



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

ПРИМЉЕНО:	27 ДЕЦ 2007
ОРГАНИЗ.ЈЕД	БРОЈ
0603	9/1704

Naziv rada

OSNOVNI PRINCIPI ZAŠTITE OD JONIZACIONOG ZRAČENJA

- diplomski rad -

Mentor:

Docent Nataša Todorović

Kandidat:

Marijeta Đaković

Novi Sad, 2007.

SADRŽAJ:

UVOD

I ATOMI I RADIJACIJA

- 1.1. STRUKTURA MATERIJE
- 1.2. RADIOAKTIVNOST

II JONIZACIONO ZRAČENJE

- 2.1. ENERGIJA RADIJACIJE
- 2.2. TIPOVI RADIJACIJE
- 2.3. JONIZACIJA NAELEKTRISANIM ČESTICAMA
- 2.4. TEŠKI JONI
- 2.5. ELEKTRONI
- 2.6. GAMA ZRACI
- 2.7. NEUTRONI

III DELOVANJE JONIZACIONOG ZRAČENJA NA ŽIVU MATERIJU

- 3.1. RADIJACIONO-HEMIJSKI PROCESI
- 3.2. OŠTEĆENJE DNK
- 3.3. DOZE ZRAČENJA

IV UTICAJ ZRAČENJA NA ZDRAVLJE ČOVEKA

- 4.1. UZROK KANCERA
- 4.2. INDIREKTNO-GENETSKI EFEKTI

V PREPORUKE ZA OSTVARIVANJE OPTIMALNE ZAŠTITE

- 5.1. PRINCIPI NA KOJIMA SE MORA ZASNIVATI ZAŠTITA
- 5.2. CENA NEGATIVNE POSLEDICE ZRAČENJA
- 5.3. IDEALNI SLUČAJ OPTIMALIZACIJE
- 5.4. GRANICE EKVIVALENTNE DOZE RADNIKA U PROFESIONALNOM KONTAKTU SA JONIZACIONIM ZRAČENJEM
- 5.5. EKVIVALENTNE DOZE ZA STANOVNIŠTVO

VI ZAŠTITA OD ZRAČENJA

- 6.1. OSNOVNI VIDOVI ZAŠTITE OD JONIZACIONOG ZRAČENJA
- 6.2. MEDICINSKA UPOTREBA RADONA
- 6.3. OPŠTI PRINCIPI ZA RADNA MESTA
- 6.4. MERENJE I KONTROLA ZRAČENJA
- 6.5. SISTEMATSKE MERE ZAŠTITE
- 6.6. LOKALNE MERE ZAŠTITE
- 6.7. ZAŠTITA OD ZRAČENJA U NAŠOJ ZEMLJI

ZAKLJUČAK

UVOD

Radijacija je životna činjenica. Živimo u svetu u kom je radijacija prirodno zastupljena svuda. Svetlo i toplota od nuklearnih reakcija na Suncu su osnova našeg postojanja. Radioaktivni supstance koje se prirodno javljaju kroz okruženje i naša tela sadrže radioaktivne materijale, kao što su karbon-14, potozijum-4, polonijum-210, koji su potpuno prirodni. Ceo život na Zemlji razvijen je u prisustvu ove radijacije.

Od otkrića X-zraka i radioaktivnosti pre više od 100 godina, zraci su dobijeni veštačkom proizvodnjom radijacije i radioaktivnog materijala. Rentgen (W. Conrad Röntgen) je otkrio, 8. novembra 1895. godine, novu vrstu elektromagnetskog zračenja, koje nazvao X-zracima (rentgensko zračenje). Ubrzo je otkriveno da to zračenje može da bude opasno po zdravlje. Godine 1896. zabeležena je prva opeketina izazvana X-zracima. Tumačenje stvaranja opeketina bilo je različito. Nikola Tesla je, na primer, 1896. godine smatrao da su oštećenja na koži nastala ozonom ili ugljen-dioksidom koji je nastao na površini kože, pa je zato kao zaštitu predlagao mazanje kože uljem ili izolaciju od zraka. Leonard (L. L. Leonnard) je, 1898. godine, opeketine tumačio teorijom statičkog naboja. Preporučio je korišćenje mreže uzemljenih vodiča, koje bi se postavljali između bolesnika i cevi, da bi se u zemlju odveo stvoreni elektrostatički nabolj. Ove mreže donekle su apsorbovale niskoenergetske X-zrake, koji su odgovorni za površinske opeketine, tako što su smanjivale njihov intenzitet. Tompson (Elilu Thomson) se zalagao da u rendgenskim cevima bude visok vakuum, kako bi se dobio energetski spektar X-zraka sa manjim niskoenergijskim delom.

Jedina zaštita koja je postojala bila je uslovljena željom za poboljšanjem kvaliteta radiografije, čime su, na sreću, pacijenti i hirurzi donekle bili zaštićeni.

Rolins (Rollins) je utvrdio uticaj X-zraka na pobačaje ženki zamoraca i niz drugih bioloških uticaja. Povećanjem broja nesrećnih slučajeva, nametnula se potreba za efikasnijom zaštitom. On je upotrebio olovo, odnosno olovo oksid (olovno belilo) za eliminaciju mekog zračenja, koje se nanosilo direktno na rendgensku cev. Postojao je i predlog da se iza nanetog sloja stavi fotografска ploča, pa ukoliko ploča ne pocrni posle 7 minuta, zračenje se moglo smatrati bezopasnim. Faller je 1905. godine kao sredstvo zaštite prvi uveo pojam filtera i dao logičko objašnjenje teorije selektivne apsorpcije. Takođe je predlagao životinjsku kožu kao povoljan filter, zbog njenih sličnosti sa ljudskom kožom. Lekar Lehman preporučio je, 1906. godine, upotrebu rendgenskih snimaka umesto fluoroskopskih pregleda, kako bi se smanjilo izlaganje bolesnika i hirurga X-zracima. Dakle, 10 godina posle prvih primena X-zraka, gotovo svi osnovni principi zaštite bili su postavljeni i bilo je započeto ograničenje od nepotrebognog izlaganja. Brzo posle otkrivanja X-zraka, 1896. godine, usledilo je Bekerelovo (Becquerel) otkriće radioaktivnosti. Marija i Pjer Kiri (Marie i Pierre Curie) otkrili su, 1898. godine, radioaktivne elemente polonijum i radijum, a Debirne (Debierne) je, 1899, pronašao aktinijum. Pierre Curie vršio je na vlastitoj ruci oglede sa zračenjem radijuma (1900. god.), pri čemu je nastala povreda čiji je razvoj posmatrao sa velikom pažnjom. Maria Curie je uz sebe, u metalnoj kutijici, nosila nekoliko stotina miligrama jako radioaktivne supstance, tako da je imala povrede slične muževljevim. Becquerel je 1901. godine zadobio površinsku opeketinu kože, koja se pretvorila u otvorenu ranu, i kojoj je bilo potrebno dosta vremena da zaraste.

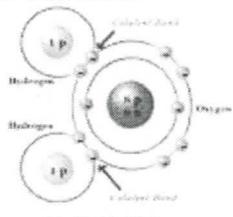
Udesi pionira u radu sa radioaktivnim supstancijama i rendgenskim zracima bili su gorka škola iskustava, koja su dobro primenjena prilikom kasnijeg procvata upotrebe supstanci koje emituju zračenje. Prvom lančanom reskocijom i razvojem upotrebe atomske energije, 1942. godine, u mnogim zemljama broj osoba izloženih u većoj meri nuklearnom zračenju je naglo porastao. Isto tako, porasla je količina radioaktivnog materijala u laboratorijama. Ukupna količina separatnog radijuma u svetu, 1939. godine, iznosila je 1000 grama. Koliko je ta količnina u sadašnjim razmerama beznačajna, ilustruje činjenica da jedan reaktor proizvodi oko jedan gram fisionih radioaktivnih produkata po MW snage u danu rada. Zbog kraćeg vremena poluraspada tih produkata, njihova aktivnost je mnogo veća od radioaktivnosti jednake količine radijuma.

Instalirana snaga nuklearnih elektrana, 1. januara 1976. godine, iznosila je 80.000 MW. Prema nekim podacima, 1985. godine ukupna snaga takvih centrala u svetu bila je oko 600.000 MW. Ovakav uspon postiže i nuklearna medicina, a mnoge dijagnoze uspostavljaju se na osnovu neinvazivnih ispitivanja sa radioaktivnim izotopima. Upotreba radioaktivnih izvora u velikom broju zahteva da se ljudi koji rade sa njima upoznaju sa opasnostima i mogućnostima efikasne zaštite, kao i sa zakonskim propisima, jer je na korisnicima velika odgovornost za pravilnu upotrebu i efikasnu zaštitu.

1. ATOMI I RADIJACIJA

1.1. Struktura materije

Sva materija na svetu koja nas okružuje sastoje se od atoma. Oni su osnovni sastojci elemenata, kao sto su vodonik, ugljenik, gvožđe, olovo, kiseonik... Svaki atom sadrži sičišno centralno pozitivno nanelektrisano jezgro i neki broj elektrona. Elektroni nose negativno nanelektrisanje i kreću se oko jezgra u oblacima sa slabo definisanim granicama. Jezgro je 10.000 puta manje nego elektronski oblaci, a sami elektroni su čak i manji. To znači da je atom uglavnom prazan i teško se opisuje, osim u dijagramima, koji su pretežno šematski.



Slika 1.1. Prikaz atoma kiseonika sa jezgrom

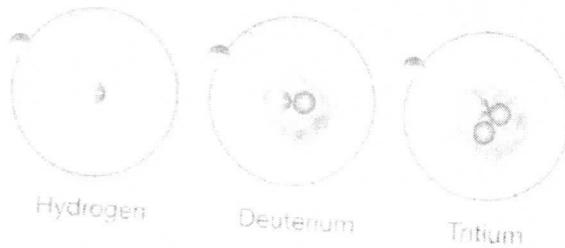
Jezgro atoma sadrži protone, koji imaju pozitivno nanelektrisanje, jednako negativnom nanelektrisanju elektrona i neutrona koji nemaju nanelektrisanje. Svaki atom sadrži jednak broj protona i elektrona i zato je električno neutralan. Atomi istih ili različitih elemenata mogu se kombinovati do forme veće molekule. Na primer, dva atoma kiseonika formiraju molekul kiseonika, a dva atoma vodonika sa jednim atomom kiseonika formiraju jedan molekul vode. Broj elektrona u atomu i broj protona u jezgru naziva se atomski broj. Atomski broj ugljenika je 6 a, na primer, za olovo je 82. Zato što protoni i neutroni imaju istu masu i mnogo su teži nego elektroni, glavnina atomske mase je koncentrisana u jezgru i ukupan broj protona i neutrona je maseni broj.

$$\text{JEZGRO} = \text{PROTON} + \text{NEUTRON}$$

Pošto je broj protona u elektroneutralnom atomu jednak, vrste atoma možemo opisati po broju protona i neutrona koje sadrže. Dok je broj protona jedinstven za svaki element, jednostavno možemo koristiti ime elementa zajedno sa brojem mase. Tako je olovo – 208, nukleid sa 82 protona i 126 neutrona. Nukleidi nekog elementa koji imaju isti broj protona, ali različit broj neutrona, nazivaju se izotopi tog elementa.

Vodonik ima, na primer, 3 izotopa: vodonik – 1 (obični vodonik sa jezgrom od samo jednog protona); vodonik–2, zvani deuterijum (1 proton i 1 neutron) i vodonik – 3, zvani tritijum (1 proton i 2 neutrona). Gvožđe ima 10 izotopa, od gvožđa–52 do gvožđa–61. Izotopi imaju ista hemijska svojstva. Oni se razlikuju po nuklearnim svojstvima (na primer, neki mogu biti podložni raspadu u toku vremena, pa se nazivaju radioaktivni izotopi).

Slika 1.2. Izotopi vodonika
Jezgro = proton + neutron



1.2. RADIOAKTIVNOST

Umesto termina ionizaciono zračenje može se koristiti termin radijacija, što je usvojila Međunarodna agencija za atomsku energiju (IAEA), u saradnji sa Nacionalnim odborom za radioološku zaštitu (Ujedinjeno Kraljevstvo). IAEA nudi široki spektar stručnih procena i programa za bezbednu upotrebu radijacije. Imala je zakonsku odgovornost za razvoj bezbednosnih standarda koji su primenljivi za rukovanje u svim vrstama aplikacija koje koristi radijacija.

Radijacija je spontano pražnjenje jednog elementa u drugi ili neke nuklearne vrste u drugu, uz emisiju zračenja. Pri transformaciji jezgra, menja se sastav ili energetsko stanje. Do ove pojave dolazi ako se u procesu radioaktivnog raspada emituje čestica, dok emisija γ -zračenja kod izomera dovodi do menjanja samo energetskog stanja jezgra. Jedan od načina da prirodno jezgro doživi tu transformaciju je α -raspad. Tada dolazi do emisije α -čestice, koja se sastoji od 2 protona i 2 neutrona, kao i jezgro atoma helijuma.

Drugi način je emisija β -čestice, koja je u stvari elektron. I α i β raspadi su praćeni emisijom γ -zračenja, koje je elektromagnetne prirode. Postoje jezgra koja emituju samo γ -zračenje i to su izomeri. U proces radioaktivnog raspada može da se svrsta i spontana fisija, koju doživljavaju jezgra ^{238}U i neka teška jezgra. Preciznim merenjima otkriveni su i spontani procesi raspada, pri kojima neko teško radioaktivno jezgro mogu da emituju ^{14}C , ^{24}Ne ili ^{25}Ne . Oni se dešavaju 10^{10} – 10^{12} puta manjom verovatnoćom nego α -raspad i služe kao primer da se pod određenim uslovima, pomoću spontanih transformacija jezgra, mogu emitovati i čestice velike mase.

Jezgro koje se raspada naziva se predak, a jezgro koje nastaje putem radioaktivnog raspada naziva se potomak. Irene i Frederik Žolio-Kiri otkrili su, 1934. godine, veštačku radioaktivnost. Utvrđili su da jezgra koja su dobijena u laboratoriji mogu da emituju i pozitrone (pozitivne elektrone). Ubrzo je otkriveno da se u nuklearnim reakcijama stvaraju nestabilna jezgra koja mogu da emituju protone, i to jedan ili dva. Kao rezultat ovih reakcija često se mogu dobiti i produkti koji su do te mere nestabilni da se trenutno raspadaju. Zato se svi oni procesi u kojima se do raspada dolazi za vreme kraće od 10^{-12} s posle stvaranja jezgra, ne smatraju radioaktivnošću. To znači da veliki broj procesa može da se odvija u novonastalom jezgru, i ako oni ne dovedu dobijeni produkt nuklearne reakcije do neke stabilne strukture, koja bi trajala bar 10^{-12} s, radi se o nestabilnoj tvorevini, sastavljenoj od protona i neutrona, koja nije jezgro u pravom smislu. Takav raspad nestabilne tvorevine ne smatra se radioaktivnošću.

Na osnovu radioaktivnog raspada, sva jezgra dele se na dve velike grupe:
– stabilna i

– nestabilna ili radioaktivna.

Jasna granica između ove dve grupe ne postoji, zato što i jezgra koja smatramo stabilnim se mogu raspadati, ali je brzina tog raspada tako mala da se teško može registrovati.

Radioaktivna jezgra se mogu podeliti na:

- prirodna
- veštačka (ne postoje u prirodi).

1.2.1. Prirodna radioaktivnost

Tu pre svega spadaju svemirski ili kosmički zraci. Oni se dele na primarne i sekundarne. Primarni kosmički zraci dolaze iz međuzvezdanog prostora. Njih čini oko 90% protona, a manji deo čine α -čestice. Oni nastaju pri eksplozijama na Suncu. Tada nastaju protoni i α -čestice koje kreću ka Zemlji. Količina zraka je veća u gornjim slojevima atmosfere, a bliže Zemlji njihov intenzitet opada.

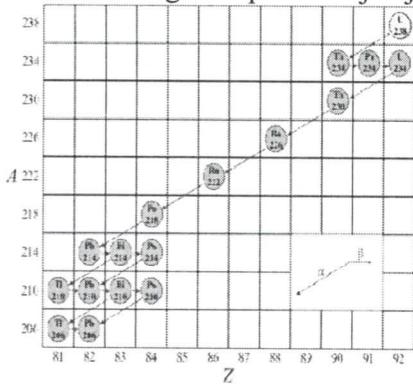
Sekundarni kosmički zraci nastaju kao posledica sudara primarnih zraka sa jezgrima elemenata koji se nalaze u atmosferi. Pri sudarima nastaju protoni i neutroni, ali i druge čestice (α i γ zračenje); u prirodi se mogu naći neki izotopi (više od 60), koji su nestabilni i raspadaju se.

1.2.2. Veštačka radioaktivnost

Veštačka jezgra su proizvedena u nuklearnim reakcijama i do sada je poznato više od 2.000 takvih jezgara.

Radioaktivni element se može dobiti, na primer, tako što se prirodni element bombarduje nuklearnim projektilima, protonima, α česticama, neutronima itd., i u njemu se izazove nuklearna transformacija u novi element ili novi izotop istog tog elementa. Danas kao glavni izvor veštačkih radioaktivnih elemenata služe nuklearni reaktori i različiti akceleratori. Kao projektili za bombardovanje koriste se neutroni jer nemaju nanelektrisanje, pa zbog toga lako prodiru u jezgro atoma.

Postoje radioaktivni elementi koji imaju tako dug period poluraspada da nisu uspeli u potpunosti da se raspadnu za poslednjih 4–4,5 milijardi godina. To su uranovi izotopi ^{235}U i ^{238}U , kao i ^{232}Th , čiji je period poluraspada redom $7,1 \times 10^8$, $4,5 \times 10^4$ i $1,4 \times 10^{10}$ godina, i svi ovi izotopi su α emiteri. Njihovi potomci raspada nisu stabilni, pa se proces nastavlja preko niza elemenata, dok ne dostigne neki od stabilnih izotopa olova. Šematski prikaz radioaktivnog niza predstavljen je slici 1.3.



Slika 1.3. Radioaktivni niz ^{238}U

U procesima radioaktivnih raspada moraju važiti neki osnovni zakoni (zakon održanja energije, impulsa, momenta impulsa...). Zakon održanja energije kod radioaktivnog raspada bi mogao da se napiše u obliku

$$M_{\text{poč}}c^2 = M_{\text{fin}}c^2 + \sum_i M_i c^2 + E \quad [1]$$

gde je: $M_{\text{poč}}$ – masa jezgra koje se raspada, M_{fin} – masa jezgra koje nastaje, M_i – početna masa čestica koje se tokom raspada mogu emitovati, E – ukupna energija koja se deli na produkte raspada.

Pošto je radioaktivni raspad spontan proces, vrednost ove energije je uvek pozitivna, tj. uvek se oslobađa određena količina energije.

1.2.3. Zakon radioaktivnog raspada

Svaki radioaktivni raspad je potpuno jedinstven, odnosno ne postoji dva nestabilna jezgra koja bi imala jednakе sve parametre karakteristične za raspad. Da li će se neka nestabilna jezgra u uzorku koji sadrži neki reaktivni element raspasti ili ne u odabranom intervalu vremena, sa sigurnošću nikada ne možemo tvrditi. Ali ako imamo izvesnu količinu nekog kratkoživećeg reaktivnog elementa, merenjem se pouzdano može utvrditi kada će se raspasti recimo polovina jezgara koja se u tom uzorku nalaze. Na primer, utvrđeno je da se za 5 dana raspadne polovina od početnog broja jezgara ^{210}Bi jednog od članova niza ^{238}U .

Nakon otkrića radioaktivnosti utvrđeno je da se na brzinu raspada nekog radioaktivnog elementa ne može uticati ni sa kakvim spoljašnjim faktorom: temperaturom, električnim ili magnetnim poljem, pritiskom itd. Samim tim verovatnoća raspada nekog radioaktivnog jezgra određena je isključivo prirodom procesa koji se u njemu odvijaju i za dati izotop može se smatrati konstantom.

Zato se veličina λ naziva konstanta radioaktivnog raspada. Ukoliko je u početnom uzorku bilo N radioaktivnih jezgara, broj raspada u određenom vremenskom intervalu dt bio bi:

$$dN = \lambda \cdot N \cdot dt \quad [2]$$

Integracijom ove jednačine dobija se dobro poznati zakon radioaktivnog raspada:

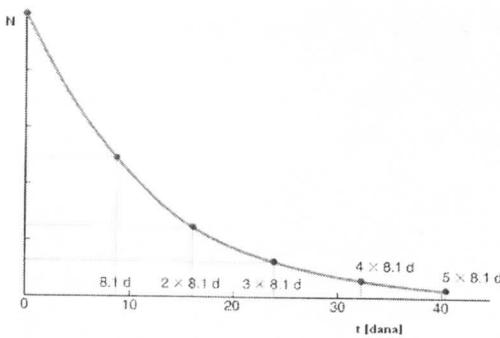
$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad [3]$$

Ovaj zakon pokazuje da se broj radioaktivnih jezgara u nekom uzorku N eksponencijalno smanjuje sa vremenom t .

N_0 – je broj jezara posmatranog reaktivnog izotopa u trenutku $t = 0$.

Na slici 1.4. u linearnoj skali predstavljena je promena broja atoma izotopa joda ^{131}I sa vremenom. U logaritamskoj razmeri vremenska zavisnost broja neraspadnutih jezgara predstavlja se pravom linijom.

јодовог izotopa ^{131}I са временом. У логаритамској размери временска зависност броја нераспаднутих језгара се претставља правом линијом.



Slika 1.4. Grafički prikaz zakona radioaktivnog raspada

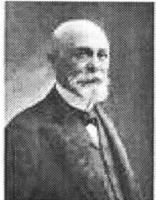
Iz jednačine [2] se može izraziti koliki će se broj jezgara nekog radioaktivnog uzorka raspasti u jedinici vremena

$$\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N \quad [4]$$

Ova veličina se naziva aktivnost radioaktivnog uzorka i označava se sa A. Jedinica za aktivnost je 1 Bq (Bekerel) i ona je jednaka aktivnosti nekog radioaktivnog izvora kome se svake sekunde raspade tačno jedno jezgro. Još je u upotrebi i stara jedinica Kiri, 1Ci, koja je definisana kao aktivnost 1 g ^{226}Ra i iznosi $3,7 \times 10^{10}$ raspada u jednoj sekundi.



Slika 1.5. Marija Kiri



Slika 1.6. Henri Bekerel

Ako pomnožimo levu i desnu stranu jednačine [3] sa konstantom radioaktivnog raspada, dobija se relacija koja pokazuje kako aktivnost nekog izvora zračenja eksponencijalno opada sa vremenom

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad [5]$$

gde je A_0 – početna aktivnost radioaktivnog izvora.

Mnogo je jednostavnije poznavati period poluraspada nekog radioizotopa. Vreme za koje aktivnost radionuklida opada na polovinu njegove originalne vrednosti naziva se poluživot (period poluraspada) $T_{1/2}$ i to je vreme za koje se polovina jezgara u nekom uzorku raspada. Svaki radionukleoid ima jedinstveni poluživot, koji je u rasponu od sekunde do biliona godina. Na primer, za jod-137 to je 8 dana, cezijum-137 je 30 godina, karbon-14 je 5.730 godina, plutonijum-239 je 24.000 godina, uranijum-238 je 4.470 miliona godina. U uzotopnim poluživotima aktivnost radionuklida se redukuje

raspadanjem na 1/2, 1/4, 1/8 i tako dalje, njihove početne vrednosti. To znači da ne možemo predvideti preostalu aktivnost u bilo koje buduće vreme. Pošto broj radionukleida opada, radijacija se emitiše proporcionalno opadajuće.

Veza između perioda poluraspada i konstante radioaktivnog raspada je

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad [6]$$

Postoji još jedna veličina, a to je srednji život nestabilnog jezgra. Ona se preko konstante radioaktivnog raspada može izraziti kao

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad [7]$$

a dobija se usrednjavanjem vremena života po celom skupu radioaktivnih jezgara jedne vrste. Konstanta radioaktivnog raspada je jedno od nekoliko osnovnih veličina koje moraju biti prozname za bilo koji element. Za kratkoživeće izotope, kojima se može meriti promena aktivnosti u nekom prihvatljivom intervalu vremena, λ se može odrediti na osnovu vremenske promene aktivnosti. Ukoliko se ta promena aktivnosti izvora predstavi u logaritamskoj skali, dobićemo linearnu zavisnost, a konstanta radioaktivnog raspada biće koeficijent pravca.

$$\lambda = - \frac{\Delta \ln(A/A_0)}{\Delta t} \quad [8]$$

Ukoliko neki radioaktivni element ima veoma dug period poluraspada, pa se aktivnost tako malo menja da se u nekom eksperimentalno dostižnom vremenskom intervalu može smatrati konstantom, λ se može odrediti na drugi način. Ako se za neki uzorak kome znamo količinu, ili broj prisutnih radioaktivnih atoma N , detekcijom radioaktivnog zračenja možemo pouzdano odrediti aktivnost, tako da se konstanta radioaktivnog raspada jednostavno izračunava prema jednačini:

$$\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N \quad [9]$$

2. JONIZACIONO ZRAČENJE

Prema efektima koje proizvodi na materiju, radijacija se može klasifikovati na:

1. ionizujuće i
2. neionizujuće zračenje.

Jonizujuće zračenje uključuje kosmičke zrake, X zrake i radijaciju od radioaktivnih materijala. Ovo zračenje poseduje energiju potrebnu za ionizaciju atoma ili molekula u materijalu. Zajedničko svojstvo svih vrsta ionizujućeg zračenja je njihovo atomsko i subatomsko poreklo, kao i relativno velika energija koja im omogućava da vrše ionizaciju. Međutim, način na koji do te ionizacije dolazi, razlikuje se prema vrsti zračenja.

Nejonizujuće zračenje uključuje: ultravioletno svetlo, topotu koja zrači, radio talase, mikrotalase. Oni ne poseduju tu energiju kao ionizaciono zračenje. Nosič energije kod neionizacionog zračenja je foton.

2.1. ENERGIJA RADIJACIJE

Energija različitih tipova radijacije, α , β , γ zraka, izražena je obično u elektro voltima (eV), a najčešće se koriste jedinice MeV. Na primer, energija α čestica koju emituje polonijum-214 je oko 7,7 MeV. Beta čestice od olova-214, takođe formirane u serijama raspada uranijuma-238, imaju maksimalnu energiju od 1,0 MeV, a γ zraci prizvedeni tako imaju energiju od 0,35 MeV.

2.2. TIPOVI RADIJACIJE

Većina zajedničkih tipova radijacije dolazi od radioaktivnih materijala, a neki tipovi radijacije se proizvode na drugi način. Najvažniji primer je da se X-zraci normalno proizvode paljenjem snopova elektrona na metalni cilj (obično volfram). Elektroni u metalnim atomima apsorbuju energiju iz elektronskog snopa, metalni atomi postaju pobuđeni i onda oslobođaju energiju u obliku X-zraka. Prema tome, radijacija dolazi od metalnih atoma, ali to nije slično radioaktivnosti jer nije od jezgra. Zbog načina na koji nastaju, X-zraci nemaju period poluživota. Jednom kada se snop isključi, X-zraci nestaju.

Alfa radijacija (α) je pozitivno nanelektrisano jezgro helijuma emitovano od već nestabilnog jezgra. To je relativno masivan deo, ali ima samo kratak domet u vazduhu (1–2 cm) pa ga papira ili kože mogu potpuno apsorbovati. Ona može biti rizična ukoliko prodre u telo inhalacijom ili gutanjem, jer pri velikom izlaganju može dospeti u obližnja tkiva, kao što su plućna maramica ili stomak.

U emisiji α čestica, ili kako se obično kaže u α raspadu, masa jezgra koje se raspada veća je nego zbir mase olova čestica i ostataka jezgra – sada novog jezgra. To je egzoterni proces u kome je višak mase pretvoren u energiju koju, u skoro ukupnom iznosu, preuzima α čestica u vidu energije gibanja. Energija emitovanih čestica u nuklearnoj fizici meri se u eV, odnosno KeV, MeV itd.

$$1\text{eV} = 1,6 \times 10^{-19}\text{J}$$

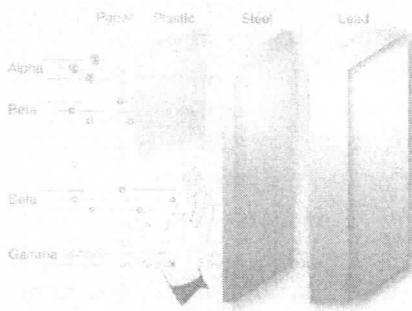
Alfa čestice koje pojedini nukleoid emituje, imaju tačno određene energije – jednu, dve, ređe i više.

Beta radijacija (β). Beta čestice ili β zraci su visokoenergetski elektroni ili pozitroni koji su stvorenji i emitovani od pojedinih radionukleida. Za razliku od α čestica, β čestice nisu određeni diskretnih energija, nego su emitovane sa kontinuiranom raspodelom u energiji. Beta čestice koje emituju radionukleidi mogu biti negativni elektroni i pozitivni elektroni.

Negativni elektroni nastaju raspadom jezgra sa viškom neutrona, a pozitivni elektroni nastaju pri raspodu nulekida sa viškom protona od onog potrebnog za stabilnost jezgra. Emisiju pozitivnih elektrona zovemo pozitronskim raspadom ili β^+ raspadom. Kao rezultat emisije β čestica masa jezgra ostaje praktično nepromenjena, ali se atomski broj menja za 1. Pošto je spektar emitovanih čestica kontinuiran, u tablicama možemo naći samo maksimalnu energiju β čestica za pojedini nukleoid. Pogodno je da se služi sa srednjom energijom β čestica.

$$\text{Srednja energija } \bar{E}_\beta = \frac{1}{3} E_{\beta \max} \quad [10]$$

Beta čestice su mnogo manje od α čestica i mogu prodreti dalje u materiji ili tkivo. Beta radijacija može se kompletno apsorbovati od listova plastike, stakla ili metala. Ne prodire iza površine obloge kože, međutim veliko izlaganje visokoenergetskim β emiterima može izazvati gorenje kože. Takvi emiteri takođe mogu biti rizični ukoliko se inhaliraju ili gutaju.



Slika 2.1. Prolazak zraka kroz različite supstance

Protoni (p^+). Protoni su jezgra vodonika, pa su prema tome pozitivno nanelektrisani. Protonski snopovi proizvode se u akceleratorima raznih tipova. Prirodni radioaktivni nukleoidi ne emituju protone. Brzi neutroni u sudarima sa vodonikovim atomima mogu izbiti jezgro i tako stvoriti protone.

Neutronska radijacija (n). Neutron je nenanelektrisana čestica, koja ima masu nešto veću od protona.

Neutroni se obično grupišu u tri kategorije:

1. **termalni neutroni** su neutroni koji imaju energije koje odgovaraju termičkoj ravnoteži okoline tako da u proseku nema razmene energije između neutrona i termički uzbudjenih atoma u materiji u kojoj se ti neutroni nalaze. Spektar energije neutrona će u tom slučaju imati Maxwellovski oblik, sa energijom $2,2 \times 10^3$ m/s, koja odgovara energiji od 0,025 eV.
2. **intermedijalni neutroni** su oni neutroni čija se energija nalazi između 0,5 eV i 10 eV. Neutroni sa energijama ispod 100 eV nazivaju se sporim neutronima.
3. **brzi neutroni** su oni neutroni koji imaju energiju iznad 10 KeV.

Neutronska reakcija je emitovanje neutrona iz nestabilnog jezgra, posebno za vreme atomske fisije i nuklearne fuzije. Nezavisno od komponenti u kosmičkim zracima, neutroni se obično proizvode veštačkim putem. Budući da su neutroni neutralne čestice, neutroni mogu biti i vrlo prodirući i kada su u interakciji sa materijom ili tkivom oni izazivaju emisiju β i γ radijacije. Zbog toga neutronska radijacija zahteva veliku zaštitu da bi redukovala izlaganje.

X i γ zraci. X i γ zraci su elektromagnetno zračenje vrlo kratke debljine talasa. Nema kvalitetne razlike između X i γ zračenja. Razlika u imenu koristi se da bi se označilo da li je neko zračenje otvoreno izvan jezgra (x) ili unutar jezgra (γ).

X zraci su visokoelektronski fotoni, kao i γ radijacija i proizvode se veštačkim brzim usporavanjem elektronskog snopa. X zraci mogu biti kontinuirane energije, u slučaju kad su izazvane zakočnim zračenjem ili su diskretnih energija u slučaju kada su izazvane prelazima između atoma. X zraci su slično prodirući i u odsustvu zaštite gustih materijala mogu isporučiti značajne doze unutrašnjim organima.

Gama radijacija (γ) je vrlo visoki energetski foton (forma elektromagnetne radijacije kao svetlo) emitovan od nestabilnog jezgra i često u isto vreme emituje β čestice. Gama radijacija uzrokuje ionizaciju u atomima kada prolazi kroz materiju, prvenstveno zbog interakcije sa elektronima. To može biti vrlo prodiruće i samo solidno debeli gusti materijal, kao što je gvožđe ili olovno, može da napravi dobru zaštitu. Gama radijacija zbog toga isporučuje značajne doze unutrašnjim organima, bez inhalacije ili gutanja. Gama zraci su, osim kod vrlo visoko pobuđenih jezgara, diskretnih energija zbog razlike u energiji nivoa u jezgru između kojih se prelaz vrži. Jezgro ne menja ni broj ni vrstu nukleona prilikom emisije γ zračenja. U prirodnoj radioaktivnosti nema primera za jezgra koja emituju samo γ zračenje. Gama zračenje prirodnih radioaktivnih izotopa uvek je praćeno emisijom β i α čestica.

Kosmička radijacija dolazi iz dubokog svemira. To je mešavina mnogih različitih tipova radijacije, uključujući protone, α čestice, elektrone i druge različite neobične (visokoenergetske) čestice. Sve ove energetske čestice u snažnoj su interakciji sa atmosferom i, kao rezultat, kosmička radijacija na nivou zemlje postaje naročito muonska, neutronska, elektronska, pozitronska i fotonska. Većina doza na nivou zemlje dolazi od muona i elektrona.

2.3. JONIZACIJA NAELEKTRISANIM ČESTICAMA

2.3.1. Apsorpcija nanelektrisanih čestica u materiji

Najbitniji mehanizam kojim nanelektrisane čestice gube energiju u materiji je interakcija kulonskog polja upadne čestice sa poljima vezanih elektrona atoma apsorbensa. Pored ovog tipa, postoji još nekoliko procesa. Ti procesi izmene energije između upadne čestice i sredstava apsorbensa su: nuklearne reakcije, kulonsko raspršenje na atomskim jezgrima i elektromagnetno zračenje.

Pri kulonskoj interakciji, čestica koja prolazi kroz apsorbens atomskim elektronima predaje izvesne količine energije. Od količine te energije zavisi da li ćemo taj proces

opisati kao ionizaciju (predata energija je bila dovoljna da se atomski elektron otkine od omotača) ili kao ekscitaciju (predata energija je bila manja od energije veze, tako da je elektron u omotaču samo došao u više energetsko stanje).

Energija dE , koja je predata u obliku eksitacije ili ionizacije, na elementu puta dx je

$$S = -\frac{dE}{dx} = \frac{e^4 z^2}{4\pi\epsilon^2 mv^2} NB \quad [11]$$

gde je

$$B = z \left[\ln \frac{2mv^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right] \quad [12]$$

e – nanelektrisanje elektrona, m – masa elektrona u gramima, E – energija, z – atomski broj atoma u apsorbensu, v – brzina upadne čestice, N – broj atoma po kubnom centrimetru homogenog sredstva apsorbensa

$$\beta = \frac{v}{c} \quad [13]$$

c – brzina svetlosti u vakuumu

I – srednji potencijal ionizacije ili pobude atoma (određen eksperimentalno)

Apsolutni iznos tog potencijala određuje se za svaki element pojedinačno eksperimentalno ili pomoću sledeće relacije

$$I = k z \quad [14]$$

gde je $k \approx 11,5$ eV

Veličina (S) iz relacije [11] predstavlja moć zaustavljanja. Često koristimo i masenu moć zaustavljanja, koja se definiše kao s/ρ , ρ – je gustina sredstva. Relacija [11] ne važi za male energije upadnih čestica ($E < 200$ KeV), isto kao kod niskih energija gde je $2mv^2 < I$, logaritamski član u [12] relaciji postaje negativan, što automatski poništava mogućnost korišćenja relacije [11].

U slučaju prolaza kroz materiju koja se sastoji od hemijskih spojeva, moć zaustavljanja svake vrste atoma je nezavisna od prisustva drugih atoma: uticaj hemijskih veza je zanemarljiv.

Neke vrednosti srednjeg potencijala su date u tabeli 2.1.

Element	I (eV)
H	16,0
C	64,0
N	81,0
O	99,0
P	165,0

Tabela 2.1. Vrednosti srednjeg potencijala

2.1.2. Domet

Pojam dometa je usko povezan sa pojmom gubitka energije. Nanelektrisane čestice u apsorbensu kontinuirano gube energiju, tako da određena vrsta čestica sa određenom energijom prelazi uvek isti put pre zaustavljanja. Razlike između određenih puteva su veoma male i ne iznose više od nekoliko procenata ukupne dužine puta, a predstavljaju uzrok statističke prirode procesa gubitka energije. Put koji pređu čestice do zaustavljanja

zove se domet i obeležava se sa R. Najčešće se koristi srednji domet, koji se definiše kao zaustavni put većeg broja čestica.

Domet čestice energije E_1 dat je relacijom

$$R(E_1) = - \int_{\infty}^{E_1} \frac{dE}{dE/dx} \quad [15]$$

gde je dE/dx data relacijom [15].

Postoji način pomoću koga se može približno odrediti domet u materijalima određenog sastava iz poznate zavisnosti dometa od energije u jednom drugom materijalu. Za to nam služi Bragg–Kleemanovo pravilo, koje govori da se dometi u materijalima a i b odnose kao

$$\frac{R_a}{R_b} \approx \frac{\rho_b}{\rho_a} \frac{\sqrt{A_a}}{\sqrt{A_b}} \quad [16]$$

gde je ρ – gustina, A – atomska masa ili srednja atomska masa apsorbensa.

Ova relacija [16] se može upotrebiti za određivanje dometa u bilo kom materijalu, poznavajući na primer domet u vazduhu od 15°C i 1,013 bara. Ako uzmemo za vazduh $\rho_b = 1226 \text{ kg/m}^3$

$A_b = 14,59$ (a.j.m.) što odgovara srednjoj atomskoj masi vazduha i dobijamo za Ra

$$R_{a/m} \approx 0,32 \frac{\sqrt{A_a}}{\rho_a} R_{vazduha} \quad [17]$$

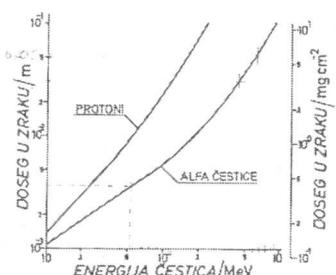
Gde je ρ_a data u (kg/m^3) , a $R_{vazduha}$ u metrima.

Često se koriste i empirijske relacije za domet α čestica u vazduhu. Jedna takva relacija, koja daje do 5% dometa α čestica u vazduhu normalne temperature (15°) i pritiska (1,013 bara) u intervalu od 4 do 15 meV je

$$R = (0,005 E + 0,285) \cdot 10^{-2} \times E^{3/2} \quad [18]$$

Gde je R izražen u m, a energije α čestica E u MeV. Na nižim energijama (E) domet čestica je proporcionalan sa $E^{3/4}$, dok je na višim energijama proporcionalan sa E^2 .

Zavisnost dometa energije za alfa čestice i protone u vazduhu prikazana je na grafiku [2.1]



Na istom grafiku takođe postoji podela koja daje domet u $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$. Odnosno, često je pogodnije domet izraziti u jedinicama površinske gustine mase. Vrednosti sa grafika u mg/cm^2 možemo koristiti za tkivo, što nije slučaj sa dometom izraženim u metrima. Taj domet u tkivu je skoro isti kao i u vazduhu.

Takođe je moguće da iz poznatog dometa jedne vrste čestica možemo izračunati i domet druge vrste čestica. Udaljenost $R_{zm}(E_1 > E_2)$ koju pređe masa M nanelektrisanja z dok joj se energija promeni od E_1 na E_2 je:

$$R_{zm}(E_1 \rightarrow E_2) = - \int_{E_2}^{E_1} \frac{dE}{dE/dx} = \frac{Mm}{4\pi e^4 z^2 ZN} \int_{v_2}^{v_1} \frac{v^3 dv}{B(v)} \quad [19]$$

Ukoliko je konačna brzina $v_z = 0$, može se napisati

$$R_{zm}(v) = Mz^{-2} F(v) \quad [20]$$

gde je $F(v)$ data integralom u relaciji [19] procenjenom u granicama O i V. Ova jednačina [20] pokazuje da domet čestica u datom apsorbensu zavisi od njihovih brzina, mase i naelektrisanja.

Najjednostavnija relacija povezuje domet čestica istog atomskog broja na druge mase

$$R_{zm}(E) = \frac{M}{M_o} R_{zMo}(E') \quad [21]$$

- gde je $E' = E \frac{M_o}{M}$ energija koju čestica mase M_o ima istu brzinu kao i čestica mase M , a energije E .

Kada se želi relacija [20] primeniti na čestice sa različitim nelektrisanjem, mora se uzeti razlika u procesima na kraju traga za obe vrste čestica. Konstanta C u sledećoj relaciji vodi računa o tim razlikama.

Tako će, na primer, domet protona biti povezan sa dometom α čestica iste brzine relacijom

$$R_p(v) = \frac{M_p z_{\alpha}^2}{M_{\alpha} z_p^2} R_{\alpha}(v) - C \quad [22]$$

- Za vazduh konstanta C je eksperimentalno određena i ona iznosi 0,02 cm za energije iznad 500 KeV. Kod nižih energija vrednost konstante postepeno opada i iznosi 0,02 cm kod 6,7 KeV.

U vazduhu je za protone, energije veće od 500 KeV, domet dat relacijom

$$R_{p(v)/cm} = 1,007 R_{\alpha(v)/cm} - 0,20 \quad [23]$$

- Pošto ta jednakost brzine zahteva $E_p = E_{\alpha} \frac{M_p}{M_{\alpha}}$ možemo napisati

$$R_p(E_p) = 1,007 R_{\alpha} (3,972 E_p) - 0,20 \quad [24]$$

gde je R_{α} (3,972 E_p) znači domet alfa čestice energije 3,972 E_p .

2.4. TEŠKI JONI

Apsorpcija teških jona u materiji

Mala brzina fisionih produkata ($\sim 10^9$ cm s⁻¹) pogoduje izmeni nanelektrisanja sa sredstvom, kao i drugim procesima izmene energije.

Domet teških jona

Tačno određivanje dometa nije moguće, ali postoji formula koja daje do 10% tačan rezultat.

$$R/(mg \text{ cm}^{-2}) = K (mg \text{ cm}^{-2} \text{ MeV}^{3/2}) E^{3/2}/\text{MeV}^{3/2} \quad [25]$$

gde je E kinetička energija teškog jona, a K je 0,14, 0,19, odnosno $0,50 \text{ mg cm}^{-2} \text{ MeV}^{-3/2}$ za vazduh, aluminijum, odnosno zlato.

2.5. ELEKTRONI

Prolaz elektrona kroz materiju

Pošto elektroni i pozitroni imaju slična svojstva interakcije prolaza kroz materiju, možemo ih posmatrati zajedno. Pozitroni nastaju kod radioaktivnog raspada, kao i kod prolaza gama kvanta kroz materiju, prilikom kojih dolazi do stvaranja parova elektron – pozitron.

Obrnuti mehanizam kojim se pozitron niske energije kombinuje sa elektronom iz materijala apsorbensa, stvarajući pri tom dva fotona čije su energije 0,51 MeV, zove se anhilacija i predstavlja redovni završetak traga pozitrona. Elektroni, zbog velikog broja u poređenju sa pozitronima, retko završavaju svoj put anhilacijom, već se sa većinom na kraju traga uklope u elektronsko mnoštvo prisutno u materijalu.

Prolazom kroz materiju elektron gubi veći deo svoje energije u jonizujućim i radioaktivnim sudarima. Svaki od tih sudara može rezultirati u priličnom deflektiranju elektrona sa njegove putanje. Onda možemo očekivati da će putanja elektrona u materiji imati oblik razlomljene krivudave linije.

Ukupna dužina te putanje u praksi je 1,2 do 4 puta veća od debljine apsorbensa u kome je domet elektrona različit od dužine putanje elektrona pre zaustavljanja.

Gubitak energije zakočnim zračenjem

Pošto su elektroni izloženi akceleraciji, kod onih koji uđu u električno polje jezgra apsorbensa, naelektrisanje Ze, dolazi do gubitka energije emisijom elektromagnetskog zračenja (Bremsstrahlug). Ova pojava koristi se u rendgenskim cevima, gde se akceleracijom elektrona dobija kontinuirani spektar X-zraka. U opštem slučaju intenzitet zračenja upadne čestice naelektrisanja z , mase M, u materijalu apsorbensa atomskog

broja Z proporcionalan je sa $\frac{z^2 Z^2}{M^2}$

Gubitak energije zakočnim zračenjem je zanemarljivo mali za protone ili slične teške čestice. Pošto elektron energije E može u radioaktivnom sudaru u vidu fotona da izgubi svaku količinu energije u intervalu od 0 do E, ukupan gubitak energije po jedinici dužine puta dobijen je integracijom po spektru zakočnog zračenja. Taj gubitak možemo prikazati izrazom

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{z.z} = Z^2 N(E + mc^2) f(z, E) \quad [26]$$

gde su Z i N – atomski broj, odnosno atomska gustina apsorbensa, E – kinetička energija elektrona, mc^2 – energetski ekvivalent mase mirovanja elektrona, f(z, E) je varirajuća funkcija od Z u N data izrazom.

$$f(Z, E) = \left[\ln 2(E + mc^2) - \frac{1}{3} \right] \quad [27]$$

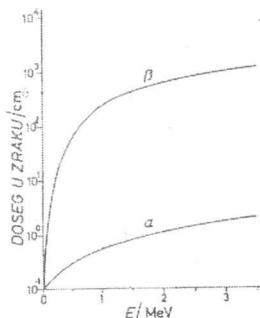
Odnos gubitaka energije zakočnim zračenjem i nelastičnim sudarima može se napisati

$$\frac{(dE/dx)_{z.z.}}{(dE/dx)_{i.n.s.}} \approx \frac{EZ}{700} \quad [28]$$

Gde je E izražen u MeV.

Ova empirijska relacija ukazuje na važnost mehanizma gubitka energije zakočnim zračenjem u materijalima sa visokim atomskim brojem Z i pri visokim energijama elektrona.

Domet elektrona



Grafik 2.2. Domet elektrona u vazduhu

Grafik 2.2. pokazuje maksimalan domet elektrona u vazduhu kao funkcija energije. Ovde vidimo da je domet β čestice u vazduhu dosta veći. Za β čestice od 0,5 MeV, 70 cm, a za β čestice energije 3 MeV – 10m. Da bi ih uporedili dat je i domet α čestice u vazduhu. U čvrstim supstancama domet je dosta kraći. Za monoelektronske elektrone, energije $0,7 < E < 3$ MeV, maksimalan domet u aluminiju R može se naći po Featherovoj jednačini

$$R/gcm^{-2} = (0,542 E/MeV) - 0,133 \quad [29]$$

Za energije manje od 0,5 MeV, dobijamo bolje rezultate pomoću sledeće jednačine

$$E/MeV = 1,92 (R^2/cm^2) + (0,22 R/cm)^{1/2} \quad [30]$$

Ona važi za energije od 50 KeV do 3 MeV.

Radionukleidi emituju kontinuirani spektar β čestica, pa za domet treba uzeti maksimalnu energiju. U aluminiju domet β čestica je približno izražen u gcm^{-2} i brojno je jednak polovini maksimalne energije 2 MeV. Maksimalni domet će biti $1 gcm^{-2}$.

Domet izražen u mg/cm^2 u drugim elementima će biti skoro isti kao u aluminiju tako dugo dok energija elektrona ne prođe 1 MeV.

Do sada smo govorili o maksimalnom dometu elektrona, ali broj elektrona koji izlaze iz apsorbensa smanjuje se sa njegovom debljinom. Razlog tome je efekat raspršenja i progresivnog zaustavljanja elektrona sa nižom energijom. Eksperimentalno je otkriveno da se broj elektrona smanjuje približno eksponencijalno sa povećanjem apsorbensa do faktora smanjenja 20. Posle toga je apsorpcija brža.

Debljina poluapsorpcije ($D_{1/2}$)

Debljina apsorbensa potrebna da se smanji broj β čestica iz radioaktivnog izvora na pola zove se debljina poluapsorpcije ($D_{1/2}$). Ona se aproksimativno može naći iz sledeće empirijske formule

$$D_{1/2} / \text{gcm}^{-2} = 0,095(Z/A)E_{\max}^{3/2} / \text{MeV}^{3/2} \quad [31]$$

Koja vredi za sve elemente od vodonika do bakra. Ako želimo da brzo identifikujemo β aktivne nukleoide, možemo izraziti $D_{1/2}$ tako da se služimo masenim koeficijentom apsorpcij μ / ρ koji je za aluminijum jednak $\frac{17}{E_{\max}^{1,14}} \cdot \text{cm}^2 \text{g}^{-1}$.

Tada je za aluminijum

$$D_{1/2} / \text{gcm}^2 = \frac{0,693}{(\mu / \rho)} = 0,04E^{-1,14} / \text{MeV}^{1,14} \quad [32]$$

Poznavajući debljine poluapsorpcije, grubo možemo izračunati da je maksimalni domet β čestica približno 8 puta $D_{1/2}$.

2.6. GAMA ZRACI

Interakcija elektromagnetskog zračenja sa materijom

Tok γ zraka prolazom kroz apsorbens opada eksponencijalno sa debljinom. To je vezano sa činjenicom da je učestalost apsorpcionih procesa koji uklanjuju iz snopa fotone u svakom trenutku proporcionalna upadnom broju fotona.

Procesi koji učestvuju u atenuaciji snopa γ zraka su:

- apsorpcija*, u kojoj postoji direktno pretvaranje cele energije fotona ili dela fotonske energije u kinetičku energiju nanelektrisanih čestica ili elektrona
- raspršenje* kojim se fotoni uklanjuju iz snopa.

Sve ove interakcije γ fotona sa materijom odvijaju se uglavnom preko tri procesa:

1. fotoelektrični efekat,
2. Komptonovo rasejanje,
3. proizvodnja parova.

1. *Fotoelektrični efekat* je interakcija gama kvanata sa materijom u kojoj upadni foton energije $h\nu$ ulazi u interakciju sa atomom kao celinom predajući čitavu svoju energiju elektronu iz elektromagnetskog omotača jezgra.

Elektron se izbacuje energijom

$$E_{\text{kin}} = h\nu - E_b \quad [33]$$

- E_b je energija vezanja elektrona (zavisno je od elektronske ljudske iz koje je izbačen)

Kao sekundarni proces pojavljuje se jedan ili više X fotona ukupne energije E_b kao rezultat popunjavanja ispraznjenog mesta u ljudsci.

2. *Komptonovo rasejanje*. To je proces u kome upadni foton ulazi u interakciju sa bilo kojim od orbitalnih elektrona, koje možemo smatrati slobodnim pod uslovom da je primarna energija γ kvanta velika u poređenju sa energijom vezanja elektrona. Tada interakciju možemo smatrati kao elastični sudar između primarnog fotona i elektrona.

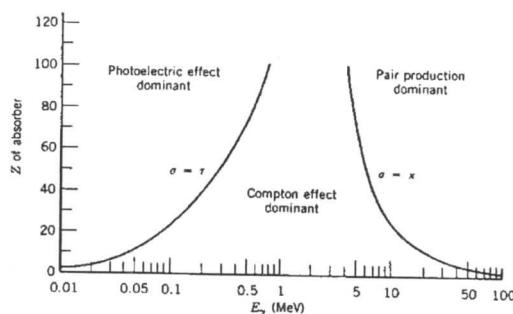
Kao rezultat sudara, energija se raspoređuje između odbijenog elektrona i sekundarnog fotona. Sekundarni foton ima različit smer i energiju od upadnog i zovemo ga rasejnim fotonom. Primenom zakona održanja energije i količine kretanja daje nam izraz za energiju rasejnog fotona E_R :

$$E_R = \frac{E}{1 + (1 - \cos \Theta) E / mc^2} \quad [34]$$

Gde je E – energija upadnog fotona, Θ je ugao između smera upadnog i rasejnog fotona. Energija odbijenog elektrona koja predstavlja ovim procesom apsorbovanu energiju je $E_{el} = E - E_R$. Komptonov proces je najvažniji proces interakcije gama zraka sa tkivom u području energije fotona od 100 KeV i 10 MeV.

3. *Stvaranje parova* je proces u kome nastaje foton, a energija mu se pretvara u masu mirovanja para elektron – pozitron, koji je stvoren i njihovu kinetičku energiju. Proces je energetski moguć samo za fotone energije $E_\gamma > 2mc^2 = 1,02$ MeV.

Grafik 2.3.



Na ovom grafiku prikazan je šematski ideo pojedinih procesa za apsorpciju γ fotona u zavisnosti od energije upadnih fotona u atomskom broju apsorbensa. Linije pokazuju atomski broj Z i energiju fotona za koje su susedni efekti jednaki.

Atenuacija i apsorpcija snopa γ zraka

Atenuacija ili smanjenje broja fotona u snopu, prolazom kroz materiju, bitno je za zaštitu kao i za pručavanje svojstava interakcije. Snop γ zraka I_0 nakon prelaza kroz apsorbens debljine d (cm) ima intenzitet I , dat relacijom

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad [35]$$

Ova relacija vredi za kolimirani snop γ zraka, gde rasejani fotoni ne mogu doći do detektora.

μ je totalni linearni koeficijent atenuacije i predstavlja zbir koeficijenata atenuacije pojedinačnih procesa:

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad [36]$$

Gde su τ , σ , κ parcijalni koeficijenti koji se odnose na fotoelektrični efekat, Komptonov efekat i proizvodnju parova.

Alternativna forma relacije [35] je

$$I = I^o \cdot e^{-\mu_m d_m} \quad [37]$$

Gde je μ_m totalno maseni koeficijent atenuacije, odnosno $\frac{\mu}{\rho}$ u $\text{cm}^2 \text{ mg}^{-1}$

d_m – debljina izražena u mg cm^{-2} , tj. ρd

ρ – gustina apsorbensa u mg cm^{-3} .

Koeficijent atenuacije daje informaciju o broju uklonjenih primarnih fotona iz snopa, što nije potpuna informacija jer ne pokazuje koliki je broj fotona apsorbovan, odnosno kolika je energija upadnog snopa apsorbovana, jer za razliku od β čestica deo energije upadnog snopa izlazi iz apsorbensa u vidu sekundarnih ili raspršenih fotona. Najveći deo tih fotona je stvoren interakcijom preko Komptonovog rasejanja, ali i druga dva procesa doprinose stvaranju takvih fotona. U fotoelektronskom procesu dolazi do stvaranja niskoenergetskih fotona izazvanih prelazom elektrona iz više u niže ispražnjenu ljudsku. U interakciji preko stvaranja parova dolazi do sekundarnih fotona stvorenih anhilacijom elektronskog para. Zbog toga je potrebno prvo definisati pojam linearne apsorpcije koeficijenta apsorpcije μ_E kao sumu koeficijenata apsorpcije pojedinih procesa, odnosno:

$$\mu_E = \tau_E + \sigma_E + \kappa_E \quad [38]$$

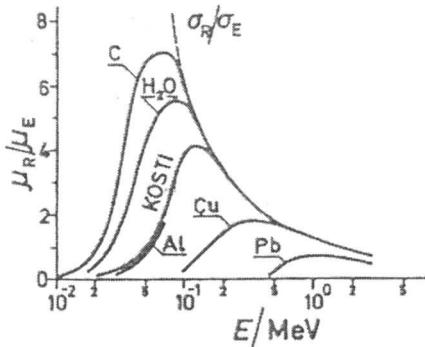
gde indeksi E označavaju da se ovde radi o apsorpciji energije. Kada se koeficijent μ_E definiše kao

$$\mu_E = \tau + \sigma_E + \kappa_E \quad [39]$$

ukoliko se podje sa stanovišta da fotoni niske energije stvoreni fotoelektričnim procesom neće uspeti izaći iz materijala u kome su stvoreni, nego će biti brzo apsorbovani. Koeficijent μ_E povezan je sa koeficijentom atenuacije i relacijom

$$\mu_E = \mu - \mu_R \quad [40]$$

gde je μ_R koeficijent rasejanja u ukupnoj atenuaciji.



Grafik 2.4.

Na grafiku 2.4. prikazana je zavisnost odnosa μ_R/μ_E od energije za ugljenik, vodu, kosti, aluminijum, bakar i olovo.

Ovde vidimo da se kriva μ_R/μ_E poklapa sa onom koja za odgovarajući odnos koeficijenta Komptonovog procesa σ_R/σ_E u području energija u kojem je za određeno sredstvo Komptonov proces interakcije najvažniji. Na isti način kao i za koeficijent apsorpcije, maseni koeficijent apsorpcije definisan je kao μ_E/ρ . Koeficijenti atenuacije i apsorpcije su zavisni od energije fotona i atomskog broja apsorbensa.

Debljina poluapsorpcije ($D_{1/2}$)

Debljina poluapsorpcije ($D_{1/2}$) definiše se kao debljina apsorbensa koja je potrebna da se smanji broj fotona na polovinu i ona je data relacijom

$$D_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0,693}{\mu} \quad [41]$$

Srednji domet (R)

Srednji domet (R) je srednji put koji foton prođe pre nego što bude ukonjen iz snopa. Može se reći da je $R=1/\mu$, što znači da iza apsorbensa debljine $1/\mu$ intenzitet fotona će pasti na $1/I$ od prvobitne vrednosti. R računamo iz sledeće relacije:

$$R = \frac{\int_0^{\infty} xe^{-\mu x} \mu dx}{\int_0^{\infty} e^{-\mu x} \mu dx} = \frac{1}{\mu} \quad [42]$$

2.7. NEUTRONI

Interakcije neutrona sa materijom

Ova interakcija se veoma razlikuje od oblika interakcije čestica i γ zraka. Neutroni moraju doći u kontakt sa jezgrom na domet nuklearnih sila. Domet nuklearnih sila je mnogo manji od dometa elektromagnetskih sila. Za razliku od nanelektrisanih čestica i γ zraka gde „nuklearne reakcije“ imaju zanemarljivu ulogu u totalnoj apsorpciji, one su kod neutrona veoma bitne.

Nuklearne reakcije mogu poprimiti sledeće vidove

a) *Elastično rasejanje*: $A(n, n)A$

Energija uporednog neutrona se raspoređuje na rasejani neutron i jezgro apsorbensa A;

b) *Neelastično rasejanje* ($A/n, n' A; A(n, n')\gamma A$ ili $A(n, 2n)B$)

Svi ovi procesi su bitni kod viših energija neutrona koje su dovoljne za pobudu, pobuđenih stanja jezgra A. Kod (n, n') procesa jezgro A ostaje u metastabilnom stanju, a kod $(n, n')\gamma$ procesa deeksitacija se vrši emitovanjem γ zraka. Za energije neutrona do oko 10 MeV i više moguć je $(n, 2n)$ proces;

c) *Uhvata neutrona* ($A(n, \gamma)B$)

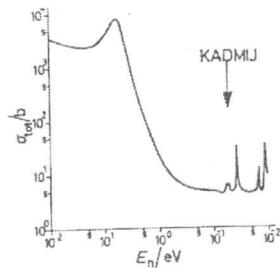
Ovaj proces je karakterističan za neutrone najnižih energija, koji se zovu termalni neutroni ($E_n \sim 1/40$ eV), kao i za neutrone nešto viših epitermalnih energija ($E_n < 100$ KeV) u slučaju rezonantnog uhvata. Nastali γ zraci imaju energiju od nekoliko MeV.

d) *Emisija nanelektrisanih čestica* (n, p), (n, d), (n, α), (n, t)

Zbog Kulonove barijere ovakva reakcija je nejrealnija za neutrone viših energija ($E_n -$ nekoliko MeV), kao i za laka jezgra apsorbensasa.

e) *fisija* (n, t)

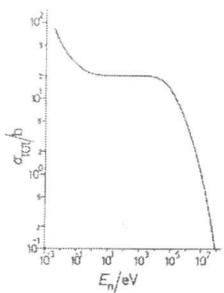
Jezgra koja su složena i koja su nastala ulaskom neutrona u jezgro apsorbensa raspadaju se na dva fisiona fragmenta i jedan ili više neutrona. Fisija nastaje sa termalnim neutronima u ^{235}U , ^{239}Pu i ^{233}U , a sa brzim neutronima ($E_n > 100 \text{ KeV}$) u mnogim teškim jezgrima.



Grafik 2.5.

Na grafiku 2.5. dati su udarni procesi za apsorpciju neutrona u kadmijumu.

Kadmijum je posebno značajan jer oštar porast u udarnom preseku na kraju područja sa termalnim energijama zavisi samo od (n, γ) . Reakcijom na ^{113}Cd omogućuje da se upotrebi za apsorbovanje termalnih neutrona kompleksnog spektra energija.



Grafik 2.6.

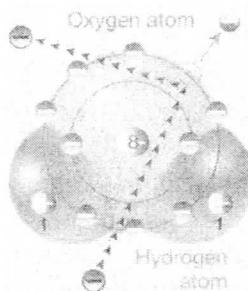
Na grafiku 2.6. predstavljen je totalni udarni presek neutrona u vodoniku, u zavisnosti od energije.

III DELOVANJE JONIZUJUĆEG ZRAČENJA NA ŽIVU MATERIJU

Poznato je da prolaskom ionizacionog zračenja kroz neku materijalnu sredinu dolazi do njene *direktne ili indirektne* ionizacije. U biološkim sistemima ova pojava može da dovede do različitih biohemijskih promena. Procesom ionizacije se od neutralnog atoma ili molekula stvaraju slobodni elektroni i pozitivni joni preostalog atoma (odnosno molekula) koji dalje mogu da izazovu hemijske promene, a time i da prouzrokuju poremećaje u funkcijama izvesnih tkiva i organa. Ove promene nisu svojstvene samo za makromolekule živog tkiva, već se dešavaju i u prostim hemijskim jedinjenjima, na primer, u vodi, koja je najviše zastupljena u tkivima.

Pri prolasku kroz materiju taloži se energija. Alfa i beta čestice, pošto su nanelektrisane, talože energiju kroz električnu interakciju sa elektronima u materijalu. Gama i X-zraci gube energiju na različite načine, ali svaki od njih uključuje i oslobođanje atomskih orbitirajućih elektrona, koji onda oslobođaju energiju u interakciji sa drugim elektronima. Neutroni takođe gube energiju na različite načine, a najvažniji je kroz koliziju sa jezgrom koje sadrži protone. Protoni se tada pokreću i pošto su nanelektrisani, takođe talože energiju kroz električnu interakciju. Znači u svakom slučaju, radijacija na kraju dovodi do električne interakcije u materijalu.

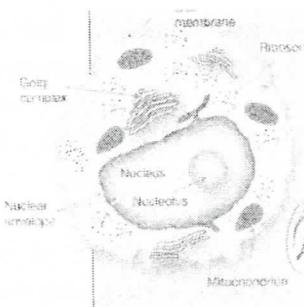
U nekim slučajevima elektron u materijalu može primiti dovoljno energije da pobegne iz atoma, ostavljajući tako formiran atom ili molekul pozitivno nanelektrisan.



Slika 3.1. Molekul vode

Slika pokazuje ovaj proces u molekulu vode. Molekul ima ukupno 10 protona i 10 elektrona, ali samo 9 atomskih elektrona ostaje pošto kroz njega prođe nanelektrisana čestica, a molekul u celini ostaje pozitivno nanelektrisan.

Osnovna jedinica biološkog tkiva je ćelija, koja ima kontrolni centar koji se naziva jezgro. Jezgo ćelije je komplikovane strukture i ne treba ga mešati sa jezgrom atoma. Oko 80% ćelije sastoji se od vode, ostalih 20% su kompleksna biološka jedinjenja. Kada ionizaciono zračenje prolazi kroz ćelijsko tkivo, ono proizvodi nanelektrisane molekule vode. To dovodi do stvaranja slobodnih radikalata, poput slobodnog hidroksidnog radikalata (OH^-), koji se sastoji od atoma kiseonika i atoma vodonika. Slobodni radikali mogu da promene važne molekule u ćeliji.



Slika 3.2. Ćelija

3. 1. RADIJACIONO-HEMIJSKI PROCESI U TKIVU

Većina tkiva sastoji se od atoma sa malim atomskim brojem, kao što su (C, H, O...). Najgrublje rečeno, biološku ćeliju možemo prikazati kao mešavinu molekula vode i organskih molekula (nukleinske kiseline, lipidi, proteini...)

Ionizaciono zračenje može delovati na dva načina:

1. *direktnom interakcijom* sa biološki važnim organskim molekulima, koje za rezultat ima oštećenje tih molekula,
2. *indirektnom reakcijom*, koja nastaje delovanjem produkata radiolize vode na te organske molekule.

Direktna interakcija

Jonizovani i uzbuđeni molekuli poseduju višak energije, pa su zbog toga nestabilni. Višak te energije se može oslobođiti na sledeće načine:

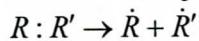
- emisijom fotona (fluorescencija X-zraka),
- kidanjem jedne kovalentne veze i cepanjem molekula na dva radikala. Cepanje molekula je verovatnije posle ionizacije nego posle uzbune, zato što je količina predate energije u prvom slučaju veća.

Cepanje veze ne znači da je nužno inicialna ionizacija delovala baš na tu vezu. Apsorbovana energija može se preuzeti unutar molekula, a prekid veze će se desiti na mestu najslabije veze. Ova energija se može preneti i na neki drugi molekul, koji će zato snositi posledice kao da je i on bio pogodjen zračenjem.

Slobodni radikali

Znamo da se kovalentna veza sastoji od jednog para (:) elektrona koji su spareni sa antiparalelnim spinovima. Kada se ta veza prekine, svaki fragment sa sobom odnosi jedan nespareni elektron (·).

Za molekul koji se cepa možemo napisati za radikale R i R' .



[43]

Molekularni fragment sa nesparenim elektronom zove se slobodnim radikalom i on se obeležava \dot{R} . U radikalu nespareni elektron toj strukturi daje veliku hemijsku reaktivnost, za razliku od jona koji imaju sparene elektrone, koji su hemijski malo aktivni. Svaki

radikal ima magnetni moment, što pomaže da se detektuje tehnikom elektronske paromagnetne rezonancije. Radikali koji su nastali, reaguju između sebe ili sa drugim molekulima:



Kada se rekombinacija završi, svi molekuli se ponovo nalaze u stabilnom obliku, menja im se hemijski sastav i neki od njih budu oštećeni u biološkom smislu. Radijaciono-hemijski prinos definišemo za datu vrstu molekula kao:

$$G = \frac{\text{broj nastalih ili nestalih molekula}}{100 \text{ eV apsorbovane energije}} \quad [45]$$

Koji će tip oštećenja biti, zavisi od strukture molekula.

U slučaju organskih polimera, na primer, lanci molekula će doživeti i kidanje i retikulaciju (premošćenjem između molekula).

Indirektna interakcija

Radioliza vode je posledica integracije zračenja sa molekulom vode. Rezultat hidrolize je stvaranje vrlo reaktivnih radikala $\dot{O}H$: oksidans, \dot{H} i e_{aq}^- . e_{aq}^- pri jonizaciji molekula vode nastali elektroni gube energiju sudarima. Kada su dovoljno usporeni, oni su uhvaćeni od jako polarizovanih molekula. Naziv se dobija od hidrazovanih elektrona.

Primarna rekombinacija. Rekombinacijom radikali mogu dati stabilne molekule. Tako nastaje vodonik peroksid $\dot{O}H + \dot{O}H \rightarrow H_2O_2$, koji u svakodnevnom životu služi za posvetljivanje kose i dezinfekciju rana.

Ako su jonizacije relativno udaljene, verovatnoća za rekombinacije je relativno mala, a ona je najveća gde su jonizacije gušće. Ovo pokazuje da će rekombinacija biti zančajna duž tragova čestica sa visokim linearnim prenosom energije (LPE)

	LPE keV/ μm	$G(\dot{H})$ (1)	$G(\dot{O}H)$ (2)	$G(H_2)$ (3)	$G(H_2O_2)$ (4)
γ zrake od 1,25 MeV	0,42	3,7	2,9	0,40	0,80
α čestice od 5,3 Mev	150	0,6	0,5	1,57	1,45

Tabela 3.1. Radijaciono-hemijski prinos G u funkciji LPE upadne čestice za pojedine radikale (1–2) i molekularne vrste (3–4) stvorene radiolizom vode

Oni radikali koji su stvorenici u vodi defundiraju u toku vremena i veravotnoća rekombinacije se smanjuje. Radikali mogu delovati na organske molekule, tako što menjaju njihov hemijski sastav. Jedan organski molekul R:H može na sledeći način reagovati sa radikalima.

Hidrogenizacija $\dot{O}H$ radikalima:



Dehidrogenizacija i aditivni kompleksi sa radikalima \dot{H} :



Radioprotektori

To su supstance koje su prisutne za vreme delovanja zračenja. One imaju osobinu smanjenja efekata ozračivanja, sadrže grupu SH ili NH₂ (amino spojevi) koji hvataju OH radikale, H atome i hidratizovane elektrone.

Procesi hvatanja su:



Kada se jedan OH radikal otkine od biološki važnih molekula R₁H, jedan H atom, radikal R₁ se može ponovo hidrirati mehanizmom reparacije.



Toksičnost tih spojeva ograničava za sada njihovu širu upotrebu.

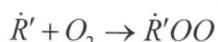
Efekat kiseonika

Molekul kiseonika se sastoji od dva nesparena elektrona. Kiseonik koji je prisutan u trenutku ozračivanja povećava efekat tog zračenja. Način delovanja je sledeći:

- zahvat \dot{H} radikala $\dot{H} + O_2 \rightarrow \dot{HO}_2$
- \dot{HO}_2 – predstavlja jaki oksidans
- Stabilizacija $e_{aq}^- : e_{aq}^- + O_2 \rightarrow O_2^-$

Ovaj mehanizam je odgovoran za 40% efekta kiseonika

Lančana reakcija:



Hidroperokski i peroksidi su toksične supstance i one takođe ošteteju ćelije.

3.2. OŠTEĆENJE DEZOKSIRIBONUKLEINSKIH KISELINA (DNK)

Funkcije ćelije mogu biti promenjene ako se oštete razni molekuli. Analizom biohemijских fenomena u ćeliji pokazuje se da najveću pažnju treba posvetiti modifikacijama DNK.

DNK koja se nalazi u genima služi kao kalup za sintezu ribonukleinskih kiselina (RNK). One upravljaju proteinskom sintezom, a naročito onom kod enzima. Pored toga, DNK je repliciranje lanca RNK, koje se vrši pre deobe ćelije. Preživljavanje jedne ćelije direktno je vezano za DNK: postoji veza između količine DNK koje postoji u jezgru i

radioosetljivosti. Mnogi ogledi su pokazali da je zračenje jezgra mnogo opasnije za preživljavanje ćelije nego zračenje okoline citoplazme.

Svaki nukleotid se sastoji od po jednog molekula azotne baze, pentoze i fosforne kiseline. Nukleinske kiseline sadrže dva tipa azotnih baza: purinske (adenin i duanin) i pirimidske (timin, citozin i urocil). U sastavu DNK se mogu naći adenin, guanin, timin i citozin, a u sastavu RNK se umesto timina javlja urocil. Molekuli DNK i RNK su linearni (nerazgranati polimeri), tako da se mogu zamisliti kao lanci čije su karice pojedini nukleotidi. Poredak u lancu uslovljava genetski kod ćelija.

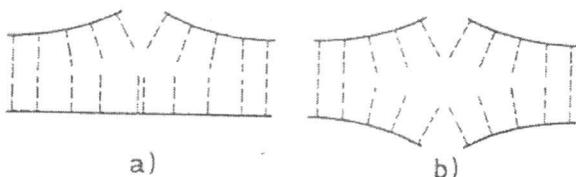
Molekul DNK sastoji se od dva lanca koji su vezani vodonikovim vezama između baza. Nasuprot baze timina (T) jednog lanca nalazi se adenin (A) u drugom, a nasuprot guaninu (G), nalazi se citozin 80.



Slika 3.3. Molekul DNK

Molekul je šematski prikazan u obliku lestice, čije su prečke vodonikove veze, a stranice oba lanca. Pri replikaciji iba lanca se rastavljaju i svaki od njih služi kao model za sintezu jednog novog komplemetarnog lanca.

Jonizovano zračenje uzrokuje kidanje difosfodiesterskih veza i oštećenja baza i šećera. Kidanje je najvećim delom izazvano indirektnim delovanjem, međutim nema efekta kiseonika za to oštećenje, što pokazuje da je to nastalo radikalom \dot{H} .



Jednostruki prekid: jedan od lanaca puca i u procep ulazi molekul vode i dolazi do prekida vodonikovih veza između baza (a).

Dvostruki prekid: oba lanca se nalaze u prekidu. Udaljenost prekida nije veća od 3 nukleotida (b). Postoji otprilike jedan dvostruki prekid za desetak jednostrukih prekida.

Oštećenje baza: baze mogu biti delimično oštećene ili hemijski promenjene. Pirimidinske baze su osetljivije od purinskih baza.

Oštećenje šećera: ova oštećenja su slabije poznata. Tu dolazi do oksidacije i hirolike sa oslobođanjem baze, praćeno ponekad i prekidom fosfodiesteraske veze.

3.2.1. Posledice zračenja na nivou ćelije

Smrt ćelije

Prestanak bilo kakve metaboličke aktivnosti nastaje posle doze zračenja od nekoliko greja. Može se reći da će ćelija biti istog trenutka uništena. Ako su doze zračenja još niže, ćelija će prestati da se deli posle nekoliko mitoza i konačno potomci se više ne dele.

Neka ćelija u tkivu može naoko izgledati normalno, ona će još sintetizovati DNK, ali će joj se moć deljenja trajno oduzeti. Naprotiv, ćelije koje su u punom smislu preživele, zadržće moć deljenja. Za ćelije koje su visoko diferencirane i koje obavljaju specijalne funkcije, ali koje se više ne dele (kao živčane ćelije, mišićne ćelije), smrt će se definisati kao gubitak specifične funkcije. Za uništenje svake ćelijine funkcije, u ćelijama koje se ne dele potrebna je doza od nekoliko stotina Gy, a ćelije koje se dele su mnogo osetljivije na zračenje (1–2 Gy).

Privremeno zaustavljanje mitotske aktivnosti

Deoba ćelija se provodi u tačno određenim fazama koje su određene mitotskim ciklusom. Ali, da bi to objasnili potrebno je da obradimo uticaj jonizujućeg zračenja na mitozu i glavne faze mitotskih ciklusa.

Faze se odvijaju na sledeći način: prvo se citoplazma deli na dva posebna dela, a zatim nastaju dve potpune celine (ćelije), koje su identične sa prvobitnom. Prva faza se zove profaza, u jezgru će se pojaviti končići hromatina koji se posebno kondenzuju i stežu u konce koji se zovu hromozomi. Njihov broj može biti različit, što zavisi od životinje ili organizma iz koga potiče ta ćelija. Ljudske ćelije imaju 46 hromozoma. Kada se proces mitoze nastavlja dalje, vidi se da su konci sastavljeni od dve niti koje se zovu hromatide. Sa nastankom hromozoma istovremeno se membrana jezgra steže i nestaje, tako da hromozome ostavlja stisnute zajedno u citoplazmi. Tada se u njoj pojavljuje struktura u obliku gela, zvana vreteno, koja se proteže iz polova ćelije.

U drugoj fazi (metafazi) vreteno se vezuje za hromozome, koji se uredno poredaju u jednu ravninu u centru ćelije. To se može videti u anafazi, gde se hromozomi naglo razdele i kada vreteno povuče neke hromotide u suprotne delove ćelije i nastaju dve jednakе grupe hromatida. Deoba ćelije se završava telofazom. Ovde se citoplazma razdvaja u dve približno jednakе mase rastavljene novom ćelijskom membranom. Membrana jezgra se ponovo formira i hromozomi u novim ćelijama nabujaju u toj meri da se ne mogu razabrati pod mikroskopom. Jezgro poprima izgled ćelije koja miruje. U toku procesa mitoze može se opisati kako rastu diferencirani organi i jednoćelijski organizmi. Množenje mnogoćelijskih organizama je proces koji nastaje sjedinjavanjem polnih ćelija, koje prolaze kroz niz jedinstvenih deljenja ćelije, koje pritom omogućavaju mešanje hromozoma. Pošto znamo ga hromozomi nose gene koji određuju nasledne osobine, izmena delova hromozoma je neophodna za život, što je nužan preduslov da potomstvo bude u mogućnosti da ima karakteristike svojih roditelja. Polne ćelije možemo jednim imenom zvati gamete, i one sadže samo polovinu normalnog broja hromozoma, odnosno 23 hromozoma kod čoveka. Potreban broj hromozoma se dobija spajanjem polnih ćelija u oplođenom jajetu ili zigotu. Oploženo jaje raste deljenjem ćelija

i diferencijacijom dok ne nastane novo biće. Deljenje ćelija kojim nastaju gamete naziva se mejoza.

Posle ozračivanja ćelija dozama nedovoljnim da ih uništi, može se zapaziti jedna pojava koja predstavlja zaustavljanje procesa njihove deobe kroz ograničeni vremenski interval. Ovakva pojava se očituje kao zaostajanje množenja. Takva oštećenja pokazuju da je osetljivost ćelija različita i da zavisi od stepena koji je ćelija postigla u svom mitotičkom ciklusu posle ozračenja. Ovaj proces ne prestaje odmah posle ozračenja ili kratko vreme posle toga, i onda nastupa period bez deoba. Posle ozračenja malim dozama, broj ćelija u deljenju ostaje nepromenjen, pa brzo počinje pad, sa tim što se minimalan broj postigne posle jednog do dva sata.

Posle tog vremena aktivnost se naglo povećava i nastaje kompenzujući talas u broju deoba, koji je veći od normale, ali vremenom poremećaj potpuno nestaje i kultura postaje opet normalna.

Vremenski ograničen period povećanja broja mitotičnih ćelija nije nastao stimulacijom rasta ćelija koja je uslovljena zračenjem, nego potiče od činjenice da se počinju deliti one ćelije koje su bile zaustavljene i one na koje zračenje nije delovalo, pa se one normalno dele. Veće doze zračenja uzrokuju pad broja ćelija u deljenju, tako da je njihov broj posle 1 ili 2 sata neznatan. Posle postignutog minimuma dolazi do ponovnog uspostavljanja mitotične aktivnosti, koja više nikada ne postigne isti iznos kao pre zračenja.

Uticaj doze na mitozu ćelije

Za oštećenje ćelije nije bitna samo veličina primljene doze nego i vremenski interval u kome je ta doza primljena, odnosno oštećenja su zavisna od brzine doze. Uticaj brzine će biti značajan ako je ona vrlo mala. Ukoliko je srednja brzina doze dovoljno mala, oporavljanje prouzrokovano normalnom mitozom smanjiće uticaj cele primljene doze zračenja, tako da i relativno velike doze mogu ostaviti male ili nikakve vidljive posledice.

Osetljivost različitih vrsta ćelije

Ćelije određene vrste, koje grade pojedina tkiva čovečjeg organizma, kao što su koštano, mišićno i živčano tkivo, nazivaju se diferenciranim ćelijama. Ove ćelije su dostigle takav nivo razvitka da se više ne dele. Između ovakvih ćelija postoje razlike u osjetljivosti na zračenje, ali je ta razlika mnogo veća kod matičnih ćelija ili kako ih drugačije nazivamo nediferencirane ćelije, koje su u najvećem broju zastupljene kod polnih žlezda, koži, sluzokoži i krvotvornom tkivu.

Osetljivost embriona

Ćelije koje prve nastaju pri deljenju oplođenog jajeta u početnom stadijumu stvaranja embriona slabo su diferencirane i one su u mogućnosti da stvaraju različite velike delove tela. Embrion je veoma osjetljiv na zračenje, ali njegova otpornost raste uporedno sa stepenom diferencijacije.

3.3. Doze zračenja

Dozimetrija ionizujućeg zračenja predstavlja postupak merenja energije koju ionizujuće zračenje preda ozračenom materijalu. Odnosno, ionizujuće zračenje, prolazeći kroz materiju sudara se sa atomima i predaje im svoju energiju, što za posledicu ima ionizaciju atoma, odnosno molekula. Poznato je da dejstvo ionizujućeg zračenja na određenu sredinu zavisi od više faktora: iznosa energija koja se apsorbuje, vrste ionizujućeg zračenja, vrste apsorbentata i sl. Pojmovi koji se najčešće sreću u dozimetriji ionizujućeg zračenja su doze i jedinice kojima se one izražavaju. Pojam doze je tokom vremena pretrpeo više izmena.

Apsorbovana doza – D se definiše kao srednja apsorbovana energija dE proizvoljne vrste ionizujućeg zračenja u apsorbentu mase dm , tj.

$$D = \frac{dE}{dm} \quad [54]$$

Izvedena SI jedinica za apsorbovanu dozu naziva se grej, oznaka Gy. 1 Gy označava apsorbovanu dozu koja nastaje pri apsorpciji ionizujućeg zračenja stalne gustine energetskog fluksa čija je energija jedan džul u telu mase jedan kilogram.

$$1\text{Gy} = \frac{J}{kg}$$

Specijalna vanskemska jedinica za apsorbovanu dozu koja se do sada u praksi upotrebljava je 1 rad (često se označava i kao rd, za razliku od radijana koji takođe ima oznaku rad). Veza između rada i greja je data relacijom:

$$1\text{ rad} = 10^{-2}\text{ Gy}$$

Integralna apsorpciona doza D_i predstavlja ukupnu energiju zračenja koju apsorbuje celokupni ozračeni matrijal mase m , tj.

$$D_i = m \cdot D \quad [55]$$

Ona se izaržava u jedinicama energije.

Brzina apsorbovane doze je količina energije ionizujućeg zračenja koju akumulira jedinica materije u jedinici vremena. Izražava se u $\text{Gy/s} (= \text{J kg}^{-1} \text{s}^{-1})$.

Veličina brzine apsorbovane doze je značajna zato što od nje zavise učinci ionizujućeg zračenja na živu materiju. Ako dve jedinke apsorbuju istu dozu zračenja, ali u različitim vremenom, odnosno različitom brzinom apsorbovane doze, posledice će biti različite.

	Jedinka A	Jedinka B
Ukupna D	4 Gy	4 Gy
Brzina D	1 Gy/h	1 Gy/h
Dužina ozračivanja	4 h	40 h
Rezultat	Može uginuti	Blaže posledice

Apsorbovana doza se može meriti na više načina, u praksi se ne meri već se informacija o apsorbovanoj dozi dobija poznavanjem i određivanjem ekspozicije.

Ekspoziciona doza. Ako posmatrano ionizujuće zračenje čine samo fotoni, tj. ako se radi o rentgenskom ili gama zračenju i ako se njihovo ionizujuće dejstvo ograniči isključivo na vazduh, uvodi se veličina X – ekspoziciona doza.

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad [56]$$

dQ predstavlja zbir nanelektrisanja svih jona istog znaka nastalih jonizacijom vazduha u elementu zapremine vazduha mase dm , pri transformisanju energije upadnog fotona. Izvedena SI jedinica za dozu izlaganja iznosi 1 C/kg (označava dozu izlaganja X ili γ zračenja, pri čemu ukupno nanelektrisanje svih stvorenih jona istog znaka u ozračenom vazduhu mase 1 kg iznosi 1 C, ako je gustina energetskog fluksa ista u celoj količini ozračenog vazduha).

Vansistemska jedinica za ekspozicionu dozu je rendgen. Označava se sa R (ređe sa r) i u odnosu na SI jedinicu iznosi: $1R = 2,58 \cdot 10^{-4}$ C/kg.

Ekvivalentna doza. Pošto apsorbovana doza ne iskazuje dovoljno efekte štetnog dejstva zračenja na biološke sisteme, u zaštiti od zračenja uvedena je tzv. ekvivalentna doza H u nekoj tački tkiva, koja se definiše kao:

$$H = DQN \quad [57]$$

Gde je D apsorbovana doza, Q je faktor kvaliteta i N proizvod svih drugih modifikujućih faktora koje je međunarodna komisija za radiološku zaštitu (ICRP) specifikovala. Faktor Q izražava različite vrednosti biološkog dejstva na različite vrste zračenja. To je neimenovan broj i može imati vrednosti od 1 do 20. Na primer, za rendgensko i gama zračenje $Q = 1$, za alfa zračenje $Q = 20$. Shodno navedenoj jednačini, ekvivalentna doza ima iste dimenzije kao apsorbovana doza, ali se može razlikovati po kvantitetu ako je Q različito od 1.

Izvedena SI jedinica za ekvivalentnu dozu je:

$$H = \frac{1J}{kg} = 1Sv$$

Vansistemska jedinica jedinica za ekvivalentnu dozu je rem (Rentgen Equivalent for Men)

$$1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv} \quad [58]$$

Relacija [58] predstavlja vezu između siverta i rema.

Male doze zračenja su do 0,2 Gy γ zračenja. Ako se radi o malim dozama jonizujućeg zračenja, nije dovoljno poznavati samo apsorbovanu dozu D , nego treba znati i o kojoj vrsti zračenja se radi. Odnosno učinci neće biti isti ukoliko je D isto, a različito je ionizujuće zračenje.

Svako tkivo ima svoju ekvivalentnu dozu.

Efektivna ekvivalentna doza (H_E). Isto zračenje na različita tkiva može izazvati različita biološka dejstva, u zavisnosti od radiosenzitivnosti pojedinih tkiva i organa. H_E je dat relacijom:

$$H_E = \sum_t W_t H_t \quad [59]$$

W_t označava težinske faktore za pojedine organe, odnosno faktor rizika za tkivo t , a H_t ekvivalentne doze za te organe. Vrednost težinskog faktora predstavlja verovatnoću da će se desiti određen biološki efekat kad se ozrači određen organ, kao i pri istoj dozi kojom bi bilo ozračeno celo telo.

Zračenje uz odmah vidljive učinke izaziva i kasne učinke, koji se mogu iskazati i više godina posle prestanka zračenja. To su stohastički učinci (stochastic – koji se ne može predvideti) – kasne promene nastale kao faktor rizika – težinski faktor za pojedine delove tela (ICRP 1977)

Celo telo	1 (100%)
Jajnik, testis	0,25 (25%)
Kostna srž	0,12 (12%)
Površina kostiju	0,03 (3%)
Štitna žlezda	0,03 (3%)
Grudi	0,15 (15%)
Pluća	0,12 (12%)
Ostala tkiva	0,30 (30%)

Kolektivna efektivna ekvivalentna doza S_E odnosi se na jednu populaciju koja radi i živi na određenom području. Definiše se kao:

$$S_E = \sum_i H_{(E)i} N_i \quad [60]$$

$H_{(E)i}$ predstavlja efektivnu ekvivalentnu dozu pojedinca, a N_i je broj pojedinca u ozračenoj populaciji.

IV UTICAJ ZRAČENJA NA ZDRAVLJE ČOVEKA

Delovanje zračenja može vršiti na dva načina:

1. direktno – putem somatskih efekata,
2. indirektno – genetskim efektima

1. Somatski efekti (direktni)

Čovek može biti izložen ionizacionim zračenjem na dva načina:

- zračenjem iz nekog spoljnog izvora (prirodnog) na tela,
- unošenjem radioaktivnih izotopa u telo tako da zračenje deluje konstantno unutar organizma.

Po vremenu pojavljivanja ozleda posle ozračenja možemo razlikovati rane i kasne somatske efekte.

Rani efekti se pojavljuju vrlo brzo posle zračenja. Ovi efekti su povezani za visoke apsorbirane doze koje se mogu videti u terapijama ili akcidentima. Kod X zraka i γzraka koji imaju veliku prodornost oni mogu doći i do krvotoka i izazvati smetnje i smanjenje broja crvenih i belih krvnih ćelija. Pošto znamo da bela krvna zrnca (leukociti) imaju zadatak da se bore protiv bakterijskih infekcija, a njihovim smanjenjem se slabi otpornost protiv infekcija. Smanjenje broja trombocita može u organizmu izazvati unutrašnje krvarenje. U limfnim tkivima zračenje može izazvati smanjenje broja limfocita. Koža koja je ozračena ima sledeći redosled simptoma. Prvo postane crvena, pa sjajna, osetljiva, suva i zatrgnuta tako da se izgube brazde na njoj. Posle se pojavljuju plikovi ili bradavice ili karcinomske rane koje teško zarastaju. Posle toga se na koži pojavljuje radiodermatitis, depigmentacija, gubitak otisaka prstiju, nestajanje dlačica.

Ako se dugotrajno i prekomerno ozrače organi za reprodukciju, može doći do potrećeja polnih žlezda, što se može ispoljiti sa privremenom ili konačnom sterilnosti. Beta zraci, slično kao i X i gama zraci, uzrokuju radiodermatitis, suvu kožu, pucanje ili ljuštenje noktiju i kože i bradavice. Posle prekomerne izloženosti ovim zracima može se pojaviti i karcinom kože. Na očima se može javiti upala rožnjače i katarakta.

Alfa čestice znatno manje prodiru tako da ne mogu prouzrokovati nikakve ozlede kože ako energija nije veća od 9 MeV. Energiju manju od 9 MeV imaju prirodni alfa emiteri, pa ne predstavljaju veću opasnost. Alfa čestice se mogu ubrzati sa akceleratorima čestica (ciklotroni, linearni akceleratori...), oni ubrzavaju i protone, deutrone, tritone i ostale do energije koja iznosi nekoliko stotina MeV. Takve visokoenergetske čestice prodiru dublje u materiju, tako da mogu oštetiti i tkiva.

Neutroni direktno ne ionizuju atome žive materije kroz koje prolaze. Brzi neutroni svoju energiju predaju protonima, a pomoću nuklearnih reakcija uzrokuju emisiju gama zračenja, nekad i alfa i beta čestica. Posledice su iste kao one kod pojedinih vrsta zračenja ili svih vrsta istovremeno.

Kasni somatski efekti

U vremenu lokalizovane jake doze mogu, osim kratkoročnih somatskih efekata, urodit i dugoročnim posledicama. Još jedan način izazivanja dugoročnih posledica je akumuliranje malih doza kroz dugi niz godina.

Akumuliraju pripada unutrašnja kontaminacija radioaktivnim izotopima. To dolazi putem udisanja, gutanjem ili upijanjem kroz kožu radioaktivnih supstanci. Ovde se radi o radioaktinim prašinama, parama, tečnostima ili gasovima.

Dužina ozračenja u slučaju kontaminacije organizma zavisi od perioda poluraspada izotopa, kao i njegovim metabolizmom u telu. Radioaktivni elementi nisu opasni samo zbog zračenja već i zbog otrovnosti, tako da mere zaštite moraju istovremeno voditi računa o zaštiti od zračenja.

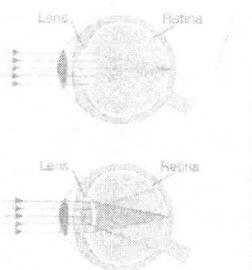
Povrede mogu nastati kod unutrašnjeg zračenja. Gama zraci imaju iste povrede kao kod spoljnog zračenja. Alfa zraci u unutrašnjosti organizma uzrokuju jaku ionizaciju koja povećava vrednost razvoja malignih tumora, koji se na to mestu mogu javiti i posle 10–20 godina. Rak pluća može nastati kao posledica udisanja supstanci koje šalju alfa čestice. Najpoznatiji su plutonijum, polonijum i radijum. Radijum ima vreme poluraspada od 1620 godina, on se taloži u kostima i njegove alfa čestice bombarduju kostnu srž. Pošto kostna srž ima veliku ulogu u stvaranju crvenih i belih krvnih zrnaca, bombardovanje alfa česticama dovodi do anemije i smanjenja otpornosti organizma.

Povrede mogu biti uzrokovane i beta česticama, ali ako je pogoden isti organ. Na primer, stroncijum 90, koji je odašiljač beta čestica, taloži se u koštanom tkivu, stvarajući ozlede slične omim kao radijuma. Stepen povreda zavisi od hemijskih sastava radioaktivnih supstanci, njihovoj topivosti, apsorpciji, vremenu poluraspada, brzini izlučivanja iz organizma, od količine i veličine čestice ako se radi o prašini.

Prema tipu, kasni somatski efekti mogu biti nekancerozni i kancerozni. Nekancerozne povrede mogu biti zamućenje očnog sočiva i katarakta očnog sočiva. Katarakta nastala zračenjem počinje da se pojavljuje na sredini zadnjeg dela sočiva, šireći se prema krajevima.

Katarakta izazvana drugim uzrocima, kao i ona koja se spontano sa godinama pojavljuje, počinje periferno, odnosno od rubova duž ose sočiva.

Kod normalnih sočiva svetlo je fokusirano normalno na mrežnjaču.



Slika 4.1. Sočivo

Sočivo sa kataraktom – neprovidnost sočiva blokira ili izobličava svetlo od postojećeg, fokusiranog na mrežnjači, rezultirajući u redukovani vid.

Promene koje nastaju na sočivu se mogu najranije zapaziti 6 meseci posle ozračivanja, a za gornju granicu ne postoji ograničenje.

Za neutrone se smatra da su doze od 0,2 do 0,5 Sv dovoljne da izazovu katarktu sočiva, a najniža doza X-zraka za koje je primećena katarakta je 2 Sv.

Ostali delovi oka otporniji su na kasna oštećenja. U kasne somatske efekte spadaju i degenerativne promene na plućima i u digestivnom traktu.

4.1. Uzrok kancera

Najvažniji od svih stohastičkih efekata je kancer, koji uvek ozbiljan, a često i fatalan. Iako tačan uzrok većine kancera ostaje nepoznat ili teško razumljiv, izlaganje duvanskom

dimu, azbestu i ultravioletnim zracima, kao i ionizujuća radijacija su poznati uzroci izazivanja određenih tipova kancera. Razvoj kancera je kompleksan višefazni proces, koji obično traje godinama. Radijacija ima uticaja u prvobitnoj fazi, prouzrokovanjem određenih mutacija DNK u normalnim ćelijama u tkivu. Ove mutacije omogućavaju ćeliji da krene putem abnormalnog rasta, koji ponekad može da dovede do razvoja maligniteta.

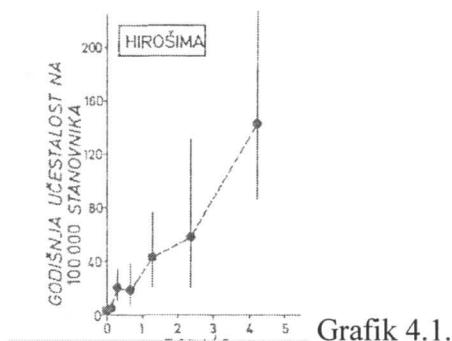


Slika 4.2. Ozračena ćelija

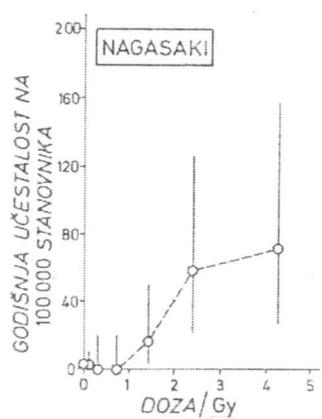
Ako ne možemo da ustanovimo razliku između ovih slučajeva kancera, koji nastaju izlaganjem radijaciji i onih nastalih od drugih uzroka, kako možemo da izračunamo rizik od kancera od radijacije. U praksi možemo da koristimo epidemiologiju – statističke studije slučaja (broj slučajeva i njihova distribucija) specifičnih poremećaja u specifičnim populacionim grupama. Prepostavimo da znamo broj ljudi u izloženoj grupi i doze koje su primili. Onda posmatranjem pojave u grupi i poređenjem doza i broja kancera koji se očekuju u drugoj sličnoj ali neizloženoj grupi, možemo proceniti rizik od kancera po jedinici doze. Ovo se obično naziva faktor rizika. Najvažnije je da se u ovim kalkulacijama uključe podaci o velikoj grupi ljudi, kako bi se minimizirale statističke greške u proceni i uračunati faktori, poput godina i pola, koji spontano utiču na razvoj kancera.

Nisu svi kanceri fatalni. Prosečna smrtnost od kancera tiroide prouzrokovanih radijacijom je oko 10% (iako je dosta niži – manje od 1% za slučajeve dece ili tinejdžera izazvanih nesrećom u Černobilu), kancera dojke oko 50%, a od kancera kože oko 1%. Sve u svemu, ukupan rizik od nastanka karcinoma podjednakim izlaganjem celog tela je oko upola veći od rizika nastanka fatalnog kancera.

Glavni izvor informacija o dodatnom riziku od kancera koji nastaje posle izlaganja gama radijaciji su studije o preživelima od atomske bombe baćene na Hirošimu i Nagasaki 1945. god. Rezultati posmatranja preživelih stanovnika ovih gradova nesumnjivo ukazuju na povećanje obolelih u proporciji sa dobijenom dozom zračenja. Treba napomenuti da su se bombe baćene na Hirošimu i Nagasaki razlikovale. Ona baćena na Hirošimu je više neutronskog zračenja nego u Nagasakiju. Na graficima 4.1. i 4.2. može se videti da je frekvencija leukemije na 100.000 stanovnika na godinu dana veća u Hirošimi, u skladu sa povećanom relativnom biološkom efikasnošću neutrona.



Grafik 4.1.



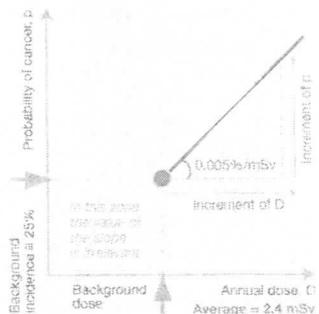
Grafik 4.2.

Na slici 4.3. prikazana je frekvencija leukemije na 100.000 preživelih stanovnika u Hirošimi, a na slici 4.4. isti podaci za Nagasaki (podaci po UNSCEAR Jonizung 1972. vol. II).

Proučavanja u Japanu pokazala su i različit stepen rizika po starosnom dobu. Najveća frekvencija leukemije je zabeležena u dobu od 0 do 14 godina. Procenjeno je da je i apsolutni rizik (broj obolelih iznad proseka, po 0,01 Gy i po milionu stanovnika) za leukemiju 1,6. Pored leukemije, zračenje utiče na pojavljivanje raka plića, grudi i štitne žlezde. Za rak pluća je apsolutni rizik privremeno procenjen na 2,0 po 0,01 Gy i po milionu stanovnika, što znači ako se ozrači milion stanovnika dozom od 0,005 Gy, to će rezultirati još jednim dodatnim slučajem raka pluća.

U vreme eksplozije rak dojke je bio najčešći kod žena između 10 i 39 godina. Za mlađe i starije žene frekvencija je niža. Apsolutni rizik za rak dojke je procenjen na 2,1 po 0,01 Gy po milionu stanovnika. Latentno vreme pojavljivanja kanceroznih posledica procenjeno je na osnovu istih istraživanja na 6 godina za leukemiju i više od 10 godina za rak pluća i grudi.

Posle velikog istraživanja bioloških efekata na niske doze ionizacije radijacije, UNSCEAR je 2000. god. zaključio da je „porast rizika od nastanka kancera proporcionalan dozi radijacije u skladu sa saznanjem i prema tome ostaje naučna procena o odbrani uticaja niskih doza“. Međutim UNSCEAR takođe prihvata da postoji nesigurnost i izjavljuje da „... odnos striktno linearne doze uticaja ne treba očekivati u svim slučajevima.“



Grafik 4.3.

U stvarnosti rizik za aktuelnu osobu od date doze, zavisi od doba date osobe u vreme izlaganja i od njenog tela. Na primer, ako osoba primi dozu kasnije u životu, radijacijom prouzrokovani kancer možda neće imati vremena da se pojavi pre nego što osoba umre od nekog drugog uzroka. Skorašnji napredak znanja govori da genetska konstitucija osobe može uticati na njen rizik od kancera posle ozračivanja. Sada možemo identifikovati samo retke porodice koji mogu nositi rastući rizik, ali stručnjaci u budućnosti mogu biti u stanju da računaju na neke od takvih naslednih crta.

Tkivo i organ	Faktor rizika ($\times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$)
Bešika	0,30
Koštana srž (crvena)	0,50
Koštane površine	0,05
Grudi	0,20
Debelo crevi	0,85
Jetra	0,15
Pluća	0,85
Jednjak	0,30
Koža	0,02
Jajnik	0,10
Stomak	1,10
Tiroidna žlezna	0,08
Ostatak	0,50
ukupno	5,00

4.2. Indirektno-genetski efekti

Nezavisno od kancera, glavni kasniji efekat od radijacije je nasledna bolest. Kao i sa kancerom, mogućnost nasledne bolesti, ali ne i njenog intenziteta, zavisi od doze, o čemu je bilo reči u delu o dozama. Genetska šteta potiče od ozračivanja testisa i jajnika. Jonizujuća radijacija može izazvati mutacije u ovim ćelijama ili u ćelijama zametka, koji ove ćelije formiraju. Mutacije mogu narasti do štetnih efekata kod budućih generacija. Javljuju se kao rezultat struktturnih promena kod DNK u pojedinim ćelijama zametka, koji kasnije nosi naslednu informaciju u DNK kroz buduće generacije. Nasledne bolesti mogu uzrokovati promene u snažnom rangiranju, od rane smrti i ozbiljnih mentalnih defekata do relativno običnih abnormalnosti skeleta i sporednih poremećaja metabolizma. Mada mutacije nastaju i rastu u ljudskom biću bez nekog vidljivog razloga, prirodna radijacija i drugi činioci mogu ih takođe uzrokovati i doprineti rasprostiranju okolnosti nasledne bolesti. Međutim, tome nema vidljivog svedočenja kod ljudskog potomstva za nasledne defekte, karakteristične za izlaganje prirodnoj i veštačkoj radijaciji. Široke studije o potomstvu preživelih od atomskih bombi, posebno, imaju nedostatak da nisu pokazale porast od statističkog značaja u naslednim defektima. Umesto toga, negativni zaključci pomogli su da se sproveđe više procena faktora rizika za njih.

Velike eksperimentalne studije su urađene o naslednom oštećenju, gde jonizaciona radijacija deluje na životinje, pretežno na miševe. Ovo je pokriveno širokim spektrom doza i odnosa doza i često pokazuje da jonizujuća radijacija uzrokuje mutacije. Rezultati takođe pokazuju koliko često su nasledni defekti uzrokovani poznatim dozama. Kada se

uzmu u obzir zaključci o preživelima od atomskih bombi, ova informacija dozvoljava da se napravi procena naslednog rizika za ljudsko biće.

ICRP procenjuje rizik ogromne nasledne bolesti u većini populacije izložene niskim dozama i procentima doza. To donosi faktor rizika od $1,0 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ ili 1 u 100 po Sv za svaku bolest koja nastaje u bilo koje vreme u budućim generacijama. Mutacije dovode do bolesti koje su strogo nasledne, kao što je hemofilija i Daunov sindrom, čineći oko polovine od svih: ostatak dolazi od grupe takozvanih multifaktoralnih bolesti, kao što su dijabetes i astma. Ova procena rizika nosi priličnu nesigurnost, posebno kod multifaktoralne bolesti, gde međusobno kombinovanje genetskih faktora okruženja dovodi do pometnje u čitavom razumevanju.



Slika 4.3. Hromozom 21, abnormalnost u ženi sa Daunovim sindromom

Ozračivanje testisa i jajnika nosi rizik od naslednih efekata ukoliko se javi pre ili za vreme reproduktivnog perioda života. Dok je proporcija radne populacije da se verovatno reproducuje niža, dotle je u opštoj populaciji faktor rizika za radnike manji. ICRP procenjuje rizik kod radne populacije na $0,6 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ ili 1 u 170 po Sv za žestoke nasledne bolesti u svim budućim generacijama.

Više ranijih procena pokazuje da rizici od naslednih efekata sada mogu biti niži nego u ranijim procenama, posebno za multifaktoralne bolesti. U izveštaju Generalnoj skupštini UN, 2001. godine, UNSCAR je pokazao obiman pregled naslednih rizika od izlaganja radijaciji. Za populaciju izloženu radijaciji u samo jednoj generaciji, rizici za prvu generaciju su bili procenjeni na 0,3–0,5 po centu po Gy, što je između jedne trećine i jedne polovine ICRP za sve obuhvaćene generacije. Rizici za sve ostale generacije su mnogo niži. Dakle, po ovoj novoj proceni po Greju je negde u redu od 0,4 do 0,6 po centu od osnovne učestalosti ovih poremećaja u ljudskoj populaciji.

Rizik za zajednicu

Važna konsekvenca pretpostavke da je rizik proporcionalan dozi, bez niskog praga doze, je da kolektivna efektivna doza postaje pokazatelj štete po zajednicu. Po ovom konceptu, matematički nema razlike ako u zajednici od 50.000 ljudi svako prima efektivnu dozu od 2 mSv ili u zajednici od 20.000 ljudi svako prima dozu od 5 mSv – kolektivna doza u

svakoj zajednici je 100 man Sv, a zajednička cena u svakoj generaciji može biti 5 smrti od kancera i 1 teški nasledni defekt u budućim generacijama. Članovi manje zajednice, međutim, stiču veći individualni rizik od fatalnog kancera. Međutim kalkulacije kolektivne doze ne bi trebalo uzimati tako daleko: proizvod neograničenog broja ljudi i beskonačne male doze prilično je besmislen.

Izlaganje u trudnoći

Rizici izlaganja dece dok su u materici zaslužuju specijalnu napomenu. Ako je neki embrion ili fetus izložen radijaciji u vreme dok se formiraju organi, razvojni defekti kao što su redukovani prečnik glave ili mentalna retardiranost mogu biti izazvani. Studije na preživelima od atomske bombi, kojima su bili izloženi pre rođenja, pokazuju da mentalna retardiranost uglavnom prati izlaganje za vreme perioda od 8 do 15 nedelje posle začeća. Za izlaganja za vreme najveće osetljivosti, u periodu između 8 i 15 nedelje, ICRP procenjuje da opadanje IQ direktno zavisi od doze, bez praga, a sa gubitkom od 30 IQ poena po Sv. Tako, na primer, izlaganje fetusa od 5 mSv za vreme ovog stadijuma trudnoće vodi gubitku u IQ od 0,15 poena, što ne bi bilo otkriveno.

Visoke doze mogu da izazovu smrt ili visoku nakaznost embriona. Prag za ove efekte je između 0,1 i 1 Sv ili više, u zavisnosti od vremena posle začeća. Genetski rizici po fetuse presuđuju da bude isto kao i za punu reproduktivnu populaciju posle rođenja, u stvari $2,4 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ ili 1 u 40 po Sv. Izlaganje pre rođenja takođe može voditi povećanju rizika od malignosti u detinjstvu. Rizik od fatalnog kancera u doba do 15 godina je procenjen da bude oko $3,0 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ ili 1 u 30 po Sv, a krajnji rizik od kancera je oko dva puta ove vrednosti.

Iz svih ovih razloga najbolje je da trudna žena izbegava dijagnostičke X zrake u predelu stomaka, osim ako bi odlaganje zračenja do kraja trudnoće bilo nepoželjno. Naravno, za žene u reproduktivnom periodu, gde nije prihvatljivo da se trudnoća isključi, dijagnostička procedura koja daje visoke doze u karličnom pojasu poželjno je da se ograniči na rani deo menstrualnog ciklusa, kada je trudnoća najmanje verovatna. Specijalne restrikcije odnose se na doze koje prima trudna žena ukoliko je zaposlena na poslu sa radijacijskim izvorima.

Štetni efekti radijacije

Okolnosti izlaganja	Zdravstvene posledice	Izvori informacija
	Rani efekti	
Visoka doza ili prevelik nivo doze za telo u predelu kože, testisa ili jajnika	Smrt Crvenilo kože Sterilitet	Ljudski podaci iz različitih izvora
	Kasniji efekti	
Bilo koja doza ili nivo doze Rizik zavisi od doze Javlja se godinama kasnije	Različiti kanceri	Faktori rizika za ljudsko biće procenjeni ekstrapolacijom ljudskih podataka za visoke doze i nivoe i nivoe doza
Bilo koja doza ili nivo doze Rizik zavisi od doze Javlja se kod potomaka	Nasledni defekti	Faktori rizika za ljudsko biće izvedeni iz podataka od životinja i odsustvo ljudske evidencije
Visoka doza bilo kog nivoa Različita vremena javljanja	Funkcionalna oštećenja	Ljudski podaci iz različitih izvora
Doza u materici Javlja se u detetu	Mentalna retardiranost	Ograničeni ljudski podaci

V PREPORUKE ZA OSTVARIVANJE OPTIMALNE ZAŠTITE

Pristupi zaštiti protiv ionizujućeg zračenja su značajno saglasni širom sveta. Ovo je uglavnom zahvaljujući postojanju dobro ustanovljenog i međunarodno poznatog sistema. Naučni komitet Ujedinjenih nacija u Efektima atomske radijacije (UNSCEAR) redovno pregleda prirodne i veštačke izvore radijacije u okruženju u kojem su ljudi izloženi radijaciji ovih izvora i o svojim zaključcima izveštava Generalnu skupštinu UN.

Međunarodna komisija za radiološku zaštitu (ICRP) je nevladina naučna organizacija osnovana 1928. godine, koja redovno objavljuje preporuke za zaštitu protiv ionizujuće radijacije. Njen autoritet proizlazi iz naučnog stanovišta njenih članova i vrednosti njenih preporuka. Bazira se na njenim procenama mogućnosti fatalnog kancera uglavnom na studijama Japanaca preživelih od atomske bombe i njenim procenjivanem od tela kao što su UNSCEAR.

Međunarodna agencija za atomsku energiju ima zakonsku funkciju da ustanovljava bezbednosne standarde, koje određuje u saradnji sa drugim odgovarajućim međunarodnim organizacijama. U ovom radu ostvaruje tesnu saradnju sa UNSCAR i ICRP. Takođe, ima odgovornost za sprovođenje primene ovih standarda na zahtev države i to radi kroz različite mehanizme, uključujući i provizije od usluga i treninga. Međunarodna komisija za radiološku zaštitu je 1977. godine dala preporuku za mere koje bi po njenom mišljenju koristile za postizanje bolje zaštite od zračenja.

U svrhe zaštite se predlaže da se odrede dva tipa delovanja zračenja, zavisno od apsorbovane doze:

1. stohastički efekti i
2. nestohastički efekti.

1. Stohastički efekti su oni za koje je vrednost događaja slučajna, odnosno veza između doze i delovanja je stohastična. Tako, na primer, na nivou doza koje su uobičajene u zaštiti od zračenja, nasledni efekti se mogu smatrati stohastičnim. Ovi efekti nemaju određen prag i predstavljaju linearnu zavisnost od doze. Za stohastične efekte komisija je došla do zaključka da zbog nepostojanja praga, za njih je potrebno stvoriti relativne kriterijume prihvatljivosti. Oni se moraju osnivati na poređenju radiološkog rizika sa ostalim rizicima profesionalnog ili javnog života.

2. Nestohastički efekti – kod njih ozbiljnost efekta zavisi od doze i za koje je na osnovu toga moguće odrediti pragove. Neki od ovih efekata su specifični za određena tkiva, kao što je zamagljenje očnih sočiva, nemaligno oštećenje kože, smanjenje broja ćelija u kostnoj srži, do oštećenja ćelija koja dovode do smanjenja plodnosti.

Kod nestohastičnih efekata se može postaviti absolutni kriterijum prihvatljivosti, odnosno primljene doze moraju biti ispod praga za takve efekte.

5.1. Principi na kojima se mora zasnovati zaštita

Po ICRP, postoje tri osnovna principa zaštite:

1. opravdavanje za izvođenje određene radnje,
2. optimalizacija zaštite
3. ograničenje doze.

Ova prva dva principa se odnose na izvor, a treći princip se odnosi na osobe.

1. Pošto se uglavnom smatra da nije u osnovi radiološke zaštite da ispituje opravdanost i potrebu za korišćenje zračenja, ali pošto je zaštita od zračenja bazirana uglavnom na prepostavci linearne baze između doze i efekta, ne postoji doza za koju se možemo smatrati potpuno sigurni. To znači da se upotreba zračenja mora zasnovati na pažljivoj analizi koristi u poređenju sa rizicima.

2. Optimalna zaštita je veoma važan element zaštite od zračenja. ICRP to definiše na sledeći način: „Sve doze se moraju učiniti onoliko malim koliko je to razumno moguće uzimajući u obzir ekonomske i društvene faktore“. Da bi se utvrdilo da li je moguće „razumno“ smanjiti dozu, komisija je uvela nove pojmove, kao što su:

a) Negativna posledica

To je matematički izražena „očekivana“ šteta po stanovništvo, nastala kao posledica zračenja. Pritom uzimamo ne samo različite tipove štetnih posledica (društveni, zdravstveni...), nego i njihovih težina. Ponekad govorimo samo o negativnim posledicama po zdravlje. Za efekte zdravlja postoji izraz za grupu od P osoba

$$\underline{G} = \underline{P} \sum_i p_i \cdot g_i \quad [61]$$

Gde je p_i – verovatnoća da dođe do efekta i, a g_i je pripadajući težinski faktor.

b) Efektivni ekvivalent doze (He)

Definisan je kao suma produkata ekvivalentne doze u organima ili tkivu H_T i određenih težinskih faktora za pojedine organe koje je propisala ICRP:

$$H_E = \sum_T W_T \cdot H_T \quad [62]$$

Ova veličina bi odgovarala za određivanje godišnjih granica za unutrašnju kontaminaciju raznim radionukleidima.

Vrednosti W_T su sledeće: gonade 0,25, grudi 0,15, kostna srž 0,12, pluća 0,12, tiroida 0,03, pokosnica 0,03, ostatak organizma 0,3. Za ostatak organizma proračun se vrši tako što se uzima u obzir 5 različitih organa koji dobijaju najveću dozu i svakom se dodaje $WT = 0,06$, a pošto je $5 \times 0,06 = 0,30$, ostali organi se zanemaruju.

c) Kolektivni efektivni ekvivalent doze (Se)

Za postupke optimizacije smatra se korisnim da se definiše veličina kolektivni efektivni ekvivalent Se kao

$$\underline{S}_E = \int_{\underline{H}}^{\infty} N_{HE}(\underline{H}) \cdot \underline{H}_E \cdot d\underline{H}_E \quad [63]$$

Gde je $N_{HE} \cdot dH_E$ broj pojedinaca koji prime efektivni ekvivalent doze između H_E i $H_E + dH_E$

d) Obaveze efektivnog ekvivalenta doze

Ako je zračenje prođeno u vremenu, mora se u obzir uzeti i vremenski integral doze. Obaveza efektivnog ekvivalenta doze $H_{E,C}$ koja je posledica date odluke ili prakse je integral od 0 do beskonačnosti u vremenu, brzine efektivnog ekvivalenta doze po glavi stanovnika $\bar{H}(t)dt$ za datu grupu ljudi

$$H_{E,C} = \int_0^{\infty} \bar{H}_E(t) dt \quad [64]$$

Izražava se u Sv (sivertima).

5.2. Cena negativne posledice zračenja

Svi znamo da ništa nije važnije od ljudskog života, ali u donošenju mnogih odluka inicijalno se nalazi i vrednovanje života u novcu. Na primeru SAD je orijentaciono uzeto da je cena negativne posledice 10^5 dolara za jedan čovek sivert, ali u većini slučajeva se dobijaju povoljni rezultati uzimajući i 5 do 10 puta manju vrednost.

Za proces optimalizacije negativne posledice prikazujemo kao:

$$Y = \alpha \cdot S \quad [65]$$

Gde je α – cena koštanja pridružena jedinici kolektivnog efektivnog ekvivalenta doze, a S je kolektivna obaveza efektivnog ekvivalenta doze pridružene nivou zaštite.

5.3. Idealni slučaj optimalizacije

Kod idealnih slučajeva postoji samo jedna grupa ozračenih, jedan parametar zaštite. Glavni zahtev u idealnom slučaju je postojanje kvantitativne veze između obaveze kolektivnog efektivnog ekvivalenta doze S i maksimalnog godišnjeg efektivnog ekvivalenta doze H :

$$H = f(s) \quad [66]$$

Optimalizacija se provodi u području individualnih doza ispod maksimalnih dopuštenih granica. Granične doze ne predstavljaju vrednosti za planiranje zaštite već donju granicu područja nedozvoljenih vrednosti. Vrednosti iznad graničnih nisu dozvoljene. One služe samo kao uslovi za procenu optimalizacije. Za nju se upotrebljavaju optimalne granice (L) koje su samo deo graničnih vrednosti. Na osnovu toga proces optimalizacije ima dva uslova:

$$1) X(W) + Y(W) = \text{minimum} \quad [67]$$

gde je X cena zaštite, a Y cena negativne posledice zračenja, i oni su procenjeni na nivou zaštite koja je označena sa W . U nekim slučajevima W , $X(W)$ i $Y(W)$ mogu biti kontinuirana, a u nekim mogu imati diskretne vrednosti.

2) da se nalazimo ispod operativne granice

$$f(S) \leq L \quad [68]$$

3) Ograničenje doze

Ograničenje doze dopunjava procedure opravdanosti i optimalizacije. Granice su postavljene da spreče nestohastične efekte i da ograniče neprihvatljivi nivo pojavljivanja stohastičnih efekata. Granice koje su se pre postavile bile su stare dvadesetak godina, i ništa nije ukazivalo da nisu davale dovoljan nivo zaštite.

Komisija je htela da promeni te granice po današnjim saznanjima i dostignućima. Nove granice se zasnivaju na totalnom riziku koji je povezan sa izlaganjem zračenju svih tkiva. Osnovne preporuke komisije trebale bi osigurati da štetne posledice koje proilaze iz godinu dana rada budu limitirane na jednu vrednost koja je nezavisna od raspodele ekvivalenta doze u organizmu. Granice ekvivalentne doze primenjuju se na ekvivalentne doze primenjen na godinu dana rada, a ne više na 13 nedeljno razdoblje.

U većini zemalja godišnje doza na individualnog člana javnosti u praksi, koja dovodi do izlaganja, spuštena je ispod $0,3 \text{ mSv}$ godišnje. Primarna doza je deo ograničenja.

5.4. Granice ekvivalentne doze radnika u profesionalnom kontaktu sa joniziranim zračenjem

Komisija smatra dobrim metodom za merenje stepena prihvatljivosti rizika u radu sa ionizacionim zračenjem u poređenju sa onim drugih profesija koje su priznate kao zanimanja sa visokim stepenom nivoa sigurnosti sa srednjom smrtnošću od 10^{-4} zbog profesionalnih uzroka.

Stepen rizika za „sigurno“ zanimanje je u stvari prosečni rizik za sve radnike u toj grani, individualni rizik varira oko srednje vrednosti. Granice su određene 0,5 Sv na godinu za sva tkiva, osim za očno sočivo, kod kojih je 0,3 Sv na godinu.

Za stohastične efekte ekvivalentne doze zasnivaju se na principu da rizik može biti jednak bez obzira na to da li je zračeno telo homogeno ili nije. To će se zadovoljiti ako je:

$$\sum_T W_T H_T = H_{E,L} \quad [69]$$

- gde je W_T – težinski faktor koji predstavlja stohastični rizik povezan sa tkivom prema totalnom riziku u slučaju homogenog zračenja, H_T je ekvivalent godišnje doze u tkivu T, $H_{E,L}$ je granica ekvivalenta godišnje doze za homogeno zračenje čitavog tela, odnosno 50 m Sv.

Ove granice odgovaraju za sve radnike bez obzira na pol ili uzrast. Zaštita embriona ili fetusa prilikom profesionalnog zračenja se mora tretirati posebno.

5.5. Granice ekvivalentna doze za stanovništvo

Ako posmatramo nivo smrtnih opasnosti za stanovništvo, možemo videti da je on oko deset puta manji od onog kod profesionalnog nivoa rizika koji se prihvata. Zato komisija predlaže godišnju granicu ekvivalenta doze 5mSv za stanovništvo i to za ozračenje celog organizma. Ovde treba napomenuti da bi uz pretpostavku nivoa rizika od 10^{-2}Sv^{-1} uz zračenje koje bi delovalo kroz ceo život, bilo potrebno smanjiti granicu na 1m Sv na godinu.

Od strane komisije je to opisano na sledeći način:

„Stanovništvo ne sme biti izloženo zračenju, spoljašnjim ili unutrašnjim, iznad 0,17 rem (1,7 mSv) godišnje (genetski značajna doza). Pojedinci u sredini u kojoj žive ne smeju biti izloženi zračenju celog tela iznad 0,5 rem (5,0 mSv) godišnje.“

VI ZAŠTITA OD ZRAČENJA

Postoje tri glavne metode zaštite od zračenja:

- 1) udaljenost,
- 2)vreme,
- 3) apsorbens.

Pored ove tri metode, potrebno je raditi sa izvorima koji nemaju veću radioaktivnost nego što je potrebno.

1) Udaljenost:

Intenzitet radijacije opada sa kvadratom rastojanja od takastog izvora. Zbog toga se faktor udaljenosti može koristiti za smanjenje primljene doze zračenja. Ako hvatamo radioaktivni izvor prstima, udaljenost između radioaktivnog izvora i prsta iznosi nekoliko milimetara, a između izvora i ruke je nekoliko cm. Ako se upotrebi pinceta dužine oko 20 cm, doza koju prime prsti će se smanjiti za faktor 1000, a doza koju primi ruka za faktor 15 do 20.

U slučaju da udaljenost ne bi bila dovoljna zaštita, ono ipak doprinosi smanjenju debljine potrebnog apsorbera i tako smanjenju troškova.

2) Vreme:

Ako se skrati vreme rada sa izvorom zračenja, može se primiti vrlo mala doza, iako je intenzitet zračenja prevelik da bi se sa tim izvorom moglo raditi normalno radno vreme. Na primer, dozvoljeno je da se radi u prostoru gde je brzina doze 100 puta veća od maksimalno dozvoljene doze za kontinuirani rad, ako se radno vreme kod te brzine smanji na stoti deo od 40 radnih sati, dakle manje od pola sata.

Ali ako je izlaganje osoba brzinama većim od 1000 puta dopuštene brzine doze treba dozvoliti samo u izuzetnim slučajevima i pod posebnim okolnostima.

3) Apsorberi:

Postoje dve vrste debljine apsorbera, u zavisnosti od toga da li se radi o zaštiti od nanelektrisanih čestica, između kojih i materije postoji veoma jako međudelovanje, ili o nenanelektrisanim česticama, kao što su gama zraci i neutroni, koji imaju veliku prodornu moć, više nego što sa materijom reaguju.

U principu, treba koristiti istovremeno sve faktore, ali češće treba naći razuman kompromis. Na primer, povećanje debljine štita i udaljenosti može dovesti do povećanja vremena rada.

a) Apsorberi za nanelektrisane čestice osim elektrona

Ako se radi o zaštiti protiv nanelektrisanih čestica, očigledno je da njihov domet u datom apsorberu odlučujuća veličina za određivanje debljine istih. Za alfa zrake energije 2–3 MeV, dovoljni su apsorberi jedan list papira, ili tanki metalni listić i da alfa čestice do 7,5 MeV neće proći kroz kožu. Pošto znamo da je srednja debljina kože 7 mg cm^{-2} , kožu možemo smatrati kao zaštitini sloj ljudskog tela. Iz tog razloga alfa zraci nisu opasni kao spoljno zračenje, ali mogu biti vrlo opasni unutar tela. Domet alfa čestica energije 4 do 9 MeV u vazduhu je približno 2,5 do 8,5 cm. Domet protona energije 1 do 10 MeV u lakinim elementima je 3 do 150 mg cm^{-2} .

b) Apsorberi sa elektromagnetskim zračenjem

Za proučavanje debljine apsorbera za X i gama fotone treba znati takozvanu „geometriju“ eksperimentalnog uređaja. U zaštiti se srećemo sa problemom širokog snopa, koji pada na štit, odnosno loše geometrije za koji je potrebno poznavanje faktora gomilanja.

6.1. Osnovni vidovi zaštite od jonizujućeg zračenja

Osnovni vidovi zaštite su:

- tehnička zaštita,
- medicinska zaštita,
- vaspitno-obrazovne mere zaštite.

Izlaganje jonizujućoj radijaciji javlja se u mnogim zanimanjima. Veštački izvori radijacije se uglavnom koriste u proizvodnji i uslužnoj industriji, u područjima odbrane (nuklearne bombe) i istraživačkim institucijama i na univerzitetima, kao i u industriji dobijanja nuklearne energije, u medicini za različite upotrebe (dijagnostiku i terapiju). Iz veštačkih izvora posle korišćenja uranijuma i posle upotrebe radionukleida nastaje nuklearni otpad. Nuklearni otpad emituje radijaciju. Nuklearni otpad se deponuje, transportuje i odlaže na tzv. „sigurno mesto“. Danas u svetu postoje milioni litara nuklearnog otpada i hiljade tona sagorelog uranijuma. Ali najveći problem je upravo rukovođenje, skladištenje i konačno uništavanje tog otpada širom sveta.



Slika 6.1. Transport nuklearnog otpada u SAD

Međutim za sada nema „dobrog“ rešenja za skladištenje i čuvanje nuklearnog otpada, pošto nijedno tehničko rešenje nije dovoljno pouzano jer znamo da u nuklearnom otpadu ima i onoga koji će zračiti, a samim tim predstavljati opasnost za životnu sredinu i posle nekoliko hiljada godina.

6.2. Medicinska upotreba radona

Većina ljudi u nekom trenutku u svom životu ima pregled X-zracima, kako bi se pomoglo lekaru da odredi pravilnu dijagnozu bolesti ili oštećenja tela. Upotreba X-zraka kod pregleda pacijenata naziva se dijagnostička radijologija, a upotreba lekova sa radionukleidima za dijagnozu ili terapiju naziva se nuklearna medicina. Kada se koriste radijacijski zraci za lečenje pacijenata, procedura se zove radioterapija.

Tabela 6.1. Izlaganje radijaciji od dijagnostičkih medicinskih procedura UNSCEAR

Populacija po doktoru	Broj ispitivanja na 1000 ljudi po godini	Godišnji prosek efektivne doze, mSv
<1.000	920	1,2
1.000–3.000	150	0,14
3.000–10.000	20	0,02
> 10.000	< 20	0,02
Svetски prosek	330	0,4

Pri pregledu X-zracima, zraci iz mašine prolaze kroz pacijenta. X-zraci prodiru kroz meso i kosti u različitim stepenima i proizvode sliku unutrašnje strukture tela. Delovi tela koji se najviše pregledaju su grudi, udovi i zubi i svaki zauzima oko 25% od ukupnog pregleda. Doze su približno niske – oko 0,1 mSv za pregled grudi, na primer.

Tabela 6.2. Uobičajene doze konvencionalnih X-zraka i kompjutersko-tomografska ispitivanja po pacijentu (UNSCEAR)

Ispitivanje	Doza konvencionalnog X zraka (mSv)	Kompjuterska tomografska doza (mSv)
Glava	0,07	2
Zubi	< 0,1	-
Grudi	0,1	10
Abdomen	0,5	10
Karlica	0,8	10
Donji deo kičme	2	5
Donji deo creva	6	-
Udovi i zglobovi	0,06	-

Za dijagnostičku proceduru u nuklearnoj medicini, pacijentu se daje radionukleid u nekoj nosećoj supstanci, na primer leku, koji se prvenstveno preuzima od strane tkiva ili organa koji se ispituje. Radionukleidi emituju gama zrake. Specijalni detektor koji se zove gama kamera koristi se da bi se posmatralo kako organi ili tkiva reaguju ili koliko se brzo kreću radionukleidi.

Tabela 6.3.

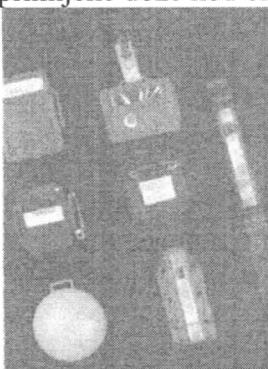
Skenirani organ	Efektivna doza (mSv)
Mozak	7
Kost	4
Tiroïdna žlezda	1
Jetra, bubreg	1

Radionukleidi se koriste za ove procedure zato što imaju kratak poluživot.

Pošto se izvodi veliki broj procedura dijagnoza X-zracima, posebno u razvijenim zemljama, kolektivna doza nastala iz ove prakse je veoma velika. UNSCEAR je procenio da je kolektivna doza od 2500 miliona molSv za sve dijagnostičke procedure. U stvarnosti, međutim, mladi ljudi nisu izloženi mnogo X-zracima, a verovatnoća za pregledom raste sa godinama. To znači manju mogućnost uopšte od pojave bilo kakvog kancera koji nastaje kao posledica.

Neki radnici su takođe izloženi prirodnim izvorima radijacije u takvim okolnostima da je mera nadgledanja i zaštite neophodna. Ovo posebno važi kod izlaganja radonu u rudnicima i na običnim imanjima, gde je širom područja nivo radona visok. Sa relativno visokom dozom, procenjenom iz iskustva u vazdušnom saobraćaju, zahvaljujući kojoj se podižu nivoi kosmičkog zračenja na visokim letovima, neki naučnici smatraju da je nadgledanje takođe potrebno za vazdušnu posadu, mada je manje poznato do kog stepena njihovo izlaganje može odmah biti redukovano.

Mnogi ljudi koji su izloženi radijaciji u njihovom poslu nose lične upozoravajuće uređaje (ili dozimetre) kao što je mali fotografski film ili neki termoluminiscentni materijal, na specijalnom držaču. Takođe postoji rastuća upotreba elektronskih uređaja za ovu svrhu. Oni registruju radijacijski incident na telu, iz spoljašnjih izvora i donose procenu primljene doze kod onoga ko ih nosi.



Slika 6.2. Film i TLD dozimetri



Slika 6.3. TLD bedž

6.3. Opšti principi koji važe za radno mesto

Kontrolisano područje treba ostvariti gde osoblje prima doze koje su veće od 15 mSv. Kontrolisana područja su ona područja gde su zračenjem izložene osobe pod nadzorom

službenika zaštite od zračenja. To su osobe koje imaju potrebno obrazovanje i koje znaju kako treba primeniti odredbe zaštite od zračenja i za to snose veliku odgovornost. Taj stručnjak mora imati znanje i obrazovanje koje je potrebno za merenje ionizujućeg zračenja.

6.4. Merenje i kontrola zračenja

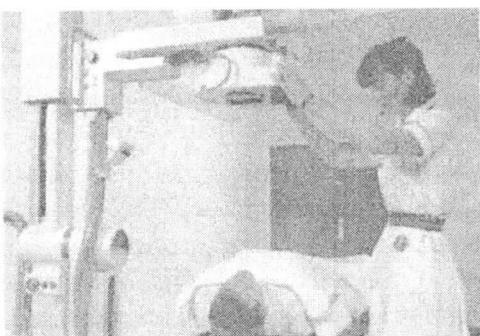
U kontrolisanom području potrebno je sprovesti prvo odgovarajuće merenje doze zračenja. Ta merenja se moraju izvršiti pomoću određenih uređaja, redovno (jednom godišnje) da bi se mogla ustanoviti efikasna mera zaštite. Za aktivnosti u radnom prostoru, bilo da je prirodnog ili veštačkog porekla, najbolje je da se uzorkuje vazduh koji radnik diše i onda proceni unutrašnja doza. U nekim slučajevima može biti moguće da se izmeri aktivnost u izlučevini i izvede doza, ili, naravno, izmeri aktivnost direktno u telu sa osetljivim detektorima. Pravilno je uvek dati najbolju moguću procenu doze.

Tabela 6.4. Prosečne godišnje efektivne doze u različitim zanimanjima (UNSCEAR)

Izvor	Doza (mSv)
Veštački izvori	
Nuklearna industrija	4,5
Rudnici uranijuma	3,3
Mlevenje uranijuma	0,1
Obogaćivanje	1,0
Fabrikovanje goriva	1,4
Nuklearni reaktori	1,5
Ponovna obrada	
Medicinska upotreba	
Radiologija	0,5
Stomatologija	0,06
Nuklearna medicina	0,8
Radioterapija	0,6
Industrijski izvori	
Ozračivanje	0,1
Radiografija	1,6
Proizvodnja izotopa	1,9
Fino sečenje	0,4
Skceleratori	0,8
Osvetljavanje	0,4
Prirodni izvori	
Izvori radona	

Rudnici uglja	0,7
Rudnici metala	2,7
Imanja na zemlji (radon)	4,8

Kosmički izvori
Civilne vazdušne posade 3,0



Slika 6.4. CT skeniranje

Tabela 6.5. Efektivne doze tokom vazdušnog putovanja

Gradovi	Efektivna doza (μ Sv)
Vankuver – Honolulu	14,2
Frankfurt – Dakar	16,0
Madrid – Johanezburg	17,7
Madrid – Santjago de Čile	27,5
Kopenhagen – Nankok	30,2
Montreal – London	47,8
Helsinki – Njujork (JFK)	49,7
Frankfurt – Ferbanks, Aljaska	50,8
London – Tokijo	67,0
Pariz – San Francisko	84,9

6.5. Sistematske mere zaštite

Sistematske mere zaštite se sastoje u:

- sveobuhvatnom obrazovanju i vaspitanju stanovništva o zračenju i zaštiti od zračenja,
- stalnom praćenju stanja radioaktivnog zemljišta, vode, vazduha i hrane,
- međusobnoj saradnji država i organizacija koje se bave proučavanjem i zaštitom od zračenja,
- prelasku na druge vidove energije, osim nuklearne,
- obustavi nuklearnih proba u vazduhu, vodi i pod zemljom,
- obustavi proizvodnje (ili smanjenju) nuklearnog oružja,
- pronalaženju sigurnijeg smeštaja radioaktivnog otpada i
- opštoj zaštiti čovekove okoline i tome slično.

6.6. Lokalne mere zaštite

Pored sistematskih, postoje i lokalne mere zaštite od zračenja, gde spadaju upotreba zaštitnih odela (olovno odelo, kecelja i rukavice) pri radu sa radioaktivnim materijalom. Redovna kontrola radioaktivnosti pojedinih izvora pomoću merenja doza (jonizacionom komorom) ili ozračenosti ličnim dozimetrima (film) itd.

Dekontaminacija

Dekontaminacija je veoma važna mera zaštite od zračenja. Ona može da se vrši fizički i hemijski.

Fizičke mere su: ispiranje u mlazevima vode, četkanje, brisanje, kupanje, struganje, usisavanje itd. Koja će se mera koristiti zavisi od oblasti ili objekta koji se dekontaminira. Hemijske mere: tu spadaju pranje deterdžentima ili sapunom, razblaživanje, upotreba kiselina ili alkalija, kao i organskih rastvarača.

Dekontaminacija se izvodi pored nekog vodenog izvora, kao što je reka, jezero..., a voda koja se pri tome utroši mora da odlazi ka kontaminiranom području. Materijal koji se kontaminira (i ljudi) dolazi sa jedne, a posle dekontaminacije odlazi na drugu stranu, pa je potrebno da se ne mešaju.

Što se tiče hrane, povrće i voće treba prati u protočnoj vodi više puta i ako je moguće, pre upotrebe da se oljušti.

Posle dekontamimacije se mora aparatima ponovo ispitati intenzitet zračenja.

6.7. Zaštita od zračenja u našoj zemlji

Zaštita od zračenja je u nadležnosti nekoliko ministarstava, kao što su resorno ministarstvo za industriju, zdravstvo, zaštitu životne sredine... Takođe postoje i određeni zakoni, kao što su „Zakon o zaštiti životne sredine“, „Zakon o zaštiti od jonizujućeg zračenja“ itd. U svim zemljama, pa i u našoj, zakoni se donose na osnovu međunarodnih preporuka i preporuka organizacija koje se bave ovim pitanjem. Ponekad u nekim situacijama ovi zakoni nisu dovoljno usklađeni sa realnom situacijom, tako da oni trpe izvesne promene ili dopune.

Ono što je bitno pitanje je šta se dešava u praksi u svakodnevnom životu. To je da li smo dovoljno zaštićeni od mogućeg delovanja štetnog zračenja (prirodnog ili veštačkog). Mnogi događaji iz naše bliske prošlosti, kao što je Černobil, NATO bombardovanje, ukazali su na mnoge nedostatke i slabosti.

U oblasti zaštite od zračenja, bez obzira na postojanje obrazovanog kadra, postoji veliki broj još nerešenih problema. Rešavanje ovakvih problema je od interesa za celu zemlju. Zato u mnogim razvijenim zemljama postoje nacionalni instituti ili agencije za zaštitu od zračenja, koji imaju naučnike iz različitih oblasti, potrebne za uspešan rad. Takvo rešenje je potrebno i za našu zemlju.

ZAKLJUČAK

Kao što smo videli, pod pojmom zračenja podrazumeva se ionizujuće (alfa, beta, gama) i nejonizujuće (UV, lasersko, elektromagnetno) zračenje.

Takođe smo svesni da je čovek od postanka bio izložen prirodnom zračenju (iz kosmosa, sa Sunca...). U 20. veku čovek je koristio zračenje u medicini, industriji i nauci. Sve to je pokazalo da zračenje ima koliko prednosti (koristi), toliko i mana (štete). Zbog svega toga čovek treba da posveti još više pažnje merama zaštite od zračenja. To je bitno za nas i buduće generacije.

Zaštita od zračenja i mere zaštite se neprekidno razvijaju u svetu, uz pomoć raznih organizacija i međunarodnih instituta koji se bave ovom temom, kao što su Međunarodna agencija za atomsku energiju (IAEA), Naučni komitet Ujedinjenih nacija za efekte atomskog zračenja (UNSCEAR), Međunarodna komisija za radiološku zaštitu (ICRP), Svetska zdravstvena organizacija (WHO).

Sve one su postavile savremeni koncept zaštite od zračenja koji je prihvaćen i kod nas. Tako se ovim problemom kod nas bave INN Vinča, Institut za medicinu rada i radiološku zaštitu „Dr Dragomir Krajović“, VMA, Institut za primenu nuklearne energije u poljoprivredi, Institut za tehnologiju nuklearnih i mineralnih sirovina i mnoge druge ustanove i fakulteti.

Sve ovo ukazuje koliko je zaštita od jonizacionog zračenja bitna i treba da se dalje razvija.

LITERATURA:

Radiation, people and environment, Produced by the IAEA Division of Public Information, February 2004.

V. Paić, G. Paić: *Osnove radijacione dozimetrije i zaštite od zračenja*, Udžbenik Sveučilišta u Zagrebu, Liber, Zagreb, 1983.

www.radiobiologija.vet.hr

[www.milan milanković.org](http://www.milanmilankovic.org)

www.viva.fizika.org

www.jdzzz.org.yu

www.planeta.org.yu

www.wikipedia.org

Biografija:



Marijeta Đaković, rođena 11. 11. 1963. godine u Debru.

Osnovnu i srednju školu završila u Beogradu.

Višu pedagošku školu, smer Fizika i hemija, završila 1987. u Beogradu.

Radi kao nastavnik fizike u osnovnoj školi „20. oktobar“ na Novom Beogradu.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

TD

Tip zapisa:

TZ

Vrsta rada:

VR

Autor:

AU

Mentor:

MN

Naslov rada:

NR

Jezik publikacije:

JP

Jezik izvoda:

JI

Zemlja publikovanja:

ZP

Uže geografsko područje:

UGP

Godina:

GO

Izdavač:

IZ

Mesto i adresa:

MA

Fizički opis rada:

FO

Naučna oblast:

NO

Naučna disciplina:

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči:

PO

UDK

Čuva se:

ČU

Važna napomena:

VN

Izvod:

IZ

Monografska dokumentacija

Tekstualni štampani materijal

Diplomski rad

Đaković Marijeta

Docent Nataša Todorović

Osnovni principi zaštite od jonizujućeg zračenja

srpski (latinica)

srpski/engleski

Srbija

Vojvodina

2008

Autorski reprint

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

Fizika

Nuklearna fizika

Zaštita od jonizujućeg zračenja

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

nema

U radu je opisano jonizujuće zračenje i zaštita od istog

Datum prihvatanja teme od NN veća: 31.8.2007.
DP

Datum odbrane:

4.1.2008.

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik:

Profesor Miodrag Krmar

član:

Profesor Radomir Kobilarov

član:

Docent Nataša Todorović

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

DT

Monograph publication

TR

Textual printed material

CC

Final paper

AU

Marijeta Đaković

MN

Docent Nataša Todorović

TI

Basic rules for protection against ionization radiation

LT

Serbian (Latin)

LA

English

CP

Serbia

LP

Vojvodina

PY

2008

PU

Author's reprint

PP

Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
5/182/32/0/71/0/3

PD

Scientific field:

SF

Scientific discipline:

SD

Subject/ Key words:

SKW

UC

Holding data:

Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

HD

none

N

Abstract:

AB

Accepted by the Scientific Board: 31.8.2007.
ASB

Defended on:

4. 1. 2008.

DE

Thesis defend board:

DB

President:

Profesor Miodrag Krmar

Member:

Profesor Radomir Kobilarov

Member:

Docent Nataša Todorović

