_0$  s obzirom na zakon radioaktivnog raspada  $A_0 = \lambda N_0$ , aktivnost u početnom trenutku  $t_0$ . Jedinica za aktivnost u SI sistemu je Bekerel (*Becquerel*), Bq (1Bq=1 raspad/s).

2. **Konstanta raspada.** Konstanta radioaktivnog raspada,  $\lambda$ , predstavlja verovatnoću da se neki atom raspadne u jedinici vremene. Određuje se iz zakona radioaktivnog raspada.

$$\lambda = \frac{-dN/N}{dt} \quad (13)$$

Konstanta raspada zavisi od vrste radioizotopa i ne zavisi od temperature, pritiska i hemijskog okruženja.

3. **Period poluraspada.** Period poluraspada,  $T_{1/2}$ , je vreme za koje se broj radioaktivnih atoma smanji na polovinu od svoje početne vrednosti  $N_0$ . Period poluraspada je povezan sa konstantom raspada preko relacije:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (14)$$

Period poluraspada zavisi od vrste radioizotopa, ne zavisi od količine radioaktivnih atoma, od temperature, pritiska i hemijskog okruženja.

4. **Srednji život.** Srednji život,  $\tau$ , predstavlja verovatno vreme života većine atoma. Veza sa konstantom raspada i periodom poluraspada je sledeća:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{0,693} \quad (15)$$

## 2.2. INTERAKCIJA RADIOAKTIVNIH ČESTICA I MATERIJE

Vrlo brzo nakon otkrića radioaktivnosti, naučnici su otkrili da zračenje menja procese u organizmu. Svima je poznata činjenica da je velik broj naučnika i drugog osoblja koji su u početnom periodu radili sa radioaktivnim supstancama oboleo od raka. Iako, proučavanje bioloških efekata traje već čitav vek, ni danas slika svih fizičkih, hemijskih i bioloških procesa nije sasvim jasna. Osnovni problem u proučavanju su velike razlike u kašnjenju pojedinih procesa nakon apsorpcije zračenja. Primarni proces je fizički proces, naime proces interakcije, jonizacija, koji traje oko  $10^{-15}$  s. Hemijski procesi modificiranja bioloških molekula su sekundarni i mnogo sporiji, oko  $10^{-6}$  do  $10^{-3}$  s, dok se biološki efekti tih promena mogu pojaviti mnogo kasnije, mereno danima pa čak i godinama [3].

Kada su u pitanju ovi primarni, fizički procesi zapaža se da način interakcije radioaktivnih  $\alpha$  i  $\beta$  čestica sa biološkim molekulima različit od načina interakcije  $\gamma$ -zračenja i x-zračenja, iako u oba slučaja imamo za posledicu jonizaciju tkiva.  $\alpha$  i  $\beta$  čestice su naelektrisane čestice pa kao takve predstavljaju izvore električnog polja koje će intereagovati sa orbitalnim elektronima u atomima supstancije kroz koju prolaze čestice. U zavisnosti od prenosa energije imamo ili jonizaciju ili samo ekscitaciju atoma tkiva. Ukoliko je prenos energije jednak ili veći od izlaznog rada elektrona,

nastaje katjon i slobodan elektron, a za manje iznose prenosa energije nastaje samo ekscitovan atom. Broj ovih interakcija zavisi od brzine i naelektrisanja čestice. Čestice koje su sporije i višestruko naelektrisane uzrokuju jaču interakciju.

### 2.2.1. TEŠKA ČESTICA

U nuklearnoj medicini su teške čestice one koje imaju masu protona ili veću, a to su naravno pored protona još i deutroni,  $\alpha$ -čestice i druge čestice. One svojim električnim poljem deluju na elektrone atoma tkiva samo dok prolaze blizu atoma, a u zavisnosti od udaljenosti prolaska posledica je jonizacija ili ekscitacija.  $\alpha$ -čestica u interakciji gubi po jedinici dužine četiri puta više energije nego što gubi proton i deutron jednake brzine, pa kažemo da je ona biološki štetnija [3]. Energija alfa čestica se kreće u opsegu od 2 do 10 MeV. U zavisnosti od svoje energije,  $\alpha$ -čestica na svom putu uzrokuje nastanak od 20 do 80 hiljada jonskih parova. Najveća moć jonizacije je pri kraju puta kada čestica izgubi najveći deo svoje energije i brzinu, tada sa dovoljno smanjenom brzinom će zahvatiti orbitalni elektron i formirati neutralni atom helijuma pri čemu jonizacija naglo pada na nulu [1]. Parametar kojim u nuklearnoj medicini klasifikujemo radioaktivno zračenje jeste linearni prenos energije, LET (opis u dozimetrijskim veličinama). Alfa čestica ima veliki LET i uzrokuje velika biološka oštećenja.

### 2.2.2. LAKA ČESTICA

**$\beta^-$  čestica.** Brzi elektroni gube kinetičku energiju zakočnim zračenjem dok sporiji elektroni jonizuju tkivo. Naime, elektron pri prolazu kroz materiju može da se raseje ne elektronskom omotaču i jezgru nekog atoma materije. Rasejanje može biti elastično, kada se totalna energija sistema ne menja, i neelastično kad dolazi do promena energija. Ukoliko se elektron neelastično raseje na elektronskom omotaču atoma medijuma, on će izgubiti energiju na jonizaciju i ekscitaciju atoma. U najvećem broju slučajeva beta čestica intereaguje sa česticama jednake mase, dakle elektronima, stvarajući jonske parove. Broj stvorenih jonskih parova u vazduhu na 1 cm puta se kreće od 10 do 100, dakle jonizaciona moć beta čestice je oko  $10^3$  puta manja od jonizacione moći alfa čestice [1]. Ako imamo slučaj neelastičnog rasejanja na jezgru, beta čestica, odnosno elektron će se zakočiti u električnom polju jezgra i emitovaće fotone, odnosno elektromagnetno zračenje, pod nazivom zakočno zračenje. Ovakva interakcija je prisutna u tkivima sa teškim elementima i kod elektrona sa velikom energijom (većom od 10 MeV). Zakočnim zračenjem se ne stvaraju joni pa elektroni na početku svog puta slabo jonizuju tkivo, a proces jonizacije će prevladati tek kada energija elektrona bude manja od 1 MeV. Za razliku od teških čestica koje imaju uglavnom pravolinijsku putanju, elektroni prelaze mnogo duži put od njih zbog sudara sa atomima tkiva usled kojih skreću od svoje putanje. Dakle, elektroni na svom putu trpe višestruke sudare pa im je putanja izlomljena linija. LET elektrona je mnogo manji od LET-a  $\alpha$ -čestice i nije ravnomeran duž celog puta već raste sa dubinom prodiranja elektrona. Efektivni domet elektrona u tkivu se određuje kao debljina sloja tkiva u kojem se elektron zaustavi, dakle, preda početnu kinetičku energiju. Domet beta čestice u vazduhu može biti od nekoliko centimetara do desetak metara. Beta čestice prodiru u tkivo organizma od 10 do 15 mm. Za zaštitu su od beta zračenja su najpogodniji laki materijali kao što su staklo, plastične mase ili aluminijum u kojima se ne javlja zakočno zračenje i beta čestica će se zaustaviti u sloju od nekoliko mm.

**$\beta^+$  čestica.** Brzi pozitroni gube kinetičku energiju kao elektroni jednake energije. Kada se pozitroni uspore, oni anihiliraju sa elektronom iz elektronskog omotača pri čemu nastaju dva  $\gamma$ -

kvanta jednakih energija (svaki 0,511 MeV), koji se sa mesta anihilacije emituju u suprotnim smerovima (pod uglom od  $180^\circ$ ). Nastalo  $\gamma$ -zračenje ima dovoljnu energiju da bez interakcije prođe kroz tkivo i stigne do detektora. Mereći istovremenosti detekcije anihilacijskih fotona može se odrediti mesto izvora zračenja, pa se pozitroni efikasno koriste u dijagnostici (PET) [3].

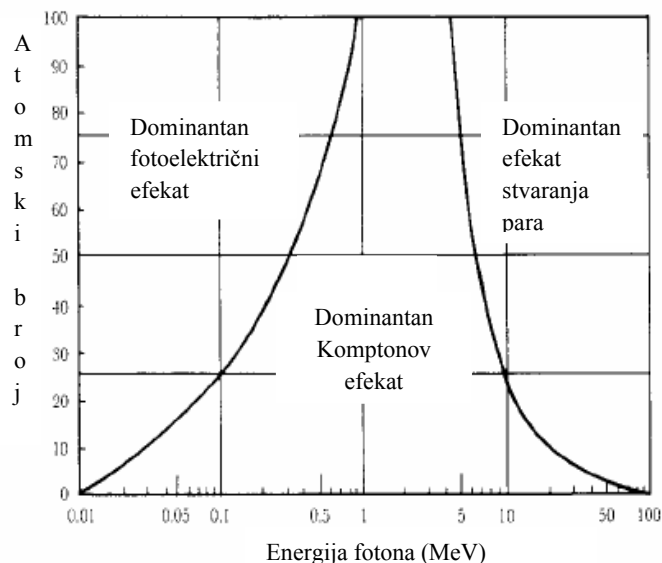
### 2.2.3. ELEKTROMAGNETNO ZRAČENJE

U zavisnosti od porekla, jonizujuće zračenje se može svrstati u jednu od četiri grupe. Prvu grupu čini zakočno zračenje, kontinuirani spektar x-zračenja koje potiče od gore pomenute interakcije elektrona i jezgra atoma sredine. Druga grupa je karakteristično x-zračenje koje se emituje pri prelasku orbitalnog elektrona sa jednog na drugi dozvoljeni nivo. Treća grupa su gama zraci koji su za ovaj rad od najvećeg značaja jer se oni emituju pri raspadu jezgra atoma, dakle pri radioaktivnom raspadu nestabilnih izotopa, odnosno radioizotopa i radiofarmaceutika koji se koriste u nuklearnoj medicini. Četvrtu grupu čini anihilacijsko zračenje, takođe kasnije pomenuto u radu u delu posvećenom PET skeneru, koje se emituje kroz pozitron-elektronsku anihilaciju.

Elektromagnetno zračenje intereaguje sa tkivom, odnosno uopšte sa materijom, fotoelektričnim efektom, Kulonovim efektom ili stvaranjem parova. Ovi efekti su najviše odgovorni za smanjenje inteziteta zračenja pri prolazu kroz neku sredinu. Ostali efekti mogu nastati pri interakciji elektromagnetnog zračenja sa jezgrom i oni su zanemarljivo mali.

U slučaju fotoelektričnog efekta celokupna energija fotona se troši na izbacivanje elektrona iz elektronskog omotača (vezani elektron) i njegovu kinetičku energiju (spoljašnji fotoelektrični efekat), pa pri tome foton nestaje. Kod efekta stvaranje para elektron-pozitron, celokupna energija se troši na kreiranje ovih čestica i njihovu energiju. Uslov za stvaranje para je da energija fotona bude veća od energije mirovanja stvorenih čestica (1,02MeV). Za Komptonov efekat je karakteristično da foton predaje samo deo svoje energije elektronu koji se smatra slobodnim. Na taj način foton

preživljava ovaj efekat ali je on rasejan pod uglom rasejanja u odnosu na prvobitni pravac i nosi manju energiju od početne. Koji od ova tri efekta će se dogoditi zavisi od energije koju nosi foton, i od atomskog broja atoma sredine (slika 1) [6].



Slika 1. Regije dominantnosti jednog od tri glavna procesa kod interakcije fotona i sredine  
Izvor: [6]

Slika 1 pokazuje koji od tri glavna procesa kod interakcije fotona sa materijom dominira u kojoj oblasti. Leva kriva pokazuje oblast gde su atomski koeficijent za fotoefekat i Komptonovo rasejanje jednaki, a desna oblast u kojoj su atomski Komptonov koeficijent i atomski koeficijent stvaranje para jednaki (ovi atomski koeficijenti se odnose na atomske koeficijente atenuacije za svaki efekat posebno).

U dijagnostici se koriste  $\gamma$ -fotoni energije približno 200 keV, jer je verovatnoća interakcije takvih fotona i tkiva mala. Ako se interakcija dogodi, onda je najverovatniji Komptonov efekat pri kojem nastaje sekundarni  $\gamma$ -foton, elektron i pozitivni jon. Oslobođeni elektroni imaju veliku kinetičku energiju pa na svom putu kroz tkivo izazivaju nove jonizacije, tako da u tkivu dobijamo veliki broj sekundarnih elektrona. Primarni usporeni elektron se uhvati za elektronski omotač atoma pri čemu nastaje negativan jon. Dok sekundarni fotoni nastali Komptonovim rasejanjem takođe intereaguju sa atomima tkiva i jonizuju ih.

### 3. DETEKCIJA JONIZUJUĆEG ZRAČENJA

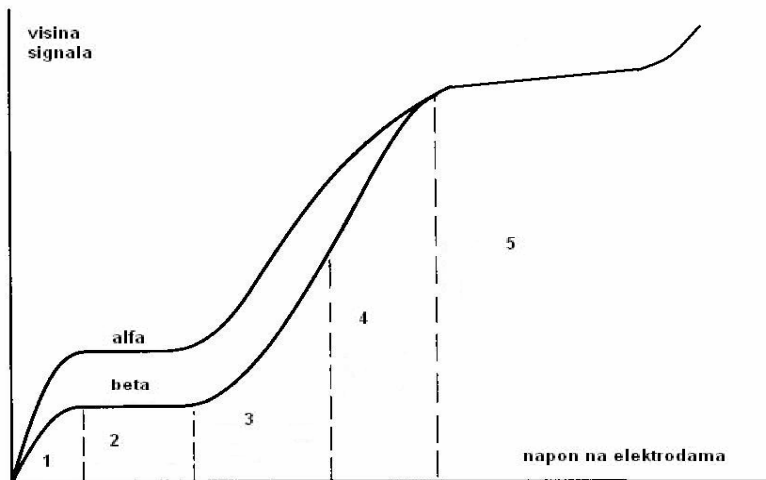
#### 3.1. DOZIMetriJA

Dozimetrija je proračun apsorbovane doze u datoj sredini koja je rezultirala usled izlaganja direktnom ili indirektnom jonizujućem zračenju [6]. Dozimetrija je bitna disciplina ne samo za nuklearnu medicinu, već i za druge nauke kod kojih postoji izvesna interakcija čoveka i jonizujućeg zračenja. Instrumenti kojima se detektuje i meri jonizujuće zračenje nose naziv dozimetri. Postoje različiti tipovi dozimetara, a grubo ih možemo podeliti na one koje beleže količinu zračenja u vazduhu, kakvi su Gajger-Milerovi brojači i jonizacione komore, i one koji se koriste za lični monitoring.

#### 3.2. DOZIMETRI

Najveći broj detektora koristi gas kao radnu supstancu kojom je detektor ispunjen jer se najjednostavnije može prikupiti u gasu naelektrisanje koje stvara zračenje. Postoji nekoliko različitih vrsta gasnih detektora i svi rade na principu jonizacione komore. Jonizacione komore obično imaju tanke zidove i ispunjene su vazduhom ili nekim drugim gasom, pod različitim pritiscima u zavisnosti od namene. U njihovoj unutrašnjosti se nalaze dve elektrode na koje se može dovoditi napon spolja. Jonizacione komore su najčešće cilindrične i ukoliko je to slučaj tada je anoda najčešće uvedena u vidu metalne žice zategnute duž ose, a katoda se pravi kao unutrašnja obloga šupljeg cilindra. Jonizaciona komora zapravo predstavlja običan kondenzator koji se puni naelektrisanjem kojeg stvara zračenje pri prolasku kroz gas. Ako je izložena zračenju, doći će do oslobađanja elektrona i stvaranja pozitivnih jona koji će potom otpočeti kretanje pod dejstvom polja ka katodi i anodi. Kondenzator, kojega jonizaciona komora predstavlja, se može prazniti dovodenjem spoljašnjeg kola, a u zavisnosti od postavljenog spoljašnjeg kola razlikujemo integralni i diferencijalni režim rada detektora [7].

Rad jonizacione komore veoma zavisi od napona koji je primenjen na njenim elektrodama. Na slici 2 je prikazano kako izgleda visina signala kojeg daje jonizaciona komora nakon prikupljanja naelektrisanja pri prolasku jedne čestice zračenja kroz jonizacionu komoru. U zavisnosti od spoljašnjeg kola taj signal može biti ili amplituda kratkotrajnog stujnog toka ili naponski signal. Na slici su prikazane vrednosti amplitude izlaznog signala za slučaj kada se detektuje alfa i beta čestica. Na slici se vidi da u većem delu naponske oblasti koja se primenjuje na jonizacionu komoru alfa čestice zbog veće jonizacione moći proizvode signale veće amplitude.



Slika 2. Visina signala jonizacione komore u zavisnosti od primenjenog napona na njenim elektrodama

Izvor: [7]

U zavisnosti od ponašanja jonizacione komore radni opseg napona je podeljen u nekoliko oblasti:

1. Prva oblast se zove oblast rekombinacije i nema nikakve praktične primene u radu jonizacione komore. Naime, u ovoj oblasti napon još uvek nije dovoljno visok da bi električno polje prikupilo sve jone stvorene prolaskom čestice zračenja, pa se joni sporo kreću i uspevaju da se rekombinuju i pre nego što stignu do elektroda. Uočljiv je veoma brz porast signala sa porastom napona između elektroda, jer kako napon raste povećava se broj jona koji dospeju do elektroda pre rekombinacije.
2. Druga oblast se zove oblast jonizacione komore u kojoj radi jonizaciona komora. Napon je dovoljno visok da stvori električno polje koje može da prikupi sve jone, a amplituda izlaznog signala je konstantna i ne zavisi od napona između elektroda.
3. Treća oblast je oblast proporcionalne komore u kojoj rade proporcionalni brojači. Napon je dovoljno visok da elektroni krećući se ka anodi bivaju ubrzani i preko energije potrebne za jonizaciju u gasu kojim je ispunjena komora. Dolazi do sekundarnih jonizacija u kojima se stvara novo naelektrisanje, što konačno doprinosi tome da amplituda signala znatno poraste. Signal koji se dobija još uvek je proporcionalan energiji koju je čestica zračenja ostavila u gasu.
4. Pri porastu napona, visina signala nastavlja brže da raste nego u trećoj oblasti. Sve je isto kao i u oblasti proporcionalne komore, samo se sekundarne jonizacije i sve naredne još intenzivnije odvijaju. Ova oblast se naziva oblast ograničene proporcionalnosti jer izlazni signal ne mora nužno biti proporcionalan energiji koju je čestica zračenja ostavila u gasu.
5. Peta oblast se naziva Gajger-Milerova oblast a detektori koji rade u oblasti sa ovako visokim naponima su Gajger-Milerovi detektori. Visina signala veoma slabo zavisi od napona dovedenog na

elektrode. Napon je toliko visok da dolazi do lavinskog pražnjenja. Visina signala ne zavisi ni od energije koju je čestica zračenja izgubila u gasu.

Daljnijim povećavanjem napona dolazi do nekontrolisanog pražnjenja koje dovodi do uništenja jonizacione komore [7].

### 3.2.1. GAJGER-MILEROV DETEKTOR

Napon na kojem rade Gajger-Milerovi detektori (GM detektori) omogućava lavinsko pražnjenje u celoj zapremini detektora. Kod GM brojača pražnjenja je samostalno i traje i nikad se ne bi ugasilo kada jednom započne.

Za stvaranje lavine i početak pražnjenja dovoljan je i jedan elektron koji će jakim poljem biti ubrzan do te mere da počne jonizovati i pobuđivati atome gasa na koje naiđe. Radni gas je najčešće argon. Pobuđeni atomi gasa, nakon prelaska na niže energetske stanje emituju fotone, koji padaju na metalnu katodu i iz nje izbijaju nove elektrone koji opet započinju nove jonizacije i lavine. Ovaj proces je relativno brz i ceo ciklus od stvaranja elektrona, ekscitacije atoma argona, emisije fotona i izbijanja novih elektrona sa katode traje oko  $10^{-6}$  s. Joni argona putuju u električnom polju do katode i ako su usput stekli dovoljnu energiju, uspevaju da izbiju nove elektrone koji započinju nove lavine. Ovo je malo sporiji proces jer jonu argona treba do  $10^{-4}$  s da prevali rastojanje od mesta nastanka do zida brojača.

Jednom započet proces lavinskog pražnjenja nikad se ne bi okončao sam od sebe, pa da bi detektor bio u mogućnosti da detektuje narednu česticu mora se to pražnjenje na neki način zaustaviti. To je moguće elektronskim putem, spuštanjem napona u momentu kada lavina započne. Drugi način bi bio da se u GM-brojaču pored argona nalazi i neki višeatomski gas. Najčešće to bivaju alkoholne para čiji višeatomski molekuli imaju zadatak da apsorbiraju fotone nastale deekscitacijom argona, a da tom prilikom ne nastanu elektroni koji bi sa katode izbijali nove elektrone. Molekuli alkoholnih para se nakon apsorpcije fotona pobuđuju i doživljavaju disocijaciju, bez emisije novih fotona. Tako se efektivno smanjuje broj fotona koji imaju mogućnost da na katodi izbijaju nove elektrone. Alkoholne pare u isto vreme uspevaju da smanje broj jona gasa koji udaraju u katodu i izbijaju elektrone, jer ako dođe do sudara između jona argona i molekula alkohola, često se dešava da jedan elektron iz alkohola pređe na argon i neutrališe ga. Sada jonizovani molekuli alkohola putuju ka katodi, a kako oni imaju znatno veću masu od jona argona, ne uspevaju da steknu dovoljnu kinetičku energiju da bi izbili elektron sa katode. Tako se brzo redukuje broj elektrona što ima kao posledicu gašenje lavine. GM-brojači koji rade na ovom principu se nazivaju samogaseći.

Sa slike 2 se može videti da visina naponskog signala i GM-oblasti slabo zavisi od napona između elektroda. Takođe se može videti da je visina signala ista i za alfa i za beta česticu. Jednom započeta lavina će dati naponski signal koji je određen dizajnom Gajger-Milerove cevi i koji uopšte ne zavisi od vrste detektovane čestice ili njene energije. Zbog toga se ovi detektori mogu koristiti samo kao brojači. Brzina brojanja nije naročito visoka zbog relativno dugog vremena potrebnog za formiranje signala i gašenja lavine, ali za osnovne namene ovih detektora vremenska razolucija od  $10^{-2}$  do  $10^{-5}$  s je itekako dovoljna.

Lavinski proces stvori veliku količinu naelektrisanja koje formira visoke naponske signale koji mogu biti i do nekoliko desetina volti što znači da iza detektora može da stoji prosta elektronika



jer nije potrebno pojačavanje signala. Usled toga je moguće napraviti različite oblike GM-brojača malih dimenzija, prenosnog tipa, sa kojima se može vršiti merenja gde god se za to ukaže prilika. Efikasnost GM-brojača je gotovo 100%. Dovoljno je da zračenje proizvede samo jedan par jona u gasu pa da se započne lavinski proces. Kod GM-brojača nije neophodno da gama-foton stvori jonski par u razređenom gasu, dovoljno je da izbije samo jedan elektron iz zida brojača pa da proces stvaranja lavine započne. Verovatnoća za interakciju fotonskog zračenja sa čvrstim materijalom od kog je Gajger-Milerova cev napravljena je znatno veća od verovatnoće interakcije sa gasom kojim su punjeni ostali gasni detektori, tako da imamo bitno efikasniju detekciju gama ili rendgenskog zračenja [7].

### 3.3. DOZIMETRIJSKE VELIČINE I JEDINICE

Jonizujuće zračenje je štetno za organizam, ali poštujući i pridržavajući se određenih ograničenja u njegovoj upotrebi, dobićemo neprocenljivu korist u medicini. Zato je vrlo bitno da znamo kolika je energija koju ostavlja dato zračenje pri prolazu kroz neki medijum. Zbog toga, i u cilju zaštite od jonizujućeg zračenja uvodimo radijacione dozimetrijske fizičke veličine i njihove jedinice kojima ćemo posvetiti pažnju u ovom odeljku. Osnovne dozimetrijske veličine i jedinice definisane su od strane Svetske zdravstvene organizacije (*WHO, World Health Organisation*), Međunarodne Agencije za atomsku energiju (*IAEA, International Atomic Energy Agency*), Međunarodne Komisije za radiološke jedinice i merenja (*ICRU, International Commission on Radiological Units and Measurements*), Međunarodne Komisije za radiološku zaštitu (*ICRP, International Commission on Radiological Protection*) i drugih.

#### 3.3.1. EKSPOZICIONA DOZA JONIZUJUĆEG ZRAČENJA

Ekspoziciona doza ili kraće ekspozicija se odnosi samo na x- i gama-zračenje i njihovo jonizaciono dejstvo u vazduhu. Ova fizička veličina meri sposobnost zračenja da jonizuje vazduh. Izražava se relacijom:

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (16)$$

gde je dQ apsolutna vrednost ukupnog naelektrisanja svih jona istog znaka u vazduhu, kada su svi elektroni i pozitivni joni oslobođeni fotonima jonizujućeg zračenja u elementu zapremine vazduha mase dm potpuno zaustavljeni u vazduhu [2].

Jedinica ekspozicione doze je jedan Kulon po kilogramu (1 C/kg) ozračenog vazduha. Ovo je jedinica u SI sistemu i za sada nema posebno ime, a vansistematska jedinica koja je vrlo poznata i povezana sa ovom jedinicom je Rendgen, R, a veza je data sledećim odnosom:

$$1R = 2,58 \cdot 10^{-4} \frac{C}{kg}, \text{ odnosno } 1 \frac{C}{kg} = 3876 R \quad (17)$$

### 3.3.2. APSORBOVANA DOZA

Predpostavimo da imamo materiju mase  $m$  kroz koju prolazi zračenje i da pri prolazu po svakom kilogramu mase preda energiju  $E_{\text{predano}}$  (u Džulima, J). Odnos te energije i mase  $m$  nazivamo apsorbovanom dozom, i označavamo sa  $D$ :

$$D = \frac{E_{\text{predano}}}{m} \quad (18)$$

Jedinica za merenje apsorbovane doze je jedan Džul po kilogramu (1 J/kg), a naziva se Grej (*Gray*), oznake Gy [2], dakle:

$$1 \text{ Gy} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ kg}} \quad (19)$$

Treba napomenuti da nije svejedno o kojoj vrsti zračenja se radi, dakle, da li je u pitanju alfa, beta ili gama zračenje. Iskustvo nam govori da ukoliko imamo alfa izvor zračenja u blizini, nećemo imati nikakve posledice, jer se kod ovog zračenja sva jonizacija dogodila u vazduhu između izvora i kože, pa tako ne dolazi do apsorpcije energije u telu nego van tela. Dalje, ukoliko imamo gama emiter u blizini tela, ovo zračenje će se slabo apsorbovati u vazduhu koji ima manju gustinu od tkiva, i uglavnom će se apsorbovati u tkivu i organima. Sasvim drugi slučaj imamo ukoliko unesemo izvor zračenja u telo, bilo da ga progutamo ili udahnemo. Reč je o unutrašnjem zračenju. Energija koju odašilje alfa izvor se u potpunosti apsorbuje u blizini samog izvora. U tom slučaju ćemo imati veliku energiju oslobođenu na maloj zapremini, mala masa, i kao krajnji zaključak imamo veliku apsorbovanu dozu, pa je štetnost takvog zračenja velika. Ako progutamo gama izvor on će emitovati fotone koji će napustiti telo, a samo mali deo energije ostaje u telu pa je doza manja. Takođe treba napomenuti još jednu činjenicu a to je da nisu sva tkiva jednako osetljiva na zračenje. Neka su više osetljiva, a neka manje. Na kraju pri oceni štete određene vrste zračenja treba uzeti i ovu osetljivost u obzir. Ovo su razlozi uvođenja još dve vrste doza, a to su ekvivalentna doza i efektivna doza.

### 3.3.3. LINEARNI TRANSFER ENERGIJE, LET (*Linear Energy Transfer*)

Linearni transfer energije (LET) predstavlja energiju apsorbovanu od strane sredine po jedinici dužine puta (najčešće se izražava u keV/μm) [4]. Za datu sredinu, LET je proporcionalan kvadratu naelektrisanja čestice i obrnuto srazmeran kinetičkoj energiji čestice:

$$LET \sim \frac{q^2}{E_k} \quad (20)$$

Tako, spore čestice sa višestrukim naelektrisanjem, kao na primer spore alfa čestice, imaju najviše vrednosti LET-a. Neutroni, protoni, alfa čestice, i teški joni spadaju u takozvana *high* LET (eng. *high* – visoko) zračenja sa vrednostima LET između 3 i 200 keV/μm. Fotoni, gama zraci, elektroni i pozitroni spadaju u *low* LET (eng. *low*- nisko) zračenje sa vrednostima od 0,2 do 3 keV/μm. *High* LET zračenje je mnogo više efikasnije u stvaranju bioloških oštećenja nego *low* LET. Fotoelektroni stvoreni u tkivu mogu da kreiraju stotine jonskih parova. Ova uložena energija može prekinuti deo biološki važnih molekula kao što je DNK i tako modifikovati funkciju ćelije. Kada se razmatraju biološki efekti zračenja, totalna količina apsorbovane energije (apsorbovana doza) i efektivnost ovog zračenja na stvaranje biološke štete (LET) se moraju uzeti u obzir.

### 3.3.4. EKVIVALENT DOZE, H, I EKVIVALENTNA DOZA ZA ORGAN ILI TKIVO, H<sub>T</sub>

Apsorbovana doza sama nije dovoljna da bi se njome mogla naznačiti verovatnoća nastajanja štetnih efekata nastalih usled izlaganja jonizujućem zračenju. Usled toga je u oblasti zaštite od jonizujućeg zračenja uvedena nova radijaciona veličina koja može bolje da opiše uslove nastajanja štetnih efekata, a to je ekvivalent doze, H. Ekvivalent doze je veličina koja predstavlja proizvod apsorbovane doze zračenja, D, i i izvesnih modifikujućih faktora, takozvanog faktora kvaliteta, Q, i proizvoda svih drugih modifikujućih faktora, N:

$$H = DQN \quad (21)$$

Ovaj proizvod se odnosi na neku posmatranu tačku tkiva, što znači da za neku susednu tačku možemo imati već druge vrednosti ekvivalenta doze. Faktor kvaliteta u zavisnosti od posmatrane vrste zračenja može imati različite vrednosti [2]. Preporučene vrednosti za faktor kvaliteta, Q, su navedene u tabeli 1.

Tabela 1. Vrednosti faktora kvaliteta za različita zračenja

Vrsta zračenja	Faktor kvaliteta, Q
x-zračenje, gama zračenje i elektroni	1
Neutroni, protoni i jednostruko naelektrisane čestice	10
Alfa čestice i višestruko naelektrisane čestice	20

Veličini N je propisana jedinična vrednost (N=1), pa imamo uprošćen izraz za ekvivalent doze zračenja:

$$H = DQ \quad (22)$$

SI jedinica je ista kao i za apsorbovanu dozu zračenja i iznosi 1 J/kg, a specijalno ime za SI jedinicu ekvivalentne doze je Sivert, oznake Sv. Jedinica za apsorbovanu dozu (Gy) i za ekvivalentnu dozu (Sv) su dimenzionalno iste veličine, ali se međusobno bitno razlikuju jer veličina ekvivalentna doza u sebi sadrži i pomenuti faktor kvaliteta.

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg} \quad (23)$$

Vansistemska jedinica "rad" koja se do skoro koristila je povezana sa ovom sistemskom jedinicom preko relacije:

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Sv} \quad (24)$$

Dakle, ekvivalent doze, H, u posmatranoj tački uveden je kako bi se objasnili biološki efekti nastali usled izlaganja jonizujućem zračenju. Druga novija veličina koja se izvodi na osnovu poznavanja apsorbovane doze zračenja za određeno tkivo ili organ se zove ekvivalentna doza, H<sub>T,R</sub>.

Ekvivalentna doza  $H_{T,R}$  u posmatranom tkivu ili organu T, nastala usled zračenja R, jednaka je:

$$H_{T,R} = W_R \cdot D_{T,R} \quad (25)$$

gde je  $D_{T,R}$  prosečna vrednost apsorbovane doze zračenja R u tkivu T, a  $W_R$  se naziva radijacioni težinski faktor za datu vrstu zračenja R.

$W_R$  je bezdimenziona veličina, tako da je jedinica ekvivalentne doze ista kao i jedinica apsorbovane doze, odnosno J/kg, a naziv jedinice je isti kao i za ekvivalent doze, Sivert, Sv.

Vrednosti radijacionih težinskih faktora zavise od vrste i kvaliteta zračenja, bilo da je u pitanju spoljašnje ili unutrašnje zračenje. Vrednosti  $W_R$  za određene vrste zračenja određenih energija date su u tabeli 2. Ove vrednosti su vrlo kompatibilne sa vrednostima faktora kvaliteta, Q koje su u vezi sa vrednostima LET-a. Za sve vrste zračenja koje imaju nizak LET odabrane su jedinične vrednosti za radijacioni težinski faktor [2].

Tabela 2. Vrednost radijacionog težinskog faktora za različita zračenja određenih energija

Vrsta i energija zračenja	Radijacioni težinski faktor, $W_R$
Fotoni (svih energija)	1
Elektroni i mioni (svih energija)	1
Neutroni, energija $<10\text{keV}$	5
10keV do 100keV	10
$>100\text{keV}$ do 2MeV	20
$>2\text{MeV}$ do 20MeV	10
$>20\text{MeV}$	5
Protoni, energija $>2\text{MeV}$	5
Alfa čestice, teška jezgra, fragmenti fisije	20

Poseban slučaj je kada polje zračenja potiče od više vrsta zračenja različitih energija. Za svaku vrstu zračenja date energije u tom slučaju pridružujemo određenu vrednost radijacionog težinskog faktora, a apsorbovana doza mora biti razdeljena na pojedinačne vrednosti kojima se pridružuje odgovarajući radijacioni težinski faktor. Tada njihov zbir daje ukupnu ekvivalentnu dozu a to se predstavlja na sledeći način:

$$H_T = \sum_R W_R \cdot D_{T,R} \quad (26)$$

gde je  $D_{T,R}$  srednja apsorbovana doza od zračenja R u tkivu T.

### 3.3.5. EFEKTIVNA DOZA

Odnos između verovatnoće nastajanja stohastičkih efekata zračenja (poglavlje 5.1.2.1.) i ekvivalentne doze zračenja zavisi od tkiva ili organa koje je izloženo zračenju. Dakle, nije svako tkivo jednako osetljivo. Ovo se izražava uvođenjem još jedne radijacione veličine i još jednog težinskog faktora. Ona se zove efektivna doza i njome se na osnovu poznavanja ekvivalentne doze može opistai pomenuta zavisnost u slučaju ozračivanja različitih tkiva ili organa različitim dozama zračenja, a u cilju utvrđivanja ukupnih stohastičkih efekata. Najpre je potrebno poznavanje ekvivalentnih doza u pojedinim tkivima ili organima T kojima bi se pridružili odgovarajući težinski faktori tkiva  $W_T$  [2].

Težinski faktori tkiva  $W_T$  su izabrani tako da uniformna ekvivalentna doza za celo telo daje efektivnu dozu koja je brojno jednaka toj dozi. Znači da je zbir svih težinskih faktora tkiva jednak jedinici.

Efektivna doza se obeležava sa E, a jedinica efektivne doze je J/kg, i takođe nosi naziv Sivert.

Efektivna doza, E, predstavlja zbir proizvoda svih ekvivalentnih doza tkiva ili organa  $H_T$  (ekvivalentna doza za tkivo T) i odgovarajućih težinskih faktora tkiva  $W_T$  (težinski faktor tkiva T):

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T \quad (27)$$

S obzirom na relaciju 26 datu za  $H_T$  ovaj izraz možemo proširiti:

$$E = \sum_T W_T \sum_R W_R \cdot D_{TR} \quad (28)$$

Predložene vrednosti za težinske faktore tkiva date su tabeli 3.

Tabela 3. Vrednosti težinskog faktora tkiva za određeni organ

Tkivo ili organ, T	Težinski faktor tkiva, $W_T$
Koža	0.01
Površina kostiju	0.01
Crvena koštana srž	0.12
Gonade	0.20
Debelo crevo	0.12
Pluća	0.12
Želudac	0.12
Dojke	0.05
Jetra	0.05
Tiroidna žlezda	0.05

U tabeli 4 je prikazan pregled dozimetrijskih veličina i jedinica.

Tabela 4. Radijacione veličine, jedinice, i konverzija između starih i SI jedinica

Veličina	Definicija	SI jedinica	Stara jedinica	Konverzija
Ekspozicija, X	$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m_{\text{vaz}}}$	$2.58 \times \frac{10^{-4} \text{C}}{\text{kg}}$	1 R	$1 \text{ R} = 2.58 \times \frac{10^{-4} \text{C}}{\text{kg}}$
Apsorbovana doza, D	$D = \frac{\Delta E_{\text{ab}}}{\Delta m}$	$1 \text{ Gy} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$	1 rad	$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$
Ekvivalentna doza, H	$H = D w_R$	1 Sv	1 rem	$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$
Aktivnost, A	$A = \lambda N$	$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$	1 Ci	$1 \text{ Bq} = \frac{1 \text{ Ci}}{3.7 \times 10^{10}}$

$\Delta Q$  - naelektrisanje

R - oznaka za Rendgen

$\Delta m_{\text{vaz}}$  - masa vazduha

Gy - oznaka za Grej

$\Delta E_{\text{ab}}$  - apsorbovana energija

Sv - oznaka za Sivert

$\Delta m$  - masa sredine

Bq - oznaka za Bekerel

$w_R$  - radijacioni težinski faktor

Ci - oznaka za Kiri

$\lambda$  - konstanta raspada

N - broj radioaktivnih atoma

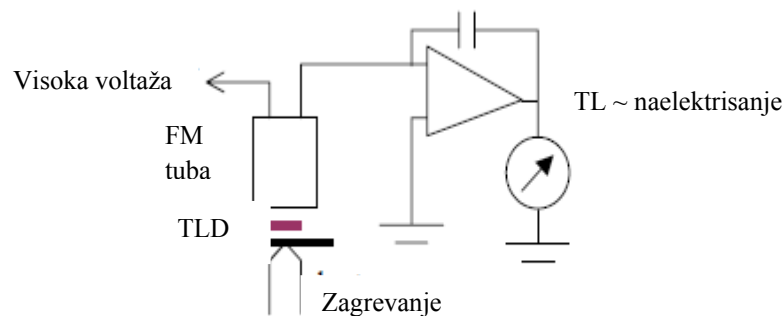
### 3.4. LIČNI MONITORING

Lični monitoring predstavlja merenje radijacione doze koju primaju osobe koje rade sa jonizujućim zračenjem. Sve osobe koje rade sa jonizujućim zračenjem bi trebale da nose lične dozimetre. Koristan je za beleženje promena u nivoima radijacije na radnom mestu, i da obezbedi potrebne informacije ukoliko dođe do slučajnog izlaganja zračenju. Najčešće korišćeni uređaji za lični monitoring su termoluminescentni i film dozimetri. Samoočitavajući džepni dozimetri i električni personalni dozimetri su dozimetri sa kojih se direktno očitavaju vrednosti i pokazuju i trenutnu stopu doze kao i dozu akumuliranu u bilo kom trenutku.

### 3.4.1. TERMOLUMINESCENTNI DOZIMETRI

Termoluminescentni dozimetri ili skraćeno TLD predstavljaju jedan od mnogobrojnih metoda koji se koriste u dozimetriji. Kao vrsta ličnog dozimetra koristi se za merenje ekspozicije jonizujućeg zračenja. TLD se sastoji od kristala koji odaje svetlost kada se zagreva. Svetlost je proporcionalna stepenu izloženosti TLD-a zračenju. Kristal je uglavnom smešten u držač, a zaposleni na nuklearnoj medicini u cilju ličnog monitoringa ga mogu nostiti kako na trupu tako i recimo na prstu itd [6].

Kada jonizujuće zračenje intereaguje sa nekim materijalom, kao što je kristal, zračenje deponuje svoju celokupnu ili deo svoje početne energije u taj materijal. Tako ono jonizuje datu sredinu, odnosno atome te sredine koji apsorbuju tu energiju, pri čemu se stvaraju slobodni elektroni i šupljine. Većina kristala sadrži nečistoće, tako da su prisutne nepravilnosti u strukturi kristalne rešetke. Nepravilnosti u kristalnoj rešeci deluju kao "zamke" na kojima slobodni elektroni mogu da budu zarobljeni. Zagrevanje kristala izaziva kristalnu rešetku da vibrira pri čemu se oslobađa zarobljeni elektron. Oslobođeni elektron se vraća na svoje prvobitno osnovno stanje oslobađajući uloženu energiju jonizacije u vidu svetlosti. Intezitet oslobođene svetlosti se meri fotomultiplikatorskim tubama. Broj izbrojanih fotona je proporcionalan količini energije jonizujućeg zračenja deponovane u kristalu.



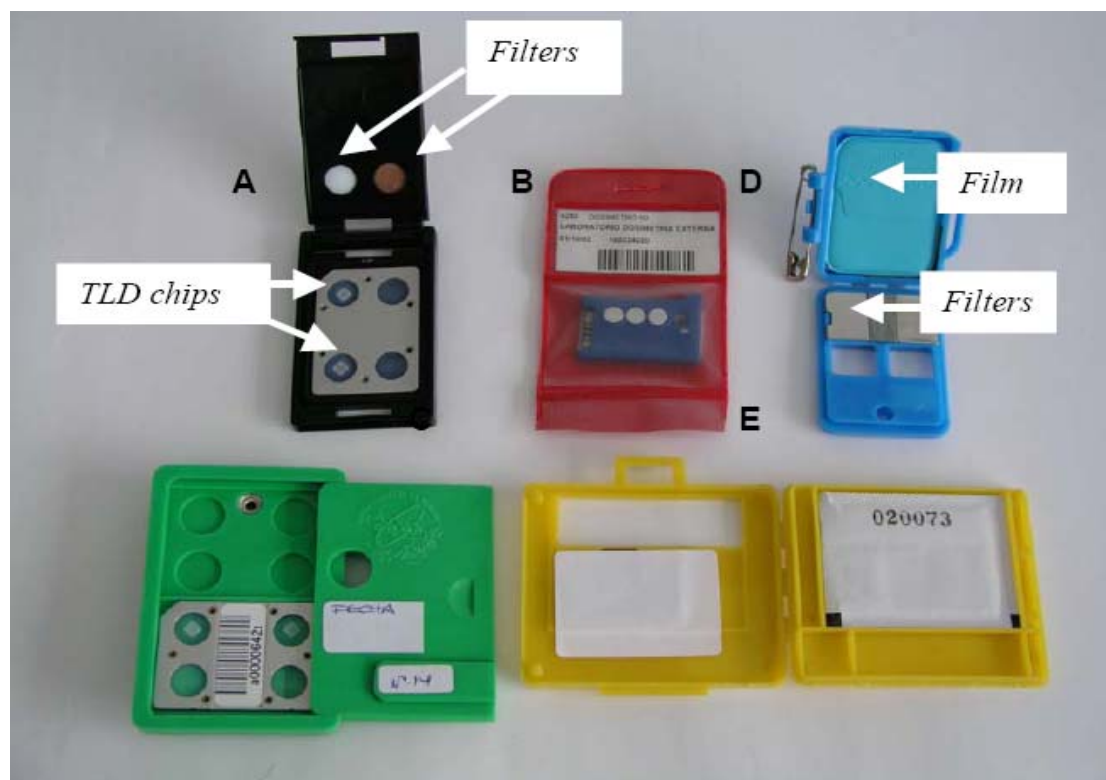
Slika 3. Šematski dijagram za očitavanja sa TLD-a

Izvor: [6]

Jednostavniji TL dozimetri zagrevaju kristale jedan po jedan pomoću vrućeg gasa. Zagrevanje se vrši u mraku, tako da se spoljašnje svetlo ne bi mešalo sa fotonima koje daje sam kristal. Postupak očitavanja zabeleženih rezultata bi podrazumevao odgovarajuće merenje TLD izlaza i poređenje rezultata sa kalibracionim krivama koje su dobijene beleženjem rezultata pri izlaganju TLD-a različitim poznatim dozama pod dobro definisanim uslovima merenja. Više sofisticirani automatizovani termoluminescentni dozimetri imaju TLD kristal koji je montiran na aluminijumsku i teflonsku karticu. Do četiri kristala sa može postaviti na jednu karticu. Svaka kartica ima jedinstveni identifikacioni broj i faktor konverzije za svaki kristal sa kojim je u vezi. Kada se koristi, postavljaju se filteri od različitih materijala, na primer plastike, bakra, aluminijuma, i debljine ispred kristala. Filteri se koriste kako bi se približio odgovor TLD materijala odgovoru

koji bi dalo tkivo, s obzirom da TLD materijal nije ekvivalentan tkivu. Svrha postojanja četiri kristala iza filtera je da se utvrdi tip i energija upadnog zračenja, pošto različiti materijali redukuju različitu količinu jonizujućeg zračenja koja padne na kristal. Četiri kristala se onda istovremeno zagrevaju toplim gasom a izlazna svetlost iz svakog kristala se očitava odvojeno. Algoritam za preračunavanje doze se primenjuje na očitane vrednosti sa kristala i izračunava se doza zračenja koju je primila individua koja nosi dozimetar [9].

Termoluminescentni dozimetri mogu meriti niske doze (0,1 mGy) kao i visoke (10 Gy). Osim za ličnu dozimetriju koriste se i za merenje izloženosti pacijenata tokom radiografskih ispitivanja.



Slika 4. Lični dozimetri: primeri TLD-a (A,B,C) i flim dozimetra (D,E)

Izvor: [6]

### 3.4.2. FILM DOZIMETRI

Film dozimetri poseduju specijalnu emulziju fotografskog filma. Film sa svojom opnom otpornom na svetlost je zatvoren u futroli ili je smešten u držač sa prozorčedom. Ovaj tip dozimetra takođe koristi različite filtere ili sisteme filtera kako bi se približio njegov odgovor na neku energiju, odgovoru tkiva. Kumulativne doze zračenja se procenjuju merenjem optičkog denziteta filma, a potom se rezultat upoređuju sa kalibracionim filmovima koji su bili izloženi poznatim dozama poznatog zračenja. Na filmove mogu negativno uticati različiti spoljašnji faktori kao na primer, temperatura, velika vlažnost, tečnosti, itd. Latentna slika u nerazvijenom filmu vremenom



bledi, pa tako postoji i vremenska ograničenost upotrebe fima, koja je najčešće tri meseca pod idealnim uslovima [6].

### 3.4.3. DIREKTNO-OČITAVAJUĆI LIČNI DOZIMETRI

Pored pasivnih koriste se i lični dozimetri sa kojih možemo direktno da očitamo dozu zračenja u bilo kom trenutku vremena. Njima možemo pratiti primljene doze iz dana u dan, i vrlo su korisni u nekim posebnim situacijama, na primer kada dodje do iznenadnog izlaganja zračenju. Ovi lični dozimetri spadaju u dve kategorije: samoočitavajući džepni dozimetri i električni personalni dozimetri (EPD) [6].

Samoočitavajući džepni dozimetri liče na olovku, a sastoje se od jonizacione komore koja se ponaša kao kondenzator. Kondenzator je potpuno napunjen pre upotrebe, a to stanje je obeleženo nulom. Pri izlaganju radijaciji u nekom intervalu vremena, jonizacija u komori prazni kondenzator i ekspozicija je direktno proporcionalna pražnjenju. Ovo se direktno očitava preko specijalnog okulara koji je ugrađen na samom dozimetru. Ipak, upotreba ovih džepnih dozimetara je opala poslednjih godina i to zbog svog malog korisnog opsega, problema sa curenjem naelektrisanja i male osetljivosti u poređenju sa električnim personalnim dozimetrima.

Elektronski lični dozimetri se baziraju na minijaturnom Gajger-Milerovom brojaču ili silicijumskom detektoru. Oni su dostupni sa opsegom merenja za energiju fotona do 30 keV. EPD pružaju trenutni prikaz akumulirane ekvivalentne doze u bilo kom trenutku. Pored vizuelne indikacije postoji i audio, naime EPD se oglašava klikom, a frekvencija takvog oglašavanja je proporcionalna stopi ekvivalentne doze. Na taj način možemo odmah ustanoviti promene u polju zračenja.



Slika 5. Samoočitavajući lični dozimetar

Izvor: [www.3endt.com/radiation equipments](http://www.3endt.com/radiation equipments)



Slika 6. EPD

Izvor: [www.3endt.com/radiation equipments](http://www.3endt.com/radiation equipments)

## 4. RADIOIZOTOPI U NUKLEARNOJ MEDICINI

### 4.1. NUKLEARNA MEDICINA

Nuklearna medicina je grana medicine koja koristi zračenje (radionuklide) kako za dijagnostiku, tako i za lečenje i istraživanje bolesti. Telo ne razlikuje radioaktivni izotop od neradioaktivnog, tako da se radionuklid ponaša isto kao i stabilni nuklidi, odnosno imaju identično hemijsko ponašanje i podležu istim biološkim procesima, pa unoseći neki radioizotop u telo možemo spolja posebnim detektorima pratiti ponašanje ovog indikatora nekog biološkog procesa.

Nuklearna medicina se javlja u 20. veku, kao rezultat razvoja prirodnih i tehničkih nauka. Nakon otkrića radioaktivnosti, zainteresovanost naučnika za radioaktivne elemente naglo raste. Razvoj proizvodnje radioaktivnih elemenata u nuklearnim reaktorima i ciklotronima, razvoj proizvodnje radiofarmaceutika, detektora i brojača radioaktivnosti, i razvoj informatičkih metoda, obezbedili su nuklearnoj medicini jak i stabilan značaj u medicini.

Danas preko 10.000 bolnica širom sveta koristi radioizotope, a oko 90% od ukupne upotrebe jeste njihova primena za postavljanje dijagnoze. Radioizotop koji se najčešće koristi jeste tehnecijum-99m.

#### 4.1.1. DIJAGNOSTIČKE TEHNIKE U NUKLEARNOJ MEDICINI

Dijagnostičke tehnike u nuklearnoj medicini koriste radioaktivne obeleživače koji emituju gama-zrake iz tela pacijenta. Ovi obeleživači su uglavnom kratkoživeći izotopi koji se vezuju za hemijska jedinjenja, tako da se na taj način mogu razmatrati specifični fiziološki procesi. Dakle, uloga radionuklida jeste da oponašaju prirodne fiziološke procese. Radionuklidi se mogu dati pacijetu putem injekcije, inhalacijom ili oralno. Oni emituju fotone koji će biti detektovani gama kamerom, koja snima organe iz različitih uglova. Kamera gradi sliku na osnovu pravaca iz kojih su emitovani fotoni.

PET, skraćeno od pozitronska emisiona tomografija, je tehnika novijeg razvoja, preciznija i sofisticiranija, a koristi radioizotope proizvedene u ciklotronima. Prve ideje PET tehnike su se pojavile pedesetih godina, dok se prvi PET skener koji je ušao u upotrebu pojavio 1975. godine. Radionuklid, koji se najčešće unosi putem injekcije, akumulira u ciljnom tkivu. Prilikom raspada, on emituje pozitron koji interaguje sa obližnjim elektronom, na taj način pozitron brzo gubi energiju i na kraju kada je gotovo sva njegova energija izgubljena, kombinuje sa elektronom, stvarajući pozitron-elektronski par, pozitronium, koji ubrzo anihilira, što dovodi do istovremene emisije dva gama kvanta jednakih energija u suprotnim pravcima. Gama kvanti se detektuju PET kamerom koja daje vrlo precizne informacije o mestu njihovog porekla. Osnova detekcije je simultano brojanje dva gama-zraka. Okružujući pacijenta detektorskim sistemom, dva detektora koja su u vremenskoj koincidenciji mogu ostvariti simultano brojanje dva gama-zraka. Poreklo emisije pozitrona a time i mesto radiofarmaceutika se može pretpostaviti da leži na liniji koja spaja dve tačke u kojima su gama-zraci pogodili detektor. Zahvaljujući savršenim prikupljanjem i obradom dobijenih informacija u toku pregleda, ono što dobijamo kao rezultat je slika distribucije

pozitronskih emitera. Koristeći radiofarmaceutik pod nazivom fluorodeoksiglukoza ili skraćeno FDG, PET ima najvažniju kliničku ulogu u onkologiji, pošto je dokazano da je to najpreciznija neinvazivna metoda za otkrivanje raka. PET se takođe koristi i u neurologiji, kardiologiji, kao i u kliničkoj farmakologiji. PET studije daju apsolutno kvantitativne informacije procesa metabolizma. Glavno ograničenje upotrebe ove tehnike je visoka cena izgradnje PET centra zajedno sa ciklotronom za proizvodnju radionuklida.

Pozicioniranje izvora radijacije u telu čini osnovnu razliku između imidžinga u nuklearnoj medicini i drugih tehnika oslikavanja kao što je imidžing x-zracima. U nuklearnoj medicini imamo informaciju o položaju i koncentraciji radioaktivnih izotopa u telu, slika organa je raspodela radioaktivnih metabolita u datom organu. Takođe je moguće i pratiti promenu raspodele u vremenu, odnosno pratiti kinetiku nekog procesa [8].

#### *4.1.2. TERAPIJA RADIONUKLIDIMA*

Ćelije koje se brzo dele su posebno osetljive na oštećenje od radijacije. Iz tog razloga, neke kancerogene izrasline mogu da se kontrolišu ili eliminišu ozračivanjem oblasti koja ih sadrži. Spoljašnje zračenje se može vršiti pomoću gama-zraka iz radioaktivnog izvora kobalta-60. Bitne karakteristike izvora Co-60 su relativno visoka energija gama-zraka, relativno dugo vreme poluživota i relativno prosta sredstva produkcije. Otkriće Co-60 teleterapeutske jedinice, koja je sad već decenijama u upotrebi, obezbedilo je ogroman porast u traganju za višim energijama fotona, pa danas ova jedinica ne predstavlja prvi plan u radioterapiji. U razvijenim zemljama se mnogo više koriste linearni akceleratori kao izvori visokoenergetskog x-zračenja.

Interna (unutrašnja) terapija radionuklidama predstavlja ugradnju malih izvora radijacije, obično gama ili beta emitera, u određenim regionima, u samom tumoru ili u neposrednoj blizini tumora. Ova radioterapija kratkog dometa je poznata pod nazivom brahiterapija. U zavisnosti od vrste malignog tumora, izvor zračenja se može ugraditi na odgovarajuće mesto samo kratak vremenski period ili trajno. Ova vrsta terapije koristi specijalne vrste katetera i aplikatora za precizno postavljanje radioaktivnog izvora. Jod-131 se često koristi za lečenje raka štitne žlezde, a takođe se koristi i u lečenju nemalignih oboljenja štitnjače. Iridijum-192 se u brahiterapiji koristi pri tretmanu glave i grudi. Implantati se proizvode u obliku žice i uvode se kroz kateter do ciljane oblasti. Nakon primenjene ispravne doze, implant žica se uklanja i odlaže u neko kućište koje poseduje odgovarajuću zaštitu. Brahiterapija je ciljna terapija, tako da izbegava ozračivanje nepotrebnih delova. Postoje dva osnovna tipa brahiterapije, i to intrakavitalna i intersticijska. Intrakavitalnom brahiterapijom radioaktivni izvor se postavlja u prostor u blizini lokacije tumora, kao što su grlić materice, vagina ili rektum, dok se kod intersticijske brahiterapije radioaktivni izvor postavlja direktno u tkivo tumora, kao što su prostata, dojka ili grlić materice.

Lečenje leukemije može da uključi transplantaciju koštane srži, u kom slučaju se koštana srž pacijenta najpre ozrači letalnom dozom zračenja pa tek onda zameni zdravom koštanom srži donora.

Mnoge terapijske procedure su palijativne, uklanjaju na primer samo bol. Za primer je terapija stroncijumom-89, kojom se oslobadja bol u kostima pacijenata obolelih od raka ovog organa.

Novo mesto zauzima ciljana alfa terapija (TAT, *Targeted Alpha Therapy*). Ona kombinuje nova dostignuća iz molekularne biologije i radionuklide koji su novi za medicinsku upotrebu. Kratak domet u tkivu visokoenergijskog alfa zračenja, znači da se veliki deo te radijativne energije odlazi u ciljane ćelije raka, kada nosilac primi radionuklid koji emituje alfa zračenje na tačno odgovarajuće mesto. Laboratorijska istraživanja, kao i klinička ispitivanja su u toku i ohrabrujuća za leukemiju, cistične gliome i melanome. Eksperimentalni razvoj terapije ovog tipa je bor neutronske zahvat pomoću bora-10 koji se koncentriše malignim tumorima u mozgu. Pacijent je tada ozračen termalnim neutronima koje bor snažno apsorbuje, proizvodeći tako visokoenergijske alfa čestice koje ubijaju ćelije kancera. Ova vrsta terapije zahteva da se pacijent dovede do nuklearnog reaktora, a ne da se radioizotopi daju pacijentu [8].

Terapija radionuklidima je postepeno postala uspešna u lečenju upornih bolesti i to sa malo toksičnih neželjnih efekata. Uz svaki terapijski postupak bitno je da se dobro proceni količina zračenja, odnosno doza koju treba da primi pacijent. Doze po terapiji su obično 20-60 Gy.

#### 4.1.3. BIOHEMIJSKA ANALIZA

Veoma je lako detektovati prisustvo ili odsustvo nekih radioaktivnih materijala iako su oni prisutni u vrlo malim količinama. S toga se radioizotopi mogu koristiti za obeležavanje molekula bioloških uzoraka *in vitro* (van tela). Patolozi su osmislili stotine testova za određivanje sastojaka krvi, seruma, urina, hormona, antigena, zahvaljujući osobini vezivanja radioizotopa. Ove procedure su poznate pod nazivom radioimuno testovi i iako je u biohemijskom pogledu složenost ovih testova velika, oprema koja se proizvodi za laboratorijsku upotrebu je veoma jednostavna za korišćenje i daje precizne rezultate [8].

#### 4.2. RADIOIZOTOPI

Mnogi hemijski elementi imaju veći broj izotopa. Izotopi nekog elementa imaju isti broj protona u njihovom atomu (atomski broj  $Z$ ), ali različite mase usled različitog broja neutrona, dakle različit atomski maseni broj,  $A$ . U neutralnom atomu, broj elektrona u elektronskom omotaču takođe odgovara atomskom broju,  $Z$ . Spoljašnji, valentni elektroni determinišu hemijska svojstva atoma.

Kada se kombinacija neutrona i protona, koja ne postoji u prirodi, veštački proizvede, atom će biti nestabilan i kao takav se naziva radioaktivni izotop ili samo radioizotop. Takođe postoje i nestabilni prirodni izotopi nastali raspadom od prvobitnog uranijuma ili torijuma. Ukupno, postoji preko 1800 poznatih radioizotopa. Trenutno se oko 200 radioizotopa redovno koristi, a većina njih se dobija veštačkim putem.

Radioizotopi se mogu proizvesti na nekoliko načina. Najčešći način dobijanja je aktivacijom neutrona u nuklearnim reaktorima usled čega sledi tzv. neutronske zahvat. Drugi radioizotopi se proizvode u akceleratorima (ciklotronima) u kojima je prisutan protonski zahvat. Nakon ovih zahvata, jezgro postaje nestabilno, i ostaje u takvom stanju određeno vreme nakon čega prelazi u novo stabilno stanje praćeno emisijom alfa i/ili beta čestice (ili pozitrona). Ove čestice mogu biti praćene i emisijom energije u obliku elektromagnetnog zračenja, naime gama-zračenjem. Reč je o radioaktivnom raspadu.

Radioaktivni produkti koji se koriste u medicini se često nazivaju radiofarmaceutici, iako oni koji se koriste u dijagnostici nemaju farmakološko dejstvo jer se unose u organizam u veoma malim količinama, pa se za njih koriste i nazivi kao što su radioobeležena jedinjenja ili radioobeleživači. Ova jedinjenja treba da budu nosioci određenih fizičko-hemijskih osobina kako bi se na određeni način distribuirali u telu, a radioaktivna zračenja koje ona emituju služe za praćenje njihove distribucije. Radiofarmaceutici mogu biti jednostavna neorganska jedinjenja, ali i veoma složena organska jedinjenja. Radioobeležena jedinjenja se najčešće koriste u vidu rastvora. Na raspodelu radiofarmaceutika u organizam zatim stepen vezivanja u pojedinim organima i na brzinu eliminacije utiču hemijski oblik jedinjenja i stepen oksidacije, tj. valentno stanje radioizotopa.

#### 4.2.1. PROIZVODNJA RADIOIZOTOPA

**1. Proizvodnja radioizotopa u nuklearnim reaktorima.** Cepanjem uranovih jezgara u nuklearnom reaktoru se oslobađa veliki broj neutrona čija je kinetička energija mala, ali s obzirom da se radi o električni neutralnim česticama, na njih ne deluje odbojno električno polje jezgra, pa oni mogu biti zahvaćeni od strane jezgra stabilnog izotopa i učiniti ga nestabilnim [3]. Dakle, u nuklearnom reaktoru bombardujemo jezgra stabilnog izotopa sporim neutronima, pri čemu nastaju atomi susednog izotopa istog elementa ( $Z$  se ne menja, menja se  $A$  i to se povećava za jedan). S obzirom da su ovi bombardovani atomi ustvari deo određenog molekula oni se mogu hemijski odvojiti. Pri apsorpciji neutrona u nekom od atoma izvorni molekul se raspadne, pa je nastali izotop sada deo nekog drugog molekula i lako ga je odvojiti od inertnog izotopa, iako imaju jednaka hemijska svojstva. Tako se za upotrebu u medicini proizvodi metastabilni izotop indijuma  $^{113m}\text{In}$ . Metastabilni izotopi imaju jezgro koje dugo ostaje u pobuđenom stanju, a takva jezgra su dobri radioobeleživači. Druga mogućnost je dobijanje izotopa koji  $\beta^-$  raspadom postaje atom sa povećanim  $Z$  za jedan, ali u metastabilnom stanju. Primer koji se mnogo koristi u medicini je tehnicijum  $^{99m}\text{Tc}$ .

**2. Jezgra bombardovana česticama ubrzanim u akceleratorima.** Ako stabilno jezgro bombardujemo ubrzanim pozitivno naelektrisanim česticama, dobijamo radioaktivni izotop koji je emiter pozitrona odnosno  $\beta^+$  čestica. Ova pozitivno naelektrisana čestica mora imati veliku energiju od nekoliko MeV ili nekoliko desetina MeV, kako bi savladala jaku odbojnu elektrostatičku silu i prodrla u jezgro. Za dobijanje ovako velikih energija, čestice se ubrzavaju u akceleratorima. Akceleratori su uređaji za ubrzavanje naelektrisanih čestica i izgrađuju se po principima fizičkih zakona koji opisuju zakone ponašanja naelektrisanih čestica u električnom i magnetnom polju. Kada je u pitanju dijagnostika, onda se ove ubrzane čestice koriste za proizvodnju radioaktivnih izotopa, dok se u terapiji one koriste za neposredno ozračivanje tumora. Dakle, možemo uvideti veliki značaj ovih uređaja, pa ćemo se zadržati malo na njihovoj građi.

Brojni tipovi akceleratora su se izgradili za istraživanje u nuklearnoj fizici i fizici visokih energija. Tipovi akceleratora se razlikuju po načinu na koji proizvode ubrzavajuće električno polje i po tome kako polje utiče na česticu koju treba ubrzati. Kada je u pitanju ubrzavajuće električno polje, postoje dva osnovna tipa akceleratora: elektrostatički i ciklični. Primeri elektrostatičkih akceleratora koji se koriste u medicini su površne i ortovoltazne rendgen cevi i neutronske generatori, a najpoznatiji primeri cikličnih akceleratora su linearni akceleratori, mikrotroni, betatroni i ciklotroni. Radioizotopi koji su, između ostalog, bitni i za nuklearnu medicinu se dobijaju u ciklotronima.

Ernest Lorenc (E.O. Lawrence) je 1930. godine razvio ciklotron za ubrzavanje jona do kinetičkih energija od nekoliko MeV. Činjenica da je ugaona frekvencija kretanja ( $\omega = Bq/m$ )

nezavisna od brzine kretanja jona ako je masa stalna, je osnovna stavka za ubrzavanje jona u ciklotronu. U početku, su ciklotroni bili korišteni za osnovna istraživanja u oblastima nuklearne fizike, ali su kasnije našli važnu primenu u proizvodnji radioizotopa za nuklearnu medicinu, a takođe i za proizvodnju protonskih i neutronskih snopova koji se koriste u radioterapiji. Ciklotroni su zaslužni za proizvodnju FDG-a (4.3.3.) koji se koristi za PET/CT mašine, čiji je značaj danas ogroman.

Ciklotron se sastoji od magneta unutar kojeg su smeštene dve šuplje elektrode u obliku slova D. Ove elektrode su spojene na generator visokofrekventnog napona. Magnetno polje i električno polje su međusobno normalni. Ceo sistem je smešten u evakuisanu komoru (pritisak oko 1 mPa). Izvor ubacuje naelektrisane čestice u prostor između dve šuplje elektrode. Joni se ubrzavaju pod dejstvom električnog polja između elektroda, pa potom ulaze u elektrode gde nema električnog polja. Magnetno polje je normalno na putanju naelektrisanja, pa se čestica unutar elektrode kreće po kružnoj putanji stalnom brzinom. Nakon polukružne putanje, jon ponovo ulazi u električno polje između elektroda, koje je u međuvremenu promenilo smer, tako da je opet ubrzavajuće za posmatranu česticu. Svako ubrzanje između elektroda uzrokuje sve veći radijus putanje unutar elektroda, i period kretanja se menja. Frekvencija promenljivog napona na generatoru, frekvencija ciklotrona, je zbog toga jednaka kružnoj frekvenciji kretanja jona u magnetnom polju. Jon se unutar ciklotrona kreće po spirali, a na izlasku se jon velike energije izbacuje iz ciklotrona po tangenti na putanju [3].

Generalno pravilo je da je teže dobiti radioizotop u ciklotronu nego u reaktoru. Reakcije u ciklotronu su manje produktivnije i manje predvidive nego nuklearne reakcije koje su prisutne u nuklearnim reaktorima. Ciklotroni proizvode neutronski deficitne radioizotope, dok reaktori daju radioizotope bogate neutronima. Tako reaktor i ciklotron dopunjuju jedan drugog u zadovoljavanju potreba društva i daju čitav niz radioizotopa.

Postoji par radioizotopa koji se mogu proizvesti na oba načina, dakle i u ciklotronu i u reaktoru, a takav je i tehnicijum-99m koji se najčešće koristi u medicini. Otkriće da se tehnicijum-99m može proizvesti i u ciklotronu, skoro da i nije umanjilo upotrebu reaktora za ovu svrhu (detaljnije u 4.3.1).

**3. Radioaktivna jezgra nastala fisijom.** Kada teško jezgro,  $A$  veće od 200, zahvati spor neutron, verovatniji je raspad na dve podjednako velike čestice nego na indukovani alfa raspad. Ovaj proces se naziva fisija a radioaktivna jezgra koja nastaju ovim postupkom su npr. radioaktivni jod,  $^{131}\text{I}$ , i radioaktivni molibden,  $^{99}\text{Mo}$ .

U tabeli 5 su dati radioizotopi koji se dobijaju u reaktorima, a u tabeli 6 oni dobijeni u ciklotronima, kao i njihove osnovne karakteristike.

Tabela 5. Radioizotopi u medicini koji se proizvode u nuklearnim reaktorima:

Naziv radioizotopa	Oznaka radioizotopa	Vreme poluraspada	Upotreba u medicini
Bizmut-213	<sup>213</sup> Bi	46 min.	Target alfa terapija (TAT)
Hrom-51	<sup>51</sup> Cr	28 dana	Obeležava crvena krvna zrnaca
Kobalt-60	<sup>60</sup> Co	5,27 god.	Ranije se koristio za spoljašnju zračnu radioterapiju, danas više za sterilizaciju
Disprozijum-165	<sup>165</sup> Dy	2 h	Tretman artritisa
Erbijum-169	<sup>169</sup> Er	9,4 dana	Oslobađanje od bola u zglobovima
Holmijum-166	<sup>166</sup> Ho	26 h	Dijagnostika i lečenje jetre
Jod-125	<sup>125</sup> I	60 dana	Brahiterapija (prostata i mozak), za procenu stope filtracije bubrega, dijagnoza tromboze krvnih sudova u nozi
Jod-131 *	<sup>131</sup> I	8 dana	Snimanje štitne žlezde, terapija raka štitnjače, dijagnostika abnormalne funkcije jetre, bubrega, protoka krvi i opstrukcije urinarnog trakta
Iridijum-192	<sup>192</sup> Ir	74 dana	Izvor unutrašnje radioterapije za tretman kancera
Gvožđe-59	<sup>59</sup> Fe	46 dana	Studije metabolizma gvožđa u slezini
Lutecijum-177	<sup>177</sup> Lu	6,7 dana	Kao gama emiter se koristi za snimanje, a beta zračenje za terapiju malih, npr. endokrinih, tumora.
Molibden-99 *	<sup>99</sup> Mo	66 h	Predak u generatorima za proizvodnju Tc-99m
Paladijum-103	<sup>103</sup> Pd	17 dana	Pravljenje permanentnih implanata semena u brahiterapiji za početnu fazu kancera prostate
Fosfor-32	<sup>32</sup> P	14 dana	Beta emiter. Za lečenje bolesti viška crvenih krvnih zrnaca
Kalijum-42	<sup>42</sup> K	12 h	Određivanje zamenljivog kalijuma u koronarnom krvotoku
Renijum-186	<sup>186</sup> Re	3,8 dana	Smanjuje bol kod raka kostiju
Renijum-188	<sup>188</sup> Re	17 h	Beta ozračivanje koronarnih arterija
Samarijum-153	<sup>153</sup> Sm	47 h	Beta emiter. Efikasan za tretman raka dojke i prostate
Selen-75	<sup>75</sup> Se	120 dana	U obliku selen-metionina za proučavanje proizvodnje enzima za varenje

Natrijum-24	$^{24}\text{Na}$	15 h	Studije elektrolita u telu
Stroncijum-89 *	$^{89}\text{Sr}$	50 dana	Beta emiter. Smanjuje bol kod raka prostate i kostiju
Tehnicijum-99m	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6 h	Za imidžing skeleta i srčanog mišića, mozga, štitne žlezde, pluća, jetre, slezine, bubrega...
Ksenon-133 *	$^{133}\text{Xe}$	5 dana	Studije plućne ventilacije
Iterbijum-169	$^{169}\text{Yb}$	32 dana	Studije cerebrospinalnih tečnosti u mozgu
Iterbijum-177	$^{177}\text{Yb}$	1,9 h	Predak Lu-177
Itrijum-90 *	$^{90}\text{Y}$	64 h	Čist beta emiter, ima sve veći značaj u terapiji

Označeni sa \* predstavljaju produkte fisije



Tabela 6. Radioizotopi u medicini koji se proizvode u ciklotronima:

Naziv radioizotopa	Oznaka radioizotopa	Vreme poluraspada	Upotreba u medicini
Ugljenik-11	$^{11}\text{C}$	20,38 min	Ovo su pozitronski emiteri koji se koriste u PET-u za izučavanje fiziologije i patologije mozga, u psihijatrijskim i neuropsihijatrijskim studijama. Uloga u kardiologiji. F-18 u FDG-u je postao veoma važan u detekciji karcinoma, kao i za praćenje progressa u toku lečenja, korišćenjem PET-a.
Azot-13	$^{13}\text{N}$	10 min	
Kiseonik-15	$^{15}\text{O}$	122 s	
Fluor-18	$^{18}\text{F}$	109,77 min	
Kobalt-57	$^{57}\text{Co}$	272 dana	Marker za procenu veličine organa; in-vitro dijagnostički setovi
Bakar-64	$^{64}\text{Cu}$	13 h	Proučavnje genetskih oboljenja koja utiču na metabolizam bakra; PET imidžin tumora; terapija
Bakar-67	$^{67}\text{Cu}$	2,6 dana	Beta emiter u terapiji
Galijum-67	$^{67}\text{Ga}$	78 h	Snimanje tumora i lokalizacija inflamatornih lezija
Galijum-68	$^{68}\text{Ga}$	68 min	Pozitronski emiter u PET i PET-CT skenerima.
Germanijum-68	$^{68}\text{Ge}$	271 dan	Predak u generatorima za dobijanje Ga-68
Indijum-111	$^{111}\text{In}$	2,8 dana	Specijalističke studije dijagmostike mozga, infekcija, debelog creva
Jod-123	$^{123}\text{I}$	13 h	Dijagnostika funkcije štitnjače, čist gama emiter, beta zračenja I-131
Jod-124	$^{124}\text{I}$	4,18 dana	Trejser
Kripton-81m	$^{81\text{m}}\text{Kr}$	13 s	Rana dijagnoza plućnih bolesti i funkcionisanje pluća
Rubidijum-82	$^{82}\text{Rb}$	1,26 min	Pogodan PET agent za snimanje perfuzije miokarda
Stroncijum-82	$^{82}\text{Sr}$	25 dana	Predak u generatorima za dobijanje Rb-82
Talijum-201	$^{201}\text{Tl}$	73 h	Dijagnoza nepravilnog rada srčanog mišića, lokalizacija nekvalitetnih limfoma

### 4.3. RADIOFARMACEUTICI U DIJAGNOSTICI

Sa hemijske tačke gledišta, svaki organ u našem telu se ponaša drugačije. Hemičari i lekari su identifikovali velik broj jedinjenja koje apsorbuju određeni organi. Na primer, štitasta žlezda apsorbuje jod, mozak glukozu i tako dalje. Dakle, cilj je otkriti koji se radioizotop vezuje za neku biološki aktivnu supstancu. Kada se radioaktivna forma koja odgovara određenoj supstanci ubaci u telo, uključuje se u normalni biološki proces i izlučuje na uobičajene načine.

Radiofarmaceutici u dijagnostici se koriste za ispitivanje protoka krvi u mozgu, funkcionisanje jetre, pluća, srca, bubrega, za ispitivanje rasta kostiju, i za potvrđivanje drugih dijagnostičkih procedura.

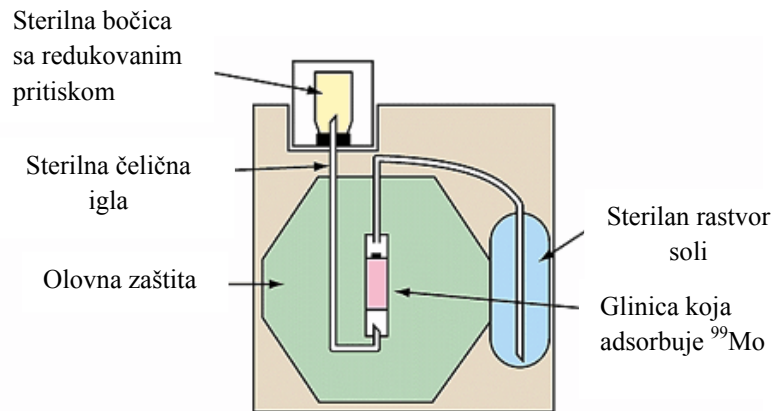
Količina radiofarmaceutika koja se daje pacijentu je taman dovoljna za posmatranje potrebnih stvari pre nego što li se raspadne. Radijaciona doza koja se pri tome primi je medicinski beznačajna. Pacijent ne oseća nikakve nelagodnosti tokom pregleda i posle veoma kratkog perioda gube se svi tragovi koji pokazuju da je test obavljen. Dakle, uzimajući u obzir da je ovo neinvazivna dijagnostička tehnika, kao i da nam pruža mogućnost da posmatramo funkcionisanje organa, lako je shvatiti koliko je ovo koristan i moćan metod za uspostavljanje dijagnoze.

Ovakvi radioizotopi moraju emitovati gama-zrake dovoljne energije koji će napustiti telo i koji moraju imati period poluraspada dovoljno kratak kako bi se raspali ubrzo nakon njihovog unošenja u organizam.

Radioizotop koji se najviše koristi u medicini, gotovo u 80% od svih procedura je tehnecijum-99m. Bolnice se snabdevaju generatorima tehnecijuma. Generatorski sistem se koristi i za rubidijum-82 koji se koristi u PET-u, a dobija se iz stroncijuma-82 sa periodom poluraspada od 25 dana. Generatori se lako transportuju od mesta gde se nalaze uređaji za proizvodnju radioizotopa, tj. od nuklearnih reaktora i ciklotrona do institucija koje pomenute uređaje ne poseduju i oni služe kao izvor kratkoživećih radioizotopa. Generatori radioizotopa se zasnivaju na principu radioaktivnog raspada dugoživećeg roditelja i nastajanja kratkoživećeg potomka. Roditelj i potomak bi trebali da se u pogledu hemijskih osobina bitno razlikuju kako bi se mogli brzo i jednostavno odvojiti. Bitno je da ovi generatori budu jednostavni za transport i upotrebu i da budu sterilni i nezapaljivi. Generator uglavnom ima mogućnost za veliki broj ponovljenih ciklusa dobijanja potomka uz što bolju reproduktivnost [8] .



A



B

Slika 7. Generator: A) spoljašnji izgled; B) struktura generatora

Izvor: [www.frankswebpace.org.uk/ScienceAndMaths/physics](http://www.frankswebpace.org.uk/ScienceAndMaths/physics)

Generator se sastoji od plastične ili staklene cevi- kolone, na čijem se dnu nalazi porozno staklo. Kolona se puni adsorbensom kao što je aluminijum-oksidi ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), ili neki drugi materijal koji menja jone. Na materijal kojim je napunjena kolona adsorbuju se radionuklidi roditelja i njihovim raspadom dobićemo radioizotop potomka. Radioaktivnost potomka se povećava sve dok se ne uspostavi privremena ili stalna ravnoteža. Potomak se slabije vezuje za adsorbens, s obzirom na razliku hemijskih osobina sa roditeljom, pa se tako potomak posebnim rastvaračem ili rastvorom spira sa kolone, a roditelj i dalje ostaje vezan za adsorbens. Nakon elucije (spiranja) aktivnost potomka ponovo počinje da raste do uspostavljanja ravnoteže i ceo postupak se ponavlja. U eluatu dobijamo čist potomak bez nosača.

Za PET imidžing, glavni radiofarmaceutik je FDG, fluorodeoksiglukoz, koji koristi F-18 kao obeleživač sa vremenom poluraspada nešto ispod 2 sata. FDG se inkorporira u ćeliju i predstavlja dobrog indikatora ćelijskog metabolizma. Ovaj radioizotop se proizvodi u ciklotronima, a s obzirom na kratko vreme poluraspada, bitno je da laboratorije koje koriste skeniranje PETom imaju ciklotron u svojoj blizini. Razvijeni medicinske institucije imaju svoje tzv. *baby* ciklotrone.

#### 4.3.1. TEHNIČIJUM- $^{99m}\text{Tc}$

Tehnicijum je srebrnasto sivi metal. Zapravo, sav tehnicijum na Zemlji je nastao ljudskom aktivnošću koja uključuje rad sa materijalima podložnim fisiji. Carlo Perrier i Emilio Segrè su ga izolovali 1937. Nastao je bombardovanjem atoma molibdena neutronima ubrzanim u ciklotronu.

Postoje 22 poznata izotopa tehnicijuma sa atomskim masama od 90 do 111. Svi izotopi tehnicijuma su radioaktivni. On je jedan od dva elementa sa  $Z < 83$  koji nema stabilnih izotopa; drugi je prometijum ( $Z = 61$ ). Tehnicijum ima tri dugoživeća radioaktivna izotopa:  $^{97}\text{Tc}$  ( $T_{1/2} = 2.6 \times 10^6$  godina),  $^{98}\text{Tc}$  ( $T_{1/2} = 4.2 \times 10^6$  godina) i  $^{99}\text{Tc}$  ( $T_{1/2} = 2.1 \times 10^5$  godina).  $^{99m}\text{Tc}$ , "m" je oznaka za

metastabilni izotop, ( $T_{1/2} = 61$  days) je izotop obeleživač. Najkorisniji izotop tehnicijuma je  $^{99m}\text{Tc}$  ( $T_{1/2} = 6.01$  sati) koji se koristi u mnogim testovima putem radioizotopa u medicini. Ovaj radioizotop ima gotovo idealne karakteristike za skeniranje u nuklearnoj medicini:

- Tehnicijum-99m se raspada izometrijskim prelazom, procesom u kom  $^{99m}\text{Tc}$  prelazi u  $^{99}\text{Tc}$ , emitujući gama zračenje i niskoenergijske elektrone. Pošto nema visokoenergijskog beta zračenja, radijaciona doza u pacijetu je mala.

- Emitovani gama-zraci lako napuštaju telo pacijenta i detektuju se precizno gama kamerom.

- Vreme poluživota je 6 h, a to je dovoljno dugo da bi se pregledao metabolički proces, a opet dovoljno kratko da minimizira radijacionu dozu u pacijentu.

- Ponaša se kao tragač tako što se ugradi u biološki aktivnu supstancu, na taj način verifikuje koncentraciju supstance u tkivu ili organu koji je od interesa [4].

Tehnicijum-99m se koristi u nuklearnoj medicini za lociranje ćelija kancera kao i za druge imidžing metode. On predstavlja radioaktivni obeleživač koji se daje intravenozno ili putem injekcije. Koristi se za imidžing skeleta, srca, mozga, tiroidne žlezde, pluća, jetre, slezine, bubrega, mokraćnog mehura, koštane srži, pljuvačnih i suznih žlezda, infekcija i brojnih specijalizovanih medicinskih studija.

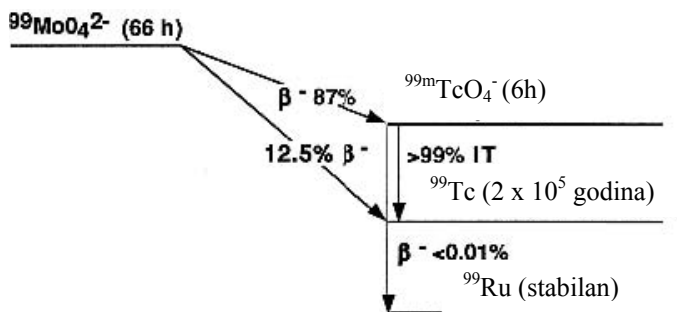
U nuklearnim reaktorima se tehnicijum dobija bombardovanjem molibdena-98 neutronima. Kada molibden-98 zahvati neutron, prelazi u molibden-99. Molibden-99, sa vremenom poluraspada od 67 h se raspada beta raspadom na tehnicijum-99m (detaljnije u „ $^{99}\text{Mo}$ - $^{99m}\text{Tc}$  generator,,).

S druge strane, ciklotroni ne proizvode molibden-99, nego proizvode tehnicijum-99m direktno. Dakle, bilo bi potrebno da se ciklotron nalazi u medicinskoj ustanovi u kojoj se vrše testovi pregleda. Jasan je razlog zašto se moćni ciklotroni koji postoje u svetu ne koriste za proizvodnju ovog izotopa– radioizotop ne bi preživeo put do laboratorije u kojoj se vrši njegovo apliciranje. Kada bi se oslonili na ciklotronsku proizvodnju tehnicijuma, imali bismo ozbiljne negativne posledice. Brzi raspad Tc-99m bi ograničio broj pacijenata u jednom danu i sprečio korišćenje tehnike nuklearne medicine u vanrednim situacijama jer bi zalihe bile iscrpljene. Kao posledicu bismo imali dugačke liste pacijenata koji su na čekanju za Tc-99m. Takođe i ekonomski faktor ograničava ciklotronsku proizvodnju. Naime, sirovine za proizvodnju u reaktoru su daleko jeftinije (par dolara po kilogramu) i lako dostupne, dok je početni materijal za ciklotonsku proizvodnju redak oblik molibdena koji mora biti na visokom nivou čistoće izotopa (>99%), a kao takav je retko dostupan i koštao bi milione dolara po kilogramu. Tragovi drugih izotopa molibdena u sirovinama mogli bi da smanje čistoću tehnicijuma-99m. Postoji niz nuklearnih reakcija koje pritom konkurišu, pa bismo imali i nepoželjne dugoživeće radioizotope tehnicijuma, posebno Tc-96, koji može da akumulira tokom dana. Nivo ovakve nečistoće mogao bi da pređe dozvoljenu granicu i naruši kvalitet skenirane slike. Ostali izotopi tehnicijuma bi izložili pacijenta većim radijacionim dozama. Samo 0,1% Tc-96 je neophodno pre nego što se radijaciona ekspozicija pacijenta udvostruči. Zaključak je da je proizvodnja tehnicijuma-99m tehnički izvodljiva u ciklotronima, ali je nepoželjna zbog navedenih razloga.

Granice nuklearne medicine se neprekidno proširuju i van dijagnoza bolesti sa Tc-99m.

#### 4.3.2. $^{99}\text{Mo} - ^{99\text{m}}\text{Tc}$ GENERATOR

Takozvani moli-generator je jedan od prvih i do danas najčešće korišćen generator kratkoživećeg radionuklida. Molibden-99 se dobija ozračivanjem molibdena-98 u reaktoru (n,  $\gamma$ -reakcija) ili kao jedan od proizvoda fisije urana-235. Radionuklid molibden-99 ima vreme poluraspada od 67 sati i  $\beta^-$ -emisijom 87% ovog radioizotopa prelazi u metastabilan tehnicijum-99m koji sa vremenom poluraspada od 6 sati emisijom gama-fotona od 140 KeV prelazi u osnovno stanje, tehnicijum-99. U ovom osnovnom stanju  $^{99}\text{Tc}$  je takođe radioaktivan i sa vremenom poluraspada od  $2,1 \times 10^5$  godina,  $\beta^-$  emisijom daje stabilan izotop rutenijuma.



Slika 8. Glavni prelazi raspada  $^{99}\text{Mo}$

Izvor: [6]

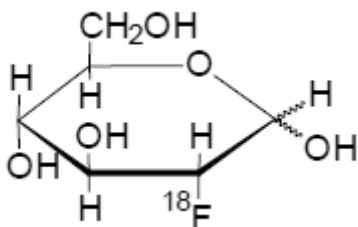
Molibden-99 se adsorbuje na koloni aluminijum-oksida u generatoru, i to u obliku jona molibdata ( $\text{MoO}_4^{2-}$ ). Ukoliko je aktivnost  $^{99}\text{Mo}$  manja, treba obezbediti veću količinu adsorbensa kako bi se obezbedio veći broj aktivnih mesta za vezivanje neradioaktivnih jona molibdata. Nakon adsorpcije radioizotopa molibdena na kolonu, počinje da se povećava broj atoma tehnicijuma-99m. Maksimum aktivnosti se postiže nakon četiri vremena poluraspada  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  i potom se uspostavlja ravnoteža, a aktivnost  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  opada shodno vremenu poluraspada roditelje.

Radionuklid tehnicijum-99m se eluira u obliku natrijum-pertehnetata,  $\text{Na}^{99\text{m}}\text{TcO}_4$ , fiziološkim rastvorom (0,9% rastvor NaCl u vodi). Posle eluiranja aktivnost tehnicijuma-99m opet raste sve do uspostavljanja nove ravnoteže, kada se ponovo vrši eluiranje. Ako je potrebno, eluiranje se može izvršiti i pre uspostavljanja ravnoteže [1].

Uz svaki generator se isporučuje i odgovarajući pribor za eluiranje i uputstvo za upotrebu. Iskorišteni generatori ostaju trajno radioaktivni jer se dugoživeći  $^{99}\text{Tc}$  vezuje na koloni, te istrošene generatore moramo tretirati kao radioaktivni otpad.

### 4.3.3. FLUORODEOKSIGLUKOZA, FDG

Fluorodeoksiglukoza, F-18, predstavlja radiofarmaceutik, emiter pozitrona koji se koristi u pozitronskoj emisionoj tomografiji. Primenjuje se intravenskim ubrizgavanjem. Aktivni sastojak 2-deoksi-2-[<sup>18</sup>F]fluoro-D-glukoza, skraćeno [<sup>18</sup>F] FDG, ima molekulsku formulu C<sub>6</sub>H<sub>11</sub><sup>18</sup>FO<sub>5</sub>.



Slika 9. Hemijaska struktura FDG-a

Izvor: [11]

Injekcija FDG-a se daje kao izotoničan, sterilan, bistar, bezbojan rastvor. Svaki ml rastvora sadrži između 0,37 do 3,7 GBq (10,0-100 mCi) deoksi-2-[<sup>18</sup>F]fluoro-D glukoze na kraju sinteze, 4.5 mg natrijum hlorida i 7.2 mg citrata jona. Rastvor se pakuje u staklene bočice i ne sadrži nikakve konzervanse [11].

FDG se raspada pozitronskom emisijom i ima vreme poluraspada, kao što je već pomenuto, od 109,7 minuta. Glavni fotoni korisini za PET imidžing su gama-fotoni od 511 keV, koji nastaju prilikom anihilacije pozitrona. FDG u PET imidžing metodama treba da naznači procenat abnormalnosti metabolizma glukoze kako bi pomogao otkrivanju stepena maligniteta kod pacijenata kod kojih se ili sumnja ili je već utvrđeno nekim drugim metodama da postoje izvesne anomalije, ili na kraju kod pacijenata kod kojih je već uspostavljena dijagnoza kancera. Indikacija FDG-a se takođe vrši kod osoba obelelih od koronarne bolesti, raznih disfunkcija srčanog mišića. Takođe se upotrebljava i za određivanje regiona abnormalnog metabolizma glukoze kod osoba sa epileptičnim napadima. Preporučena doza FDG-a za odrasle (70kg) je 185-370 MBq (5-10 mCi), kao intravenozna injekcija, za utvrđivanje maligniteta, kao i u kardiološkim testovima i za epilepsiju. Za FDG još uvek nisu osnovane optimalne stope upotrebe kao i gornja bezbedna doza. Vremenski interval između dve upotrebe injekcije FDG-a bi trebao da bude dovoljno dug da obezbedi značajne raspade, i fizičke i biološke, od prethodnog apliciranja. Konačna doza za pacijenta treba da bude izračunata upotrebom odgovarajućih faktora raspada od vremena završetka sinteze jedinjenja, a mereno odgovarajućim sistemom radioaktivne kalibracije, naravno pre same upotrebe.

Fluorodeoksiglukoza je analogna glukozi koja se koncentriše u ćelijama, a koja predstavlja izvor energije, ili u ćelijama čija zavisnost od glukoze raste u patofiziološkim uslovima.

U poređenju sa aktivnošću specifičnih organa ili tipova tkiva u pozadini, regije koje su primile manje FDG-a ili uopšte nisu reflektuju smanjenost ili nedostatak metabolizma glukoze.

Regije koje su povećale uzimanje FDG-a ukazuju na veću stopu metabolizma glukoze od normalne. Nakon intravenozne primene, FDG se brzo distribuira na sve organe u telu. Snimanje PET-om se vrši uglavnom 30 do 40 minuta nakon ovog apliciranja. U ćelijama kancera imamo karakterističan poboljšan metabolizam glukoze i to delimično zbog povećanja aktivnosti transportera glukoze, zatim usled povećane stope fosforilacije aktivnosti, smanjene fosfatne aktivnosti, ili delimične promene u ravnoteži među svim ovim procesima. Kakogod, metabolizam glukoze ćelije kancera koji se odražava akumulacijom FDG-a, pokazuje značajne varijabilnosti. U zavisnosti od vrste tumora, faze i lokacije, FDG akumulacija može biti povećana, normalna ili smanjena [11].

#### **4.4. RADIOFARMACEUTICI U TERAPIJI**

Radijaciono zračenje se koristi i u terapiji, odnosno za tretiranje obolelih ćelija, tkiva, organa.. Radioizotopi koji generišu zračenje mogu biti lokalizovani u organ od interesa na isti način kako se to radi u dijagnostici- putem radioaktivnog elementa prateći njegov uobičajeni biološki put ili preko elementa koji se vezao za određeno biološko jedinjenje. U većini slučajeva to je beta zračenje koje izaziva uništenje obolelih ćelija. Ova terapija se naziva radionuklidna terapija (RNT) ili kraće radioterapija. Terapija koja danas predstavlja glavni način lečenja je kratkodometna radioterapija, brahiterapija. Iako se radioaktivni materijali više koriste u dijagnostici nego u terapiji, radioterapija je veoma važna i široko rasprostanjena. Idealan radioizotop za radioterapiju je jak beta emiter sa tek dovoljno gama zračenja koje će obezbedi snimanje tokom tretmana.

Jod-131 i fosfor-32 su korisni za radioterapiju. Jod-131 se koristi za lečenje karcinoma štitne žlezde i drugih abnormalnih stanja štitnjače kao što je na primer hipertireoza. Za lečenje bolesti čiji je glavni simptom višak crvenih krvnih zrnaca proizvedenih u koštanoj srži, koristi se fosfor-32.

Pojavila se nova, za sad još uvek eksperimentalna procedura radioterapije koja koristi bor-10. On se koncentriše u tumoru, pacijent se tada ozrači neutronima koji bivaju apsorbovani od strane bora, nakon čega sledi emisija visokoenergijskog alfa zračenja koje ubija ćelije tumora (TAT).

Širom sveta se sprovode značajna medicinska istraživanja upotrebe radionuklida koji se vezuju za specifična biološka jedinjenja, kao što su molekuli imunoglobulina. Eventualno označavanje ovih ćelija terapijskom dozom zračenja bi moglo da dovede do regresije ili čak izlečenja nekih bolesti [8].

#### **4.5. APLIKACIJA I ČINIOCI BIODISTRIBUCIJE RADIOFARMACEUTIKA**

Kako ćemo uneti ili aplikovati u organizam radiofarmaceutik zavisi najpre od informacije o dijagnozi koju želimo dobiti i od fizičko-hemijskih osobina radionuklida. Svaki radiofarmaceutik koji se unosi u organizam mora biti apirogen, netoksičan, sterilan i da poseduje što veću moguću radiohemijsku čistoću. On mora biti čist gama-emiter i dati idealan fluks fotona jedne energije, dakle, monoenergijski. Takođe je bitno da bude metabolijski inertan, odnosno, ne bi trebao da se metaboliše ili razgrađuje pre nego što dospe do ciljnog organa.

U osnovi, radiofarmaceutici se mogu uneti u organizam svim putevima kojima se unose i lekovi, naime: peroralno, intravenski, intramuskularno, subkutano, intradermalno, udisanjem, intratekalno i intrakavitarno. Izbor načina aplikacije zavisi najmanje od dva činioca, a to je fizički

oblik radiofarmaceutika, dakle gasovito, tečno ili čvrsto agregatno stanje, i vrsta fiziološkog procesa koji se želi ispitati.

Nakon aplikacije sledi širenje i raspodela radiofarmaceutika u organizmu. U ovoj raspodeli učestvuju mnogi biološki procesi pa tako ovaj proces raspodele nazivamo biodistribucijom ili biokinetikom radiofarmaceutika [1]. Činioci biodistribucije radiofarmaceutika su sledeći:

*Radiohemijaska čistoća.* Ako radiofarmaceutik sadrži različite radioobeležene hemijske oblike, svaki od njih može imati različite puteve biodistribucije. Tako da će samo radiohemijaski čist i homogen radiofarmaceutik imati kvantitativno i kvalitativno određene puteve biodistribucije.

*Naelektrisanje molekula* radioobeleživača. Ako je molekul nepolaran bolje se rastvara u organskim rastvaračima i u lipidima nego u vodi, tako da sa lakoćom prolazi kroz ćelijske membrane. Polarni molekuli se kroz membranu mogu preneti samo aktivnim transportom pri čemu se troši metabolička energija.

*Veličina molekula* radioobeleživača je bitna odrednica kod apsorpcije i reapsorpcije u biološkom sistemu.

*Rastvorljivost* radioobeleživača u telesnim tečnostima i ćelijskim strukturama.

*Vezivanje radioobeleživača za proteine plazme.* Stepem vezivanja zavisi i od njegovih fizičko-hemijaskih osobina i od sadržaja amino-, hidroksilnih-, ili karbonskih- grupa belančevina.

*Membranski receptori* na površini ćelije koji prepoznaju i vezuju određene molekule imaju veliku ulogu u nakupljanju radiofarmaceutika u određenom tkivu i tako diktiraju biodistribuciju i kinetiku unetih radiofarmaceutika.

#### **4.6. NUKLEARNA FARMACIJA**

Nuklearna farmacija je specijalna oblast farmacije koja izdaje radioaktivna jedinjenja za upotrebu u nuklearnoj medicini. Specijalnost ove grane farmacije je to da zahteva visoko znanje jedne kompleksne oblasti. Ona je počela da se razvija sa razvojem nuklearne medicine. Kako se razvijala nuklearna medicina, potreba da neko priprema označene proizvode postala je evidentna. Dok su mnoge velike bolnice bile u mogućnosti da obučavaju svoje farmaceute o rukovanju sa radioaktivnim materijalima, manje bolnice nisu imale mogućnost da koriste procedure nuklearne medicine jer nisu imale stručni kadar koji bi pripremao potrebne doze na ekonomičan način. Kao rezultat toga, u ranim 1970. godinama, rođen je koncept centralizovane nuklearne apoteke. Kada je određeni radioaktivni materijal potreban, obučeni farmaceut mora da pripremi proizvod i obezbedi siguran prevoz do krajnjeg korisnika. Nuklearni farmaceut mora da pripremi i naznači recept, zatim da označi da li je proizvod u tečnom stanju ili u obliku kapsule i da obavezno označi aktivnost proizvoda u mCi.

Nuklearni farmaceut mora biti obučen o radijacionoj sigurnosti i o mnogim aspektima koji se odnose na pripremu jedinjenja i radioaktivnih materijala. Nuklearni farmaceut je odgovoran za radioaktivni materijal. Najčešće se on nalazi u generatoru iz kog ga vadi, dok se generator ne isprazni, a potom se ispira natrijum-hloridom kako bi se uklonio višak radioaktivnog materijala. Eluati se potom prikupljaju u zaštićene evakuisane bočice. Nakon obavljenih testova kvaliteta ovih



eluata, mogu se koristiti za finalni radiofarmaceutski proizvod. Farmaceut sve pripreme i merenja vrši iza zaštitnog olovnog zida i olovnog stakla, i nosi zaštitne rukavice [10].



*Slika 10. Nuklearna farmacija: A) priprema preparata; B) oprema*

*Izvor: [10]*

#### *4.6.1. TESTOVI KVALITETA RADIOFARMACEUTIKA*

Pre svake upotrebe određenog radiofarmaceutika potrebno je izvršiti nekoliko testova. Ti testovi nose naziv testovi kvaliteta i u njih spadaju provera čistoće radionuklida, radiohemijske i hemijske čistote i sterilnosti. Prisustvo neželjnih radionuklida u nekom uzorku odnosno radionuklidna čistota se proverava upotrebom brojača koji traga za nepoželjnim nivoima energije. Radiohemijska čistota je hemijska čistota izotopa i proverava se tankim slojem hromatografije. Hromatografijom se odvajaju komponente koje su rastvorljive u rastvoru. Hemijska čistota se odnosi na količinu nepoželjnih hemijskih sastojaka. Sterilnost znači da je radiofarmaceutik oslobođen mikroskopske kontaminacije bilo koje vrste. Svi testovi se obavljaju pre nego što se agent unese u telo pacijenta. Naravno, svaka doza se pre ubrizgavanja proverava doze kalibratorom, a ovaj test nosi naziv doze kalibrator kontrola kvaliteta. Doze kalibrator je jonizaciona komora koja meri aktivnost doze radioizotopa u MBq (mCi).



Slika 11. Doze kalibrator

Izvor: [www.3endt.com/radiation\\_equipment](http://www.3endt.com/radiation_equipment)

#### 4.7. VREMENA POLURASPADA RADIONUKLIDA

Kao što je već pomenuto, vreme poluraspada predstavlja vremenski period za koji se polovina radioaktivnih izotopa od početne vrednosti raspadne. Za dati radioizotop, vreme poluraspada, koje se može u medicinskoj fizici nazvati fizički poluperiod, je fizički određeno i nezavisno od okoline u kojem se on nalazi. Međutim, ako se radioizotop nalazi u živom organizmu, on može biti izlučen, odnosno transponovan ili eliminisan u biološkom smislu, tako da više ne predstavlja datom organizmu izvor radijacije. Za neke radioizotope koji su od medicinskog značaja, uvedena je veličina u koju je sadržan stepen izlučivanja, i koja nije toliko precizno određena kao i fizički poluperiod, a naziva se biološki poluperiod. Dakle, biološki poluperiod je determinisan odbacivanjem radionuklida iz organa, tkiva ili tela. Obeležava se sa  $T_b$ . Biološki poluperiod je određen hemijskom formom radionuklida i fiziološkom funkcijom posmatranog organa. Kada je prisutan biološki transport ili izlučivanje, period radioaktivnog materijala se smanjuje. Ova pojavu ispoljavamo uvodeći efektivni poluperiod,  $T_e$ , nekog radionuklida u bilo kom organu i on obuhvata i period poluraspada i biološki poluperiod, a relacija koja povezuje ova tri perioda je:

$$\frac{1}{T_e} = \frac{1}{T_b} + \frac{1}{T_{1/2}} \quad (29)$$

Tako na primer, ako je period poluraspada nekog radionuklida 6 sati, a biološki poluperiod 3 sata, onda će prema datoj formuli efektivni poluperiod biti 2 sata. Efektivni poluperiod je uvek kraći bilo od fizičkog ili biološkog poluperiod. Ukoliko je jedan od poluperioda mnogo duži, bilo fizički ili biološki, od drugog, efektivni poluperiod se aproksimira kraćem od ta dva, a ukoliko su ova dva perioda jednaka, efektivna vrednost uzima polovinu vrednosti biološkog ili fizičkog poluperioda [4].

Sledeća tabela daje pregled pomenutih vremena poluraspada za neke radioizotope.

Tabela 7. Fizičko, biološko i efektivno vreme poluraspada za različite radioizotope

Radioizotop	Vreme poluraspada (dana)		
	$T_{\text{fizičko}}$	$T_{\text{biološko}}$	$T_{\text{efektivno}}$
P-32	14.3	1155	14.1
Co-60	2000	10	10
Tc-99m	0.25	1	0.20
I-123	0.5	138	0.5
I-131	8	138	7,6
Cs-137	10000	70	70

## 5. BEZBEDNOST U RADU SA RADIOAKTIVNIM MATERIJALIMA U NUKLEARNOJ MEDICINI

U ovom poglavlju su razmatrani osnovni principi radiobiologije, zatim principi rizika od radijacije, zaštite od jonizujućeg zračenja, kao i programi i organizacije radijacione zaštite i sigurnosti koji moraju biti u saglasnosti sa određenim zakonima. Zaposleni na nuklearnoj medicini i drugim odeljenjima gde se koristi jonizujuće zračenje, imaju zadatak da brinu o radijacionoj zaštiti kako pacijenata, tako i zaposlenog osoblja i šire javnosti. Na kraju su navedene granice doza propisane za zaposlene na nuklearnoj medicini.

### 5.1. OSNOVNI PRINCIPI RADIOBIOLOGIJE

#### 5.1.1. BIOLOŠKI EFEKTI

Radiobiologija predstavlja granu nauke koja proučava delovanje jonizujućeg zračenja na biološka tkiva i žive organizme, odnosno efekte zračenja na biološke jedinice. Ovi efekti se nazivaju biološkim efektima. Mera biološkog efekta zavisi od količine deponovane energije i od tipa zračenja. Radiobiologija zapravo jeste kombinacija dve discipline, radijacione fizike i biologije.

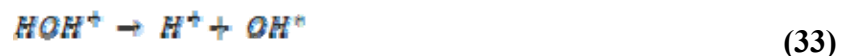
Sva živa bića se sastoje od protoplazme koju čine organska i neorganska jedinjenja, rastvorena ili suspendovana u vodi. Najmanja jedinica protoplazme koja je u stanju da nezavisno postoji je ćelija. Važno je imati na umu da su svi štetni efekti radijacije na ćelijskom i subćelijskom nivou. Stoga je neophodno razumevanje uticaja zračenja na ćelije kako bi se razumeli i efekti radijacije na čoveka ili populaciju.

Sve interakcije zračenja su funkcija verovatnoće, što bi značilo da možemo predvideti kakav će biti efekat, ali ne možemo predvideti individualne događaje kao što je uticaj zračenja na deo ćelije ili sekvencu DNK. Interakcije su neselektivne, ili slučajne po prirodi. Dalje, vreme potrebno da se prenese energija sa jedinice zračenja na materiju iznosi od  $10^{-17}$  do  $10^{-5}$  s, tako da je teško izmeriti tačno šta se dešava u procesu interakcije u nekom trenutku vremena. Interakcija radijacije sa ćelijama može biti jonizacija, u kojoj je elektron oslobođen iz atoma, ili ekscitacija, u kojoj je jedan ili više elektrona pomeren na viši energijski nivo. Većina interakcija se dešava u vodi, koja čini od 70 do 85% ćelijskog sadržaja. Ovakve interakcije se zovu indirektne interakcije. Primarni mehanizam indirektne interakcije je radioliza (razbijanje vode). Interakcije koje se direktno odigravaju na biološkim molekulim na primer DNK ili proteinima, nazivaju se direktne interakcije. Pri direktnoj interakciji, zračenje jonizuje molekule ili atome unutar makromolekula. Zbog prekida veze elektrona (kovalentna veza), menja se biološka ili hemijska funkcija tog molekula. U nekim slučajevima ovo oštećenje nije fatalno za ćeliju i može se popraviti, dok u drugim slučajevima jeste fatalno, javlja se oštećenje DNK molekula koje može biti genetsko i prenositi se budućim generacijama ćelija, naime mogu se prekinuti fosfodietarske veze, oštetiti baze i šećeri DNK, a to dalje zaustavlja transkripciju RNK usled čega se menja genetička šifra za proteine. Direktna interakcija se javlja prvenstveno sa česticam visokog LET-a. Već smo rekli da stepen biološkog efekta zavisi i od vrste zračenja. Alfa čestice su generalno efektivnije u pravljenju bioloških oštećenja nego beta čestice, x- i gama-zračenje, za istu količinu energije deponovanu u tkivu, odnosno dozu. Iako je DNK najosetljivija meta, radioliza vode je primarni efekat radijacione ekspozicije ćelije, s obzirom da svaki molekul DNK u ćeliji sadrži  $1,2 \times 10^7$  molekula vode. Kada

zračenje reaguje sa vodom, voda se jonizuje i nastaje jonski par  $\text{HOH}^+$  i  $e^-$ . Nastali elektron može da se veže sa drugim  $\text{HOH}^+$  jonom ili se može spojiti sa drugim neutralnim molekulom vode pri čemu se obarazuje slobodan radikal,  $\text{HOH}^*$ . Slobodni radikali sadrže dakle nespareni elektron pa su zbog toga hemijski nestabilni.  $\text{HOH}^*$  tako teži da se razbije na hidroksil,  $\text{OH}^\cdot$ , i na hidrogen slobodni radikal,  $\text{H}^*$ . Ovi slobodni radikali teže da se kombinuju sa kiseonikom, stvarajući hidroperoksi radikale. Hidroperoksi radikali mogu direktno napraviti biološko oštećenje ili se razložiti na hidrogen-peroksid,  $\text{H}_2\text{O}_2$ , i kiseonik:



$\text{HOH}^+$  jon može i intereagovati sa drugim  $\text{HOH}$  molekulom, stvarajući hidroksil radikal,  $\text{OH}^*$  i  $\text{H}_3\text{O}$ , ili se može razbiti na hidrogen jon,  $\text{H}^+$ , i hidroksil radikal:



U oba slučaja, hidroksil radikal se može kombinovati sa drugim hidroksil radikalom pri čemu se opet stvara hidrogen-peroksid,  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Oko dve trećine od svih bioloških efekata je prouzrokovano hidrogen-peroksidom iz ova dva procesa [5].

Oštećenje ćelije koje izaziva radijaciono zračenje se ne može razlikovati od oštećenja koja izazivaju neki drugi uzroci, kao što su hemikalije ili toplota. Zbog toga je teško tačno odrediti šta je tačno prouzrokovalo oštećenje ćelije. Ovo je važno pitanje pri izračunavanju efekata niskih nivoa radijacije koja su karakteristična za procedure u nuklearnoj medicini. Biološke promene se javljaju tek nakon latentnog perioda, tokom kog ne postoje znakovi oštećenja. Ovaj latentni period može trajati svega nekoliko minuta ili čak nekoliko decenija, što zavisi od količine primeljene doze i tipa ćelije.

Za radiobiologiju i zaštitu od zračenja, fizička veličina koja se koristi za definisanje kvaliteta jonizujućeg zračenja je linearni prenos energije, LET. Za razliku od zaustavne moći koja svoju pažnju posvećuje na gubitak energije naelektrisanih čestica koje se kreću kroz sredinu, LET fokusira pažnju na linearnu stopu apsorpcije od strane apsorbujućeg medijuma dok naelektrisana čestica prelazi medijum. Dakle, LET je energija koju apsorbuje tkivo po jedinici dužine puta čestice. LET je povezan sa veličinom biološke štete koju izazivaju različiti tipovi radijacije, i sa veličinom za merenje biološke štete koja se naziva relativna biološka efikasnost, RBE. RBE poredi količinu test zračenja koje je potrebno da izazove isti efekat kao poznata doza 250 keV x-zračenja:

$$\text{RBE} = \frac{\text{doza od 250 keV x - zraka koja izaziva isti efekat}}{\text{doza test radijacije koja izaziva neki efekat}} \quad (34)$$

Relativna znači da mi poredimo biološke štete koje izazivaju različiti tipovi zračenja. RBE zavisi od tipa zračenja, zatim od tipa tkiva ili ćelije, stanja ćelije i veličine doze. Ako se LET povećava, raste i RBE. Čestice visokog LET-a imaju takođe i velik RBE.

Oznaka sa kojom se srećemo u radiobiologiji je  $LD_{50/60}$ , a predstavlja radiobiološku letalnu dozu. To je letalna doza zračenja koja će ubiti 50 % populacije za 60 dana. Procenjena  $LD_{50/60}$  za jednu dozu je u opsegu od 3 do 5 Gy.

Pored pomenutih genetičkih mutacija odnosno promena genetičkog koda, postoji i niz drugih ozbiljnih posledica na ćelijskom i subćelijskom nivou. Hromozomski prekidi i aberacije, zatim pri velikim dozama, radijacija može izazvati smrt ćelije itd.

Podaci o štetnim efektima radijacije su uglavnom dobijeni iz studija o preživelim žrtvama atomskih bombi, radnicima koji rade sa zračenjem, i pacijenata koji primaju radioterapiju.

### *5.1.2. PODELA BIOLOŠKIH EFEKATA*

#### 5.1.2.1. DETERMINISTIČKI I STOHAISTIČKI EFEKTI

Stohastički efekti jesu biološki efekti koji podležu zakonima verovatnoće. To bi značilo da verovatnoća nekog oštećenja zavisi od veličine doze, ali pritom nema sigurne doze i ne postoji doza praga. Dakle, za ove efekte verovatnoća događaja, odnosno oštećenja, ne može biti nula. Što je manja doza, i verovatnoća je manja, ali nikad nije jednaka nuli. Rizik od radijacije pri dijagnostici je stohastičan. Nasledni efekti i karcinomi su takođe stohastični.

Deterministički efekti ili kako se još nazivaju nestohastički efekti, su oni kod kojih oštećenje raste sa povećanjem doze i za koje postoji prag doze ispod koje oštećenje sigurno neće nastati. Nekad se nazivaju i sigurni efekti jer se pri visokim dozama, naročito pri radioterapiji, očekuju neki efekti, kao što su iritacija kože, katarakta, sterilnost [5].

#### 5.1.2.2. GENETIČKI I SOMATSKI EFEKTI

Ova podela podrazumeva podelu efekata na one koji su prenosivi i na druge generacije i na one koje se pojavljuju samo na ozračenoj osobi. Genetički efekti su izazvani promenama u genima, i to mutacijama sa morfološkim promenama hromozoma ili bez tih promena, ili mutacijama gena koje uzrokuju promene broja hromozoma. Genetska oštećenja su trajna i predstavljaju izvore malformacija u potomstvu. S druge strane, somatski efekti se dele na rane i kasne u zavisnosti na vreme proteklo od primene zračenja do njihove pojave. Dermatološke promene i sterilnost se odmah pojavljuju, dok se maligni tumori mogu pojaviti i desetak godina nakon ozračivanja.

### *5.1.3. FAKTORI RADIJACIONIH EFEKATA*

Efekat koji ostavlja neko zračenje na organizam, odnosno ukoliko pričamo samo o biološkom oštećenju zavisi od tipa zračenja, zatim od doze koju primaju ćelije odnosno od apsorbovane doze i od ukupnog vremena za koje je primljena ta doza tj brzine primanja doze. Biološki efekat ne zavisi samo od predane energije, nego i od vrste jonizujućeg zračenja ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , neutronska zračenja). Jednaka apsorbovana doza različitih vrsta zračenja ostavlja u istom tkivu različite efekte. Zbog toga da bismo dobili meru koja uvažava različiti efekat pojedine vrste zračenja, apsorbovanu dozu množimo faktorom karakterističnim za tu vrstu zračenja i tako dobijamo

ekvivalentnu dozu. Takođe je dobro poznata činjenica da će biološka šteta biti manja ukoliko se izvesna radijaciona doza primeni tokom dužeg vremenskog perioda, na primer na nekoliko meseci umesto u roku od nekoliko sati. Reč je o brzini primanja doze. Ako je brzina doze dovoljno mala ili je primenjena u delovima, tzv frakcijama između kojih postoje dovoljno dugi razmaci, tkivo će biti u mogućnosti da normalnom mitozom nadoknadi izgubljene ćelije. Tako, doza koja bi primenjena odjednom imala letalni učinak, primenjena na duži vremenski period neće nužno za posledicu imati smrt. Relativno velike doze primenjene na duži vremenski period mogu ostaviti male ili nikakve vidljive posledice. Postoji i zavisnost efekta od raspodele doze. Oštećenja u znatnoj meri zavise od veličine dela tela koje je ozračeno. Efekti zračenja na telo će biti manji što je ozračeni deo manji.

Radijacioni efekti takođe zavise i od stanja ćelije, kao na primer od njene starosti i snabdevenosti kiseonikom. Efekat starenja se ispoljava u svakom organizmu. Osetljivost na radijaciju se smanjuje sa starenjem organizma. Takođe koncentracija kiseonika u ćeliji ili tkivima u velikoj meri utiče na biološke efekte nakon zračenja. Ovaj efekat se javlja kod većih doza tako da za dijagnostičke svrhe nije toliko značajan. Ćelije koje generalno imaju malo kiseonika slabije reaguju na radijaciju od onih sa više kiseonika. Zdrava ćelija i tkivo su oksigenizovana kako bi normalno obavljali svoje metaboločke procese, dok kod tumornih imamo nedostatak kiseonika (hipoksija ili su čak neoksigenizovane). Da bi se prevazišlo stanje hipoksije u tumorskim ćelijama predlagane su neke metode kojim bi se tumorske ćelije snabdevale kiseonikom i tako postajale osetljivije na radijaciju. Još jedna poznata činjenica kada je u pitanju osetljivost ćelije na radijaciju je ta da ona zavisi od faze deobe u kojoj se ćelija nalazi. Naime, ćelije se dela na polne i somatske ćelije. Polne ćelije podležu deobi koja se zove mejoza, a deoba somatskih mitozu. Mitoza sadrži pet faza, profazu, metafazu, koja je najosetljivija faza na radijaciju, anafazu, telofazu i interfazu. Dakle, ukoliko se u trenutku izlaganja ćelija nalazi u metafazi, postoji najveća šansa za nastajenje bioloških efekata.

## 5.2. RIZIK OD RADIJACIJE

Upotreba zračenja može biti valjana samo od strane osoba koje razumeju ujedno i rizik i korist zračenja. Kada osoba poseduje ovo razumevanje ona je sposobna da traga za ograničenjima izlaganja zračenju koja će obezbediti maksimalnu efikasnost u dijagnozi i terapiji jonizujućim zračenjem. Od početka čovekovog postojanja, ljudi su bili izloženi izvesnoj količini prirodnog pozadinskog zračenja, a tek nakon otkrića x-zraka i radionuklida postaju takođe izloženi i zračenju čiji je tvorac sam čovek. U proseku, medicinska doza jonizujućeg zračenja nije veća od prirodnog pozadinskog zračenja. Zbog ovog neki autori smatraju da medicinska doza mora biti bezbedna s obzirom da ne premašuje nivoe normalnog pozadinskog zračenja u prirodi. Prema ovome treba obavezno razviti kritički stav, i za takav će se založiti svaka osoba koja je dovoljno edukovana i svesna da rizik od zračenja kao takvog kakvo jeste uvek postoji, pa da onda to bezbedno zvuči zapravo naivno.

Udžbenici o radijacionoj zaštiti uglavnom predpostavljaju da ne postoji granica ili prag ispod kog se neće videti nikakvi efekti. Ukoliko ne predpostavimo nikakvu donju granicu znači da svaka doza zračenja može imati potencijalni efekat. Nedostatak praga dovodi do razmatranja "rizik protiv koristi". Pošto nema praga, znači da svaka upotreba radijacije donosi potencijalni mali rizik. Međutim, upotreba zračenja u izlečenjima rezultira u mnogobrojne koristi, tako da ukoliko se pravilno koristi, koristi od zračenja mogu uspešno nadmašiti mali rizik kod individua. Zdravlje populacije bi opalo bez upotrebe jonizujućeg zračenja zato što bismo izgubili sposobnost da dijagnostikujemo neka obolenja. Ukoliko posmatramo pojedinca, opet se javlja pitanje rizika ili

koristi. Očigledno, ne postoji potreba za pregledom ukoliko bi on doneo samo rizik, i pacijent bi trebao da ga odbije. Ako je rizik mali a potencijalna korist velika, pacijent bi trebao da se pregleda.

Naravno, nisu samo pacijenti ti koji podležu izvesnom riziku. Postoji rizik od radijacije za osobe koje su u neposrednoj blizini pacijenata. To je medicinsko osoblje, od radiološkog tehničara, preko medicinskih sestara, doktora opšte medicine, doktora nuklearne medicine, itd. Ono što bi trebalo prvo da ih izdvoji od pacijenata i drugih ljudi i opravda njihovo ime kao stručni kadar, jeste razvijena svest o riziku od radijacije kojem svaki čovek podleže. Da bi se u pravoj meri razvila ova svest potrebna je visoka edukacija ne samo iz oblasti medicine, već i drugih naučnih disciplina, fizike, hemije, biologije, radiobiologije itd. Ono što danas imamo kao izvor informacija, odnosno neki udžbenik edukacije o jonizujućem zračenju ili i o njegovoj upotrebi u medicini nije poteklo iz rukopisa nekolicine lekara, ili nekolicine naučnika prirodnih nauka, već je proisteklo iz tima naučnika svih delatnosti koje imaju tu dodirnu tačku i njihovog timskog rada. No, razvijenost svesti o riziku je osnovna stvar. Pacijent je taj koji donosi krajnju odluku, ali svaki pacijent je laik i konsultujući se sa lekarom, uglavnom donosi odluku u skladu sa doktorovim savetom. Takođe osoblje treba da bude svesno i sopstvenog izlaganja riziku od radijacije. Ali ovog puta je u pitanju samoodgovornost. Svi zaposleni bi trebalo da se pridržavaju zakona koji se izdaju o zaštiti od jonizujućeg zračenja, bilo da je u pitanju zaštita pacijenata, šire javnosti ili lična zaštita. Obuke su preduslov za zaposlenje na odgovarajućem radnom mestu. Iako osoblje na nuklearnoj medicini ne može, u skladu sa zakonom, biti uskraćeno za znanje o bezbednosti i sopstvenoj zaštiti, možemo biti svedoci njihove nemarnosti prema ličnom zdravlju. Ovo ne mora da bude česta pojava, ali na žalost, činjenica je da je prisutna.

Ono što možemo da zaključimo je da ukoliko se principi radijacione fizike i radiobiologije inteligentno primene u kliničke svrhe, dobićemo ograničene doze pacijenata na najmanje moguće količine. Cilj je da se maksimalno poveća korist pregleda ili tretmana, a da se ograniči rizik na što je manje moguće. Pravilana upotreba zračenja osoblja zahteva pored znanja, profesionalni stav u koji spadaju motivacija i volja za edukacijom drugih. Zakoni koji se odnose na zaštitu od zračenja uključuju zakone o opremi, zakone o licencama, i potencijalnim tužbama usled pogrešnog lečenja.

### **5.3. RADIJACIONA ZAŠTITA I SIGURNOST**

Radijaciona zaštita ili radijaciona bezbednost predstavlja primenjenu radijacionu fiziku i radiobiologiju. Radijaciona zaštita uključuje unapređenja onih vežbi koje ograničavaju izlaganje jonizujućem zračenju najmanjih količina. Filozofija ove discipline je da se potencijalna korist od zračenja svede na najviši mogući nivo, a rizik na najmanji mogući nivo. Na svako izlaganje radijaciji se gleda tako da postoji izvesni potencijal da donese neki štetni efekat, tako da iako ne znamo koji bi to potencijalni efekat bio, moramo da obezbedimo radijacionu zaštitu.

#### **5.3.1. ALARA PRINCIP**

ALARA je akronim nastao od rečenice "*As Low As Reasonably Achievable*", što bi u bukvalnom prevodu sa engleskog značilo "što je niže razumno ostvarljivo". ALARA je regulatorni zahtev za sve programe o radijacionoj bezbednosti. Ovaj princip je zasnovan na pretpostavci da zračenje može doneti štetu i da se svako izlaganje zračenju treba svesti na najmanje moguće, u okviru granica. Svi koji rade sa ili u blizini izvora jonizujućeg zračenja bi trebali da drže ekspozicije zračenja na najnižem mogućem nivou dok obavljaju svoje zadatke. Predpostavlja se i razume se da



će radnici dok obavljaju svoje zadatke primiti neku dozu zračenja. Kako bi se smanjili nivoi ekspozicije treba instalirati na radnim mestima odgovarjuće tehnike. Implimentacija ALARA principa je odgovornost poslodavca, ali odgovornost za sprovođenje ALARA programa pada i na radnike i na poslodavca.

### 5.3.2. OSNOVNI PRINCIPI ZAŠTITE OD RADIJACIJE

Bilo da pričamo o pacijentima, o osoblju na nuklearnoj medicini ili o radnicima na drugim radnim mestima gde su prisutni izvori radijacije, za sve postoje tri osnovna principa radijacione zaštite i smanjivanja doza zračenja, pored naravno aktuelnog ALARA principa, a to su vreme, udaljenost i zaštita.

**Vreme.** Smanjivanjem vremena izlaganja radijaciji će se smanjiti količina zračenja koju primi osoblje, s obzirom da je ukupna apsorbovana doza u pravoj srazmeri sa vremenom ozračivanja. To se naročito odnosi na delove procesa kod kojih se ne može koristiti olovna zaštita kao na primer pri prenošenju rastvora i špriceva u kalibrator doza, ili prilikom sprovođenja i smeštanja pacijenta kojem je apliciran radiofarmaceutik ili je primio terapiju radionuklidima, itd.

**Udaljenost.** Nivo zračenja opada sa kvadratom udaljenosti od radijacionog izvora. Zbog toga treba sve manipulacije sa radioaktivnim izvorima obavljati ispruženih ruku i kad god je potrebno vršiti neku vizuelnu kontrolu nekog procesa treba vršiti sa što većeg rastojanja. Radioaktivni izvori se nikada ne prislanjaju uz telo niti se prenose u džepovima.

**Zaštita.** Postavljanjem zaštite između osobe koja je izložena zračenju i izvora zračenja će se redukovati nivo radijacije. Radioaktivni materijali dolaze u laboratoriju u olovne posude-kontejnere koji apsorbuju veliki deo zračenja i sprečavaju da se jonizujuće zračenje širi u okolinu. Iako ova zaštita smanjuje zračenje ona ga ne uklanja u potpunosti pa se kontejneri moraju držati u skladištu izotopa, a nikako u radnim prostorijama. Da bi se izbegle sve štetne posledice od zračenja i mogućeg štetnog delovanja na ljude, otvoreni izvori radioaktivnosti se mogu koristiti samo u posebno opremljenim laboratorijama koje se nazivaju nuklearnomedicinske laboratorije [1,5].

### 5.3.3. ORGANIZACIJE ZADUŽENE ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA

Svaka država ima svoj zakon o zaštiti od jonizujućih zračenja koji bi trebao da sadrži osnovne odredbe, mere zaštite, mere nuklearne sigurnosti i štete, nadzore i kaznene odredbe. Pored ovakvih državnih zakona koji imaju za cilj regulaciju i bezbednost građana i sprovođenja kaznenih mera usled nepoštovanja donesenog pomenutog zakona, postoje i organizacije koje su na internacionalnom nivou. Jeste da ove organizacije ne donose zakone u punom smislu te reči kao kada je u pitanju državni zakonik, ali takođe imaju svoje odredbe kojima žele da ukažu na mere zaštite od jonizujućeg zračenja i bezbednosti populacije na Zemlji.

ICRP (*International Commission on Radiological Protection*) je osnovan 1928. godine i već decenijama izdaje svoje publikacije o zaštiti od zračenja proučavajući štetne efekte zračenja. Ova komisija prati naučna dostignuća iz oblasti zaštite od jonizujućeg zračenja i preporučuje mere za sprečavanje nastajanja štetnih efekata. Zatim UNSCEAR (*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*) izdaje izveštaje o riziku od radijacije. ICRU (*International*

*Commission on Radiological Units and Measurements*) savetuje o mernim jedinicama u radiologiji, NRC (*Nuclear Regulatory Commission*) je odgovorna za pravila i regulaciju u pogledu nuklearnih materijala, itd. Zahvaljujući ovim i drugim organizacijama poboljšava se zaštita od zračenja iz godine u godinu, a njihove preporuke se odmah ugrađuju u državne zakone o zaštiti od jonizujućeg zračenja, preprevlajući ili proširujući ih.

#### 5.4. RADIJACIONA ZAŠTITA NA NUKEARNOJ MEDICINI

Za bolje upoznavanje sa osnovnim principima zaštite od jonizujućeg zračenja na nuklearnoj medicini naveden je naredni tekst, ali je akcentat stavljen samo na zaštitu osoblja sa nuklearne medicine, jer ukoliko bismo se dotakli i bezbednosti samih pacijenata bilo bi preobimno i napustili bi granice teme ovog rada.

Mere zaštite medicinskog osoblja odnose se na dve vrse radijacionog rizika kojem su oni izloženi koristeći otvorene izvore jonizujućeg zračenja, a to je rizik od spoljašnjeg ozračenja od strane izvora kojim rukuju, i rizik od unutrašnjeg ozračenja putem kontaminacije koja je moguća prilikom aplikacije radioizotopa pacijentima. Mere zaštite od spoljašnjeg ozračivanja se sastoje u dozimetriji i fizičkoj zaštiti pri rukovanju sa izvorima zračenja, dok mere zaštite od unutrašnjeg ozračivanja se sastoje od niza postupaka kojima se sprečava radioaktivna kontaminacija. Bitna mera zaštite koje medicinsko osoblje takođe treba da se drži je mera kojom se štiti životna sredina, a to se postiže posebnim rukovanjem sa radioaktivnim otpadom. Da bi se navedene mere zaštite uopšte mogle sprovesti, svi poslovi oko primene otvorenih izvora zračenja se vrše u specijalno organizovanim i opremljenim nuklearnomedicinskim laboratorijama.

##### 5.4.1. ZAŠTITNE MERE OD SPOLJAŠNJEG OZRAČIVANJA

Tehničar na nuklearnoj medicini je odgovoran za održavanje sopstvene radijacione izloženosti na što je moguće nižem nivou, kao i izloženosti pacijenata, drugog bolničkog osoblja i posetioca. Monitoring lične radijacione izloženosti je jedan od načina da se proceni radijaciona bezbednost. Zbog toga je bitno da se lični monitori uvek i pravilno koriste, kako bi vrednosti koje će pokazati verodostojno predstavljale primljenu dozu. Dozimetri koji bi trebali da izmere dozu koju je primilo celo telo, nose se negde između ramena i struka. Ukoliko se želi izmeriti izloženost ruku radijaciji, koriste se termoluminescentni dozimetri koji su dizajnirani tako da se mogu nositi kao prsten. Kada se ne koriste, ove uređaje treba ukloniti dalje od izvora radijacije. Abnormalno visoke očitane vrednosti zabeležene na njima, koje nisu u skladu sa propisanim ograničenjima, treba istražiti bez odlaganja. U cilju smanjenja izloženosti radijaciji i cilju radijacione bezbednosti osoblja na nuklearnoj medicini treba uvek imati na umu već pomenuta tri osnovna principa zaštite od zračenja, a to su vreme, udaljenost i zaštita.

**Zaštita.** Jedan od najefektivnijih načina da se smanji izloženost zračenju je da se apsorbuje najveći deo zračenja upotrebom zaštite oko izvora jonizujućeg zračenja. Špricevi koji se koriste pri pripremanju radiofarmaceutika i ubrizgavanju bi trebali da poseduju određenu zaštitu. Procenjeno je da je brzina ekvivalentne doze za prst od nezaštićenog šprica koji sadrži 20 mCi tehnicijuma-99m oko 220 mSv/h. Ovo može dovesti do velikog izlaganja ruku radijaciji u zavisnosti od toga koliko vremenski traje priprema i aplikacije radiofarmaceutika i koliko ih obavi u nekom vremenskom periodu. Srećom, špricevi i bočice u kojima se drže radiofarmaceutici su zaštićeni. Posebno

dizajnirana olovna zaštita koja se stavlja oko generatora radionuklida je neophodna zato što je unutrašnja zaštita namenjena samo za vreme pošiljke i transporta radioaktivnog materijala. Kada se generator pripremi za upotrebu u laboratoriji nuklearne medicine, potrebno je postaviti dodatnu zaštitu. Olovne cigle se takođe mogu koristiti kao dodatna zaštita oko generatora i drugih predela gde se čuva radioaktivni materijal.

Oprema i doze radiofarmaceutika se pripremaju iza olovnog stakla kako bi tehničar ili hemičar bio zaštićen i mogao da vidi pripremljeni materijal. Iako olovo pruža odgovarajuću zaštitu za većinu radionuklida koji su gama emiteri, ne sme se koristiti za beta emitere kao što je fosfor-32. Ako postavimo beta izvor iza olovne zaštite nastaje zračeno zračenje, naime kada se beta čestica odnosno elektron približava jezgri atomu olova iz postavljene zaštite, doći će do smanjenja njegove brzine, gubiće energiju koja se emituje u obliku zračnog x-zračenja. Tako da bi u tom slučaju imali samo još i dodatno zračenje. Zbog toga se za beta emitere koristi zaštita od nekog materijala manje gustine. Takođe je neophodna zaštita osoblja u vidu olovnih kećelja, rukavica i specijalnih naočara.

**Vreme i udaljenost.** Druge metode za smanjivanje radijacione ekspozicije su povećanje udaljenosti od izvora radijacije i smanjivanje vremena rada sa radioaktivnim izvorom. Ove metode su korisne kada se radi sa pacijentima koji su primili radiofarmaceutik. Dakle, za vreme praćenja pacijenta iz ili u salu za čekanje i za vreme skeniranja. Očigledno, stanje pacijenta će diktirati udaljenost tehničara i koliko će vremena biti potrebno da se obavi pregled. Tehničar treba da ima na umu da i najmanja udaljenost od pacijenta može znatno smanjiti radijacionu izloženost. Male prostorije sa malom opremom mogu otežati tehničaru da se osloni na tu vrstu zaštite. Tako da se ta činjenica mora uzimati u obzir pri izgradnji laboratorija za nuklearnu medicinu. Takođe treba da postane vičan koristeći odgovarajuće uređaje za držanje pacijenata u pravilan položaj, a ne da ih on ili neko drugi od osoblja pridržava. Ukoliko se efikasno rukovodi sa radioaktivnim materijalom, dakle brzo, što se može postići i vežbom na nekom neradioaktivnom materijalu, i ukoliko tehničari ostaju u blizini pacijenata samo za vreme koje je neophodno, može se znatno smanjiti vreme izloženosti zračenju.

#### *5.4.2. ZAŠTITNE MERE OD UNUTRAŠNJEG OZRAČIVANJA*

**Unutrašnje izlaganje.** Može se desiti da neko od zaposlenih u radu sa radionuklidima unese radioaktivni materijal u svoj organizam inhalacijom ili apsorbujući ga preko kože ili rane. Tada osoba postaje izložena unutrašnjoj radijaciji. Pošto se ovaj način izlaganja radijaciji ne može detektovati ličnim dozimetrima, primarno se kontroliše eliminisanjem potencijalnih uzroka unutrašnje kontaminacije. Ovaj oblik kontaminacije se može zaobići izbegavanjem upotrebe kozmetike, hrane i pića u prostorijama gde se nalazi i koristi radioaktivni materijal. Strogo je zabranjeno da se pipetira ustima radioaktivni materijal. Zaštitna odeća, posebno rukavice, mogu smanjiti apsorpciju preko kože ako se desi da se prospe neki radioaktivni materijal. Posebno odelo i obuća koja se nosi u laboratoriji ne sme se iznositi iz nje, kao i drugi predmeti jer su potencijalno kontaminirani. Zadaci oko otvaranja, preliivanja i razblaživanja radiofarmaceutika se obavljaju u radiohemijskim digestorima sa podpritiskom i to uvek na posudama od materijala koji se lako pere, kao što je PVC. U radu sa radioaktivnim materijalima najbolje je koristiti pribor za jednokratnu upotrebu koji se baca. Ako se koriste stakleni sudovi ili pipete oni se odmah nakon upotrebe moraju oprati vodom, a zatim potopiti u sud sa deterdžentom radi konačnog pranja

### 5.4.3. OSTALE MERE ZAŠTITE

Nuklearnomedicinske laboratorije su organizovane i opremljene tako da omogućuju bezbedno čuvanje i otvaranje radioaktivnih izvora. Naime, u ovim laboratorijama se koriste radioaktivni izotopi u vidu rastvora ili gasova koji su privremeno zatvoreni u svoje odgovarajuće zaštitne posude a prilikom upotrebe one se otvaraju i izvori postaju otvoreni izvori jonizujućeg zračenja koji predstavljaju potencijalnu opasnost. Laboratorije treba da budu opremljene tako da tu opasnost svedu na što je mogući manji nivo. U okviru ovog prostora trebalo bi da postoji takozvana vruća zona, gde se radi sa otvorenim izovima najviše aktivnosti. U njoj bi trebalo da postoje skladište radioizotopa, zatim radiohemijski digestor, odvojeni sanitarni propusnik i monitor zračenja za kontrolu kontaminacije. U vezi sa vrućom zonom je niz prostorija u kojima se radi sa manjim dozama otvorenih izvora, a to su prostorija za niske aktivnosti, zatim za apliciranje radiofarmaceutika, čekaonice, i prostorije za merenja i snimanja. U svim ovim prostorijama, a posebno u vrućoj zoni treba rigorozno primenjivati propisane zaštitine i dozimetrijske mere. Prostorije koje koriste odgovarajuću zaštitu radi bezbednijeg rukovanja radioaktivnim materijalima spadaju u kompleks kontrolisane radijacione zone. Ukoliko je u okviru ovih laboratorija instalirana i prostorija za terapijsku primenu otvorenih izvora radioaktivnosti, mora postojati i terapijski blok.

Pre napuštanja laboratorije kao i posle svakog dodira sa radioaktivnim materijalom treba dobro oprati ruke i proveriti njihovu čistoću na monitoru zračenja

Pored ličnih monitora odnosno dozimetara u nuklearnomedicinskim laboratorijama se postavljaju i laboratorijski monitori koji mogu biti veći i instalirani na nekom određenom mestu ili manji a pokretni (portabl). Oni kontinuirano mere radioaktivno zračenje u laboratoriji po svom odgovarajućem principu rada. Kojigod da je tip laboratorijskog dozimetra, obavezna je njihova česta provera u cilju otkrivanja eventualne nepravilnosti u radu, tj. merenju, jer iako oni predstavljaju danas usavršene elektronske uređaje, i dalje su koliko toliko podložni promenama režima rada i nekim kvarovima.



Slika 12. Pokretni laboratorijski monitor zračenja

Izvor: [www.3endt.com/radiation equipments](http://www.3endt.com/radiation equipments)

Ukoliko dođe do kontaminacije ili se ona otkrije kontrolnim merenjem pomoću monitora zračenja, ovo kontaminirano mesto se obeležava, rad se obustavlja i obaveštava se odgovorno lice za zaštitu u laboratoriji koje će izvršiti odgovarajuću dekontaminaciju [1,5] .

## 5.5. GRANICE DOZA

Čovek je stalno izložen zračenju. Spomenuto je i pozadinsko zračenje u prirodi. Procenjeno je da čovek na godišnjem nivou primi dozu od oko 3 mSv od prirodnih izvora zračenja. Koji su to prirodni izvori zračenja i koji je njihov udeo od ove navedene ekvivalentne doze predstavljeno je u sledećoj tabeli.

*Tabela 8. Godišnje ekvivalentne doze različitih prirodnih izvora koje prima čovek*

Izvor	Doza u mSv/god
Udisanje radona	2
Ostali radionuklidi uneseni u telo	0,39
Zemljino zračenje	0,28
Kosmičko zračenje	0,28

Najveći doprinos prirodnom pozadinskom zračenju daje odomaćeni radon. Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) je radioaktivan gas nastao prilikom raspada radijuma. Radon je alfa emiter, koji ima period poluraspada približno 4 dana. Potomci radona su takođe radioaktivni i čine ih dva kratkoživeća beta emitera i dva kratkoživeća alfa emitera. Potomci se vezuju za aerosoli i deponuju u plućima. Prosečana koncentracija radona napolju je od 4 do 8 Bq/m<sup>3</sup>, a unutra 40Bq/m<sup>3</sup>.

Pored ovog prirodnog pozadinskog zračenja čovek dodatno prima u proseku još oko 0,5 mSv na godinu dana od veštačkih izvora zračenja, a tu se prvenstveno misli na takozvanu medicinsku dozu od x-zračenja i radionuklida koji se koriste u nuklearnoj medicini. Što će reći da čovek primi godišnju ekvivalentnu dozu zračenja od približno 3,5 mSv. Od pomenutih 0,5 mSv medicinske doze, oko 0,4 mSv dolazi od x-zračenja, a oko 0,14 mSv u proseku od radionuklida nuklearne medicine. Dijagnostičke procedure koje koriste jonizujuće zračenje su najveći izvori veštačkog izlaganja radijaciji.

Zbog toga što je svaka doza zračenja štetna, a čovek je neizbežno izložen zračenju stalno, javila se potreba za postavljanje granica doza. Još davne 1934. godine se razgovaralo o ograničavanju doza kojima su izloženi ljudi koji rade sa jonizujućim zračenjem, a nešto kasnije, pedesetih godina prošlog veka se pokazala potreba i za ograničavanjem doza za ostatak populacije upravo zato što je porasla upotreba veštačke radioaktivnosti. Uvedena je maksimalna dopuštena doza ozračivanja od 5 mSv na godinu dana. To je procenjena doza koja u ukupnoj populaciji neće uzrokovati posledice ni na ozračenju osobi ni na njeno potomstvo.

Granice doze za osobe koje rade sa radioaktivnim materijalima su pumnije izučene i izmenjene. Efektivna doza je ograničena na 100 mSv u pet uzastopnih godina, s tim da ni u jednoj godini primljena doza ne sme prekoračiti 50 mSv. Godišnja granica ekvivalentne doze za očno sočivo iznosi 150 mSv, dok za podlaktice, ruke, stopala i kožu iznosi 500 mSv. U skladu sa načelom ograničenja i optimalizacije, to što su sve vrednosti iznad propisanih granica striktno zabranjene ne

znači da su sve vrednosti ispod ove granice prihvatljive. Ove propisane granice služe kao uslovi za proceduru optimalizacije [5]. Postavljanje granica doze je samo jedan deo sprovođenja zaštite od jonizujućeg zračenja čiji je cilj smanjiti količinu doze onoliko nisko koliko je to razumno moguće postići.

## 6. MERENJE APSORBOVANIH DOZA ZRAČENJA NA INSTITUTU ZA ONKOLOGIJU VOJVODINE NA ZAVODU ZA NUKLEARNU MEDICINU

### 6.1. UVOD U MERENJE

Cilj svakog kontrolnog merenja apsorbovanih doza jonizujućeg zračenja je da se utvrdi da li odgovarajuća institucija koja radi sa izvorima zračenja radi u skladu sa Zakonom o zaštiti od jonizujućeg zračenja i Pravilniku o granicama izlaganja jonizujućem zračenju koje donosi država na predlog Ministarstva za zaštitu životne sredine i prostornog planiranja. Ukoliko se vrednosti dobijene merenjem uklapaju u ove iz pravilnika, svaka institucija će dobiti dozvolu za rad, odnosno produžiti svoju dozvolu za rad sa izvorima jonizujućeg zračenja. Zakoni i pravilnici su regulatorni sistemi i igraju bitnu ulogu kada je u pitanju bezbednost ljudi i životne sredine. Konkretno u nuklearnoj medicini, bezbednost se odnosi na pacijente, zaposlene i okolinu. Medicina je danas nezamisliva bez ogranka nuklearne medicine tako da nije čudno koliko se uistinu pažnje posvećuje upravo merenjima doza zračenja nuklearne medicine. Specijalizovani timovi sa savremenim instrumentima vrše merenja i izdaju rezultate, zatim opise radnih mesta na zavodima za nuklearnu medicinu i na kraju navode svoje procene o bezbednosti. Ovim diplomskim radom se žele predstaviti, kao skromnim primerom, rezultati jednog takvog tipa merenja.

### 6.2. REZULTATI DOZIMETRIJSKIH MERENJA

Rezultati merenja su predstavljani u dve tabele, od kojih je prva vezana za tehnicijum-99m a druga za izvor FDG-a. Merenja su izvršena instrumentima LB 123 D-H10 Gamma Dose Rate Monitor i Radiation Alert Inspector, Internal G-M LND7317 koji su prikazani na slikama 13 i 14. Sva merenja su vršena u prostorijama i laboratorijama na Institutu za onkologiju Vojvodine na Zavodu za nuklearnu medicinu u Sremskoj Kamenici.

*Tabela 8. Rezultati merenja brzina apsorbovanih doza za Tc-99m*

Mesto merenja	Brzina apsorbovane doze ( $\mu\text{Sv/h}$ )
U blizini gama-kamere	2,7
Hodnik	0,3
Čekaonica za pacijente koji su primili Tc-99m	4,2

Tabela 9. Rezultati merenja brzina apsorbovanih doza za izvora FDG-a

Mesto merenja	Brzina apsorbovane doze ( $\mu\text{Sv/h}$ )
<b><i>Odeljenje za PET dijagnostiku</i></b>	
Direktan kontakt sa kontejnerom	90
1 m od kontejnera	4,5
Ostali deo prostorije (3-4 m)	0,4
<b><i>Prostorija sa radiohemijskom laboratorijom</i></b>	
Na mestu vađenja FDG-a	14
10 cm od kanistera za prenošenje	190
Na mestu stavljanja u špriceve	25
Iza olovnog stakla	3,1
Doze kalibrator (doza 0,35 GBq)	35
Zid radiohemijske laboratorije	
- u toku vađenja FDG-a	14
- za vreme stavljanja FDG-a u špriceve	6
- u toku pretakanja FDG-a	40
<b><i>Deo laboratorije za apliciranje</i></b>	
Na mestu rukovaoca za vreme apliciranja	133
Na mestu rukovaoca nakon apliciranja	56
<b><i>Prostorija za pacijente (1 pacijent)</i></b>	
Na ulazu u prostoriju	1
Zid prostorije	0,34
Zid naspram kupatila	0,28
10 cm od pacijenta	390



Mesto merenja	Brzina apsorbovane doze ( $\mu\text{Sv/h}$ )
<i>Prostorija za pacijente (2 pacijenta)</i>	
Na ulazu u prostoriju	8
Zid prostorije	0,4
Zid naspram kupatila	0,5
Između pacijenata	70
<i>Prostorija za pacijente (3 pacijenta)</i>	
Na ulazu u prostoriju	3,3
Zid prostorije	0,4
Zid naspram kupatila	0,8
Između pacijenata (sredina prostorije)	44
<i>Prostorija sa PET/CT aparatom</i>	
Komandna soba:	
- Na mestu rukovaoca	0,12
- Vrata	0,3
- Olovni prozor	0,24
Vrata ka hodniku	0,2
Iza olovnog paravana za vreme prolaska pacijenta	4,9
Zid ka hodniku	0,19

Broj pacijenata dnevno kojima se aplicira FDG je 8-9, a aktivnost po pacijentu iznosi od 0,29 do 0,37 GBq FDG-a. Ukupna dnevna aktivnost je do 3,7 GBq FDG-a.



*Slika 13. LB 123 D-H10 Gamma Dose Rate Monitor*

*Izvor: [www.berthold.com](http://www.berthold.com)*



*Slika 14. Internal G-M LND7317*

*Izvor: [www.firstrespondernetwork.com](http://www.firstrespondernetwork.com)*

### 6.3. OPIS RADNIH MESTA NA ZAVODU ZA NUKLEARNU MEDICINU I PROCENA RADIJACIONE BEZBEDNOSTI

Opisi radnih mesta i procene radijacione bezbednosti su dati tabelarnim pregledom za svako radno mesto posebno.

Tabela 10. Radno mesto hemičar

Naziv radnog mesta		Broj zaposlenih		
Hemičar		2		
Opis radnog mesta	Opasnost	Primenjene preventivne mere	Procenjeni rizik	Planirane aktivnosti za smanjenje rizika
Zaposleni vrše eluciju generatora i odgovarajuću primenu radiofarmaceutika. Zaposleni rade na aparatima: gama kamera, uređaj za merenje radio jodne fiksacije, doze kalibrator, monitori zračenja, jonizaciona komora	Svakodnevni rad sa otvorenim izvorima <sup>99m</sup> Tc i <sup>131</sup> I izuzetno visoke aktivnosti, kao i sa izvorom FDG-a aktivnosti 4000 MBq dva puta nedeljno. Vreme trajanja pripreme preparata svakodnevno najmanje 1 h. U toku rada sa otvorenim izvorima moguća je spoljašnja kontaminacija. Pacijenti kojima je ubrizgan radiofarmaceutik predstavljaju značajan izvor zračenja, a nalaze se u kontaktu sa zaposlenim.	Zaposleni rade u kontrolisanoj zoni zračenja. Tokom rada sa radionuklidima zaposleni nose olovne kecelje i gumene rukavice. Trajanje pojedinih faza kod elucije i pripreme radiofarmaceutika svedeno je na minimum. Svi nose lične dozimetre koji se očitavaju jednom mesečno. Zaposleni se redovno upućuju na medicinski pregled. Izvori radioaktivnog zračenja se nalaze u odgovarajućim zaštitnim kontejnerima. Dozimetrijske kontrole radnih mesta se vrše dva puta godišnje od strane ovlašćenih institucija. Zaposleni imaju beneficirano radno vreme	Na osnovu dozimetrijskih merenja utvrđeno je da zaposleni hemičari primaju izuzetno visoke doze jonizujućeg zračenja u toku svog profesionalnog rada. Lični dozimetri se nose ispod olovne kecelje, tako da rezultati očitavanja ličnih dozimetara ne predstavljaju realne doze koje zaposleni primaju. Radno mesto hemičara je radno mesto sa povećanim radijacionim rizikom.	Postupati u skladu sa ALARA principom-svesti nivo primljenih doza jonizujućeg zračenja u toku profesionalnog rada onoliko nisko koliko je razumno moguće postići uzimajući u obzir sve društvene i ekonomske faktore. Preporučuje se korišćenje elektronskih i prsten dozimetara pri pripremi radiofarmaceutika, korišćenje rukavica ojačanih olovom i svih drugih zaštitnih sredstava. Preporučuje se da zaposleni imaju beneficirani radni staž.

Tabela 11. Radno mesto lekar specijalista nuklearne medicine

Naziv radnog mesta		Broj zaposlenih		
Lekar specijalista nuklearne medicine		4		
Opis radnog mesta	Opasnost	Primenjene preventivne mere	Procenjeni rizik	Planirane aktivnosti za smanjenje rizika
Zaposleni rade na aparatima: gama kamera, uređaj za merenje radio jodne fiksacije, doze kalibrator, monitori zračenja, jonizaciona komora	Zaposleni rade u zoni zračenja sa otvorenim radioaktivnim izvorima. Nivo zračenja u radnim prostorijama je konstantno povišen i iznosi tri do četiri vrednosti prirodnog fona. Svakodnevni rad sa otvorenim izvorima $^{99m}\text{Tc}$ i $^{131}\text{I}$ izuzetno visoke aktivnosti. U toku rada sa otvorenim izvorima moguća je spoljašnja kontaminacija. Pacijenti kojima je ubrizgan radiofarmaceutik predstavljaju značajan izvor zračenja, a nalaze se u kontaktu sa zaposlenim.	Zaposleni rade u kontrolisanoj zoni zračenja. Svi nose lične dozimetre koji se očitavaju jednom mesečno. Zaposleni se redovno upućuju na medicinski pregled. Izvori radioaktivnog zračenja se nalaze u odgovarajućim zaštitnim kontejnerima. Dozimetrijske kontrole radnih mesta se vrše dva puta godišnje od strane ovlašćenih institucija. Zaposleni imaju beneficirano radno vreme	Zaposleni rade u zoni zračenja gde postoji realni rizik od mogućeg radijacionog akcidenta. Radno mesto se klasifikuje kao radno mesto sa povećanim radijacionim rizikom.	Postupati u skladu sa ALARA principom-svesti nivo primljenih doza jonizujućeg zračenja u toku profesionalnog rada onoliko nisko koliko je razumno moguće postići uzimajući u obzir sve društvene i ekonomske faktore. Koristiti sva raspoloživa sredstva zaštite. Preporučuje se da zaposleni imaju beneficirani radni staž.

Tabela 12. Radno mesto lekar opšte medicine

Naziv radnog mesta		Broj zaposlenih		
Lekar opšte medicine		1		
Opis radnog mesta	Opasnost	Primenjene preventivne mere	Procenjeni rizik	Planirane aktivnosti za smanjenje rizika
Zaposleni rade na aparatima: gama kamera, uređaj za merenje radio jodne fiksacije, doze kalibrator, monitori zračenja, jonizaciona komora	Nivo zračenja u radnim prostorijama je konstantno povišen i iznosi tri do četiri vrednosti prirodnog fona. U toku rada sa otvorenim izvorima moguća je spoljašnja kontaminacija. Pacijenti kojima je ubrizgan radiofarmaceutik predstavljaju značajan izvor zračenja, a nalaze se u kontaktu sa zaposlenim.	Zaposleni rade u kontrolisanoj zoni zračenja. Svi nose lične dozimetre koji se očitavaju jednom mesečno. Zaposleni se redovno upućuju na medicinski pregled. Izvori radioaktivnog zračenja se nalaze u odgovarajućim zaštitnim kontejnerima. Dozimetrijske kontrole radnih mesta se vrše dva puta godišnje od strane ovlašćenih institucija. Zaposleni imaju beneficirano radno vreme	Zaposleni rade u zoni zračenja gde postoji realni rizik od mogućeg radijacionog akcidenta. Radno mesto se klasifikuje kao radno mesto sa povećanim radijacionim rizikom.	Postupati u skladu sa ALARA principom-svesti nivoe primljenih doza jonizujućeg zračenja u toku profesionalnog rada onoliko nisko koliko je razumno moguće postići uzimajući u obzir sve društvene i ekonomske faktore. Koristiti sva raspoloživa sredstva zaštite. Preporučuje se da zaposleni imaju beneficirani radni staž.

Tabela 13. Radno mesto laboratorijski tehničar

Naziv radnog mesta		Broj zaposlenih		
Laboratorijski tehničar		10		
Opis radnog mesta	Opasnost	Primijenjene preventivne mere	Procenjeni rizik	Planirane aktivnosti za smanjenje rizika
Zaposleni rade na aparatima: gama kamera, uređaj za merenje radio jodne fiksacije, doze kalibrator, monitori zračenja, jonizaciona komora	Nivo zračenja u radnim prostorijama je konstantno povišen i iznosi tri do četiri vrednosti prirodnog fona. Svakodnevni rad sa otvorenim izvorima $^{99m}\text{Tc}$ i $^{131}\text{I}$ izuzetno visoke aktivnosti. U toku rada sa otvorenim izvorima moguća je spoljašnja kontaminacija. Pacijenti kojima je ubrizgan radiofarmaceutik predstavljaju značajan izvor zračenja, a nalaze se u kontaktu sa zaposlenim.	Zaposleni rade u kontrolisanoj zoni zračenja. Svi nose lične dozimetre koji se očitavaju jednom mesečno. Zaposleni se redovno upućuju na medicinski pregled. Izvori radioaktivnog zračenja se nalaze u odgovarajućim zaštitnim kontejnerima. Dozimetrijske kontrole radnih mesta se vrše dva puta godišnje od strane ovlašćenih institucija. Zaposleni imaju beneficirano radno vreme	Zaposleni rade u zoni zračenja gde postoji realni rizik od mogućeg radijacionog akcidenta. Pri aplikovanju radiofarmaceutika zaposleni primaju izuzetno visoke doze zračenja. Radno mesto se klasifikuje kao radno mesto sa povećanim radijacionim rizikom.	Postupati u skladu sa ALARA principom-svesti nivoe primljenih doza jonizujućeg zračenja u toku profesionalnog rada onoliko nisko koliko je razumno moguće postići uzimajući u obzir sve društvene i ekonomske faktore. Preporučuje se korišćenje elektronskih i prsten dozimetara kao i rukavica ojačanih olovom pri aplikovanju radiofarmaceutika. Koristiti sva raspoloživa sredstva zaštite. Preporučuje se da zaposleni imaju beneficirani radni staž.

Tabela 14. Radno mesto administrativni radnik

Naziv radnog mesta		Broj zaposlenih		
Administrativni radnik		2		
Opis radnog mesta	Opasnost	Primenjene preventivne mere	Procenjeni rizik	Planirane aktivnosti za smanjenje rizika
Zaposleni rade na šalteru Zavoda za nuklearnu medicinu.	Zaposleni ulaze u kontrolisanu zonu zračenja i svakodnevno imaju kontakt sa pacijentima kojima je ubrizgan radiofarmaceutik i predstavljaju značajan izvor zračenja.	Zaposleni rade u kontrolisanoj zoni zračenja. Svi nose lične dozimetre koji se očitavaju jednom mesečno. Zaposleni se redovno upućuju na medicinski pregled. Zaposleni imaju beneficirano radno vreme	Zaposleni svakodnevno imaju kontakt sa radioaktivnim pacijentima i ulaze u kontrolisanu zonu zračenja. Radno mesto se klasifikuje kao radno mesto sa povećanim radijacionim rizikom.	Postupati u skladu sa ALARA principom- svesti nivoe primljenih doza jonizujućeg zračenja u toku profesionalnog rada onoliko nisko koliko je razumno moguće postići uzimajući u obzir sve društvene i ekonomske faktore.

## 7. ZAKLJUČAK

U radu su dati rezultati merenja brzina apsorbovanih doza zračenja u cilju procene radijacione bezbednosti radnih mesta. Radna mesta u Zavodu za nuklearnu medicinu su radna mesta sa povećanim radijacionim rizikom.

Svi zaposleni treba da budu svesni da svaka upotreba radijacije donosi potencijalno mali rizik. Imajući to na umu, preporučuje se da se zaposleni ponašaju u skladu sa ALARA principom i da koriste sva raspoloživa sredstva zaštite. Da bi zaposleni razumeli realni rizik od zračenja kojem su izloženi i da bi se pravilno zaštitili, neophodna je permanentna edukacija iz oblasti zaštite od zračenja.

Sprovođenje edukacijskog programa o zaštiti od jonizujućeg zračenja, zatim uvođenje nove aparature i sredstava za zaštitu od radijacije i kontrolisanje radijacione zone na nuklearnoj medicini bilo bi efikasnije ukoliko bi se otvorilo novo radno mesto poput medicinskog fizičara, fizičara odeljenja za nuklearnu medicinu.



## 8. LITERATURA

- [1] *Borota, R., Stefanović, Lj. (1992): Nuklearna medicina. Medicinski fakultet, Novi Sad.*
- [2] *Tomašević, M., Goldner, B. (2001): Rendgensko zračenje i zaštita u pedijatrijskoj dijagnostici, Beograd.*
- [3] *Brnjas-Kraljević, J. (2001): Fizika za studente medicine-1.dio. Medicinska naklada, Zagreb.*
- [4] *Huda, W., Slone, R.M. (1995): Review of Radiologic Physics. Williams and Wilkins, Baltimore.*
- [5] *Dowd, S., Tilson, E. (1999): Practical Radiation Protection and Applied Radiobiology, Second Edition. W.B.Saunders Company, Philadelphia.*
- [6] *Podgorsak, E. (2003): Review of Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students. IAEA, Vienna.*
- [7] *Krmar, M. Skripta iz nuklearne fizike.*
- [8] *<http://www.world-nuclear.org/>*
- [9] *<http://hps.org/publicinformation/ate/faqs/personnelmonitoring.html://>*
- [10] *<http://nuclear.pharmacy.purdue.edu/what.php>*
- [11] *<http://fdb.rxlist.com/drugs/search.aspx?stype=drug&query=Fludeoxyglucose+F+18>*

## **9. BIOGRAFIJA**

Jasmina Jakonić rođena je 07.09.1986. godine u Kikindi, od oca Petra i majke Dušice. Osnovnu školu „Žarko Zrenjanin“ i gimnaziju „Dušan Vasiljev“ završila je u Kikindi. Prirodno-matematički fakultet na Univerzitetu u Novom Sadu (Odsek za fiziku, obrazovni profil Diplomirani fizičar-medicinska fizika) upisala je 2005. godine, a završila 2011. godine. Sve ispite predviđene planom i programom studijske grupe Diplomirani fizičar-medicinska fizika položila je sa prosečnom ocenom 9,00.

UNIVERZITET U NOVOM SADU  
 PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
 DEPARTMAN ZA FIZIKU  
 Ključna dokumentacija informacija

<b>Redni broj:</b> RBR	
<b>Identifikacioni broj:</b> IBR	
<b>Tip dokumentacije:</b> TD	<b>Monografska dokumentacija</b>
<b>Vrsta rada:</b> VR	<b>Diplomski rad</b>
<b>Autor:</b> AU	<b>Jasmina P. Jakonić, apsolvent PMF-a u Novom Sadu</b>
<b>Mentor:</b> MN	<b>Dr Nataša Todorović, vanredni profesor PMF-a u Novom Sadu</b>
<b>Naslov rada:</b> NR	<b>Procena radijacione bezbednosti zaposlenih u Zavodu za nuklearnu medicinu</b>
<b>Jezik publikacije:</b> JP	<b>Srpski (latinica)</b>
<b>Jezik izvoda:</b> JI	<b>Srpski/engleski</b>
<b>Zemlja publikovanja:</b> ZP	<b>Srbija</b>
<b>Uže geografsko područje:</b> UGP	<b>Vojvodina</b>
<b>Godina:</b> GO	<b>2011.</b>
<b>Izdavač:</b> IZ	<b>Autorski reprint</b>
<b>Mesto i adresa:</b> MA	<b>Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 5</b>
<b>Fizički opis rada:</b>	<b>9 poglavlja, 71 stranica, 14 tabela, 14 slika</b>

<b>Naučna oblast:</b> NO	<b>Fizika</b>
<b>Naučna disciplina:</b> ND	<b>Medicinska fizika</b>
<b>Predmetna odrednica:</b> PO	<b>Nuklearna medicina + zaštita od zračenja</b>
<b>Čuva se:</b> ČU	<b>Biblioteka Departmana za fiziku, prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta u Novom Sadu</b>
<b>Važna napomena:</b> VN	-
<b>Izvod:</b> IZ	<b>U Zavodu za nuklearnu medicinu na Institutu za onkologiju Vojvodine u Sremskoj Kamenici postoje sledeća radna mesta: hemičar, lekar specijalista nuklearne medicine, lekar opšte medicine, laboratorijski tehničar, i administrativni radnik. Ovo osoblje je svakodnevno izloženo otvorenim izvorima <math>^{99m}\text{Tc}</math> i <math>^{131}\text{I}</math> izuzetno visoke aktivnosti, kao i izvoru FDG-a aktivnosti 4000 MBq dva puta nedeljno. Zaposlena lica primenjuju ovo radioaktivno zračenje u dijagnostičke i terapijske svrhe pacijenata u skladu sa Zakonom o zaštiti od jonizujućeg zračenja i o nuklearnoj sigurnosti, i Pravilnikom o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima. U radu su dati rezultati merenja brzina apsorbovanih doza zračenja u cilju procene radijacione bezbednosti radnih mesta.</b>
<b>Datum prihvatanja teme od strane NN veća:</b> DP	
<b>Datum odbrane:</b> DO	
<b>Članovi komisije:</b> (ime i prezime / titula / zvanje / naziv organizacije / status) KO	<b>Predsednik:</b>  <b>Član:</b>  <b>Član:</b>

UNIVERSITY OF NOVI SAD  
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS  
KEY WORDS DOCUMENTATION

<b>Accession number:</b> ANO	
<b>Identification number:</b> INO	
<b>Document type:</b> DT	<b>Monograph documentation</b>
<b>Type of record:</b> TR	<b>Textual printed material</b>
<b>Contents code:</b> CC	
<b>Author:</b> AU	<b>Jasmina Jakonić</b>
<b>Mentor:</b> MN	<b>Dr Nataša Todorović</b>
<b>Title:</b> TI	<b>Radiation Protection of Staff in Nuclear Medicine</b>
<b>Language of text:</b> LT	<b>Serbian (latin)</b>
<b>Language of abstract:</b> LA	<b>Serbian/english</b>
<b>Country of publication:</b> CP	<b>Serbia</b>
<b>Locality of publication:</b> LP	<b>Vojvodina</b>
<b>Publication year:</b> PY	<b>2011.</b>
<b>Publisher:</b> PU	<b>Author's reprint</b>
<b>Publication place:</b> PP	<b>Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 5</b>

<b>Physical description:</b> TD	<b>9 chapters, 71 pages, 14 tables, 14 pictures</b>
<b>Scientific field:</b> SF	<b>Physics</b>
<b>Scientific discipline:</b> SD	<b>Medicine Physics</b>
<b>Subject, Key words:</b> SKW	<b>Nuclear Medicine + Radiation Protection</b>
<b>Holding data:</b> HD	<b>Library of Faculty of Science and Mathematics, University of Novi Sad</b>
<b>Note:</b> N	-
<b>Abstract:</b> AB	<b>On Department of Nuclear Medicine at the Institute of oncology Vojvodina, Sremska Kamenica, there are the following positions: chemist, a specialist nuclear medicine, general medicine, laboratory technician, and administrator. This staff is daily exposed to the open source of <math>^{99m}\text{Tc}</math> and <math>^{131}\text{I}</math> extremely high activities, and the source of FDG activities of 4000 MBq, twice a week. Employers apply this radioactive radiation in diagnostic and therapeutic use of patients in accordance with the Law on Protection against Ionizing Radiation and Nuclear Safety and Regulation on Limits of Exposure to Ionizing Radiation. This paper presents the results of measurements of the absorption rate of radiation doses to assess radiation safety jobs.</b>
<b>Accepted on Scientific Board on:</b> AS	
<b>Defended:</b> DE	
<b>Thesis Defend Board:</b>	<b>President:</b>

<b>DB</b>	<b>Member:</b> <b>Member:</b>
-----------	----------------------------------