



osce

RADIOAKTIVNOST I JONIZUJUĆA ZRAČENJA DETEKCIJA, DOZIMETRIJA I ZAŠTITA OD JONIZUJUĆIH ZRAČENJA

Autori:
Marko Nikčević
Tomislav Anđelić



Trening o izvorima jonizujućeg zračenja i uputstva
kako reagovati u slučaju pronalaska izvora zračenja



UPUTSTVO ZA DETEKCIJU I POSTUPANJE SA IZVORIMA ZRAČENJA I ZA PROVJERU FUNKCIONISANJA DOZIMETRIJSKE OPREME

Autori:

Mr. MARKO NIKČEVIĆ
UPRAVA POLICIJE

Nacionalna kontakt osoba za saradnju sa IAEA i UNICRI
u oblasti sprječavanja krijumčarenja CBRN materijala

TOMISLAV ANĐELIĆ
CENTAR ZA EKOTOKSIKOLOŠKA ISPITIVANJA CRNE GORE
Odjeljenje za zaštitu od zračenja i monitoring
Načelnik odjeljenja



osce

Trening o izvorima jonizujućeg zračenja i uputstva
kako reagovati u slučaju pronalaska izvora zračenja



RADIOAKTIVNOST I JONIZUJUĆA ZRAČENJA DETEKCIJA, DOZIMetriJA I ZAŠTITA OD JONIZUJUĆIH ZRAČENJA

Autori:

Mr. MARKO NIKČEVIĆ
UPRAVA POLICIJE

Nacionalna kontakt osoba za saradnju sa IAEA i UNICRI
u oblasti spriječavanja krijumčarenja CBRN materijala

TOMISLAV ANĐELIĆ

CENTAR ZA EKOTOKSIKOLOŠKA ISPITIVANJA CRNE GORE
Odjeljenje za zaštitu od zračenja i monitoring
Načelnik odjeljenja

Podgorica 2011

Zaštita života i zdravlja ljudi kao i životne sredine od štetnog djelovanja jonizujućeg zračenja i upravljanje radioaktivnim materijalima jedna je od važnijih aktivnosti države, potrebna za ispunjenje ekoloških ciljeva, koja zahtijeva dobro osmišljen plan i akcije, kako bi se obezbijedili svi potrebni organizacijski, ljudski i finansijski resursi i infrastruktura za sigurno i bezbjedno upravljanje radioaktivnim materijalima u svim radijacionim praksama. Crna Gora ima mali broj aktivnosti povezanih sa jonizujućim zračenjem i nema nuklearnih postrojenja. Upotreba radioaktivnog materijala je ograničena na primjenu u medicini, industriji, školovanju i naučno-istraživačkim djelatnostima. U skladu sa međunarodnim standardima koje propisuje Međunarodna agencija za atomsku energiju, kao i standardima u zemljama članicama Evropske unije, postoje specifična pravila i uslovi koje treba poštovati i slijediti za korišćenje radioaktivnih materijala. Polazeći od ciljeva Strategije o zaštiti od jonizujućeg zračenja, radijacionoj sigurnosti i upravljanju radioaktivnim otpadom, potom odredbi Zakona o zaštiti od jonizujućeg zračenja i radijacionoj sigurnosti jedan od prioriteta u ovoj oblasti predstavlja sprječavanje nedozvoljenog prometa nuklearnog i ostalog radioaktivnog materijala preko graničnih prelaza naše države, kao i pravovremeno otkrivanje zloupotrebe nuklearnog i radioaktivnog materijala.

Projekat „*Jačanje sistema zaštite životne sredine na nivou državnih institucija Crne Gore*“ ima za cilj da kroz organizovanje trening kurseva u sjevernom centralnom i južnom regionu Crne Gore za službenike granične policije, carinske službenike, inspektore Agencije za zaštitu životne sredine zaposlene na poslovima zaštite od jonizujućih zračenja i radijacione sigurnosti, kao i službenike sektora za vanredne situacije i civilnu bezbjednost Ministarstva unutrašnjih poslova i Instituta za crnu metalurgiju unaprijedi stanje životne sredine u ovoj oblasti, doprinoseći na taj način zaštiti stanovništva, a prije svega zaposlenih lica na tzv „prvoj liniji“ koji prvi dolaze u susret sa radioaktivnim izvorom ili nuklearnim materijalom, ili su u prilici da otkriju nedozvoljeni promet istih.

U okviru aktivnosti ovog projekta izrađena je brošura posvećena prevenciji nedozvoljenog transporta nuklearnog i radioaktivnog materijala, kao i uputstvo za detekciju i postupanje sa izvorom zračenja i za provjeru funkcionisanja dozimetrijske opreme koji će doprinijeti kvalitetnijem radu nadležnih institucija i boljem informisanju javnosti kada je ova oblast u pitanju.

Zahvaljujemo se Misiji OSCE-a u Crnoj Gori koja je podržala projekat „*Jačanje sistema zaštite životne sredine na nivou državnih institucija Crne Gore*“ u sklopu aktivnosti posvećenih unaprjeđenju primjene Strategije zaštite od jonizujućeg zračenja, radijacionoj sigurnosti i upravljanju radioaktivnim otpadom i potvrđujemo posvećenost jačanju nacionalnog bezbjednosnog sistema, mehanizama i saradnje na međunarodnom nivou u oblasti sprječavanja nedozvoljene trgovine nuklearnim i radioaktivnim materijalima.

Ivana Vojinović

Pomoćnik ministra za životnu sredinu
Ministarstvo održivog razvoja i turizma

RADIOAKTIVNOST I JONIZUJUĆA ZRAČENJA DETEKCIJA, DOZIMETRIJA I ZAŠTITA OD JONIZUJUĆIH ZRAČENJA

OSNOVNI POJMOVI

Jonizujuća zračenja su elektromagnetska ili čestična zračenja koja imaju dovoljno visoku energiju da mogu da jonizuju materiju i da izazovu oštećenja ćelija živih organizama.

Jonizacija je proces u kome, usljed energetske pobude, jedan ili više elektrona napuštaju elektronski omotač atoma. Tako nastaju jonski parovi koji se sastoje iz negativno naelektrisanog elektrona i pozitivno naelektrisanog ostatka atoma.

Ekscitacija je proces u kome elektorni, usljed energetske pobude, prelaze sa putanja bližih jezgri na putanje dalje od jezgra. Atom se tada nalazi u ekscitovanom ili pobuđenom stanju.

Izvori jonizujućih zračenja su radioaktivni materijali, gdje jonizujuće zračenje nastaje u procesu radioaktivnog raspada atoma, ili uređaji koji mogu da emituju jonizujuće zračenje.

Zatvoreni izvori jonizujućeg zračenja su oni izvori kod kojih je radioaktivni materijal hermetički zatvoren u odgovarajuće, najčešće metalne, omotače koji sprečavaju da pri normalnim uslovima primjene dođe do rasturanja njihove sadržine u okolinu.

Otvoreni izvori jonizujućeg zračenja su oni izvori kod kojih je pri normalnim uslovima primjene moguć direktan kontakt sa radioaktivnim materijalom.

Radioaktivni materijal je onaj materijal koji sadrži radioaktivne atome.

Radioaktivni otpadni materijal je radioaktivni materijal koji se ne planira za dalju upotrebu.

Polje zračenja je prostor oko izvora jonizujućeg zračenja u kojem dolazi do izlaganja zračenju, do ozračivanja.

Izlaganje jonizujućim zračenjima predstavlja radnju ili uslove pri kojima dolazi do ozračivanja čovjekovog organizma jonizujućim zračenjima.

Spoljašnje izlaganje je izlaganje koje nastaje usljed dejstva izvora jonizujućeg zračenja koji se nalazi van organizma čovjeka.

Unutrašnje izlaganje je izlaganje koje nastaje usljed dejstva izvora jonizujućeg zračenja koji se nalazi u organizmu čovjeka.

Kontaminacija radioaktivnim materijalom je svako nepoželjno prisustvo radioaktivnog materijala u vazduhu, na radnim površinama, na predmetima, na odjeći, na koži, (spoljašnja kontaminacija) ili u organizmu (unutrašnja kontaminacija).

Dekontaminacija predstavlja niz postupaka koji se primjenjuju za uklanjanje radioaktivnog materijala sa kontaminiranih mjesta.

Aktivnost (A) radioaktivnog izvora se definiše kao broj raspada nestabilnih atoma u jedinici vremena. Jedinica za aktivnost je bekerel (Bq). Aktivnost od 1 Bq ima izvor u kome se dešava 1 raspad u sekundi. Stara jedinica je kiri (Ci).

Vrijeme poluraspada (T_{1/2}) se definiše kao vrijeme potrebno da se raspadne polovina od ukupnog broja atoma radioaktivnog izvora.

Specifična jonizacija se definiše kao broj jonskih parova koje čestica oslobodi po jedinici dužine pređenog puta. Zavisi od energije čestice i od sredine kroz koju prolazi.

Izotopi su atomi istog hemijskog elementa, imaju isti broj protona, a razlikuju se po broju neutrona u jezgri, a time i po masenom broju. Mogu biti stabilni i nestabilni ili radioaktivni.

RADIOAKTIVNOST I ZRAČENJE - PRIRODNI FENOMENI

Riječi zračenje (radijacija) i radioaktivnost kod čovjeka odmah bude asocijaciju na atomsku bombu, accidente u nuklearnim elektranama i radioaktivni otpad. Problemi i rizici izazivaju strahovanja i potiskuju saznanja o važnosti i koristi od ovih prirodnih fenomena. Mi zračenja ne vidimo niti ih registruju naša druga čula. Zato su otkriveni relativno kasno, tek posljednjih godina XIX vijeka.

Materija koja nas okružuje, naizgled beskrajno raznovrsna i složena, može da se svede na ograničen broj osnovnih sastojaka, na hemijske elemente. Hemijski elementi su supstance koje hemijskim procesima ne mogu da se razlože na još jednostavnije sastojke. Poznato je 113 hemijskih elemenata od kojih se u prirodi srijeće 90.

Najmanji dio hemijskog elementa koji je zadržao svoje osobine je atom. Svi atomi jednog hemijskog elementa imaju istu građu. Sastojte se iz atomskog jezgra i elektronskog omotača.

Radioaktivnost je svojstvo nekih jezgara da se sami od sebe, spontano mijenjaju prelazeći u jezgra drugih atoma. Za njih se kaže da su nestabilna ili radioaktivna za razliku od onih koja nemaju ovo svojstvo, koja su stabilna.

Pojam stabilnosti jezgra odnosi se na jezgro koje se nalazi u osnovnom stanju, odnosno u stanju u kome se normalno uvijek i nalazi. U prirodi ima oko trista vrsta stabilnih jezgara. Nekoliko hiljada ostalih su nestabilna ili radioaktivna i podložna nekoj vrsti spontanog raspada. Radioaktivni atomi se nalaze svuda oko nas, u vazduhu, vodama i zemljištu. Neki su nastali kao proizvodi aktivnosti u našem nuklearnom dobu, ali je većina nastala u burnim procesima u zvijezdama i u međuzvjezdanom prostoru.

Pri raspadu radioaktivnih jezgara, radionuklida, dolazi do emisije zračenja, čestica i elektromagnetnih talasa. Posljedice dejstva ovih zračenja na materiji su promjene u elektronskom omotaču atoma i molekula sredine kroz koju zračenje prolazi. Tada dolazi do procesa pobuđivanja (eksitacije) i jonizacije atoma i molekula. Zato se govori o jonizujućem zračenju.

U jonizujuća zračenja spadaju elektromagnetni talasi, kao što su gama (γ)zraci, koje emituju radioaktivne supstance ili X zraci, poznati i kao rendgenska zračenja. Tu su i alfa(α) i beta (β) čestice koje nastaju raspadom radioaktivnih nuklida, kao i naelektrisane čestice (elektroni, protoni, joni težih elemenata), koje energiju dobijaju ubrzavanjem u akceleratorima. Neutroni, električno neutralne čestice, vrše jonizacije direktno.

Interakcija zračenja i sredine kroz koju zračenje prolazi dovodi do promjena i zračenja i sredine. Energija upadnog zraka se degradira a ozračena sredina se mijenja i fizički i hemijski, a u živoj materiji i biološki. Ovo je osnova praktične primjene jonizujućeg zračenja.

ATOM

Ideja o atomu je ponikla još veoma davno, u V vijeku prije nove ere. Po grčkom filozofu Demokritu sva tijela su sastavljena iz nedjeljivih i nevidljivih čestica koje je on nazvao atomi (atomos na grčkom znači nedjeljiv). Smatrao je da su atomi tako mali da se ne mogu vidjeti. Različiti su po obliku i veličini ali su svi sastavljeni iz iste osnovne materije. U prirodi nema ničega osim atoma i praznog prostora. Raznovrsnost tijela proističe od različitog broja i rasporeda atoma od kojih su nastala.

Demokritova ideja je pala u zaborav sve dok engleski naučnik Dalton nije postavio modernu atomsku hipotezu, koja se kasnije razvila u savremenu teoriju o strukturi materije. Danas je poznato ne samo da atomi postoje, da su najmanji dijelovi jednog hemijskog elementa, već i da postoje različite vrste atoma istog elementa. Takođe se zna da su sami atomi izgrađeni od još manjih čestica koje su identifikovane kao elektroni, protoni i neutroni. Dimenzije atoma su reda veličine 10^{-10} m.

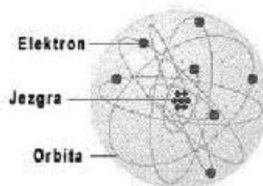
Najvažnija karakteristika jednog atoma je broj protona u jezgru, definiše se kao njegov atomski ili redni broj i obilježava se sa Z . Atomski broj je jednak rednom broju elementa u periodnom sistemu. Za neutralan atom, broj protona u jezgru jednak je broju elektrona u omotaču. Kako elektronska konfiguracija omotača definiše hemijsko ponašanje atoma, to su svi atomi sa istim atomskim brojem, tj. istim brojem protona, bez obzira na broj neutrona u jezgru, atomi istog hemijskog elementa i nazivaju se izotopi.

ELEKTRONSKA STRUKTURA ATOMA

Broj elektrona i njihov raspored u atomu zavise isključivo od broja protona u jezgru. Elektroni su za jezgro vezani privlačnim električnim silama i kreću se oko njega u energetskim orbitalama ili nivoima. Ove sile djeluju samo među naelektrisanim česticama. Među jednako naelektrisanim česticama sila je odbojna, a među različito naelektrisanim privlačna. Elektromagnetna sila drži negativno naelektrisane elektrone u orbitama oko pozitivno naelektrisanog jezgra i daje osnovu za stabilnost atoma kao cjeline.

Energetski nivoi po kojima se kreću elektroni mogu da prime samo određen broj elektrona. Da bi elektron prešao sa niže na višu orbitalu, mora da primi odgovarajući iznos energije.

Ako elektron primi energiju veću od energije kojom je vezan za jezgro atoma,



Slika 1. Prikaz atoma jezgro i elektroni na energetskim nivoima

napustiće atom. Proces u kome se usljed energetske pobude gubi elektron naziva se jonizacija, a nastali pozitivno naelektrisani ostatak atoma naziva se pozitivni jon. Energija jonizacije jednaka je energiji koju elektron treba da dobije da bi savladao privlačne sile jezgra i napustio omotač atoma.

Kada je primljena energija manja i elektron samo prelazi sa putanje bliže jezgru na putanju dalju od jezgra, govori se o procesu eksitacije ili pobuđivanja. Poslije toga atom spontano teži da se vrati u osnovno stanje.

ATOMSKO JEZGRO-SASTAV

U centru atoma nalazi se pozitivno naelektrisano jezgro ili nukleus. Iako su dimenzije tipičnog jezgra manje od jednog desetihiljaditog dijela veličine atoma, jezgro sadrži više od 99,9% njegove mase.

Atomska jezgra su primarni sistemi elementarnih čestica. Sastoje se od pozitivno naelektrisanih protona (p) i nanaelektrisanih neutrona (n). Njih drži na okupu vrlo jaka privlačna sila koja se naziva nuklearna ili jaka sila. To je najjača sila u prirodi, više od sto puta jača od elektromagnetne.

Protoni su teške čestice. Proton se smatra stabilnom česticom i njegovo naelektrisanje je jednako naelektrisanju elektrona po količini ali je različite vrste i naziva se pozitivnim naelektrisanjem.

Neutroni su sastavni dio jezgra svih atoma osim atoma običnog, lakog vodonika. Naelektrisanje neutrona je jednako nuli. Masa neutrona u miru bliska je masi protona. U savremenoj fizici protoni i neutroni se smatraju složenim česticama.

Masa atoma je koncentrisana u jezgru. Gustina jezgra je izuzetno velika, oko 10^{15} puta je veća od gustine materije. Prečnici jezgra su reda 10^{-15} m. Ostale karakteristike jezgra su:

- maseni broj (A), ukupan broj nukleona u jezgru
- atomski ili redni broj (Z), broj protopna u jezgru, određuje mjesto atoma u periodnom sistemu elemenata, i
- broj neutrona u jezgru (N), $N=A-Z$

Riječ nuklid označava jezgro bez obzira da li je ono stabilno ili ne. Pojam nuklid odnosi se na specifično jezgro koje ima određen broj protona Z, određeni broj neutrona N i u definisanom je nuklearnom stanju. Na osnovu nuklearne stabilnosti nuklidi se dijele na stabilne i nestabilne ili radioaktivne nuklide. Stabilni nuklidi su oni koji se spontano ne mijenjaju, broj protona i neutrona u njima je stalan. Radioaktivni nuklidi su oni koji se spontano mijenjaju.

RADIOAKTIVNI RASPAD

Sam proces prelaza radioaktivnog jezgra u neko drugo jezgro naziva se radioaktivni raspad. Za jedno jezgro on je trenutatan, ali se ne može unaprijed tačno reći kada će se dogoditi. Ako imamo mnoštvo istih radioaktivnih jezgara, jedan radioaktivni izvor, za njega je karakterističan određeni tempo kojim se jezgra raspadaju. Kao mjera brzine radioaktivnog raspada koristi se vrijeme poluraspada ili poluživot ($T_{1/2}$). Definiše se kao vrijeme potrebno da se raspadne polovina od ukupnog broja prisutnih atoma radioaktivnog elementa i predstavlja karakteristiku svakog radioaktivnog izotopa.

Aktivnost (A) nekog radioaktivnog izvora definiše se kao broj raspada u jedinici vremena (sekundi). Jedinica aktivnosti je Bekerel (Bq). Nazvana je po francuskom naučniku Anri Bekerelu koji je 1896. godine otkrio radioaktivnost. Jedan bekerel predstavlja jedan raspad u sekundi. Nekada se kao mjera za aktivnost koristila aktivnost jednog grama radijuma, i ta jedinica nazvana kiri (Ci) po Pjetru i Mariji Kiri još se uvijek koristi u svakodnevnom životu posebno za izražavnje velikih aktivnosti ($1\text{Ci} = 37\text{GBq}$).

Posljedica radioaktivnog raspada je promjena strukture jezgra. Mijenja se broj protona u jezgru što znači da se mijenja i hemijski element. Radioaktivni raspad praćen je emisijom zračenja i gubitkom mase. Zbir masa proizvoda nuklearnog raspada uvijek je manji od mase atoma pretka. Zato je to uvijek spontan i nepovratan proces. Izgubljeni dio mase javlja se u obliku kinetičke energije emitovanog zračenja, kao i uzmarka atoma potomka.

Pojava nestabilnosti jezgra naziva se radioaktivnošću a transformacije koje trpe radioaktivni izotopi zovu se radioaktivnim raspadima. Osnovni tipovi radioaktivnih raspada:

- α raspad
- β raspad
- spontana fisija

Pri svakom od ovih raspada dolazi do transmutacije elemenata i svi su praćeni emisijom odgovarajućih čestica, takozvanog radioaktivnog zračenja. Tu je i γ – raspad, koji je praćen emisijom fotona i ne predstavlja raspad u smislu prethodna tri, jer u njemu jezgro ne trpi nikakvu promjenu osim energetske.

α raspad

Alfa čestica je u stvari jezgro helijuma (^4He) i sastavljena je od 2 protona i 2 neutrona u čvrsto vezani sistem sa ukupnom energijom veze od oko 28 MeV-a.

Karakterističan je za teška jezgra $Z \approx 84$. Maseni broj se smanjuje za 4 a redni za 2. Najveći dio energije raspada odnosi α čestica, manji dio jezgro koje uzmiče, te je energija α zračenja praktično jednaka energiji raspada. α zračenje ima precizno definisanu energiju, odnosno linijski spektar. Energije alfa zračenja leže u opsegu od 4 do 10 MeV.

β raspadi

Postoje 3 tipa beta raspada:

- beta - minus (β^-) raspad
- beta - plus (β^+) ili pozitronski raspad
- elektronski zahvat

U beta - minus raspadu jedan neutron preživljava raspad ekvivalentan raspadu slobodnog neutrona. Pri tom se neutron transformiše u proton koji ostaje vezan u jezgru a jezgro napušta elektron - β^- zrak i antineutrino. Redni broj izotopa raste za 1. Energiju raspada među sobom dijele elektron i antineutrino. Ove dvije čestice ne dijele uvijek ovu energiju na isti način i zato energija elektrona varira od nule do neke maksimalne energije koja je karakteristična za dati spektar - raspad. Spektar zračenja beta raspada je kontinualan.

Kod beta plus (β^+) ili pozitronskog raspada jedan od protona raspada se na neutron koji ostaje vezan u jezgru, pozitron koji napušta jezgro i neutrino. Prolezeći kroz materiju pozitroni susreću slobodne elektrone i nestaju u procesima anihilacije.

U elektronskom zahvatu jedan od atomskih elektrona, najčešće iz K ljuske, biva zahvaćen od strane jednog protona iz jezgra. Proton se transformiše u neutron a iz jezgra se emituje samo neutrino tačno definisane energije. Upraznjeno mjesto elektrona u K - ljusci popunjava neki od elektrona sa viših stanja (ljusaka) i foton X_K zračenja koji se emituje iz atoma je jedino zračenje koje prati ovaj raspad. Redni broj izotopa se smanjuje za jedan.

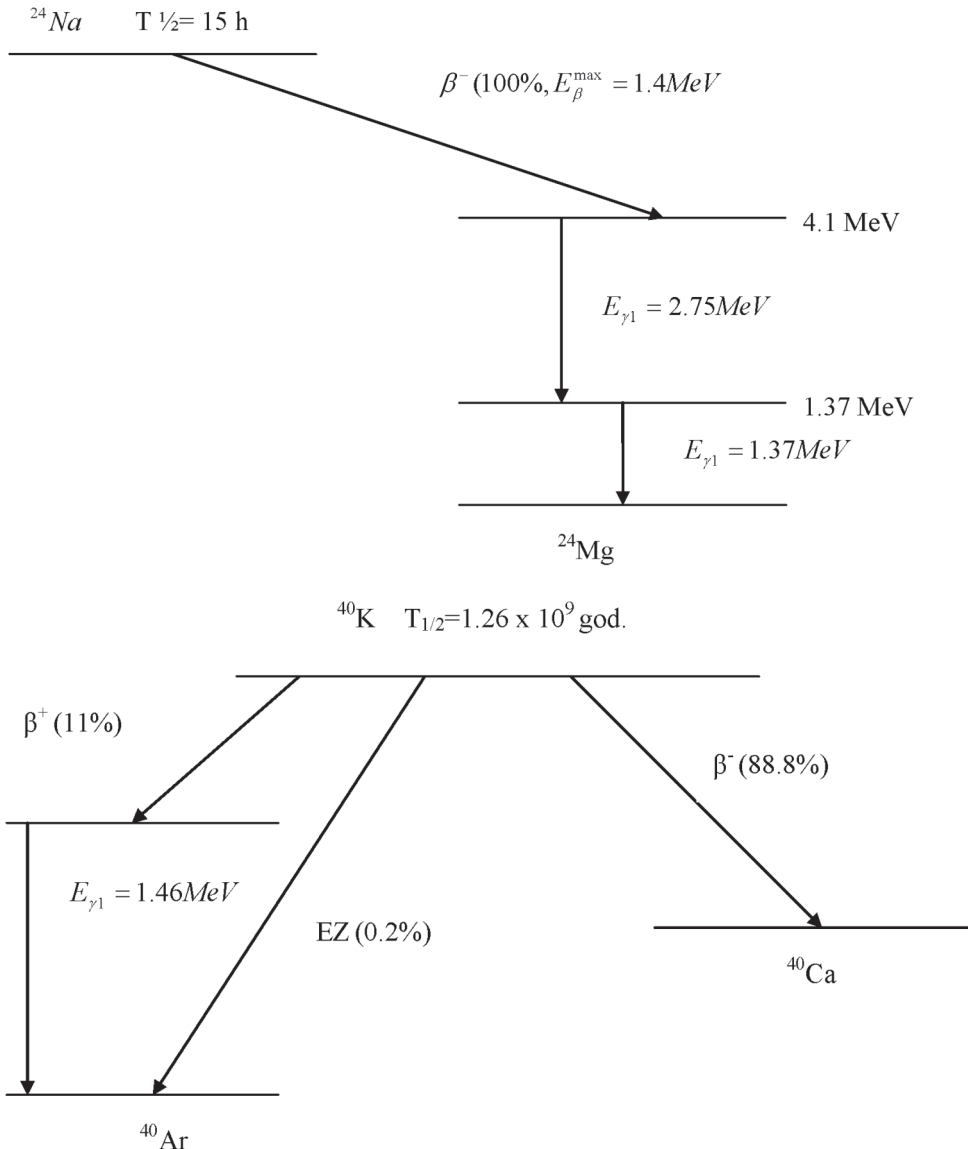
γ - raspad,

Poslije α ili β raspada, ostatak jezgra (jezgro potomak) može da ostane ne u osnovnom nego u nekom od svojih pobuđenih stanja. Jezgro potomak se iz ovog stanja praktično trenutno deekscitira emisijom γ fotona odgovarajućih energija, spuštajući se konačno u svoje osnovno stanje.

Ako α ili β raspad vodi na nako od pobuđenih stanja, tada će energija raspada biti manja no u slučaju kada raspad vodi na osnovno stanje i to za veličinu razlike energije datog pobuđenog i osnovnog stanja. Moguće je postojanje

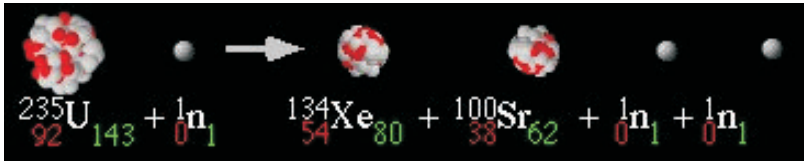
većeg broja kanala α i β raspada, pri čemu se svaki kanal ostvaruje sa datom vjerovatnoćom, izraženom odnosima grananja. Svaki kanal ostavlja jezgro potomak u nekom od pobuđenih stanja, odakle se ono dekscitira emisijom γ zračenja odgovarajućih energija. Velika većina α ili β raspada praćena je emisijom γ zračenja.

Primjeri raspada:



Fisija

Fisija je nuklearni proces u kome se teško jezgro razdvaja na dva manja jezgra. Primjer fisije, koji je iskorišten u izradi atomske bombe i koji se još uvijek koristi u nuklearnim reaktorima je:



Produkt koji nastaje ovom reakcijom je samo jedan od mogućih oblika. Fisijom može nastati bilo koja kombinacija lakših jezgara, sve dok zbir protona i neutrona u novonastalim jezgrima ne prelazi broj u početnom jezgru. Kao kod fuzije, velika količina energije se može osloboditi u procesu fisije zato što sabirak masa lakših jezgara (produkata) iznosi manje od mase jezgra koje je nastalo u procesu fisije. Fisija nastaje zbog toga što se u teškim jezgrima nalazi elektrostatičko odbijanje između velikog broja pozitivno naelektrisanih protona. Dva manja jezgra imaju manje unutrašnje odbijanje od jednog većeg jezgra. Tako da, jednom kada veće jezgro bude u stanju da savlada jaku nuklearnu silu, koja ga drži u jednom komadu, može da stupi u proces fisije. Fisija se može razumjeti i kao borba između jake privlačne nuklearne sile i odbojne elektrostatičke sile. U reakciji fisije, pobjeđuje elektrostatičko odbijanje.

Fisija je proces koji se u svemiru odvijao milijardama godina. Kao što je već pomenuto, ljudi nisu fisiju koristili samo za proizvodnju atomskih bombi, već i za proizvodnju energije u nuklearnim postrojenjima.

Interesantna je činjenica da, iako je čovjek proizveo prvi nuklearni reaktor prije samo 50 godina, proces fisije se odvijao u unutrašnjosti Zemlje u naslagama uranijuma u Zapadnoj Africi, prije dvije milijarde godina.

INTERAKCIJA ZRAČENJASAMATERIJOM

Dok prolaze kroz materiju jonizujuće zračenje stupa u kontakt sa atomima i molekulima sredine predajući im energiju. Posljedica ovih interakcija su promjene i zračenja i materija. Energija zračenja se smanjuje a ozračena sredina se mijenja fizički, hemijski, a kada je u pitanju živa materija i biološki. Interakcija zračenja sa materijom različita je za različita zračenja, a u okviru iste vrste zračenja zavisi od energije, kao i od prirode sredine kroz koju prolazi.

Pri prolasku naelektrisanog čestičnog (korpuskularnog) zračenja kroz neku sredinu dolazi do pojave niza efekata. Sudarajući se sa elektronima atoma i molekula supstance kroz koju prolaze zračenja postepeno gube svoju energiju i

njihovo jonizujuće dejstvo prestaje. Tada α čestica zahvata dva elektrona i prelazi u atom helijuma. Negativno naelektrisana β čestica (elektron) najčešće ostaje u slobodnom stanju. Pozitivno naelektrisana β čestica (pozitron) reaguje sa slobodnim elektronom pri čemu nastaju dva fotona (γ zraka) – anihilaciono zračenje.

Prolazeći kroz materiju α čestica gubi svoju energiju na jonizacije i ekscitacije atoma sredine. Brzina gubitka kinetičke energije zavisi od gustine prirode supstance kroz koju prolaze. Zbog svoje velike mase ona ne skreće sa puta koji je stoga pravolinijski. Ima veliku jonizacionu sposobnost, veliku specifičnu jonizaciju. Specifična jonizacija se definiše kao broj jonskih parova koje čestica oslobodi po jedinici dužine pređenog puta. Jonizuje nekoliko stotina hiljada atoma na svom putu. Zato je njen domet mali. Dometi α čestica tipičnih energija iznose nekoliko santimetara u vazduhu, a dijelove milimetara u čvrstim materijalima. Što je veća energija čestica veći je i njihov domet. Izvori α zračenja nijesu opasni kao spoljašnji izvor zračenja zbog malih dometa, ali su opasni kao kontaminirani odnosno kada dospiju na kožu ili unutar organizma.

Prolaz β čestica (elektrona) dosta je složen pošto one imaju malu masu i relativno veliku brzinu. Za razliku od α čestica koji gube energiju uglavnom u jonizacionim procesima, β čestice pri prolasku kroz supstancu gube energiju na više načina. Pored jonizacije i ekscitacije atoma energiju mogu da gube i emisijom zakročnog zračenja. Svaku promjenu brzine bilo koje naelektrisane čestice prati emisija ovog zračenja. Ovaj proces je izrazit naročito pri naglom zaustavljanju vrlo brzih elektrona na teškim jezgrima. Zato se zaštita od β zračenja vrši lakšim materijalima. Pošto su β čestice znatno manje mase od mase α čestica, njihova putanja je izlomljena linija pa im je domet teško precizno definisati.

Prolazak γ zračenja kroz materiju bitno se razlikuje od prolaska naelektrisanih čestica. Gama zračenje gubi energiju uglavnom kroz tri osnovna procesa: foto električni efekat, Komptonov efekat i efekat stvaranja parova.

Pri fotoefektu dolazi do interakcije fotona i elektrona u omotaču atoma. Tada foton potpuno nestaje predajući elektronu cjelokupnu energiju. Elektron koji se naziva fotoelektron napušta atom.

Komptonov efekat dolazi do izražaja kod slabo vezanih elektrona, kod elektrona koji se nalaze na periferiji elektronskog omotača. U tom sudaru foton predaje dio svoje energije elektronu koji napušta atom (Komptonov elektron). Foton se ne apsorbuje, već predaje dio svoje energije i skreće sa prvobitnog pravca kretanja. Skretanje je utoliko veće ukoliko je veći dio predate energije. Komptonov efekat dolazi do izražaja kod gama zračenja srednjih energija.

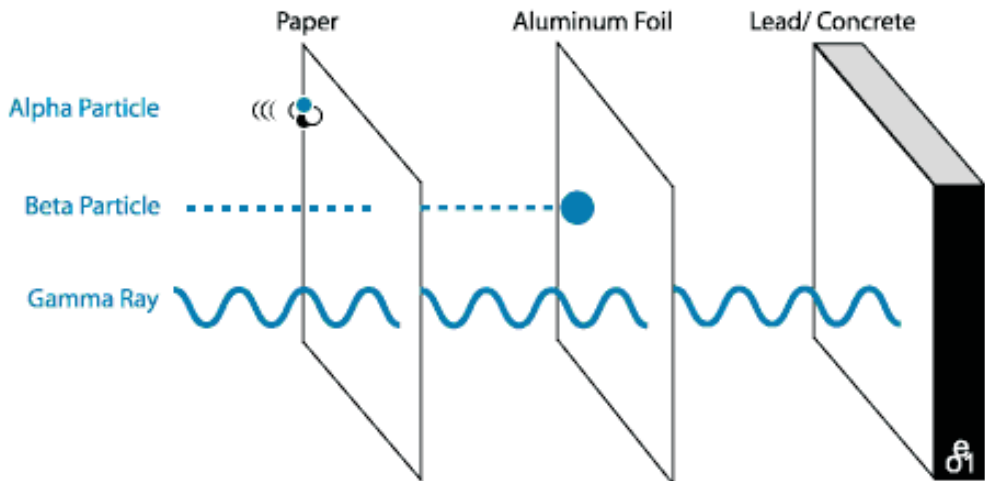
Prolazeći pored jezgra i interagujući sa njegovim električnim poljem,

foton može potpuno da nestane, pri čemu se stvara par čestica elektron-pozitron. Pri tom je potrebno da se utroši najmanje energija od 1,02 MeV. Ova energija odgovara masi mirovanja elektrona i pozitrona. Fotoni manje energije ne mogu da učestvuju u ovom procesu.

Fotoelektroni i Komptonovi elektroni, kao i elektron iz stvorenog para imaju dovoljno veliku energiju da jonizuju sredinu kroz koju prolaze tako da γ zračenje vrši jonizaciju indirektno za razliku od α i β zračenja, koji su direktna jonizujuća zračenja. Fotoni koji pretrpe ma koji od tri pomenuta efekta bivaju izbačeni iz snopa γ zračenja. Do detektora postavljenog u pravcu upadnog snopa stići će samo oni fotoni koji nisu interagovali sa materijom. Znači smanjuje se broj fotona u kolimisanom snopu (snopu u kome se svi fotoni kreću paralelno) a ne smanjuje se njihova energija.

Domet jedne vrste zračenja u nekom materijalu zavisi od energije. Veoma je važno poznavanje dometa raznih vrsta i energija zračenja zbog njihove primjene, kao i zbog korišćenja adekvatnih mjera zaštite od zračenja.

Naelektrisane čestice reafuju efikasno sa atomima i molekulima duž svoga puta. Zato gube energiju već na malim rastojanjima. Vidjeli smo da ta rastojanja za α čestice iznose nekoliko centimetara u vazduhu i nekoliko desetina mikrometara u tkivu. Beta čestice se kreću brže, doživljavaju manji broj interakcija sa sredinom i predaju manje energije po jedinici dužine puta od α čestica. Njihovi dometi su veći, nekoliko metara u vazduhu i nekoliko centimetara u tkivu. Gama zraci se kreću brzinom svjetlosti. Oni predaju relativno malo energije po jedinici dužine puta i mogu da pređu velika rastojanja čak i u sredinama velike gustine. Prolaze kroz tijelo čovjeka, apsorbuje ih sloj betona ili olova.



Prodornost jonizujućih zračenja

Detekcija zračenja

Jonizujuće zračenje se ne može neposredno opažati. Da bi se otkrilo prisustvo ovog zračenja, kao i njegove karakteristike, neophodno je koristiti posebne uređaje – detektore jonizujućeg zračenja. Prilikom prolaska zračenja kroz detekcionu sredinu dolazi do raznih procesa na čijim se efektima zasniva rad detektora. Većina uređaja koristi fizičko dejstvo zračenja, kao što su jonizacija ili ekscitacija atoma detekcione sredine.

U procesu detekcije zračenja mogu se izdvojiti tri etape. Da bi bilo detektovano zračenje mora da dospije u efikasnu (osjetljivu) zapreminu detektora. Posle prolaska zračenja dolazi do promjena u ovoj sredini koja može biti u gasnom, tečnom ili čvrstom agregatnom stanju. Otuda i jedna od podjela detektora na gasne, tečne ili čvrste. Treća etapa i krajnji rezultat detekcije je stvaranje indikacije o zračenju.

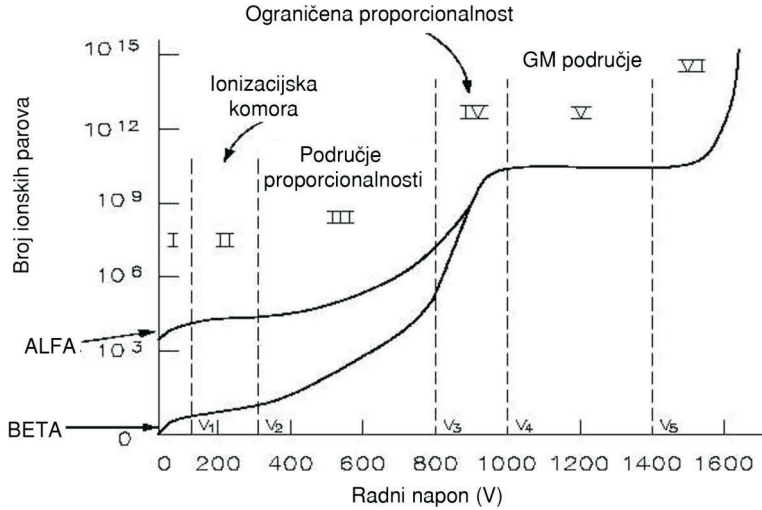
Zbog navedenog karaktera interakcije neutrona sa materijom i činjenice da oni nijesu direktno jonizujuće zračenje, detekcija neutrona zahtijeva da kroz svoju interakciju sa materijom oni prvo izazovu neki proces u kome proizvedu naelektrisane čestice, koje se zatim detektuju u običnim jonizacionim detektorima. U tu svrhu mogu da posluže i procesi elastičnog rasijanja, kada se ustvari detektuju uzmična jezgra, ali i razni neelastični procesi u kojima se proizvode ili gama zračenje, ili protoni, ili alfa čestice, ili nešto četvrto. Dok su još brzi, neutroni se najbolje detektuju pomoću procesa elastičnog rasijanja, a kada se uspore onda se za to koriste pojedinačni konkretni neelastični procesi.

Tipovi detektora

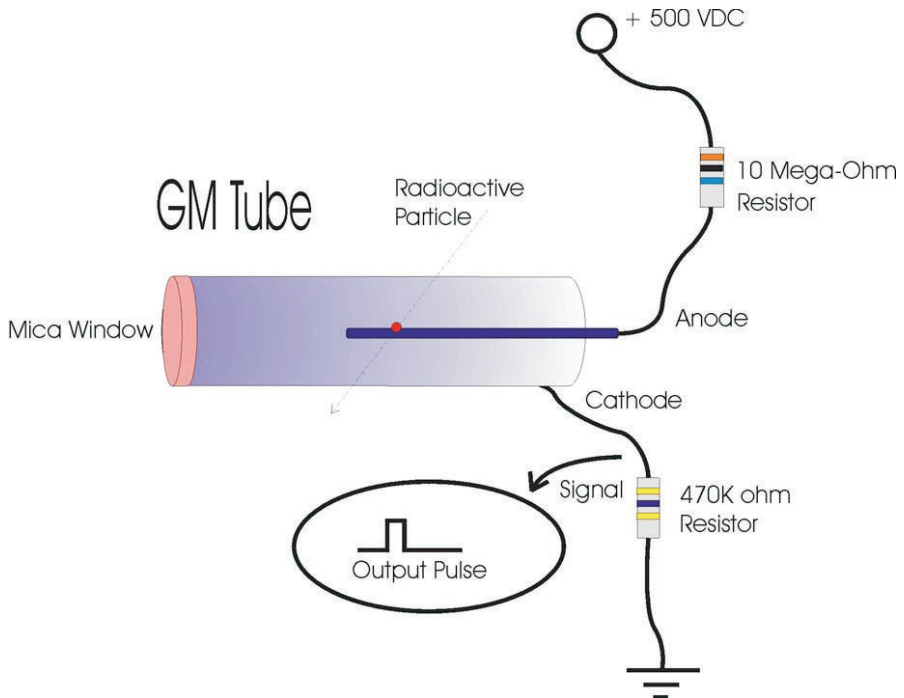
Detektori mogu biti električni i neelektrični, u zavisnosti od toga koji konačni efekti služe kao indikacija prolaska zračenja. Neelektričnim detektorima se informacije o zračenju dobijaju preko hemijskih, toplotnih ili svjetlosnih promjena izazvanih zračenjem. Za razliku od njih, električnim detektorima informacije o zračenju dobijaju se kao kontinualna struja ili kao niz električnih impulsa.

Detektori koji daju pojedinačne informacije o prolasku jonizujućeg zračenja kroz efikasnu zapreminu nazivaju se brojači. Brojači direktno broje čestice zračenja koje su interagovale sa detekcionom sredinom bez obzira na njihovu energiju. Najčešće su u upotrebi gasni detektori koji imaju tri područja rada, koja zavise od jačine električnog polja u njima. Na slici je prikazana karakteristična zavisnost jačine električnih impulsa prilikom detekcije zračenja, od jačine polja. Prvi plato je područje rada jonizacione komore, a drugi GM brojača. Između spomenutih platoa je proporcionalno područje u kojem je broj impulsa znatno pojačan, ali uz zadržavanje proporcionalnosti sa

brojem primarno stvorenih jonskih parova. Treba uočiti da u GM području nema razlike između signala od alfa čestice i elektrona.



Kao najpoznatiji detektor u upotrebi, gotovo sinonim i najpoznatiji uređaj za osnovnu detekciju zračenja su GM brojači (Gajger-Milerov brojači).



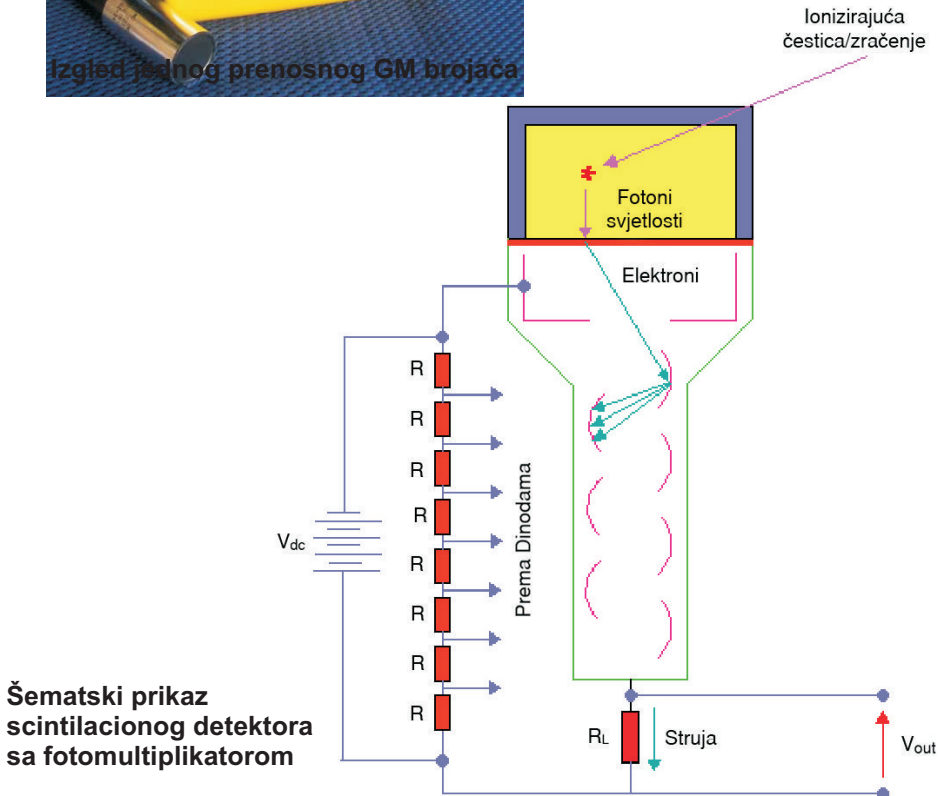
Principijelna šema GM detektora (brojača) i načina spajanja.

GM brojač je cilindričan sud ispunjen gasom (najčešće nekim od plemenitih gasova: helijumom, argonom ili neonom). Zidovi cilindra predstavljaju negativnu elektrodu (katodu) a anoda je tanka žica koja prolazi kroz sredinu cilindra. GM brojači su veoma osjetljivi i mnogo se koriste zato što mogu da detektuju bilo koje zračenje koje izvrše jonizaciju u detektoru. Proizvode se u velikom broju različitih oblika i veličina. Izlazni signal im je toliko jak da nije neophodno njegovo pojačanje. Cijena im je povoljna zato što su, kao i elektronska instrumentacija koja ih prati, jednostavne konstrukcije. GM brojači ne mogu da odrede energiju detektovanog zračenja.



Izgled jednog prenosnog GM brojača

Detektori koji pored toga što broje čestice mogu i da odrede njihovu energiju nazivaju se spektrometri. Ovdje spadaju scintilacioni, poluprovodnički silicijumski i germanijumski detektori.



Šematski prikaz scintilacionog detektora sa fotomultiplikatorom

Uređaji za mjerenje doza i jačine doza nazivaju se dozimetri. Služe za kontrolu individualnog ozračivanja (lični dozimetri) i za mjerenje doza u poljima zračenja. Monitori zračenja otkrivaju i mjere opšti nivo zračenja i nivo kontaminacije radnih površina, vazduha i drugih sredina. Za ovu svrhu koriste proporcionalni, Gajger-Milerovi, scintilacioni a sada sve više i poluprovodnički detektori.

Osnovne osobine detektora

Osnovna karakteristika svakog detektora je njegova efikasnost. Detekciona efikasnost pokazuje koji se dio od svih zračenja koja stižu do efikasne zapremine detektora detektuje. Zависи od vrste zračenja i njihove energije.

Mrtvo vrijeme je vremenski interval tokom koga je brojač nesposoban da registruje sljedeću česticu.

Vrijeme razlaganja je najveći vremenski interval u kojem se mogu dva uzastopna zračenja detektovati odvojeno.

Ne postoji univerzalni detektor koji bi mogao da detektuje sve vrste zračenja. Zato postoje detektori koji su optimalni za pojedine vrste zračenja i za odgovarajuće opsege energija.

Alfa zračenje ima jako male domete u čvrstim materijalima i zbog toga ne može da proдре u efikasnu zapreminu mnogih detektora. Zato je veliki broj detektora potpuno neosjetljiv na alfa zračenje. Detektori za alfa zračenje moraju imati specijalno tanke „prozore“ kroz koje alfa čestice mogu da stignu do detekcione sredine. Kada alfa čestica stigne do detektora efikasnost njene detekcije je praktično 100%. Za mjerenje alfa zračenja koriste se instrumenti sa cinksulfidnim scintilacionim detektorom i vrlo tankim prozorom ili sa protočnim proporcionalnim brojačem.

Detektori beta zračenja prave se od lakih materijala i njihove radne zapremine su veće nego za alfa zračenje.

Za detekciju X zračenja koriste se detektori sa tankim prozorima i sa relativno malim detekcionim zapreminama. Obično se materijali niskog radnog broja pogodni za detektorsku sredinu.

Gama zračenje zbog svoje velike prodornosti zahtijeva detektorsku sredinu od što težeg materijala i što veće radne zapremine.

DOZIMETRIJA JONIZUJUĆEG ZRAČENJA

Dozimetrija zračenja je naučna oblast bez koje nema istraživanja ni primjene zračenja. Osobe koje rade sa izvorima jonizujućeg zračenja nužno se kreću u polju zračenja, pa je neophodno da se mjerenjima ili proračunima odrede karakteristike polja i na osnovu toga utvrde neophodne mjere zaštite.

Danas se raspolaze brojnim metodama za izracunavanje doza i tehnikama za njihovo mjerenje. Prve medunarodne prihvacene preporuke za mjere zaštite od zračenja i radijacione jedinice pojavile su se 1928. godine. Standardi u dozimetriji su podložni periodičnim revizijama, modifikacijama i dopunama u skladu sa novim saznanjima. Ovdje su date definicije radijacionih veličina na osnovu preporuka Međunarodne komisije za zaštitu od zračenja (ICRP 60, 1991) i Osnovnih sigurnosnih standarda za zaštitu od jonizujućeg zračenja i za sigurnost radioaktivnih izvora (Basic Safety Standards, IAEA 1996).

Definicije osnovnih dozimetrijskih veličina i jedinica

Vrste i količine nastalih hemijskih i bioloških promjena zavise od količine energije koju je primila označena sredina. U Međunarodnom sistemu jedinica, SI, energija se izražava u džulima (J) i masa u kilogramima (kg). Fundamentalna dozimetrijska veličina u radiološkoj zaštiti je apsorbovana doza.

Međutim, pored iznosa apsorbovane doze na biološke efekte zračenja utiču i drugi faktori, od kojih su najznačajnija vrsta i energija zračenja, kao i osjetljivost tkiva i organa. Zato se pored apsorbovane doze koriste i ekvivalentna i efektivna doza.

Apsorbovana doza (D) je srednja energija (dE) koju je jonizujuće zračenje jonizacijama i ekscitacijama predalo jedinici mase (dm) neke materije. Jačina apsorbovane doze (D) definiše se kao apsorbovana doza u jedinici vremena.

Ekvivalentna doza (H) je veličina koja uzima u obzir da efekti jonizujućeg zračenja na neko tkivo ili organ ne zavise samo od energije koja je apsorbovana po jedinici mase već i od vrste zračenja.

Definiše se kao proizvod srednje apsorbovane doze $D_{t,r}$ u tkivu ili organu T koju preda zračenje vrste R i odgovarajućeg radijaciono težinskog faktora W_R :

$$H_{T,R} = D_{T,R} \cdot W_R$$

Radijaciono težinski faktor, W_R , je bezdimenzioni faktor kojim se izražava razlika u biološkim efektima različitih vrsta i energija jonizujućih zračenja.

Jedinica za ekvivalentnu dozu je džul po kilogramu (J/kg), sa posebnim nazivom sivert (Sv).

Jačina ekvivalentne doze (H) definiše se kao ekvivalentna doza u jedinici vremena. Jedinica za jačinu ekvivalentne doze je džul po kilogramu u sekundi (J/kg), odnosno sivert po sekundi (Sv/s).

Efektivna doza (E) je veličina koja je uvedena da bi se uzelo u obzir da efekti zračenja zavise i od vrste ozračenog tkiva ili organa. Definiše se kao zbir

ekvivalentnih doza H_T u svim tkivima i organima tela pomnoženim sa odgovarajućim tkivnim težinskim faktorima W_T

$$E = \sum H_T W_T$$

Tkivni težinski faktor, W_T , je bezdimenzioni faktor koji se koristi u zaštiti od jonizujućeg zračenja da bi se uzela u obzir različita osjetljivost pojedinih organa tkiva na indukciju stohastičkih efekata. Jedinica za efektivnu dozu je ista kao i za ekvivalentnu dozu – siver (Sv).

LIČNA DOZIMetriJA

Primjena izvora jonizujućeg zračenja je dozvoljena samo ako se preduzmu sve mjere za zaštitu i za smanjenje nivoa izlaganja ljudi koji sa njima rade. Jedan od načina da se to postigne je vršenje redovne lične dozimetrijske kontrole radnika koji se profesionalno izlažu dejstvu jonizujućeg zračenja. Osnovni zadatak lične dozimetrije je da se prati stepen ozračenosti pojedinca u toku obavljanja njegovih redovnih djelatnosti vezanih za rad sa izvorima zračenja.

Lična dozimetrijska mjerenja se najčešće odnose na mjerenja spoljašnjeg izlaganja i vrše se da bi se kontrolisao stepen izlaganja, odnosno primljena efektivna doza.

Kontrola dozimetara se vrši mjesečno ili tromjesečno u zavisnosti od uslova rada i nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima. Profesionalno izloženim licima koji mogu da prime efektivne doze veće od 6 m Sv godišnje i koja spadaju u kategoriju A, očitavanje ličnih termoluminescentnih dozimetara vrši se svakih mjesec dana. Za lica koja ne mogu da prekorače ovu dozu i koja spadaju u kategoriju B, period očitavanja termoluminescentnih dozimetara ne može biti duži od tri mjeseca. Za svakog radnika vodi se lični dozimetrijski karton u koji se unose vrijednosti primljenih doza.

Za trenutna očitavanja doza koriste se penkalo dozimetri ili noviji tipovi dozimetara sa direktnim očitavanjem primljene doze. Usvojeno je da se lični dozimetri nose sa lijeve strane na grudima, osim u posebnim slučajevima (na primjer dozimetri se mogu nositi na prstima ako su ruke najviše izložene zračenju).

Najpoznatiji lični dozimetri su termoluminescentni (TLD) i film dozimetar. Razvijen je i čitav niz dozimetara za mjerenje individualnih ozračivanja tokom kraćih vremenskih intervala ili specifičnih poslova u prisustvu zračenja. Zasnivaju se obično na principu elektroskopa, penkalo dozimetar ili kondenzatorskih jonizacionih komora. Ovi dozimetri imaju veću mogućnost

indikacije i signaliziranja zračenja u polju u kojem profesionalno izloženo lice boravi.

Film dozimetar

Sastoji se od specijalnog fotografskog filma i kasete sa filtrima koji su smješteni u plastično kućište. Filtri omogućavaju mjerenje doza različitih vrsta zračenja. Ukoliko je film dozimetar izložen dejstvu jonizujućeg zračenja, dolazi do zacrnljenja (zatamnjenja) filma koje je srazmjerno dozi kojoj je bio izložen.

Dobre osobine film dozimetra su:

- jednostavan je za upotrebu,
- koristi se kao trajan dokument,
- ima prihvatljivu cijenu na tržištu.

Nedostatci film dozimetra su:

- nedovoljno širok mjerni opseg / neosjetljiv je na niske doze/,
- osjetljiv je na vlagu i povišenu temperaturu,
- koristi se jednokratno,
- ne vrši se direktno očitavanje.

Zbog svojih karakteristika i velikih nedostataka film dozimetri su skoro potpuno izbačeni iz upotrebe.

Termoluminiscentni dozimetar (TLD)

Rad termoluminescentnih dozimetara bazira se na pojavi da neki kristali, kao što je litijum fluorid recimo (LiF) izloženi jonizujućem zračenju sačuvaju dio apsorbovane energije u svojoj kristalnoj strukturi koja se zatim pri odgovarajućim uslovima zagrijavanja može osloboditi u vidu svjetlosti (termoluminescencija) i detektovati. Intenzitet emisije svjetlosti kod ovih materijala proporcionalan je energiji koju je kristal apsorbovao u toku ozračivanja. Intenzitet emitovane svjetlosti očitava se na TLD čitaču, na visokim temperaturama (oko 300 °C).

Termoluminescentni dozimetri su obično u obliku tabela na bazikalcijumsulfata ili magnezijum borata. Mjere u opsegu od 10^{-6} do 10^2 Gy.

Prednosti termoluminescentnih dozimetra su:

- visoka osjetljivost,
- mogućnost mjerenja u širokom opsegu doza,
- neosjetljivost na spoljašnje faktore,
- prije očitavanja mogu dugo čuvati informaciju o primljenoj dozi i
- poslije očitavanja ponovo se mogu koristiti kao dozimetri.

Nedostaci termoluminescentnih dozimetara su:

- gubljenje informacija o primljenoj dozi poslije očitavanja i
- komplikovan sistem očitavanja.

Lični elektronski dozimetri (TLD)

Namijenjeni za detekciju i dozimetriju zračenja lica koja rade sa izvorima zračenja a takođe i lica koja mogu u radu biti izložena izvorima zračenja. Malih su dimenzija a detektori su praktično svi poznati tipovi. Mjere brzinu doze a takođe i kumulativnu dozu za period izlaganja.

Primjer: Tip detektora:energetski kompenzovana Si didodau p-n spoju u pakovanju neosetljivom na RF vrste zračenja. Detektuje X i γ . Energetskiopseg:20 keV–6 MeV

Mjerni opseg: Hp(10), Hp(0,07): 1 μ Sv/h–1 Sv/h (do 10 Sv/h)



Lični elektronski detektori zračenja

BIOLOŠKO DEJSTVO ZRAČENJA

Biološki efekti zračenja nastaju apsorpcijom energija u živoj materiji. Kao posljedica interakcije dolazi do jonizacije i ekscitacije atoma i molekula u tkivima. Veća energija predata po jedinici mase tkiva u jedinici vremena dovodi do većeg broja jonizacija i ekscitacija a time i do težih oštećenja.

Živi organizam je sastavljen od neorganske komponente, koju čini voda sa mineralima, kao i od organskih molekula (proteina, ugljenih hidrata, lipida, nukleinskih kiselina). Zračenje može da ima direktan i indirektan efekat. U prvom slučaju neki biološki aktivan molekul direktno prima energiju od zračenja i jonizuje se (ili ekscituje). Međutim, kako je voda najobilniji sastojak, to zračenje prvenstveno jonizuje molekule vode. Tom prilikom dozi do radiolize vode, molekuli se razlažu i dolazi do stvaranja vrlo reaktivnih jediniki, slobodnih radikala. Ove jedinice sada reaguju sa organskim molekulima, prenose im energiju i mijenjaju ih. Posljedica toga je smanjenje, pa i gubljenje biološke funkcije ovih molekula.

Dejstvo zračenja na čovjekovo tijelo svodi su u osnovi na oštećenja pojedinačnih ćelija. Isto zračenje ne uzrokuje isto dejstvo na sve ćelije. Zato se razlikuje osjetljivost pojedinih vrsta ćelija na zračenje, kao i individualna osjetljivost pojedinih ćelija. Zbog razlike u osjetljivosti ćelija velika je razlika u posljedicama ozračivanja različitih tkiva, organa i organizama. Manje su osjetljiva tkiva koja se sporo dijele. Mnogo su više osjetljiva tkiva i organi koji se intenzivno obnavljaju.

Klasifikacija bioloških efekata zračenja

Čitav niz faktora utiče na vrstu i veličinu radijacionog oštećenja. Neki zavise i od same ozračene osobe, njenog pola, zdravlja i starosti. Drugi se odnose na uslove ozračivanja i na apsorbovanu dozu zračenja.

Radijacioni efekti	Somatski efekti	Akutni efekti	Nemaligna oštećenja kože Gubitak kose Smanjenje broja bijelih krvnih ćelija Neplodnost	Deterministički efekti
			Katarakta	
		Kasni efekti	Leukemija Rak	Stohastički efekti
	Genetski efekti		Abnormalnosti	

Efekti zračenja na čovjekov organizam dijele se na somatske efekte i na genetske efekte. Radijacioni efekti koji se pojave na ozračenoj osobi nazivaju se somatski, a oni koji se javljaju na potomstvu ozračenog osobe nazivaju se genetski ili nasljedni faktor. O somatskom dejstvu zračenja se dosta zna na osnovu proučavanja zdravstvenog stanja osoba koje su preživjele atomska bombardovanja japanskih gradova, kao i medicinske kontrole osoba koje su zbog svojih profesija izložene zračenju. Za pouzdana izučavanja genetskih posljedica potrebno je pratiti širu populacionu grupu u dužem vremenskom periodu. Tako se sada pažljivo prate posljedice nuklearnog akcidenta u Černobilju.

Štetne posljedice dejstva zračenja na čovjeka ispoljavaju se u različitim vremenskim intervalima poslije ozračivanja, pa se somatski efekti dalje dijele na akutne i hronične.

Organizam može da bude izložen visokim dozama zračenja u kratkom vremenskom periodu i tada se govori o akutnom izlaganju. Efekti zračenja se pojavljuju relativno brzo i zavise od dijela tijela koji je bio izložen, kao i od doze. Rani efekti mogu biti posljedica oštećenja kostne srži, gastrointestinalnog trakta ili centralnog nervnog sistema.

Hronično izlaganje se odnosi na primanje manjih doza u dužim vremenskim intervalima, tokom više nedjelja, mjeseci ili godina. Hronični efekti mogu da se pojave mnogo kasnije, a period dok se efekti ne pojave naziva se latentni period.

Izlaganje može da bude totalno, kada je izloženo cijelo tijelo i parcijalno, kada je izložen samo dio tijela. Ako je u pitanju akutno izlaganje cijelog tijela dozom između 3 i 4 siverta, doći će do smrti u toku od trideset dana kod polovine od ukupnog broja ljudi koji su bili izloženi ovim dozama zračenja.

Kada se izvor zračenja nalazi izvan organizma, onda se govori o spoljašnjem izlaganju, a ako izvor zračenja dospje u unutrašnjost organizma, o unutrašnjem izlaganju. Kada se radi sa zatvorenim izvorima zračenja kod kojih je radioaktivni materijal hermetički zatvoren, treba se štititi od spoljašnjeg izlaganja. Pri radu sa otvorenim izvorima zračenja, gdje je moguće doći u direktan kontakt sa radioaktivnim materijalom, treba se štititi i od njegovog unošenja u organizam (unutrašnje kontaminacije), što bi dovelo i do unutrašnjeg izlaganja.

Važna klasifikacija štetnih radijacionih efekata je i njihova podjela na stohastičke i determinističke efekte.

Stohastički efekti su oni čija vjerovatnoća nastanka, a ne njihova jačina, zavisi od doze zračenja, a za koje ne postoji prag doze, odnosno doza ispod koje se sasvim sigurno neće pojaviti. Smatra se da su genetski efekti stohastičke prirode. Neki somatski efekti su također stohastički. Smatra se da je nastajanje

kancera glavni somatski rizik izlaganja niskim dozama i to predstavlja najveći problem zaštite od zračenja. Sa povećanjem doze rasta vjerovatnoća pojavljivanja stohastičkih efekata ali se ne mijenja njihov karakter, odnosno bolest neće biti teža, već će se efekat pojaviti kod većeg broja osoba izloženih zračenju. Smatra se da za ove efekte ne postoji prag doze.

Deterministički efekti su oni radijacioni efekti čija jačina zavisi od doze zračenja. Za ove efekte postoji prag doze. Postoji doza ispod koje se efekat ne pojavljuje. Iznad praga doze efekat nastaje i što je doza veća, postoje sve jače izražen. U ove efekte spadaju nemaligna oštećenja kože, na primjer crvenilo kože, kao i katarakta očnog sočiva.

Cilj zaštite od zračenja je da se usvajanjem dovoljno niskih granica doze spriječi pojava determinističkih efekata, a da se vjerovatnoća stohastičkih efekata svede na nivo koji se mogu smatrati prihvatljivim.

ZAŠTITA OD JONIZUJUĆIH ZRAČENJA

Evolucija granične doze

Neposredno po otkriću X-zračenja i radioaktivnosti prvi istraživači ovih pojava otkrili su, uglavnom na sebi, vidljive i očigledne efekte izlaganja zračenju i prirodnim radionuklidima.

Prvi uočeni, akutni, štetni efekat dejstva zračenja na ljudski organizam bilo je crvenilo kože-eritema. Ovaj efekat bio je uočljiv samo ukoliko je iznos primljene doze bio iznad određene vrijednosti-praga doze. Vrijednosti primljene doze ispred praga smatrane su tolerantnim. Ova „tolerantna doza“ predstavlja prvo ograničenje. Međutim, već u prvoj dekadi ovog vijeka, manje od 10 godine po otkriću X zračenja bilo je poznato da ono može izazvati kancer (prvi izvještaj o uvećanom broju leukemija kod radioloških radnika objavljen je 1911. g.). Ova statistički utvrđena činjenica nije vezana za koncept „praga doze“, već je ukazala na mnogo suptilnije mehanizme djelovanja jonizujućeg zračenja na čovjeka, a problem zaštite učinila kompleksnim. I danas osnovno pitanje zaštite od zračenja: „koliki iznos doze je štetan?“, odnosno: „koliki iznos doze je bezopasan?“, ostaje otvoreno.

Prva, brojno usvojena, tolerantna vrijednost doze bila je 52 R/god što je predstavljalo deseti dio doze koja izaziva eritemu u roku od 30 dana. Razvoj godišnjih, graničnih vrijednosti doza, preporučenih od strane Međunarodne Komisije za radiološku zaštitu prikazanu u Tabeli 1.1.

Tabela 1.1

Razvoj godišnjih, graničnih vrijednosti doza prema ICRP

Godina	Granična doza		
	[Sv/god]	[rem/god]	
1934	za profesionalce	0.52	52
1950		0.15	15
1956		0.05	5
1991		0.02	2
1959	za pojedince iz stanovništva	0.005	0.5
1991		0.001	0.1

Iz Tabele 1.1 se vidi kako je, sa većom primjenom izvora zračenja i saznanjima o biološkim efektima zračenja, granica maksimalne godišnje dozvoljene doze smanjivana, uz uvođenje sigurnosnog faktora 10 za pojedince i stanovništvo. Upoznavanje efekta radijacije počelo je pri visokim dozama i postepeno smanjivano do vrednosti od par desetina mSv, koja je porediva sa jednim rendgenskim snimkom kičme ili želuca. U granice prikazane gornjom tabelom nije uključeno ozračivanje medicinskog porijekla, što znači da osoba može tokom dijagnostičke pretrage primiti višestruku godišnju dozvoljenu dozu za profesionalno izložena lica. Ova činjenica otvara pitanje opravdanosti primjene date dijagnostičke procedure.

Vodeća svjetska organizacija zaštite od zračenja je Međunarodna komisija za radiološku zaštitu (ICRP). Tekuće preporuke ovog tijela (ICRP) preporuke čine podlogu nacionalnih propisa i standarda svih zemalja. ICRP tijesno saraduje sa sljedećim međunarodnim organizacijama:

- Međunarodnom Komisijom za radiacione jedinice i mjerenja (ICRU);
- Svjetskom zdravstvenom organizacijom (WHO);
- Međunarodnom agencijom za atomsku energiju (IAEA);
- Međunarodnim društvom za zaštitu od zračenja (IRPA);
- Komitetom Ujedinjenih nacija (UNSCEAR).

Savremeni principi zaštite od zračenja

Zaštita od jonizujućih zračenja predstavlja niz administrativnih, tehničkih i medicinskih mjera čiji je cilj da se izlaganje ljudi zračenju smanji na najmanji prihvatljivi nivo. Osnovni principi zaštite su iskazani kroz Publikacije Međunarodne komisije za zaštitu od zračenja (ICRP) i formulisani kao opravdanost prakse, optimizacija zaštite od zračenja i ograničavanje

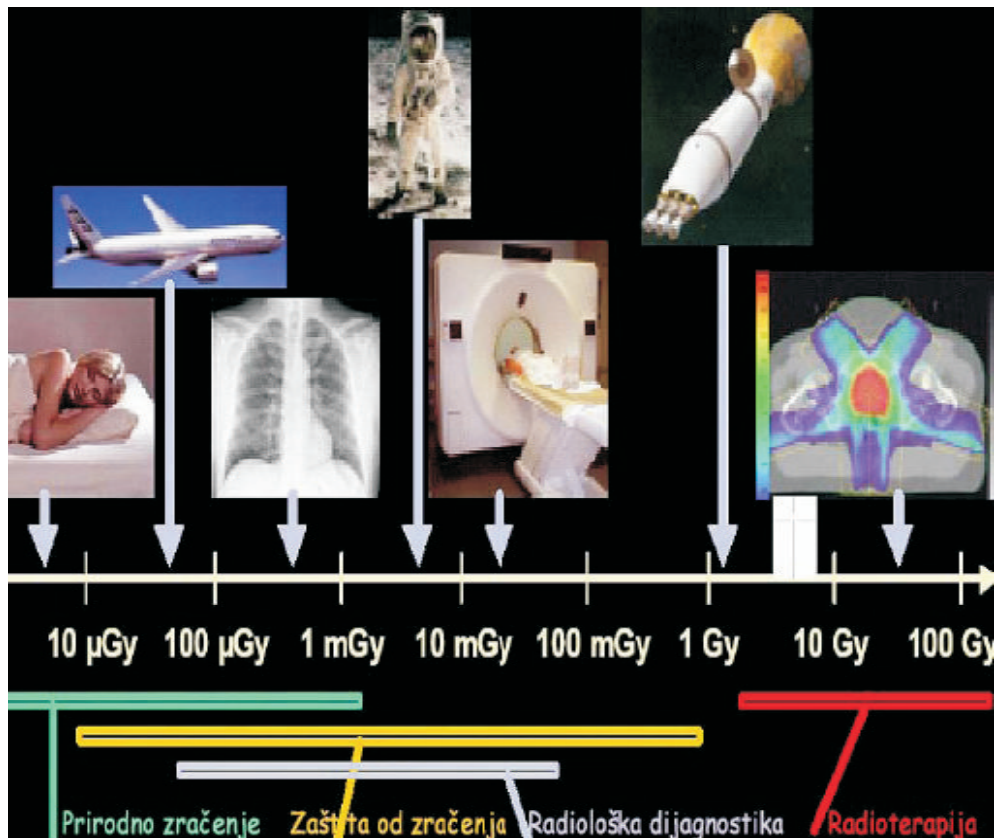
individualnih doza i rizika i sastavni su dio Zakona o zaštiti od jonizujućeg zračenja i radijacionoj sigurnosti ("Službeni list CG", broj 56/09).

Utvrđeno je da i male doze zračenja mogu izazvati štetne efekte kod čovjeka. Zato svako nepotrebno izlaganje zračenju treba izbjeći a neophodno svesti na najmanju moguću mjeru. Ovaj princip naziva se A.L.A.R.A. (As Low as Reasonably Achievable). Prije uvođenja A.L.A.R.A. principa važila je koncepcija maksimalno dozvoljenih doza. Po ovoj koncepciji maksimalno dozvoljenih doza za profesionalno izložena lica iznosila je 50m Sv godišnje. Danas je u skladu sa A.L.A.R.A. principom, uvedena koncepcija graničnih nivoa doza. Granice individualnog izlaganja zračenju koje se i u saglasnosti sa najnovijim preporukama Međunarodne komisije za zaštitu od zračenja (ICRP-60) za profesionalno izložena lica iznose:

100mSv/ 5 godina

50 mSv/ (maksimalno godišnje)

20 mSv/ (maksimalno godišnje i prosječno tokom petogodišnjeg perioda)



Iz ovih podataka se vidi da je godišnja granična doza snižena 2.5 puta, sa 50mSv na 20 mSv. Princip na kome je zasnovano ograničenje doze po ICRP preporukama obuhvata:

procjenu opravdanosti aktivnosti koja dovodi do izlaganja, optimizaciju zaštite od zračenja, i određivanje granica izlaganja koje se mogu smatrati prihvatljivim za pojedinca.

Treba istaći da sistem ograničavanja doza ne obuhvata izlaganje od fona (osnovni nivo zračenja iz prirode) kao ni izlaganje koje potiče iz medicinskih izvora (za dijagnostičke i terapijske svrhe).

Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja (ICRP) razlikuje tri načina izlaganja zračenju:

profesionalno izlaganje, medicinsko izlaganje, i izlaganje stanovništva.

Profesionalno izložena lica su ona lica koja rade sa izvorima jonizujućih zračenja ili se u procesu rada nalaze u poljima jonizujućih zračenja. Ova lica se klasifikuju prema uslovima rada i nivoima izlaganja jonizujućih zračenja u dvije kategorije: A i B.

Kategorija A – lica koja profesionalno rade u kontrolisanoj zoni i ona koja mogu da prime efektivne doze veće od 6 mSv godišnje.

Kategorija B- lica koja profesionalno ili povremeno rade u nadgledanoj zoni ili povremeno u kontrolisanoj zoni i mogu da prime doze manje od 6mSv godišnje.

Kontrolisana zona je radijaciona zona u kojoj se zahtijeva primjena specifičnih zaštitnih mjera i poštovanje sigurnosnih procedura radi kontrole normalnog izlaganja jonizujućem zračenju i sprječavanja širenja kontaminacije u normalnim radnim uslovima kao i prevenciju i ograničavanje potencijalnih izlaganja.

Nadgledana radijaciona zona nije označena kao kontrolisana zona i u njoj se ne zahtijeva primjena specijalnih zaštitnih mjera i poštovanja specijalnih sigurnosnih procedura i ako su uslovi profesionalnog izlaganja jonizujućem zračenju kontrolisani.

Medicinsko izlaganje je izlaganje pacijenata i lica koja pomažu pacijentima pri medicinskoj primjeni izvora jonizujućih zračenja (dijagnostika i terapija) a nijesu profesionalno izložena lica.

Izlaganje stanovništva obuhvata izlaganja usljed vanrednog događaja i izlaganja osnovnom nivou zračenja iz prirode (fonu). Granica efektivne doze za stanovništvo iznosi 1 mSv godišnje.

Zakon o zaštiti od jonizujućih zračenja i radijacionoj sigurnosti i prateći pravilnici uređuju prava, obaveze i odgovornosti radnih organizacija i profesionalno izloženih lica u pogledu korišćenja izvora jonizujućih zračenja i zaštitu pri radu sa njima.

TEHNIČKE MJERE ZAŠTITE

Tehničke mjere zaštite obuhvataju opremanje prostorija i radnih mjesta uređajima, priborom za rad, ličnim zaštitnim i dozimetrijskim sredstvima. Instrumenti moraju biti baždareni jednom godišnje kod ovalašćene laboratorije. Radnici se moraju pridržavati pravila i propisa rada sa izvorima zračenja. Ovlašćene osobe za zaštitu od izlaganja moraju za svakog radnika voditi dozimetrijske kartone u koje se upisuju mjesečne ili tromjesečne doze nakon očitavanja ličnih dozimetara.

Medicinske mjere zaštite

Medicinske mjere zaštite za lica koja rade sa izvorima jonizujućih zračenja obuhvataju:

zdravstveni pregled prije stupanja na rad sa izvorima zračenja,
periodične sistematske preglede u toku rada,
zdravstvene preglede nakon prestanka rada sa radioaktivnim izvorom zračenja, i
ukazivanje medicinske pomoći kod akcidentalnih ozračivanja.

Zdravstveni pregledi prije stupanja na rad sa izvorima zračenja treba da omoguće izbor osoba čije je zdravstveno i psiho-fizičko stanje u skladu sa normama predviđenim za ovakav rad. Ovi pregledi obuhvataju opšti klinički pregled, hematološke analize, pregled očnog sočiva, radiografiju pluća i funkcionalno ispitivanje bubrega (za osobe koje će raditi sa uranom ili uranovim jedinjenjima).

Periodični zdravstveni pregledi profesionalno izloženih lica kategorije A obavljaju se jednom godišnje a lica kategorije B jednom u tri godine. Ovi pregledi obuhvataju:

opšti klinički pregled,
hematološke analize,

pregled očnog sočiva,
radiotoksikološka ispitivanja, i
ispitivanja hromozomskih aberacija u limfocitima itd.

Ovi pregledi mogu se obavljati jedino u ovalašćenim ustanovama gdje se vodi evidencija za svakog radnika o rezultatima sistematskih pregleda i o mjesečnim dozimetrijskim kontrolama.

Sa izvorima jonizujućih zračenja ne smiju da rade:

- 1) lica mlađa od 18 godina života;
- 2) žene za vrijeme trudnoće;
- 3) žene za vrijeme dojenja djeteta sa otvorenim izvorima jonizujućeg zračenja.
- 4) Zabranjeno je izlaganje jonizujućem zračenju iznad granica propisanih za stanovništvo licima mlađim od 18 godina života, osim licima starijim od 16 godina života za vrijeme propisane obuke u toku redovnog školovanja za rad sa izvorima jonizujućeg zračenja.

MJERE ZAŠTITE PRI RADU SA IZVORIMA JONIZUJUĆIH ZRAČENJA

Prije nego što se pristupi korišćenju izvora jonizujućih zračenja neophodno je obezbijediti uslove pri kojima će izlaganje zračenju biti najmanje. Mjere zaštite koje treba primijeniti prvenstveno zavise od izvora zračenja koji se koristi, od vrste i obima posla.

Izvori jonizujućih zračenja su radioaktivni materijali, gdje jonizujuće zračenje nastaje u procesu radioaktivnog raspada atoma ili uređjaji koji mogu da emituju jonizujuće zračenje.

Osnovne karakteristike radioaktivnih izvora su:

1. vrsta zračenja koju izvor emituje,
2. energetska spektar zračenja, $E(eV)$,
3. vrijeme poluraspada, $T_{1/2}$, i
4. aktivnost izvora, $A(Bq)$.

Radioaktivni izvori jonizujućeg zračenja mogu da se podijele na zatvorene i na otvorene izvore. Za primjenu odgovarajućih mjera zaštite veoma je značajno da li se koriste otvoreni ili zatvoreni izvori zračenja

Zatvoreni izvori zračenja su takvi izvori kod kojih je radioaktivni materijal hermetički zatvoren u odgovarajuće kapsule ili omotače. Pri normalnom radu

sa ovim izvorima ne može se doći u direktan kontakt sa radioaktivnim materijalom. To znači da nema opasnosti od kontaminacije i da je potrebno štititi se od izlaganja zračenju.

Otvoreni izvori zračenja su najčešće u obliku radioaktivnih rastvora gdje je moguć direktan kontakt sa radioaktivnim materijalom. Kada se rukuje sa ovim izvorima potrebno je zaštititi se od izlaganja zračenju i od kontaminacije.

Kontaminacija radioaktivnim materijalom predstavlja svako nepoželjno prisustvo radioaktivnog materijala i može biti spoljašnja ili unutrašnja.

O spoljašnjoj kontaminaciji govorimo ako su kontaminirani spoljašnji dijelovi tijela, najčešće ruke ili je kontaminirana odjeća.

Unutrašnja kontaminacija predstavlja prisustvo radioaktivnog materijala u unutrašnjosti organizma i njegovo deponovanje u pojedina tkiva ili organe. Kontaminant može dospjeti u organizam preko organa za varenje, organa za disanje ili preko kože. Njegovo ponašanje u organizmu zavisi od njegovih fizičkih ili hemijskih karakteristika. Neki kontaminanti se ravnomjerno raspoređuju dok se većina koncentriše u pojedinim tkivima ili organima. Uobičajeno je da se organ u kome se sakuplja najveća količina nekog radionuklida naziva kritični organ. Kad se radioaktivna supstanca nađe u organizmu, on je izložen zračenju sve dok njena koncentracija ne postane beznačajna usljed radioaktivnog raspada i izlučivanja iz organizma.

Pravila pri radu sa otvorenim izvorima jonizujućih zračenja

Pri radu sa otvorenim izvorima jonizujućih zračenja, pored ljudi koji rade može biti kontaminirana i radna sredina, radne površine, kao i vazduh u prostorijama. Do kontaminacije najčešće dolazi za vrijeme izvođenja različitih operacija u laboratoriji. Radionuklidi mogu dospjeti u radnu sredinu u vidu gasova, aerosola, praškastih ili tečnih supstanci. Treba strogo voditi računa da male količine neaktivnih supstanci koje mogu biti bezopasne i zanemarljive, ako su radioaktivne mogu biti veoma opasne, jer su i u zanemarljivim količinama biološki aktivne.

Mjere zaštite koje se primjenjuju pri radu sa otvorenim izvorima jonizujućih zračenja neophodno je primjeniti, posebno koje se razlikuju od onih koje se primjenjuju kod zatvorenih izvora:

Prostorije u kojima se radi sa izvorima zračenja moraju biti obilježene znakom za radioaktivnost.

Pristup u prostorije u kojima se radi sa radioaktivnim materijalima dozvoljen je samo osobama koje tu rade.

Obavezno je nošenje ličnih zaštitnih sredstava (radni mantili, rukavice, posebna obuća, respiratori ...).

Obavezno je korišćenje ličnih dozimetrijskih sredstava.

Sa otvorenim izvorima zračenja radi se u digestorima ili specijalnim kutijama sa rukavicama koje imaju posebnu ventilaciju.

Pri radu se koriste odgovarajuće radne podloge na koje treba staviti pribor za rad kao i radioaktivne izvore.

Potrebno je unaprijed pripremiti sve operacije i uvježbati ih radeći »na hladno« (sa neaktivnim supstancama).

Treba odvojiti posuđe za rad sa neaktivnim supstancama od posuđa za rad sa aktivnim supstancama.

Radna mjesta se moraju održavati vrlo uredno.

Operacije ustima nijesu dozvoljene.

U radnim prostorijama, se ne smije jesti, piti ili pušiti.

Čvrsti radioaktivni otpad odlaze se u posebne kante koje su obilježene znakom za radioaktivnost.

Radioaktivne otpadne tečnosti se ne smiju izlupati u česme, treba ih sakupljati u posebne obilježene boce pa ih skladištiti ili poslati na dalju obradu.

Zabranjeno je bacanje radioaktivnog materijala u kante koje se koriste za sakupljanje neaktivnog materijala.

Prilikom odlaganja radioaktivnog otpada treba u laboratoriji odvojiti dugoživeći od kratkoživećeg, sagorivi od nesagorivog, visoko aktivan od nisko aktivnog.

Potrebno je voditi strogu evidenciju nabavke radioaktivnog materijala i njegovog trošenja.

Potrebno je redovno vršiti kontrolu radnih mjesta i ličnih zaštitnih sredstava poslije završenog rada a po potrebi i u toku samog rada.

U slučaju kontaminacije treba voditi računa da se što je moguće prije izvrši dekontaminacija, a ako to nije moguće, da se obavijeste za to ovlašćene ekipe.

Jedanput godišnje potrebno je da ustanova ovlašćena za poslove zaštite od zračenja provjeri kontaminaciju radnih mjesta i sredine.

DEKONTAMINACIJA

Dekontaminacija površina

Svuda gdje se radi sa otvorenim izvorima jonizujućeg zračenja postoji mogućnost kontaminacije radnih površina i ljudi. U slučaju da do kontaminacije dođe, lica koja rade sa izvorima zračenja treba da, što je moguće prije, izvrše dekontaminaciju. Ako to nije iz nekog razloga moguće potrebno je

da obavijeste za to ovlašćena lica.

Dekontaminacija predstavlja niz postupaka koji se primjenjuju za uklanjanje radioaktivnog materijala sa kontaminiranih mjesta. Lice koje vrši dekontaminaciju treba da bude upoznato sa vrstom i nivoom kontaminacije. U toku čišćenja obavezno je nošenje ličnih zaštitnih sredstava. Sam proces zavisi od vrste i stepena kontaminacije i traje dok se aktivnost ne svede na granični nivo. Veoma je važno da se dekontaminacija izvrši što je moguće prije zato što je tada postupak jednostavniji i brži.

Postupci za dekontaminaciju površina mogu da se podijele na fizičke i hemijske.

Primjena fizičkih metoda zahtijeva čišćenje posebnim usisivačima, mehaničko čišćenje ili uklanjanje površine abrazivnim sredstvima. Važno je da se izbjegne narušavanje strukture gornjeg sloja kontaminiranih površina. Zbog toga su veoma pogodne površine od nerđajućeg čelika, kao i neke plastične mase koje mogu biti tretirane jačim sredstvima a da ipak ostanu glatke.

Hemijske metode obuhvataju primjenu različitih rastvora, jonoizmjenjivačkih supstanci, kisjelina i baza. Dekontaminaciju treba, kad god je to moguće, uraditi što jednostavnijim i blažim sredstvima koja su često i ekonomski najpovoljnija. Treba kad god je to moguće koristiti vodu, vodenu paru, rastvore deterdženata, rastvore kompleksnih jedinjenja i jonskih izmjenjivača. Tek kad ova sredstva ne mogu da pomognu koriste se agresivnija sredstva. U slučaju kontaminacije širih razmjera treba pozvati za to specijalizovanu ekipu.

Dekontaminacija kože

Pri radu sa otvorenim izvorima zračenja može da dođe do kontaminacije ljudi koji rade. Najčešće dolazi do kontaminacije kože (najčešće se kontaminiraju ruke). Tada je potrebno što je moguće prije pristupiti dekontaminaciji. Prvo treba pokušati da se zagađeno mjesto pažljivo pere vodom i sapunom. Pri tome treba voditi računa da se koristi hladna ili mlaka voda i da je sapun blag (da nije previše alkalan). Kožu treba prati 1-2 minuta i može se koristiti meka četka. Zatim je osušiti, najbolje papirnim ubrusima ili u struji toplog vazduha i prekontrolisati pomoću monitora zračenja. Ovaj postupak treba ponavljati dok je efikasan. Ako je pranje mlakom vodom i sapunom nedovoljno koža se pere deterdžentom ili 1:4 rastvorom natrijum-hiperhlorita, 1-2 minuta, zatim ispira vodom. I ovi postupci se mogu ponoviti. Od jačih agenasa može se koristiti 4% natrijum-hipermangan koji je snažno oksidaciono sredstvo. Ako se i pored navedenih mjera kontaminat ne može

ukloniti, potrebno je uputiti kontaminiranu osobu u ovlašćenu medicinsku ustanovu.

MJERE ZAŠTITE PRI RADU SA ZATVORENIM IZVORIMA JONIZUJUĆIH ZRAČENJA

Cilj mjera zaštite pri radu sa zatvorenim izvorima jonizujućih zračenja je da se izlaganje svede na najmanji prihvatljivi nivo. Da bi se to postiglo treba voditi računa o sljedećem:

- vrijeme boravka u polju zračenja treba da bude što kraće,
- rastojanje od izvora zračenja treba da bude što veće, i
- treba koristiti zaštitne zidove.

Primljena doza je proporcionalna vremenu pa je neophodno smanjiti vrijeme provedeno u polju zračenja. Ovo se praktično može ostvariti dobrim uvježbavanjem svih operacija “na hladno” – bez izvora. Ukoliko se radi o izvorima visokih aktivnosti operacije mogu da izvedu veći broj radnika.

Doza opada sa kvadratom rastojanja pa se sa izvorima X i gama zračenja mora raditi sa što je moguće većeg rastojanja.

Zaštitni zidovi

Često se u praksi javljaju slučajevi kada prethodno izloženi vidovi smanjivanja izlaganja ne mogu da pruže optimalne efekte zaštite. To se može pojaviti usljed velikog intenziteta zračenja, dužine trajanja posla i nemogućnosti njegovog obavljanja sa većih rastojanja. U takvim slučajevima koriste se zaštitni zidovi. Osnovna funkcija zida sastoji se u smanjivanju inteziteta zračenja do graničnog nivoa. Efikasnost zida zavisi od niza faktora kao što su: vrsta zračenja, energija, oblik i dimenzija izvora, vrste materijala od kog je zid napravljen i debljine zida. Najčešće se u zaštiti od izlaganja X i γ (gama) zračenja koriste zaštitni zidovi od olova, betona itd.

Elektromagnetsko zračenje (X i gama) interaguje sa materijalom, pri prolasku kroz njega, te je krajnji efekat slabljenje jačine snopa zračenja, a samim tim se smanjuje jačina ekspozicione doze.

ZAŠTITA OD ALFA ZRAČENJA

Alfa zračenje pri prolasku kroz materijalne sredine brzo gubi svoju energiju i tako se potpuno apsorbuje u vrlo tankim slojevima materijala. Nekoliko

listova papira ili tanke aluminijske folije debljine 0.4 mm dovoljni su da apsorbuju sve alfa čestice koje emituju radioaktivni materijali. U vazduhu one pređu samo nekoliko desetina milimetara prije nego što izgube svu energiju i postanu atomi helijuma. Površinski sloj kože na ljudskom tijelu takođe apsorbuje alfa čestice energije do 7.5 MeV. Ove činjenice upućuju na zaključak da alfa zračenje ne predstavlja opasnost za spoljnje izlaganje, pa se korišćenje zaštitnih zidova isključuje.

Pri korišćenju otvorenih izvora alfa zračenja zaštita se svodi na sprječavanje unošenja radioaktivnih materijala u organizam.

ZAŠTITA OD BETA ZRAČENJA

Domet beta čestica u vazduhu iznosi nekoliko metara. Kako štetno djeluju na kožu, a posebno na oči, pri radu sa beta emiterima moraju se koristiti zaštitni ekrani. Njihov izbor zavisi od energije beta-čestica a takođe i od prinosa zakočnog X zračenja, koje se javlja pri prolasku beta-zračenja kroz materijal. Iako se potpuna apsorpcija beta zračenja može postići vrlo tankim slojevima težih materijala oni se izbjegavaju pošto je prinos zakočnog X zračenja u njima mnogo veći nego kod lakih materijala. Zato se najčešće koriste zidovi od aluminijuma, stakla ili pleksiglasa. Pri radu za izvorima beta zračenja potrebno je nositi i zaštitne naočare.

Zaštita od zračenja i javnost

Jedna od najviše osporavanih ljudskih djelatnosti je primjena izvora jonizujućih zračenja. Iako zračenje nije u vrhu liste toksičnih agenasa, i, mada se o izvorima, rizicima i efektima više zna nego za bilo koji drugi toksični agens, nema znakova da će polemika o opravdanosti primjene izvora jonizujućih zračenja uskoro prestati.

Pogrešna procjena realne dimenzije radijacione opasnosti uzrokovana je strašnim iskustvom koje je čovječanstvo doživjelo u prvoj masovnoj primjeni nuklearne energije-eksplozijama atomskih bombi u Japanu, 1945. godine. Sjenka bačenih bombi i danas pada na nuklearnu elektranu, uslovljavajući, uglavnom negativan stav javnog mnjenja. Ipak, treba naglasiti, da u normalnim uslovima eksploatacije, standardna nuklearna elektrana PWR tipa, snage oko 600 MW predstavlja daleko manji ozračivač stanovništva od klasičnog dijagnostičkog rendgen aparata (oko 100 puta).

Najznačajniji izvori zračenja, bez obzira da li su prirodnog ili vještačkog porijekla, ne privlače adekvatnu pažnju javnosti. Najveći obim izlaganja jonizujućem zračenju, ali i najveće mogućnosti za smanjenje ozračenosti leže upravo u medicinskoj primjeni izvora jonizujućeg zračenja, koja inače nije

predmet javnih neslaganja.

Skoro cjelokupan iznos ozračenja svjetske populacije od vještačkih izvora zračenja leži u domenu medicinske primjene, u čemu rendgen dijagnostika ubjedljivo dominira, procentom koji je veći od 90. U ovom iznosu veći dio se odnosi na tzv. „nepotrebno“ ozračivanje, a čije je značenje dovoljno razumljivo iz samog naziva. Primjenom savremenih metoda zaštite od zračenja, najveći globalni radijacioni dobici-radijacione uštede, u masovnom izlaganju, mogu biti, bez velikih materijalnih ulaganja, ostvareni, baš, i samo, u oblasti rendgen-dijagnostike, koja, iako izuzetno agresivan, i danas važi za nezamjenjivu dijagnostičku metodu.

Istorijat zaštite od zračenja

Čovjek je od svog nastanka bio izložen raznim zračenjima, pa između ostalih, i jonizujućim. Kada je, prije jednog vijeka, saznao o štetnim efektima radijacije, počeo je da se štiti od nje. Tako je započela razvoj jedna od najplemenitijih disciplina nuklearne fizike-zaštita od zračenja. Cilj zaštite od zračenja je isti kao i krajnji cilj medicine: zaštita zdravlja čovjeka. Ali, u odnosu na medicinu koja je stara koliko i čovjek, zaštita od zračenja je stara koliko i ovaj vijek. Razvoj zaštite od zračenja može biti podijeljen u 4 faze. Prva faza okarakterisana je postepenim otkrivanjem štetnih efekata zračenja i to baš na istraživačima koji su, nakon otkrića X-zračenja 1895. g. i radioaktivnosti 1896. g., prvi osjetili posljedice izlaganja zračenju. U ovom periodu oko 350 osoba umrlo je od posljedica zračenja.

Osnivanje Međunarodne komisije za zaštitu od zračenja u Štokholmu, 1928. g. (ICRP), nakon Međunarodnog kongresa radiologa u Londonu, (1925. g.) smatra se početkom organizovane zaštite od zračenja. Na čelu ove Komisije bio je američki fizičar Karl Morgan, koji se smatra osnivačem ove nove discipline. Ovu, II fazu razvoja zaštite karakteriše izdavanje jedinstvenih preporuka zaštite od zračenja.

Treći period razvoja zaštite započinje sredinom ovog vijeka nakon nuklearnih eksplozija u Japanu i lavine novih izvora koje je fisija donijela sa sobom. Široka mirnodopska primjena jonizujućeg zračenja praćena je porastom broja i vrsta radijacionih akcidenata, što je, sa druge strane, doprinijelo brzom razvoju zaštite.

Poslednja faza zaštite u posljednjem kvartalu ovog vijeka vezana je uglavnom za rast nuklearnih elektrana. Nova saznanja o rizicima i efektima radijacije mijenjaju osnovni pristup zaštite od zračenja, uvodeći strožije norme izlaganja zračenju, kako za stanovništvo, tako i za profesionalce. Današnji stepen zaštite u razvijenom svijetu karakterisan je uvođenjem savremenih koncepcija u praktičnu zaštitu od zračenja kroz Sistem ograničavanja doza.

Izvori zračenja i doprinos ukupnoj dozi

Radioaktivnost je prisutna na planeti Zemlji od njenog nastanka. Preko 60 radionuklida su prisutni u životnoj sredini i prema njihovom porijeklu mogu se podijeliti u tri kategorije:

Terestrijalni – prirodni, prisutni u sastavu materijala planete,
Kosmogeni – prirodni, nastali pod dejstvom kosmičkog zračenja, i
Vještački – nastali kao rezultat ljudskih djelatnosti.

Terestrijalni radionuklidi

Ova kategorija se sastoji od radionuklida koji su nastali u procesima koji su pratili nastanak univerzuma. Tipična su za njih duga vremena poluraspada, a izotopi uranijuma i torijuma su i rodonačelnici prirodnih nizova radioaktivnih raspada. U sljedećoj tabeli su date neke osnovne karakteristike ovih radionuklida.

Prirodni radionuklidi

Izotop	Simbol	$T_{1/2}$	Prirodna aktivnost
Uran 235	^{235}U	7.04×10^8 god	0.72% prirodnog urana
Uran 238	^{238}U	4.47×10^9 god	99.2745% prirodnog urana; 0.5 - 4.7 ppm ukupno urana u nekim tipovima stijena
Torijum 232	^{232}Th	1.41×10^{10} god	1.6 - 20 ppm u nekim tipovima stijena
Kalijum 40	^{40}K	1.28×10^9 god	0.037-1.1 Bq/g

^{226}Ra - radijum

^{226}Ra je član prirodnog uran-radijumskog niza. Prvi član niza je ^{238}U , a niz se završava stabilnim izotopom ^{206}Pb . Vrijeme poluraspada ^{226}Ra je $T_{1/2} = 1600$ godina.

U nizu poslije ^{226}Ra od interesa su izotopi ^{214}Bi , ^{214}Pb i ^{222}Rn , gasoviti izotop.

Posebnu opasnost po čovjeka koju donosi unos ^{226}Ra predstavlja vrijeme poluraspada, velika hemijska aktivnost i mali stepen eliminacije iz organizma. Potrebno je od 7 - 45 godina da se eliminiše polovina od unijete količine ^{226}Ra iz organizma. Radijum jednom unijet u organizam se ponaša slično kalcijumu, odnosno ugrađuje se u površinski mineralizirani sloj kostiju. Toksikološki efekat ^{226}Ra ogleda se u mogućnosti izazivanja osteogenog sarkoma, kao i u uticaju na ćelije koštane srži, odnosno na povećanu incidenciju leukemije.

⁴⁰K- kalijum

Od svih prirodnih radionuklida jedino se ⁴⁰K smatra esencijalnom jer ulazi u sastav čovjekovog organizma i nalazi se pod homeostatskom kontrolom. U prirodi ⁴⁰K se nalazi u smješi sa stabilnim izotopima kalijuma ³⁹K i ⁴¹K (³⁹K – 93.08 %, ⁴⁰K – 0.0119 % i ⁴¹K – 6.9 %). Fizičko vrijeme poluraspada ⁴⁰K je 1.2810^9 godina, a biološko vrijeme poluraspada od 58 dana. Metabolizam radioaktivnih izotopa kalijuma je isti kao i stabilnih izotopa.

²³²Th- torijum

²³²Th je prvi i najznačajniji član torijumovog prirodnog niza radioaktivnog raspada. Fizičko vrijeme poluraspada ²³²Th je 1.610^{10} godina. Glavna mjesta deponovanja ²³²Th u čovjekovom organizmu su kosti, pluća i jetra.

²³⁸U-uran

²³⁸U je najzastupljeniji izotop urana u prirodi (99.27 %). ²³⁸U je prvi član niza koji se zove još i uran - radijumski. U organizmu ²³⁸U se ponaša kao toksikant, sa dva vida dejstva: radiološko – kao izvor jonizujućeg zračenja i hemijski toksično.

Fizičko vrijeme poluraspada ²³⁸U je 4.510^9 godina, a biološko vrijeme od 1 do 500 dana, u zavisnosti od tipa jedinjenja i pokretljivosti tih jedinjenja urana.

²³⁵U-uran

²³⁵U je sigurno najpoznatiji izotop urana, zbog svoje primjene u nuklearnoj tehnici kao reaktorsko gorivo i dugo godina kao osnovna sirovina za nuklearno oružje. U hemijskom pogledu ponaša se isto kao i ²³⁸U. Specifičnost ²³⁵U se ogleda u njegovoj maloj izotopskoj zastupljenosti u smješi prirodnog urana – svega 0.72 %.

Kosmogeni radionuklidi

Gornji slojevi atmosfere interaguju sa većinom kosmičkog zračenja i na taj način nastaju radionuklidi kosmogenog porijekla. Oni mogu imati i duga vremena poluraspada, ali većina njih ima vremena koja su kraća. U sledećoj tabeli su dati najčešći kosmogeni radionuklidi i njihove karakteristike.

Kosmogeni radionuklidi

Izotop	Simb	T _{1/2}	Izvor – Porijeklo	Prirodna Aktivnost
Ugljenik 14	¹⁴ C	5730 god	Reakcija ¹⁴ N(n,p) ¹⁴ C;	0.22 Bq/g u organskim mater.
Tricijum 3	³ T	12.3 god	Inter. kosmičkog zračenja ⁶ Li(n,α) ³ H	1.2 x 10 ⁻³ Bq/kg
Berilijum 7	⁷ Be	53.12dan	Interakcija osmičkog zračenja sa N and O	0.01 Bq/kg

Kosmogeni radionuklidi ne predstavljaju neku značajniju opasnost po čovjeka. Interesantni su zbog njegovih karakteristika, a prije svega zbog načina njegovog nastanka. Nastaju interakcijom kosmičkog zračenja.

Vještački radionuklidi

Čovjek koristi radioaktivnost već oko 100 godina, i upotrebom radioaktivnosti u različite svrhe, vještačka radioaktivnost je dospjela u prirodu. Količine vještačkih radioaktivnih materijala su ipak male u odnosu na prirodne i kosmogene. Osnovna karakteristika većine vještačkih radionuklida su relativno kratka vremena poluraspada, naročito u odnosu na prirodne radionuklide. U sljedećoj tabeli dati su neki osnovni vještački radionuklidi.

Tabela III.3. Vještački radionuklidi

Izotop	Simbol	T _{1/2}	Izvor
Tricium	³ H	12.3 god	Proizveden u procesu proizvodnje i testiranja nukl. oružja i u reaktorima, postrojenjima za reprocesiranje
Jod 131	¹³¹ I	8.04 dan	Fisioni produkt, proizveden u procesu proizvodnje i testiranja nukl. oružja i u reaktorima, a koristi se u medicini za liječenje štitne žlijezde
Jod 129	¹²⁹ I	1.57·10 ⁷ god	Fisioni produkt, proizveden u procesu proizvodnje i testiranja nukl. oružja i u reaktorima
Kobalt 60	⁶⁰ Co	5.27 god	Fisioni produkt, proizveden u procesu proizvodnje i testiranja nukl. oružja i u reaktorima,
Cezijum 137	¹³⁷ Cs	30.17 god	Fisioni produkt, proizveden u procesu proizvodnje i testiranja nukl. oružja i u reaktorima,
Stroncijum 90	⁹⁰ Sr	28.78 god	Fisioni produkt, proizveden u procesu proizvodnje i testiranja nukl. oružja i u reaktorima
Tehneций 99	⁹⁹ Tc	2.11·10 ⁵ god	Produkt raspada ⁹⁹ Mo i ^{99m} Tc koristi se za medicinsku dijagnostiku
Plutonium 239	²³⁹ Pu	2.41·10 ⁴ god	Nastaje bombardovanjem ²³⁸ U neutronima (²³⁸ U + n → ²³⁹ U → ²³⁹ Np + β → ²³⁹ Pu + β)

Od svih vještačkih radionuklida za nas su od aktuelnog interesa ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co i ⁹⁰Sr. Porijeklo ovih radionuklida u našem okruženju je iz proba nuklearnog oružja obavljanih u periodu poslije 1945. godine, a većinom iz nuklearnog akcidenta u Černobilju. Vještački radionuklidi imaju široku primjenu u medicini, industriji a mogu se naći i neposredno u čovjekovom okruženju – radioaktivni gromobrani recimo.

Prirodna radioaktivnost u čovjekovom tijelu

I čovjekovo tijelo sadrži određene količine radioaktivnih elemenata. Osnovni put za unos radionuklida u tijelo je ingestija vode i hrane. U sledećoj tabeli data je procjena koncentracije radionuklida u tijelu odraslog čovjeka mase 70 Kg. Procjena je data na osnovu publikacije ICRP 30. Logično je pretpostaviti da će se svi radionuklidi koji se nalaze u čovjekovom okruženju naći i u čovjekovom tijelu, u određenim količinama.

Tabela III.4. Radionuklidi u čovječijem tijelu

Izotop	Ukupna masa izotopa u tijelu	Ukupna aktivnost izotopa u tijelu	Procjena dnevnog unosa izotopa
Uran	90 μg	1.1 Bq	1.9 μg
Torijum	30 μg	0.11 Bq	3 μg
Kalijum 40	17 mg	4.4 kBq	0.39 mg
Radijum	31 pg	1.1 Bq	2.3 pg
Ugljenik 14	95 μg	15 kBq	1.8 μg
Tricijum	0.06 pg	23 Bq	0.003 pg
Polonijum	0.2 pg	37 Bq	0.6 μg

Medicinske primjene

Praktično, cjelokupan iznos doze koju svjetska populacija prima od vještačkih izvora zračenja posljedica je primjene u medicini. Postoji ogroman broj izvora zračenja u drugim oblastima, ali njihov doprinos globalnom ozračenju nije značajan zbog malog broja izloženih osoba. U domenu medicinske upotrebe ubjedljivo dominira rendgen-dijagnostika, sa više od 90% ukupne doze. Razlog za ovu situaciju je velika masovnost dijagnostičkih rendgen aparata u odnosu na druge medicinske izvore zračenja. Rendgen pretraga često predstavlja jedini dijagnostički metod. Po podacima objavljenim od strane WHO, 30-50 % bitnih medicinskih odluka bazirani su na rendgen dijagnostici. U većini industrijskih zemalja prosječan broj rendgen-dijagnostičkih pretraga kreće se u rasponu od 300-900 godišnje, na 1000 stanovnika. U gornje cifre nijesu uključena masovna snimanja pluća i stomatološka izlaganja. Za zemlje u razvoju ove cifre se kreću u rasponu od 100-200 pretraga godišnje, na 1000 stanovnika. U evropskim zemljama broj pretraga po glavi stanovnika raste za oko 5% godišnje, pokazujući tendenciju dupliranja svakih 15-20 godina. Inače, pouzdaniji podaci stižu iz razvijenih zemalja koje čine manje od 25% od svjetske populacije. Učestalost R₀ dijagnostičkih pretraga jako varira: od 15-20 godišnje u jednoj, do 1000 do 2000, godišnje, u drugoj zemlji, sve na 1000 stanovnika. Jedna R₀ instalacija pokriva od 2000 u jednoj, do 600 000 osoba u drugoj zemlji. 75% stanovnika

planete nikad nije bilo u prilici da doživi bilo kakvu radiološku pretragu. Ukupna svjetska kolektivna ekvivalentna doza od vještačkih izvora procijenjena je na 2 000 000 do 5 000 000 manSv godišnje, od čega je 90-95% vezano za rendgen dijagnostiku. Dentalne radiografija, nuklearna medicina i radio terapija doprinose u iznosu 5-10% kolektivne doze. U sljedećim dekadama očekuje se porast broja radioloških pretraga zbog porasta urbanizacije, kao i starenja svjetske populacije. Porast kolektivne doze u 2000. godini procijenjen je na 50% u odnosu na početak posljednje dekade.

Rizik od izlaganja X zračenju korišćenjem rendgena prihvata se svjesno sa obzirom da je očekivana korist od dobijene dijagnostičke informacije veća od štete nastale ozračivanjem. Ali, pored ovog, neizbježnog, izlaganje kojem bi pacijent i izloženo osoblje bili izloženi i uz primjenu optimalnih mjera zaštite, postoji i dodatno, nepotrebno i neželjeno ozračivanje, a čijom eliminacijom efikasnost dijagnostičke metode ostaje neokrnjena. U svom Izvještaju iz 1988. godine, UNSCEAR je priznao da je, u razvijenim zemljama, dozu u izlaganju rendgen dijagnostike moguće prepoloviti bez uticaja na kvalitet dijagnoze. U slučaju okolnog medicinskog osoblja nepotrebna izlaganja zračenju mogu biti mnogostruko veća. Iz gore rečenog postaje jasniji osnovni cilj zaštite od zračenja u domenu rendgen dijagnostike: eliminacija nepotrebnog i minimizacija neizbježnog ozračivanja. U drugim oblastima primjene izvora zračenja zaštita se adekvatno i rigorozno sprovodi, iako te oblasti primjene učestvuju u ozračenosti populacije sa manje od 1%. Zbog masovnosti korišćenja svaka mjera zaštite u rendgen dijagnostici daje značajan radijacioni dobitak-smanjenje ozračenosti, te je ova oblast primjene jedina djelatnost u kojoj je moguće ostvariti značajno smanjenje ozračenosti u globalu. Izvodljivost i cijena sprovođenja ovih mjera nijesu poznati u svjetskim razmjerama, ali prve analize ukazuju na potpunu isplativost takvih akcija. Efikasno smanjenje ozračenosti u oblasti rendgen-dijagnostike može se postići uz napore koji su znatno manji od onih koji su, radi istog cilja, uloženi u drugim oblastima zaštite od zračenja, uz postizanje znatno skromnijih rezultata.

Posljednjih godina postignuto je više tehničkih rješenja i poboljšanja, što bi za posljedicu moralo imati značajna smanjenja kolektivne doze. Nažalost, studije iz Švedske i SAD nijesu ovo pokazale, mada su poboljšanja ostvarena u nekim novijim stomatološkim tehnikama i kompjuterskoj tomografiji. Istraživanja u Njemačkoj, V. Britaniji i u SAD pokazale su da se doze zračenja u raznim centrima, za istu dijagnostičku pretragu razlikuju za faktor 100. Na osnovu raspoloživih podataka UNSCEAR je dao uslovnu procjenu kolektivne doze u rendgen-dijagnostici od 1000 manSv na 1.000.000 ljudi, odnosno, u prosjeku, 1mSv po čovjeku godišnje.

Za problem ozračenosti vezano je pitanje Genetski značajne doze (GSD)-onog iznosa doze koji će moći da ima genetske posljedice. GSD zavisi, uglavnom, od dva faktora: iznosa doza koji primaju gonade i vjerovatnoće da će ozračeni subjekt, kasnije, imati djecu.

IZVORI ZRAČENJA U MASOVNOJ UPOTREBI

Radioaktivni gromobrani

Radioaktivni gromobrani, koji su montirani na teritoriji Crne Gore, su većinom proizvedeni u bivšim republikama SFRJ. U većini slučajeva se radi o radioaktivnim gromobranima sa $^{152,154}\text{Eu}$ i ^{60}Co . Datum montaže radioaktivnih gromobrana nije poznat ali se pretpostavlja da je to rađeno tokom šezdesetih i sedamdesetih godina prošlog vijeka. Nominalne aktivnosti su bile do maksimalno 0.4 Ci (1.48×10^{10} Bq). Brzina doze na 5 cm od izvora zračenja u radioaktivnom gromobranu ide čak do 200 mSv/h.



Radioaktivni gromobran 1.



Radioaktivni gromobran 2.



Radioaktivni gromobran 3.



Uložak radioaktivnog gromobrana

Zatvoreni izvori zračenja u industriji

Zatvoreni izvori zračenja imaju široku primjenu u industriji. Koriste se kao gustinomjeri, debljinomjeri, mjeraci nivoa, kontrola sadržaja vlage, ...



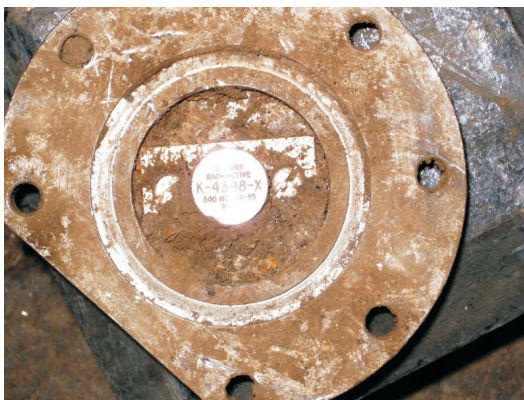
Zatvoreni izvori zracenja u industriji 1.



Zatvoreni izvori zracenja u industriji 2.



Različiti oblici izvora zračenja – kapsule



Izvor zračenja pronađen u otpadnom željezu

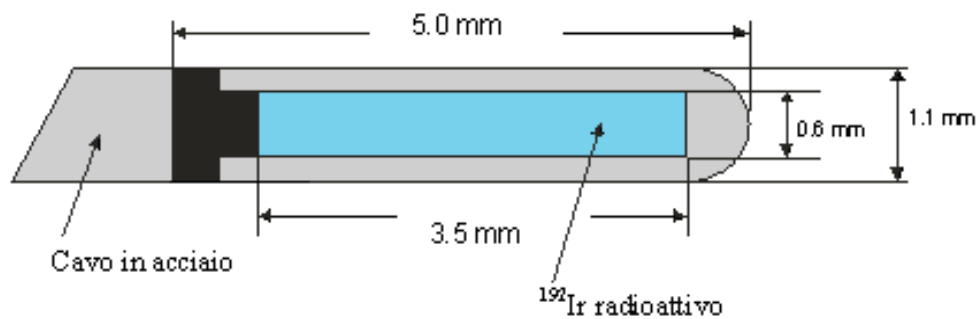


Kapsula izvora zračenja

Medicinski izvori zračenja



Brahiterapijski aplikatori sa Cs 137



Ir-192 izvor u celicnoj kapsuli



Ir-192 brahiterapijski izvor (10 Ci)



Radioterapijski izvor ^{60}Co (425 Ci)

Javljači požara

Javljači požara ugrađeni na teritoriji Crne Gore su sa ^{241}Am . Najčešće se radi javljačima proizvedenim od strane Cerberus-a iz Švajcarske. Tip ovih uložaka je FES 5B a aktivnost je $72 \mu\text{Ci}$ (2664 kBq). Pojedinačno ova aktivnost ne predstavlja opasnost ali obzirom da ih u Crnoj Gori ima na desetine hiljada, ukupna aktivnost je veoma značajana.



Javljači požara

Literatura:

1. Miller, FM (1985) , „Chemistry, structure and dynamics“, Mc Graw – Hill, New York.
2. Draganić I, Draganić Z, Adlof JP (1991) „Radijacije i radioaktivnost na zemlji i u vasioni, Dečje novine, Gornji Milanovac
3. Bojanović J, Čorbić M (1991) „Opšta hemija“, Dečje novine, Gornji Milanovac
4. Saha GB (1979) „Fundamentals of nuclear pharmacy“, Springer – Verlag, New York
5. Arnikar HJ (1992) „Osnovi nuklearne hemije“, Fakultet za fizičku hemiju, Beograd
6. Parker RP, Smith PHS, Taylor DM (1978) „Basic science of nuclear medicine“, Churchill Livingstone, Edinburgh
7. Draganić I (glavni urednik) (1981) „Radioaktivni izotopi i zračenja“, Knjiga I: „Opšti pojmovi“ (treće izmenjeno i dopunjeno izdanje). Institut za nuklearne nauke „Boris Kidrič“ Vinča, Centar za permanentno obrazovanje „Škola“, Beograd
8. Draganić I, (1996) „Kroz svet radijacija i radioaktivnosti“, Muzej nauke i geotehnike, Geoinstitut, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva
9. Sampson CB (Editor) (1994) „Textbook of Radiopharmacy. Theory and practice“, Gordon and Breach Science Publishers
10. Friedlander G, Kennedy JW, Macias ES, Miller JM (1981) „Nuclear and Radiochemistry“ Third edition, John Wiley & Sons, New York
11. Milutinović P, Bošnjaković V, Kostić K (urednici), (1990) „osnovi nuklearne medicine“, Medicinski fakultet, Beograd
12. Spinks JW, Woods RJ (1990) „An introduction to radiation chemistry“, Third edition, John Wiley & Sons, New York
13. Marković S, „Nabavka, transport, stokiranje, evidencija i propisivanje uslova za rad sa jnonizacionim javljačima požara“, Interna publikacija
14. Noz EM, Maguire QG (1985) „Radiation protection in radiologic and , Health sciences“, Second edition, Lea & Febiger, Philadelphia