

Davor ETEROVIĆ

FIZIKA

**Slikovne dijagnostike
za medicinare**

Predgovor prvom dijelu

Ovaj prvi dio udžbenika sažet je prikaz fizikalnih temelja metoda slikovne dijagnostike, pisan tako da ga mogu razumjeti matematički laici. Ciljane populacije su studenti medicine i studenti za inženjere medicinske radiologije. Gradivo se može izložiti u 15-ak sati predavanja ili seminara. Vjerujem da tekst može poslužiti i kao prva informacija ili podsjetnik liječnicima specijalizantima i specijalistima, kao i kliničkim inženjerima.

Dobrih tekstova o temeljnim aspektima slikovne dijagnostike ima, ali su većinom namijenjeni inženjerskim profilima ili ne pokrivaju ravnomjerno sva područja. Dakle, motiv pisanja nije bila činjenica da je većina sličnih knjiga napisana na engleskom jeziku, jer engleski jezik medicinarima ne smije biti prepreka.

Danas se liječnici sve više sreću s implikacijama detalja složenih fizikalnih pojava, čiju suštinu moraju razumjeti. Zato nisam izbjegavao napredne sadržaje, ali bez oslonca na višu matematiku. Formalna dedukcija često je zamjenjivana poredbama i ad hoc tvrdnjama. Tako nešto nije moguće bez žrtava. Nadam se da je fizika uglavnom preživjela.

Stilski, nastojao sam biti na tragu modernih tekstova slične namjene, gdje se koristi novinarski stil, s puno informativnih podnaslova. Tekst je sažet, tako da čitatelju nije ostavljeno da sam prosuđuje što je u važno. Bit ću sretan ako jezgrovitost nije potpuno istisnula ležernost.

D. E.

'U djelu se na razumljiv, informativan i kompetentan način, na adekvatnoj znanstvenoj i stručnoj razini i prilagođeno studentima i potrebama struke, prikazuje fizikalne osnove koje su potrebne za razumijevanje funkcioniranja i kliničke primjene dijagnostičkih metoda. Autor ovog dijela udžbenika u svojoj znanstvenoj karijeri fizičara, koji primjenjuje fizikalne metode u medicini, radio je vrlo uspješno na svjetskoj razini, i ta visoka razina znanstvene kompetencije odražava se u tekstu i omogućava autoru preciznost i jasnoću izlaganja....'

Akademik Vladimir Paar

Iz recenzije I. dijela udžbenika: Fizikalne osnove i klinički aspekti medicinske dijagnostike, Medicinska naklada, Zagreb, 2002.

I. dio

FIZIKALNE OSNOVE SLIKOVNE DIJAGNOSTIKE

1. Ionizirajuća zračenja

- Atomska jezgra
- Radioaktivni raspad
- Prolaz zračenja kroz materiju
- Dozimetrija

2. Fizika nuklearne medicine

- Što je nuklearna medicina
- Mjerenja radioaktivnosti
- Snimanja raspodjele radioaktivnosti
- Slojevita snimanja

3. Fizika MR dijagnostike

- Magnetna svojstva atomskih jezgri
- Oslikavanje pomoću magnetne rezonancije

4. Fizika rendgenske dijagnostike

- Što su X zrake
- Odlike radiograma
- Radiografske metode

5. Fizika ultrazvučne dijagnostike

- Nastajanje i detekcija ultrazvuka
- Međudjelovanje ultrazvuka i tkiva
- Prikazi ultrazvučnih odjeka
- Dijagnostički parametri ultrazvučne slike

6. Usporedba metoda slikovne dijagnostike

- Slikovni parametri
- Uočljivost lezije
- Što vidimo na slikama i zašto
- Prednosti i ograničenja metoda slikovne dijagnostike

1. poglavlje

IONIZIRAJUĆA ZRAČENJA

• Atomska jezgra

Atom se sastoji od jezgre i elektronskog omotača
Atom se ne ponaša kao makroskopska tijela
Atomska jezgra: skroviti dio atoma
Izotopi: varijante istog elementa

• Radioaktivni raspad

Stabilna jezgra ima usklađene brojeve protona i neutrona
Radioizotopi imaju nestabilne jezgre
Većina radioizotopa je umjetna
Nestabilna jezgra se burno mijenja
Alfa raspad: teška nestabilna jezgra odbacuje jezgru helija
U beta raspadu nestaju jedne i nastaju nove čestice
Gama raspadom jezgra odbacuje višak energije
Radioaktivne jezgre umiru ali ne stare

• Prolaz zračenja kroz materiju

Radioaktivno zračenje ionizira materiju
Čestično zračenje gubi energiju postupno
Čestično zračenje najviše ionizira na kraju puta
Gama zrake gube energiju odjednom ili u par koraka
Gama zrake su prodornije od čestičnog zračenja

• Dozimetrija

Izvor i polje ionizirajućeg zračenja
Učinke zračenja opisujemo dvjema veličinama
Učinke zračenja možemo predvidjeti ili mjeriti
Apsorbirana se doza može procijeniti mjerenjem ekspozicijske
Ionizacija je biološki štetna
Najviše zračenja primamo od prirodnih izvora

Atomska jezgra

ATOM SE SASTOJI OD JEZGRE I ELEKTRONSKOG OMOTAČA

Atomska jezgra je u središtu atoma, zauzima zanemarivo mali dio njegova prostora, ali sadrži gotovo cijelu masu atoma (više od 99.9 %). U prostoru oko jezgre je elektronski omotač. Atom elementa s **atomskim brojem** Z ima Z elektrona. Elektron je nositelj jediničnog negativnog električnog naboja.

Atomske jezgre građene su od **protona** i **neutrona**, čije je zajedničko ime **nukleoni**. Proton je nositelj jediničnog pozitivnog električnog naboja, dok je neutron električki neutralan. Broj protona u jezgri jednak je atomskom broju Z , tj. broju elektrona u elektronskom omotaču. Stoga je atom električki neutralan. Ako broj neutrona u jezgri označimo s N , ukupni broj nukleona u jezgri jednak je $Z+N$. Taj broj zovemo **masenim brojem** i označavamo s A . Dakle:

$$A=Z+N$$

Između protona i elektrona djeluje privlačna **Coulombova sila** koja okuplja elektrone u prostoru oko jezgre. Nukleone drži na okupu privlačna **nuklearna (tzv. jaka) sila**, nadvladavajući Coulombovo odbijanje između parova protona. Ta je sila na malim udaljenostima unutar jezgre puno jača od električne, ali na većim udaljenostima potpuno iščezava.

ATOM SE NE PONAŠA KAO MAKROSKOPSKA TIJELA

Zbivanja u atomu, a poglavito u atomskoj jezgri samo rijetko i samo približno možemo dovesti u vezu sa zbivanjima u našem makroskopskom svijetu. Tako je naivna slika atoma kao Sunčevog sustava, gdje je jezgra Sunce, elektroni planeti, a ulogu privlačne gravitacijske sile igra privlačna električna sila između protona i elektrona. Zadovoljavajući opis atoma ne omogućava klasična, već tzv. **kvantna fizika**. Kvantna fizika opisuje atom kao vezani mikrosustav: zbog privlačne Coulombove sile između naboja različitih predznaka atomski elektroni vezani su za prostor oko jezgre, ali ne mogu imati proizvoljne, već sasvim određene, međusobno razmaknute (diskretne) energije. Dovođenjem potrebne energije atomu moguće je elektrone premještati na više energijske razine, dok se te iste energije oslobađaju kada se elektroni spuštaju na niže energijske razine. Slično je i s nukleonima u atomskoj jezgri, samo što su energijske razine puno razmaknutije (jer su nuklearne sile jače od električnih).

ATOMSKA JEZGRA: SKROVITI DIO ATOMA

Kada se dva atoma približe, njihovi se elektronski omotači samo djelomično prekrivaju, tako da elektroni svakog atoma blokiraju svoj dio prostora oko jezgre. Kada se dva ili više atoma spoje u molekulu, vanjski elektroni atomskih omotača

stvore zajednički, molekulski elektronski omotač. Pri tome intenzivne pretvorbe energije i drugih osobina elektrona ne ostavljaju traga u atomskim jezgrama, upravo zbog njene prostorne izoliranosti i veće razmaknutosti mogućih energetske stanja jezgre. Dakle, jezgra je skroviti dio atoma; ona sudjeluje u formiranju i promjenama elektronskih omotača, ali se pri tome sama ne mijenja.

Ovo vrijedi za veliku većinu jezgara atoma od kojih se sastoji sav živi i neživi svijet. Međutim, postoje iznimke od ovog pravila i upravo o njima bit će riječi u sljedećim točkama ovog poglavlja.

IZOTOPI: VARIJANTE ISTOG ELEMENTA

Općenito, atom kemijskog elementa X označavamo $X-A$, a njegovu jezgru kao ${}_Z^AX$, gdje je X simbol kemijskog elementa, dok su Z i A atomski broj i maseni broj. Atomi s jednakim brojem protona Z , a s različitim brojem neutrona N , jesu različiti **izotopi** istog kemijskog elementa. Izotopi jednog elementa imaju jednaka kemijska svojstva zato jer im se elektronski omotači praktički ne razlikuju. To je stoga jer su neutroni električki neutralne čestice pa ne utječu na gibanje elektrona. Osim kemijskih i mnoga druga svojstva izotopa istog elementa gotovo su ista (kao npr. čvrstoća, viskoznost, boja), zato jer i ona ovise o svojstvima elektronskog omotača. Međutim, izotopi jednog elementa razlikuju se masom jezgre (dakle i masom atoma). Posljedično im je i makroskopska gustoća različita. U prirodi se većina elemenata nalazi u smjesi svojih izotopa, gdje prevladava jedan od njih.

Primjer 1. Postoje tri izotopa kisika. Svima im je atomski broj $Z=8$, a razlikuju se po broju neutrona, koji iznose $N=8$, $N=9$ i $N=10$. Dakle, njihovi su maseni brojevi $A=16$, $A=17$ i $A=18$, te ih obilježavamo: $O-16$, $O-17$ i $O-18$. U prirodi je 99.758 % izotopa $O-16$, 0.038 % izotopa $O-17$, a ostatak od 0.204 % je izotop $O-18$.

Osim po gustoći i detaljima u građi jezgre (koji interesiraju nuklearne fizičare) izotopi određenog elementa ponekad se razlikuju i po jednoj vrlo bitnoj osobini. Tako su jezgre nekih izotopa određenog elementa u vremenu nepromjenjive, tj. stabilne, dok su jezgre njegovih drugih izotopa podložne burnim promjenama svoje strukture. Takve nestabilne izotope nazivamo **radioizotopima**.

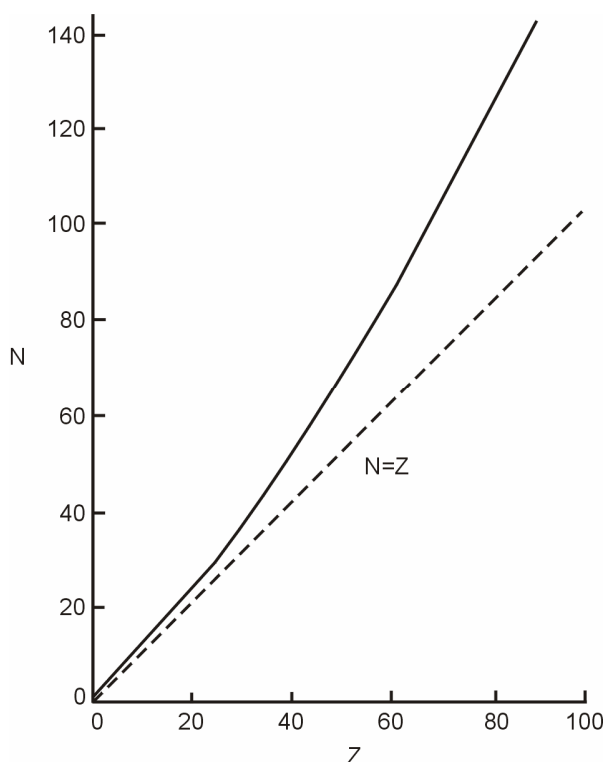
Primjer 2. Tri su vodikova izotopa: vodik-1 ($H-1$), deuterij ($H-2$) i tricij ($H-3$). Deuterij i tricij imaju osim protona, po jedan, odnosno dva neutrona u atomskoj jezgri. U prirodnom vodiku ima 99.985 % vodika-1 i samo 0.015 % deuterija. Tricij nastaje umjetno, u nuklearnim procesima u znanstvenim laboratorijima, i vrlo malo u prirodnim nuklearnim procesima izazvanim kozmičkim zrakama. Međutim, tricij je nestabilan, te vremenom nestaje.

Izotop znači "na istom mjestu". Kada govorimo o jednom elementu (dakle, jednom mjestu u periodnom sustavu) termin izotop ($X-A$) je adekvatan. Kada se radi o izotopima raznih elemenata uobičajen termin je **nuklid** ($X-A$), odnosno **radionuklid**, ako je nestabilan.

Radioaktivni raspad

STABILNA JEZGRA IMA USKLAĐENE BROJEVE PROTONA I NEUTRONA

Nuklearna sila dominira nad odbojnom električnom silom samo na udaljenostima između susjednih protona u jezgri. Nasuprot tome udaljeniji protoni "osjećaju" između sebe samo odbojnu električnu silu. Zato su za stabilnost jezgre potrebni neutroni, koji djeluju na susjedne nukleone (neovisno o tome da li se radi o protonima ili neutronima) samo privlačnom nuklearnom silom. Da bi neka jezgra bila stabilna najvažnije je da ukupan broj neutrona (N) bude veći od ukupnog broja protona (Z), osobito ako se radi o težim elementima (SLIKA 1.1).



SLIKA 1.1 Odnos između broja neutrona N i broja protona Z u jezgrama raznih nuklida. Stabilne se jezgre nalaze u uskom području oko pune crte, tzv. linije stabilnosti. Vidimo da se na početku linija stabilnosti poklapa s pravcem $N=Z$, što znači da su u laganim stabilnim jezgrama brojevi protona i neutrona podjednaki. Kako Z raste omjer N/Z , za stabilne jezgre, približava se 1.5.

RADIOIZOTOPI IMAJU NESTABILNE JEZGRE

Prilikom stvaranja Zemlje nastali su razni elementi, svaki u obliku više svojih izotopa, s raznim brojevima neutrona. Neki od izotopa pojedinog elementa imali su vrlo nepovoljan odnos N/Z , te su se brzo raspali i danas im ne nalazimo traga. Drugi, manje nestabilni, raspadali su se sporije, tako da ih i danas ima u prirodi. To su **prirodni radioizotopi**. Konačno, izotopi koji su nastali s povoljnim odnosom N/Z nepromijenjeni čine danas ogromnu većinu materije. Većina elemenata ima nekoliko stabilnih izotopa. Nasuprot tome, većina elemenata nema prirodnih radioizotopa.

VEĆINA RADIOIZOTOPA JE UMJETNA

Prirodni radioizotopi su rijetki i, za medicinske primjene, često imaju nepovoljna radijacijska svojstva (spori, lančani raspad). Zato se za primjene u medicini i drugim djelatnostima najčešće rabe umjetni radioizotopi, dobiveni u nuklearnim reaktorima i čestičnim akceleratorima. Danas je moguće proizvesti radioizotope **svih** elemenata. Ukupno je danas poznato preko 1000 radionuklida. Teži elementi imaju više radioizotopa nego lakši, jod ih npr. ima 15, dok ih vodik ima samo jednog (tricij).

NESTABILNA JEZGRA SE BURNO MIJENJA

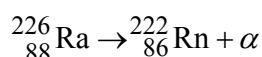
Nestabilna jezgra spontano se mijenja, nastojeći, u jednom ili više koraka, doći u stabilno stanje. Takve promjene kada se jezgra mijenja bez vanjskog utjecaja zovu se **radioaktivni raspad**, a čestice i fotone koje jezgra pri tome emitira **radioaktivno zračenje**. Osnovno je svojstvo radioaktivnog zračenja vrlo velika energija čestica i fotona. Naime, pri promjenama nestabilnih jezgri jedan se dio njene mase (m) pretvara u energiju (E , energija raspada), po čuvenoj Einsteinovoj relaciji: $E=mc^2$, gdje je c brzina svjetlosti, koja iznosi 300 000 km/s. Slijedi da jedna jedina čestica radioaktivnog zračenja ima dovoljnu energiju da promijeni strukturu 10 000 molekula u tijelu, te da se može pojedinačno detektirati našim makroskopskim elektronskim uređajima.

- *U medicini često koristimo radioaktivne izvore čiji je intenzitet zračenja vrlo mali (nedovoljan da za jedan sat ugrije decilitar vode za jedan °C). To znači da se radi o vrlo malom broju čestica (ili fotona) koje u jedinici vremena odašilju nestabilne jezgre radioaktivnog izvora. Međutim, njihova je pojedinačna energija ogromna, te su im neki učinci (prodornost, biološko oštećenje i sl.) daleko veći od neradioaktivnog zračenja (vidljive svjetlosti, npr.) ili mehaničkih valova istog intenziteta.*

ALFA RASPAD: TEŠKA NESTABILNA JEZGRA ODBACUJE JEZGRU HELIJA

Neke nestabilne teške jezgre prelaze u stabilno stanje niže energije odašiljući visoko-energetski projektil koji je u stvari jezgra helija, sastavljena od 2 protona i 2 neutrona. Taj se spontani proces naziva **alfa-raspad**, a izbačena jezgra helija **alfa-čestica** (α -čestica) ili **alfa-zračenje**. Pri tome se početna jezgra (jezgra-roditelj) pretvara u drugu jezgru (jezgru-kćer), koja ima 2 protona i 2 neutrona manje.

Primjer alfa-raspada je raspad jezgre radija-226 u jezgru radona-222, što simbolički prikazujemo:



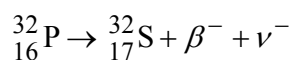
Kinetička energija ove alfa-čestice je oko 4.8 MeV, što je u mikrosvijetu ogromna energija.

Alfa-emitere (radioizotope koji se raspadaju alfa-raspadom) u medicini rijetko uporabljavamo, uglavnom u onkologiji, kao usatke koji razaraju tumorsko tkivo (tzv. brahiterapija). U medicinskoj dijagnostici se ne primjenjuju.

U BETA RASPADU NESTAJU JEDNE I NASTAJU DRUGE ČESTICE

Negativna beta čestica (β^-) je vrlo brzi elektron kojeg odašilje jezgra nakon **beta-minus raspada**. Valja ju razlikovati od orbitalnog elektrona. Radioizotopi koji imaju višak neutrona obično se raspadaju na taj način, pri čemu se jedan neutron iz jezgre pretvara u proton, koji ostaje u jezgri, i elektron, koji napušta jezgru kao β^- čestica. Osim elektrona jezgra emitira i tzv. antineutrino ($\bar{\nu}$), koji odnosi dio energije raspada. Inače je antineutrino (kao i njegova antičestica neutrino) bez naboja i praktično bez mase, te nema učinka na materiju.

Nakon beta-minus raspada jezgra zadržava maseni broj, ali joj se atomski broj povećava za 1, tj. ona postaje jezgra drugog kemijskog elementa. Tako se npr. raspada jezgra fosfora-32 u jezgru sumpora-32:



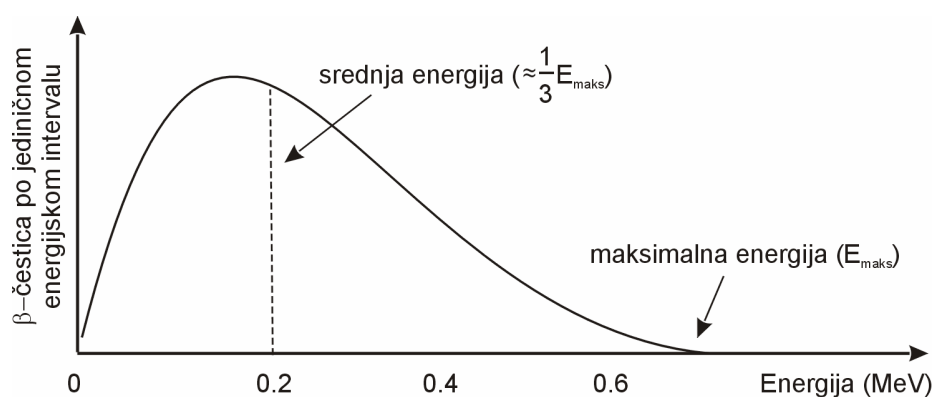
Umjetne beta-minus emitere (radioizotope koji se raspadaju beta-minus raspadom) dobivamo tako da stabilne izotope izlažemo struji sporih neutrona u nuklearnim reaktorima. Beta-minus emiteri najčešći su radioizotopi u medicinskim primjenama. Koristimo ih, zajedno s alfa-emiterima, u brahiterapiji, a fosfor-32, koji se u krvi vezuje za eritrocite, u terapiji policitemije rubre vere. Još je šira njihova primjena u istraživanju i medicinskoj dijagnostici, gdje se koriste kao obilježivači u in-vitro mjerenjima (vodik-3, ugljik-14), te kao sekundarni izvori gama-zraka (vidi sljedeću točku) u radionuklidnoj slikovnoj dijagnostici.

Pozitivna beta-čestica (β^+) je vrlo brzi **pozitron**, čestica koja ima istu masu kao i elektron, te nosi isti naboj, ali suprotnog, pozitivnog predznaka. Odašilje ga jezgra

koja ima višak protona (manjak neutrona). Tako se jedan proton u jezgri pretvara u neutron, koji ostaje u jezgri, a odašilju se pozitron i neutrino. Nakon beta-plus raspada jezgra zadržava svoj maseni broj, dok joj se atomski broj smanjuje za 1.

Beta-plus raspad uvijek prati tzv. **anihilacijsko zračenje**. Naime, nastali se pozitron usporava prolazom kroz materiju. Kada se praktički zaustavi i dođe blizu elektrona (svoje antičestice), nakon kratkotrajnog komešanja ("smrtnog plesa"), oboje nestaju. Kao energijski ekvivalent njihovih masa mirovanja najčešće nastaju dva fotona, svaki energije po 511 keV, koji odlaze u suprotnim smjerovima. Ta je činjenica pogodna u za stvaranje slike distribucije beta-plus nuklida u tijelu (**2. poglavlje**).

Energija β^+ čestice varira od nule (kada je svu energiju odnio antineutrino) do ukupne energije raspada (kada je svu energiju odnijela β^+ čestica). Prosječna je energija β^+ čestice približno jednaka $1/3$ ukupne energije raspada. Isto vrijedi i za beta-plus raspad (SLIKA 1.2).



SLIKA 1.2 Beta-plus energijski spektar Cu-64.

Beta-plus raspad zovemo i **pozitronskim raspadom**, a radionuklide koji se tako raspadaju pozitronskim emiterima. U prirodi nema pozitronskih emitera. Dobivaju se izlaganjem stabilnih izotopa određenog elementa struji ubrzanih čestica (najčešće protona) u čestičnim akceleratorima. Da bi se "strani" proton mogao inkorporirati u jezgru mora imati dovoljno energije za svladavanje odbojnih Coulombovih sila između njega i protona u jezgri, sve dok se ne približi na doseg privlačnih nuklearnih sila. Zbog toga je lakše dobiti lagane pozitronske radionuklide, koji imaju mali broj protona u jezgri. Tako su za medicinske primjene dostupni pozitronski radioizotopi kisika (O-14), ugljika (C-11), dušika (N-13) i drugi. Ti se pozitronski emiteri koriste kao obilježivači u istraživanju metabolizma tih elemenata (**2. poglavlje**). Raspadaju se brzo, jer im je višak protona relativno velik (nepovoljan odnos N/Z).

Umjesto beta-plus raspadom nestabilni izotop s viškom protona može se stabilizirati i tzv. **elektronskim zahvatom** (EZ). Primjer je jod-125, čija jezgra “pojede” vlastiti elektron. Pri tome se jedan proton pretvara u neutron, kao kod beta-plus raspada, tako da nastaje jezgra ksenona-125.

Beta-raspadi (β^+ i β^- raspad) su pokazali da se elementarne čestice mogu pretvarati jedna u drugu. Pretvorbu nukleona (protona u neutron i obrnuto) tijekom beta-raspada uzrokuje tzv. slaba sila (slabija je od električne, a poglavito od jake nuklearne). Djeluje između čestica koje se zovu leptoni (elektron, neutrino i njihove antičestice pripadaju leptonima). Posredovanjem slabe sile, pretvorbu nukleona uvijek prati izbacivanje dva leptona, od kojih je jedan čestica, a drugi antičestica (elektron i antineutrino ili pozitron i neutrino).

GAMA RASPADOM JEZGRA ODBACUJE VIŠAK ENERGIJE

Stabilne se jezgre nalaze u svom osnovnom energijskom stanju te su, za razliku od elektronskih omotača, nedostupne čestim promjenama strukture zbog međudjelovanja susjednih atoma. Stabilne se jezgre mogu penjati po svom energijskom stepeništu samo u ekstremnim, laboratorijskim uvjetima.

Ogromne energije, usporedive s veličinom energijskih stepenica jezgre oslobađaju se i tijekom radioaktivnih raspada. Nakon alfa ili beta raspada najčešće se jezgra ne nađe u svom osnovnom (najnižem) energijskom stanju, već u jednom od mogućih, viših energijskih stanja. Tu je, međutim, samo kratkotrajno, jer se jezgra vrlo brzo spušta u osnovno stanje, dok se razlika energija najčešće oslobađa u obliku fotona. Takav foton ima energiju koja je i do milijun puta veća od fotona vidljive svjetlosti i naziva se **gama-foton** ili **gama-zraka**. Proces se zove **gama-raspad**. Gama-raspad nije raspad u užem smislu riječi, jer se atomski broj jezgre ne mijenja.

→ *Dakle, gama-raspadom, za razliku od alfa i beta raspada, ne nastaje novi element.*

S neke stepenice svog energijskog stepeništa jezgra može skočiti na dno odjednom ili preko jedne ili više međustepnica. Zato je rezultat gama raspada jedna ili više gama zraka različitih energija.

Ponekad se, umjesto gama raspadom, jezgra oslobađa viška energije na drugi način. Uzmimo za primjer jezgru ksenona-125 koja je nastala elektronskim zahvatom iz jezgre joda-125. Ta jezgra ima 35 keV viška energije kojeg se ponekad oslobađa emisijom gama zrake čija je energija $E_\gamma = 35$ keV. Češće jezgra tu energiju predaje svom K elektronu (elektronu iz prve, K ljuske). Tako K elektron dobiva dovoljno energije da se oslobodi iz omotača i napušta atom. Prazno mjesto popunjavaju elektroni iz gornjih ljuski, dok se razlika njihovih energija oslobađa u obliku fotona, što nazivamo karakterističnim X zračenjem. Cijeli se proces zove **interna konverzija** (ili **izomerni prijelaz**). Kao što se vidi iz ovog primjera najčešće su gama raspad i interna konverzija konkurentni procesi.

Obzirom da su elektromagnetne sile, koje uzrokuju gama raspad, jače od slabih sila, gama-raspad je gotovo trenutno, dok je beta-raspad puno sporiji. Iznimno je moguć i relativno spori gama raspad. Taj se događa kada se, najčešće nakon beta-raspada, jezgra-kćer nađe u tzv. **metastabilnom stanju**. Iako je metastabilno stanje povišene

energije, prijelazi u niža stanja malo su vjerojatni, tako da se jezgra u tom stanju nalazi relativno dugo.

U radionuklidnoj slikovnoj dijagnostici korisne su samo gama zrake, dok se beta zračenje apsorbira u tijelu, uzrokujući nepotrebno radijacijsko opterećenje.

Metastabilni gama emiteri najpovoljniji su za primjenu u radionuklidnoj slikovnoj dijagnostici zbog dva razloga:

1. Ukoliko ih izoliramo od radioizotopa roditelja (koji je obično beta emiter), dobivamo čiste gama emitere, bez nepotrebnog čestičnog zračenja;
2. Relativna sporost njihovog raspada omogućava primjenu, bez potrebe da je stalno u blizini njihov "proizvođač" (jezgre-roditelji).

RADIOAKTIVNE JEZGRE UMIRU ALI NE STARE

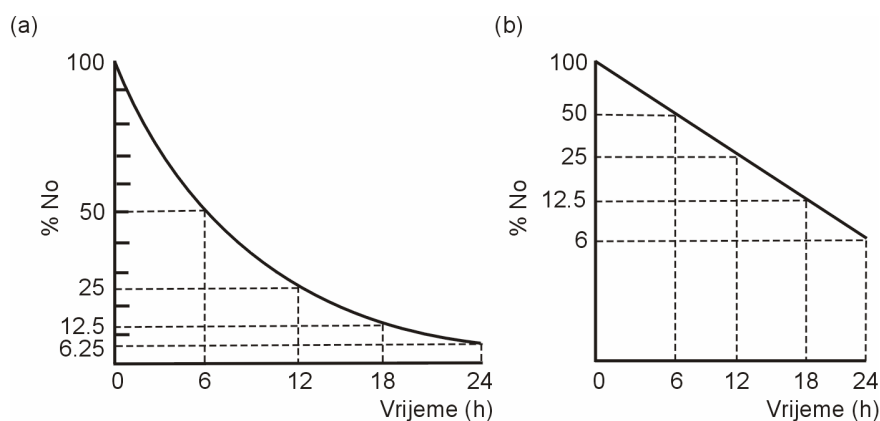
Nestabilne jezgre doživljavaju pretvorbe iznenada, a ne tako da postupno mijenjaju svoju strukturu. One nisu poput živih bića koja postepeno stare, te im život uglavnom traje u uskom pojasu oko nekog prosjeka. Nasuprot tome, radioaktivni raspad možemo usporediti s ruletom ili s igrom bacanja novčića, gdje jedan od brojeva ili jedan ishod (pismo ili glava) znači smrt, a svi ostali ishodi život. Jezgra koja je preživjela više krugova ruleta ("stara" jezgra) ne razlikuje se od one koja još nije bila u igri (novonastala, "mlada" jezgra).

→ *Dakle, nestabilna jezgra ima određenu vjerojatnost raspada u jedinici vremena koja ne ovisi o njenoj prošlosti, tj. stalna je u vremenu.*

Ta vjerojatnost, svojstvena svakom radioizotopu, zove se **konstanta raspada (λ)**, a jedinica joj je 1/sekunda.

Promotrimo što se u vremenu događa s 1 milijun jezgri nekog radioizotopa. Usporedimo radioaktivni raspad s bacanjem novčića. Zamislimo da istodobno bacamo 1 milijun novčića, te da "glava" znači život a "pismo" smrt. Nakon prvog bacanja preživiti će oko 500 000 jezgri, jer su pojedinačne vjerojatnosti ishoda jednake i iznose 0.5. Nakon drugog bacanja ostat će oko 250 000 jezgri-roditelja, potom približno 125 000 itd. Drugim riječima, istekom određenog vremena (danom učestalošću "bacanja novčića", koja je to veća što je radioizotop nestabilniji) ostat će 1/2 od početnog broja jezgra, potom, nakon istog vremena, 1/2 od 1/2 (tj. 1/4), pa 1/8, itd. To je vrijeme, kao i konstanta raspada, svojstveno za određeni radioizotop i zove se **vrijeme poluraspada** ili **poluživot ($T_{1/2}$)**.

U slučaju Tc-99m ono iznosi 6 sati (SLIKA 1.3).



SLIKA 1.3 Početna količina No radionuklida Tc-99m u vremenu i prikazana u linearnoj (a) i logaritamskoj skali (b).

Radioizotopi koji se sporo raspadaju (imaju mali λ i veliki $T_{1/2}$) mogu se naći u prirodi, dok su radioizotopi s vrlo nestabilnim jezgrama (veliki λ i mali $T_{1/2}$) isključivo umjetni (TABLICA 1.1).

TABLICA 1.1 Vremena poluraspada ($T_{1/2}$) nekih radionuklida

Radioizotop	Element	$T_{1/2}$
<i>Prirodni</i>		
U-238	uran	4.5 milijardi godina
Ra-226	radij	1600 godina
K-40	kalij	1.3 milijarde godina
C-14	ugljik	5760 godina
H-3	vodik	12 godina
<i>Umjetni</i>		
Cs-137	cezij	33 godine
I-131	jod	8 dana
I-125	jod	60 dana
Co-60	kobalt	5.3 godine
P-32	fosfor	14.3 dana
Na-24	natrij	15 sati
Tc-99m	tehnećij	6 sati

Promotrimo sada što se događa s naših milijun jezgri u vrlo kratkom vremenu, kada je promjena njihovog ukupnog broja zbog raspada zanemariva. Neka je npr. konstanta raspada 0.1 % u jednoj sekundi, dakle $\lambda=0.001/\text{s}$. Statistički očekivani broj raspada u jednoj sekundi bit će $0.001 \times 1000\,000 = 1000$. U realnosti taj broj može biti npr. 940 ili 1080, a vrlo rijetko će biti baš 1000.

→ Dakle, radioaktivni je raspad slučajna pojava za kojeg vrijede zakoni statistike, bez mogućnosti potpuno točnog predviđanja.

Općenito, ako u nekom vremenu t postoji $N(t)$ jezgri radioizotopa čija je konstanta raspada λ , ukupan broj raspada u 1 sekundi bit će približno jednak umnošku vjerojatnosti jednog raspada λ i broja prisutnih jezgri $N(t)$. Broj raspada jezgri radioizotopa u jedinici vremena $-\Delta N(t)/\Delta t$ zove se **radioaktivnost** ili kratko **aktivnost** i obilježava s $A(t)$. Dakle,

$$A(t) = -\Delta N(t)/\Delta t \quad (1.1)$$

$$\Delta N(t)/\Delta t = -\lambda N(t)$$

Predznak minus uvažava činjenicu da se N u vremenu smanjuje. Rješenje gornje diferencijalne jednadžbe pokazuje da se broj radioaktivnih jezgri u vremenu eksponencijalno smanjuje po formuli:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.2)$$

gdje N_0 označava broj jezgri u početnom vremenu $t=0$. Iz gornje jednadžbe dobivamo da je veza između konstante raspada i vremena poluraspada:

$$\lambda = \ln(2)/T_{1/2}$$

te da se aktivnost radioizotopa u vremenu smanjuje po istom zakonu kao i broj njegovih jezgri:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1.3)$$

Jedinica je aktivnosti u SI sustavu bekerel (Bq). Jedan bekerel je jedan raspad u jednoj sekundi. Stara jedinica je kiri (Ci). Jedan kiri je $3.7 \cdot 10^{10}$ Bq.

Donja tablica sažima glavna svojstva alfa, beta i gama-raspada. "Čisti" alfa, beta ili gama emiteri su rijetki. Najčešći su kombinirani raspadi: alfa/gama, beta/gama.

TABLICA 1.2 Osnovna svojstva raznih vrsta radioaktivnih raspada

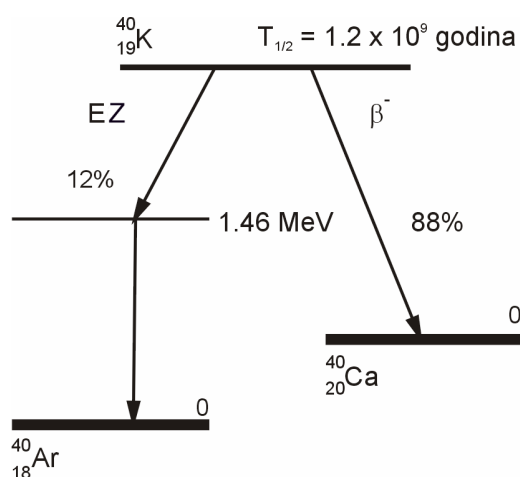
Raspad	Jezgra-roditelj	Jezgra-kćer	Zračenje
alfa	Z/N	Z-2 / N-2	jezgra He-4
beta-minus	Z/N	Z+1 / N-1	elektron
bete-plus	Z/N	Z-1 / N+1	pozitron
gama	Z/N	Z/N	gama foton

Ponekad su i jezgra-kćer, pa i jezgra-unuka i praunuka nestabilne, osobito u slučaju prirodnih radioizotopa. To su tzv. lančani radioaktivni raspad (TABLICA 1.3).

TABLICA 1.3 Postepeno pretvaranje U-238 u stabilno Pb-206.

Element	Izotop	Poluživot	Vrsta radijacije
Uran	U-238	4.55×10^9 godina	α
Torij	Th-234	24.1 dan	β, γ
Protaktinij	Pa-234	1.14 min	β, γ
Uran	U-234	2.69×10^5 godina	α
Torij	Th-230	8.22×10^4 godina	α, γ
Radij	Ra-226	1600 godina	α, γ
Radon	Rn-222	3.8 dana	α
Polonij	Po-218	3.05 min	α
Olovo	Pb-214	26.8 min	β, γ
Bizmut	Bi-214	19.7 min	α, β, γ
Polonij	Po-214	1.5×10^{-4} s	α
Olovo	Pb-210	22.2 godine	β, γ
Bizmut	Bi-210	4.97 dana	β
Polonij	Po-210	139 dana	α, γ
Olovo	Pb-206	Stabilan	-

Također su moguća grananja, kada se određeni radioizotop može raspadati na više načina, kao npr. K-40 (SLIKA 1.4).



SLIKA 1.4 Kalij-40 se vrlo sporo raspada, i to na dva načina; na svakih 100 raspada prosječno 88 puta se radi o β -minus raspadu, ostatak je elektronski zahvat, kojeg prati i gama zračenje.

Prolaz zračenja kroz materiju

RADIOAKTIVNA ZRAČENJA IONIZIRAJU MATERIJU

Infracrveno zračenje i vidljiva svjetlost, pobuđujući rotaciju i titranja molekula, zagrijavaju sredstvo kojim se šire. Osim toplinske interakcije, vidljiva, a posebice ultraljubičasta svjetlost može i osloboditi slabo vezane valentne elektrone atoma sredstva. Za razliku od tih zračenja i mehaničkih valova, gama fotoni, a posebice čestično zračenje imaju dovoljnu energiju da, prolazom kroz sredstvo, izbace iz svojih orbitala čak i dobro vezane unutrašnje elektrone teških atoma. Štoviše, jedan gama foton ili brza nabijena čestica može **ionizirati** nekoliko tisuća atoma sredstva.

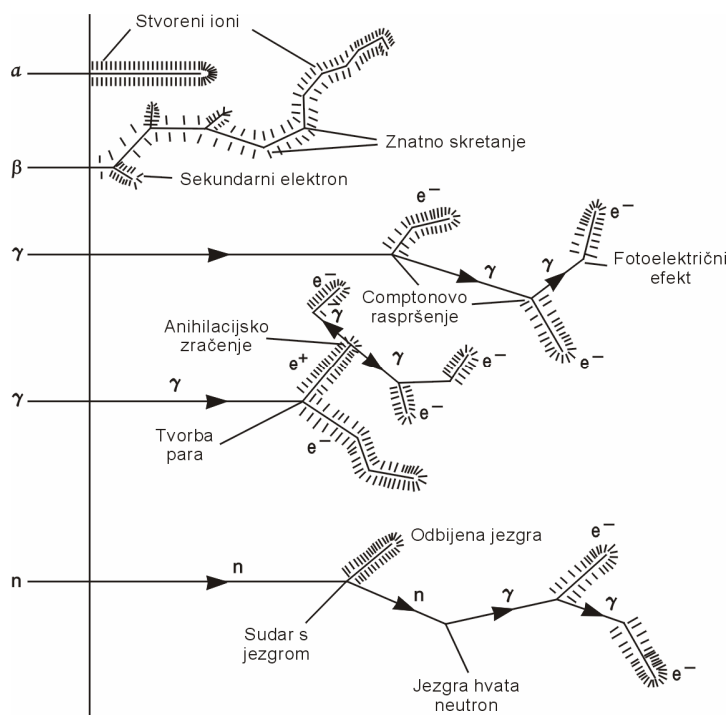
→ Mogućnost ionizacije osnovna je posljedica prolaza radioaktivnih zračenja kroz materiju, pa radioaktivna zračenja nazimo i ionizirajuća zračenja.

ČESTIČNO ZRAČENJE GUBI ENERGIJU POSTUPNO

Alfa i beta čestice najčešće gube energiju međudjelujući s elektronskim omotačima atoma sredstva kroz koji prolaze. Male porcije njihove ogromne energije postepeno se troše na ekscitaciju (pobuđivanje na više energijske razine) i ionizaciju tisuća elektrona atoma mete, pretežno iz vanjskih ljusaka. Pri tome alfa čestica malo skreće s puta jer ima relativno veliku masu, te joj je putanja pravocrtna (SLIKA 1.5). Tako je ukupna dužina puta alfa čestice u nekom sredstvu, veličina koju zovemo **doseg**, jednaka njezinoj dubini prodiranja, koja je približno jednaka za sve alfa čestice iste energije u istom sredstvu (SLIKA 1.6A). Doseg alfa čestica veće energije veći je od dosega alfa čestice manje energije, ali nije veći od par centimetara u zraku za većinu alfa čestica. To nije u suprotnosti s njihovom velikom energijom, jer alfa čestice svoju energiju predaju "gusto", tako da se cijela istroši na malom putu. Tako je **specifična ionizacija**, tj. broj oslobođenih parova iona sredstva po jedinici duljine puta čestice, za alfa čestice velika.

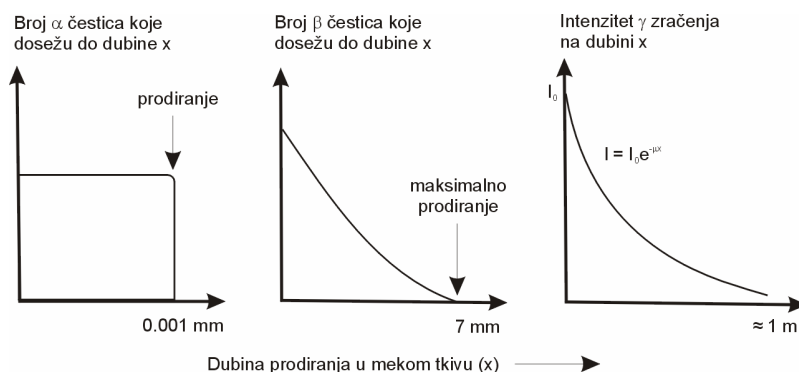
→ *Tako alfa čestice potpuno zaustavlja gornji sloj ljudske kože, te izvana ne mogu prodrijeti do osjetljivih unutrašnjih organa. Nasuprot tome, alfa su čestice vrlo opasne kada se unesu ingestijom ili disanjem, jer se potpuno apsorbiraju u malom volumenu osjetljivog tkiva, kojeg mogu sasvim uništiti. U šali možemo reći da alfa emiteri nisu opasni kao vanjski izvori zračenja, ali ih nije preporučljivo jesti.*

Beta čestica ima oko 7 000 puta manju masu od alfa čestice i, naravno, istu masu kao elektroni iz omotača sredstva kojim prolazi. Stoga beta čestica, sudarajući se s elektronima atoma sredstva, tetura te joj je putanja krivocrtna (SLIKA 1.5). Beta čestice iste energije nemaju isti doseg, a još više im varira dubina prodiranja, koja je, zbog krivocrtnog putanja, uvijek manja od dosega. Ipak, zbog puno manje specifične ionizacije, maksimalna je dubina prodiranja beta čestica u nekom sredstvu višestruko veća od dubine prodiranja alfa čestica (SLIKE 1.6 A i B).



SLIKA 1.5 Shematski prikaz tragova ionizacijskih zračenja.

Osim međudjelovanja s elektronskim omotačima atoma, vrlo brze, lagane nabijene čestice (β čestice ili elektroni ubrzani u snažnom električnom polju) jedan dio svoje energije gube i međudjelujući s jezgrom atoma sredstva. Time se brzi elektroni usporavaju, dok im se energija oslobađa vidom elektromagnetnog zračenja velike energije. To su tzv. X zrake ili rendgensko zračenje. X fotoni se od gama fotona razlikuju po načinu nastanka, a zajedničko im je svojstvo da imaju veliku energiju, te su i jedni i drugi elektromagnetna (nečestična) ionizirajuća zračenja. Energije X fotona koji se koriste u dijagnostičkoj radiologiji manje su od većine gama zraka, dok se u radioterapiji koriste i X fotoni energija viših od 1 MeV. Ako ne znamo kako je visoko-energetski foton nastao, ne možemo niti reći da li se radi o X ili o gama zruci, te ih, glede međudjelovanja s materijom, ne razlikujemo.



SLIKA 1.6 Prodiranje ionizacijskih zračenja energije 1 MeV u mekom tkivu.

ČESTIČNO ZRAČENJE NAJVIŠE IONIZIRA NA KRAJU PUTA

Specifična ionizacija alfa čestica veća je od specifične ionizacije beta čestica zato što se alfa čestica kreće puno sporije od elektrona (jer ima veću masu), te duže i stoga intenzivnije međudjeluje s elektronima atoma pored kojih prolazi. Tako će spori kamen potpuno razbiti prozor, dok će puščani metak, koji ima puno veću kinetičku energiju, napraviti samo malu rupu. Iz istog se razloga specifična ionizacija i alfa i beta čestice povećava kako one gube brzinu (energiju) i najveća im je pri kraju puta (SLIKA 1.5).

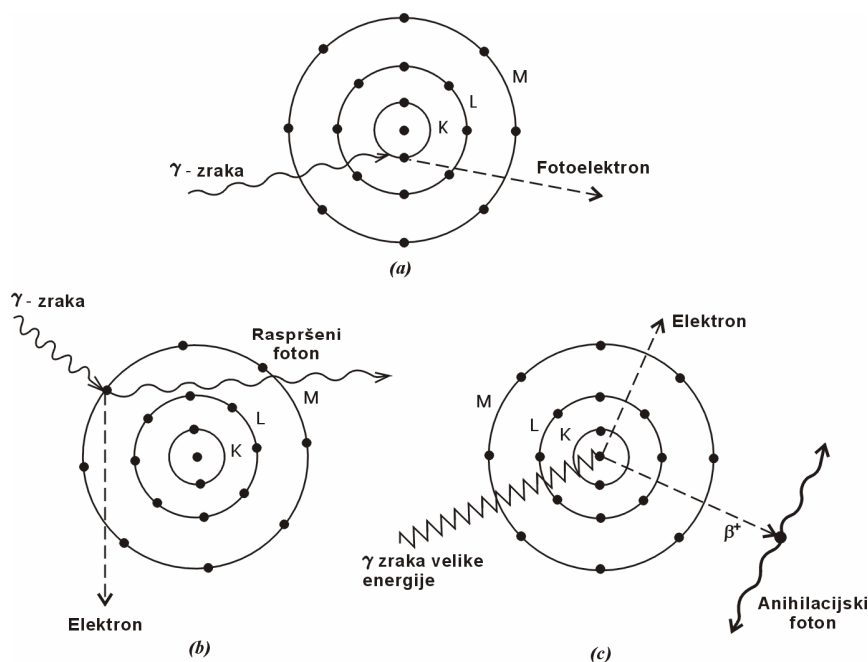
GAMA ZRAKE GUBE ENERGIJU ODJEDNOM ILI U PAR KORAKA

Za razliku od čestičnog zračenja gama foton prolazi kroz materiju bez ikakvog međudjelovanja, nepromijenjen, sve dok odjednom burno ne reagira, predajući svu ili velik dio svoje energije okolini. Kao što u radiokativnom raspadu ne možemo znati kada će jezgra doživjeti pretvorbu, ne možemo niti predvidjeti s kojim će atomom gama foton međudjelovati. Postoje, međutim, određene vjerojatnosti tih međudjelovanja, koje ovise, o "projektilu" (energiji gama zrake E_γ) i o svojstvima "mete" (gustoći sredstva i atomskom broju elementa). Tri su načina međudjelovanja gama fotona i materije (SLIKA 1.7):

1. U **fotoelektričnom efektu** gama (ili X) foton nestaje, predajući **svu** svoju energiju vezanom elektronu atoma sredstva, koji zadobiva veliki kinetičku energiju, napušta atom i vrši daljnje ionizacije (poput beta čestica, kako smo upravo opisali). Fotoelektrični je efekt vjerojatniji u snažnom električnom polju blizu jezgre, nego u slučaju slabo vezanih, vanjskih elektrona. Njegova vjerojatnost raste s kubom atomskog broja, tako da je puno učestaliji u teških elementa, s visokim Z , nego u onih s niskim Z . Dakako, potrebno je da energija gama zrake E_γ bude barem jednaka energiji veze elektrona. Obzirom da je energija veze K elektrona (elektrona iz prve, tzv. K ljuske) u atomu joda 33 keV, a u atomu olova 88 keV, fotoni energija od 33 do 88 keV mogu ionizirati K elektrone joda, ali ne i olova. Fotoelektrični je efekt najvjerojatniji kada je E_γ tek malo veća od energije veze elektrona. Međutim, daljnjim porastom E_γ njegova vjerojatnost pada (SLIKA 1.8).
2. Foton visoke energije može međudjelovati i sa slabo vezanim vanjskim (ili slobodnim) elektronima na način sličan sudaru dviju biljarskih kugli. U sudaru atomski elektron prima **dio** energije E_γ i biva izbačen iz atoma (te vrši daljnje ionizacije, kao i elektron oslobođen fotoelektričnim efektom), dok ostatak odnosi foton **manje** energije, gibajući se **u različitom** smjeru od smjera početne gama (ili X) zrake (SLIKA 1.7). Pri tome je vjerojatnija mala od velike promjene smjera (i gubitka energije), a cijeli se proces naziva **Comptonovo raspršenje (ili Comptonov efekt)**. Kao što će se najviše energije izmijeniti u sudaru kugli iste mase, tako je i Comptonov efekt najvjerojatniji za gama zrake čija je energija jednaka energijskom ekvivalentu mase elektrona, tj. za $E_\gamma = 511$ keV (SLIKA 1.8). Obzirom da se radi o gotovo slobodnim elektronima, nema utjecaja jezgre, pa Comptonovo raspršenje ne ovisi o vrsti atoma sredstva (o

atomskom broju), već samo o gustoći “meta”. Gustoća slabo vezanih elektrona približno je proporcionalna gustoći sredstva. Stoga, za danu E_γ , učestalost Comptonovog raspršenja u nekom sredstvu ovisi samo o njegovoj gustoći.

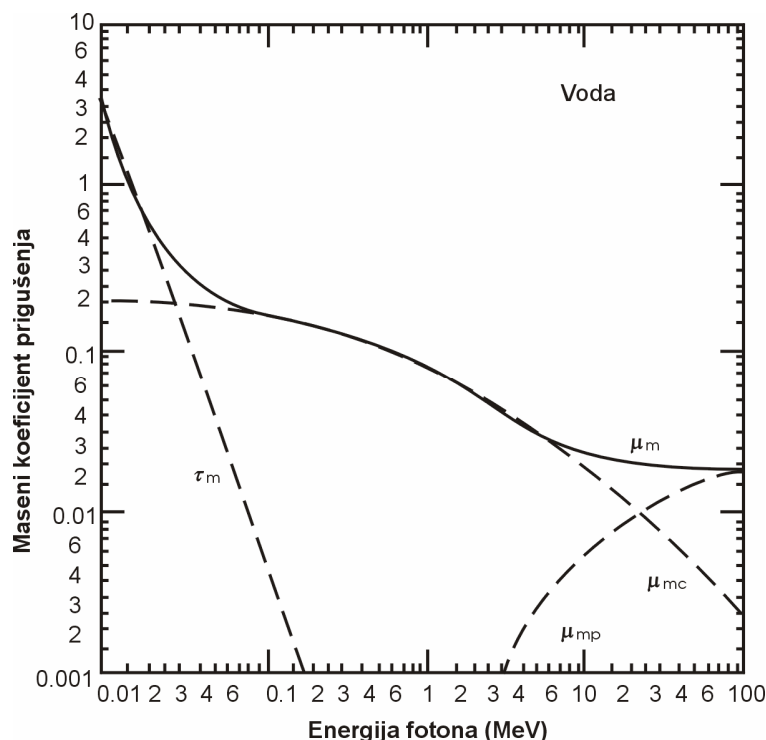
3. Fotoni vrlo visoke energije E_γ mogu gubiti energiju na još jedan način. Kada se takav foton nađe u snažnom električnom polju, blizu teške atomske jezgre, moguće je da nestane, dok se njegova energija utroši na stvaranje para elektron/pozitron (SLIKA 1.7). Obzirom da je zbroj masa mirovanja elektrona i pozitrona 1.02 MeV (2·511 keV), E_γ mora biti barem tolika ili veća (kada je ostatak energije kinetička energija novo-stvorenih čestica). Obzirom da je pozitron antičestica, to ovaj proces, koji se zove **tvorba para**, uvijek prati anihilacijsko zračenje, kao u slučaju beta-plus raspada. Ovaj je proces bitan samo za fotone vrlo visokih energija (samo neke gama zrake i X fotone koji se koriste u radioterapiji) i učestaliji je u sredstvima s visokim atomskim brojem.



SLIKA 1.7 Gama foton gubi energiju na tri načina: (a) u fotoelektričnom efektu svu energiju predaje foto-elektronu, (b) u Comptonovom raspršenju dio energije predaje elektronu, a oslabljeni foton nastavlja put u drugom smjeru i (c) u tvorbi parova od gama zrake nastaju elektron i pozitron. Nakon kratkog puta anihilacijom pozitrona nastaju dvije gama zrake od 511 keV, koje odlaze u dijametralno nasuprotnim smjerovima.

Bez obzira na vrstu međudjelovanja s materijom, jedan gama (ili X) foton ionizira samo jedan atom, dok ostale tisuće ionizacija vrše oslobođene brze nabijene čestice (i, pokoji, fotoni nastali Comptonovim raspršenjem).

→ Dakle, čestično zračenje ionizira neposredno, a gama zrake posredno.



SLIKA 1.8. Maseni koeficijent prigušenja (μ_m) u funkciji energije fotona, prikazan kao zbroj tri komponente: masenih koeficijenata prigušenja za fotoelektrični efekt (τ_m), Comptonovo raspršenje (μ_{mc}) i tvorbu parova (μ_{mp}).

GAMA ZRAKE SU PRODORNIJE OD ČESTIČNOG ZRAČENJA

Nasuprot brzim nabijenim česticama koje kontinuirano gube energiju, gama (ili X) fotoni nemaju definiran doseg. Prolaz visoko-energetskih fotona kroz materiju slični na raspad nestabilne jezgre: foton koji je prošao izvjestan sloj materije (apsorbera) ima nepromijenjenu energiju i iste vjerojatnosti međudjelovanja kao na početku puta, kao što nestabilna jezgra ne mijenja svojstva prije samog raspada. Tako, kao što se broj radioaktivnih jezgri protekom vremena eksponencijalno smanjuje u nulu (jednadžba 1.2), tako se i početni intenzitet fotonskog zračenja (snaga po jedinici površine snopa) energije E_γ , I_0 , eksponencijalno smanji prolazom kroz apsorber debljine d , po jednadžbi:

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad (1.4)$$

gdje je μ zbroj vjerojatnosti svih procesa koji mogu ukloniti foton iz pravca širenja (fotoelektričnog efekta, Comptonovog efekta i tvorbe para), po jedinici duljine puta. Ta se veličina zove **linearni koeficijent prigušenja** i ovisi, kako o energiji gama zrake, tako i o sredstvu, dakle:

$$\mu = \mu(E_\gamma, \text{sredstvo})$$

Linearni koeficijent prigušenja veći je u materijalima velike gustoće i velikog atomskog broja, koji su, dakle, dobri apsorberi elektromagnetnog ionizirajućeg zračenja.

Iz jednadžbe (1.4) slijedi da je debljina sloja apsorbera koji početni intenzitet zračenja smanji na 1/2, tzv. **debljina poluprigušenja** ($d_{1/2}$) povezana s linearnim koeficijentom atenuacije:

$$d_{1/2} = \ln 2 / \mu$$

Umjesto linearnog koeficijenta prigušenja μ često je u uporabi i tzv. **maseni koeficijent prigušenja** $\mu_p = \mu / \rho$. Time se naglašava ovisnost interakcije fotona o vrsti atoma sredstva, bez obzira na gustoću sredstva. Tako je μ_p za vodu isti bez obzira da li se radi o tekućoj vodi, ledu ili vodenoj pari. U toj notaciji jednažba (1.4) glasi:

$$I = I_0 e^{-\mu_p (\rho d)}$$

gdje se umnožak gustoće i debljine apsorbera naziva **površinska gustoća** (dimenzija je masa/površina). Iz SLIKE 8 vidimo da ukupna vjerojatnost međudjelovanja gama fotona s materijom opada s porastom energije fotona, tako da:

→ *Gama fotoni veće energije prodorniji su od gama fotona manje energije*

Općenito, gama i X zračenja prodornija su od čestičnog zračenja i nije moguća potpuna zaštita zaklanjanjem iza apsorbera. U drugu ruku velika prodornost elektromagnetnih ionizirajućih zračenja koristi se u radiološkoj dijagnostici i radioterapiji, kao i u radionuklidnoj slikovnoj dijagnostici.

U praksi jednadžbu (1.4) ne možemo izravno primijeniti zbog dva razloga. 1. Ako se foton iz snopa ukloni Comptonovim efektom, raspršeni se foton oslabljenje energije može, nakon novih višestrukih rasršenja, vratiti u snop i tako povećati njegov intenzitet. Zato je jednadžba (1.4) primjenjiva u uvjetima uskog snopa, kada je opisana pojava zanemariva. Kod širokog snopa intenziteti zračenja mogu biti nekoliko puta veći od onog kojeg predviđa jednadžba (1.4). 2. Ponekad i sam početni snop nije monoenergijski (prisutno je više gama raspada raznih energija ili se radi o X zračenju, koje je uvijek polikromatsko). Tada jednadžbu (1.4) primjenjujemo za svaku energiju E_γ zasebno.

Dozimetrija

IZVOR I POLJE IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

Izvor ionizirajućeg zračenja može biti skup nestabilnih jezgri, katoda rendgenskog uređaja ili druga umjetna naprava. U prvom slučaju bitna svojstva izvora zračenja su:

1. geometrija, u smislu da li je rasprostranjen u prostoru ili praktično točkast
2. vrsta raspada, čime su određene energije čestica i fotona, te konstanta raspada λ
3. broj nestabilnih jezgri u nekom vremenu N_0 .

Poznavanjem N_0 i λ možemo, koristeći jednadžbe 1.1 i 1.3, izračunati trenutnu aktivnost izvora $A_0 = \lambda N_0$, kao i njene promjene u vremenu: $A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$. Iz aktivnosti izvora, vrsta i energije zračenja, moguće je proračunati snagu izvora zračenja P . Snagom zračenja i geometrijom izvora određen je i intenzitet zračenja I (snaga po jedinici površine) u nekoj točki prostora koji je izložen djelovanju izvora, tj. u **polju ionizirajućeg zračenja**.

Pretpostavimo jednostavan slučaj *točkastog izvora zračenja u vakuumu*, tako da nema međudjelovanja ionizirajućeg zračenja s materijom. Tada intenzitet zračenja opada s udaljenošću od izvora R jer se čestice i fotoni raspršuju po sve većim površinama. Taj pad intenziteta moramo razlikovati od onog kojem je uzrok međudjelovanje s apsorberom.

Kako je površina kugle $4\pi R^2$, slijedi da **intenzitet opada s kvadratom udaljenosti** od izvora zračenja po jednadžbi:

$$I = P/4\pi R^2$$

Snaga zračenja proporcionalna je aktivnosti izvora, tako da vrijedi:

$$I \sim A/4\pi R^2$$

Ako se nalazimo u polju zračenja, radijacijski će učinci (o kojima govorimo u nastavku) biti proporcionalni *aktivnosti* izvora i *vremenu* izlaganja, a obrnuto proporcionalni *kvadratu udaljenosti* od izvora. Obzirom da aktivnost izvora ne možemo mijenjati, dva su osnovna načela zaštite od ionizirajućeg zračenja:

1. **što kraće**
2. **što dalje,**

s tim da je udaljavanje od izvora, zbog kvadratne ovisnosti, učinkovitiji način smanjenja izlaganja ionizirajućem zračenju.

UČINKE ZRAČENJA OPISUJEMO DVJEMA VELIČINAMA

Učinci ionizirajućeg zračenja ovise o:

- (i) intenzitetu zračenja u promatranoj točki polja
- (ii) vjerojatnostima međudjelovanja zračenja i sredstva

Te učinke opisujemo dvjema veličinama:

1. **apsorbirana doza** je energija koju je ionizirajuće zračenje predalo jediničnoj masi sredstva (apsorbera). Jedinica je **grej (Gy)**. Jedan grey je džul/kilogram (J/kg).
2. **ekspozicijska doza** je ukupan naboj svih iona (pozitivnih i negativnih) koje *X ili gama* zračenje oslobodilo u jediničnoj masi *zraka*. Jedinica je **kulon/kilogram (C/kg)**.

TABLICA 1.4 Tipične doze

Izvor	Apsorbirana doza (mGy)
Prirodni izvori radioaktivnosti	1-5 godišnje
Jedna X-slika prsnog koša	
Najbolja	0.1
Prosječna	2
fluoroskopski pregled	100
Lokalna radioterapijska doza	30 000-70 000

Apsorbirana i ekspozicijska doza opisuju kumulativne posljedice zračenja na jediničnu masu tvari tijekom nekog vremena provedenog u polju zračenja određene vrste i intenziteta. Podijelimo li te veličine s vremenom izlaganja, dobit ćemo o vremenu neovisne veličine; to su **brzina apsorbirane doze**, čija je jedinica Gy/s i **brzina ekspozicijske doze**, čija je jedinica C/(kg·s).

TABLICA 1.5. Odnos novih i starih jedinica

Veličina	Nove jedinice	Stare jedinice	Pretvaranje
Aktivnost	Bq	curie (Ci)	$1 \text{ Bq} \approx 2.7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$
Ekspozicijska doza	C kg ⁻¹	röntgen	$1 \text{ C kg}^{-1} \approx 3876 \text{ R}$
Apsorbirana doza	Gy	rad	$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$
Ekvivalentna doza	Sv	rem	$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$

UČINKE ZRAČENJA MOŽEMO PREDVIDJETI ILI MJERITI

U slučaju točkastog izvora gama zračenja brzina ekspozicijske doze jednaka je na oplošju kugle polumjera R i proporcionalna je aktivnosti izvora A :

$$\text{brzina ekspozicijske doze} = \Gamma \cdot A/R^2$$

gdje konstanta proporcionalnosti Γ (tzv. gama konstanta), ovisi o energiji gama zraka E_γ (jer o njoj ovise vjerojatnosti svih procesa u kojima gama zrake ioniziraju sredstvo i gube energiju). Gama konstanta opisuje razlike u učinku izvora gama zraka iste aktivnosti. Iako porastom E_γ vjerojatnost međudjelovanja gama zrake s materijom opada (SLIKA 1.8), broj oslobođenih iona po jednoj interakciji raste, pa općenito gama zrake većih energija imaju veće gama konstante (TABLICA 1.6). Osim toga, zbog veće prodornosti gama i X fotona velikih energija, njihov učinak sporo opada s debljinom tkiva, za razliku od onih nižih energija, čiji se učinak očituje pretežito na koži i površinskim organima.

TABLICA 1.6. Radijacijski parametri nekih radionuklida

	E_γ (keV)	$\Gamma(\text{Cm}^2/\text{kg Bq s}) \times 10^{14}$	μ (cm ⁻¹) -u olovu
Tc-99m	140	0.14	23
Hg-203	279	0.23	2.3
J-131	360	0.43	2.3
Au-198	412	0.45	2.3
F-18	512	1.11	0.76
Cs-137	667	0.60	1.20
Co-60	1250	0.52	0.58

APSORBIRANA SE DOZA MOŽE PROCIJENITI MJERENJEM EKSPOZICIJSKE

Ako je sredstvo živo tkivo, apsorbirana doza je pokazatelj biološke štete koju je radijacija uzrokovala. U drugu ruku, ekspozicijsku dozu je relativno lako mjeriti. Te su veličine izravno povezane i stoga je moguće apsorbiranu dozu elektromagnetnih zračenja predvidjeti iz njihove ekspozicijske doze.

Naime, prosječna energija potrebna da se u zraku ‘stvori’ jedan ionski par (tj. oslobodi jedan elektron) je 34 eV. Kako je $1 \text{ C/kg} = (1/1.6) \cdot 10^{19}$ naboja jednog elektrona po kilogramu, slijedi da je:

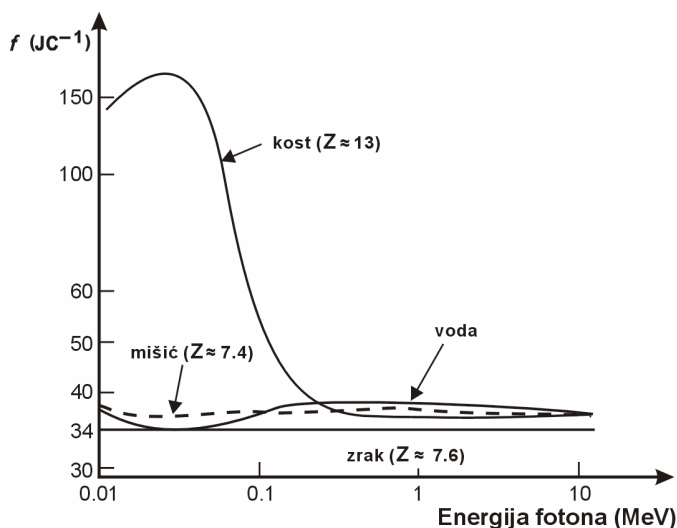
$$\text{apsorbirana doza (Gy)} = 34 \cdot \text{ekspozicijska doza (C/kg)}, \text{ ako je sredstvo zrak}$$

Općenito, za bilo koje sredstvo vrijedi relacija:

$$\text{apsorbirana doza (Gy)} = f \cdot \text{ekspozicijska doza (C/kg)}$$

gdje faktor f ovisi o vrsti apsorbera, a za niske energije fotona (manje od 100 keV), u sredstvima koja imaju relativno teške atome (npr. kost), i o energiji fotona (SLIKA 1.9). Za energije fotona iznad 100 keV veza između apsorbirane i ekspozicijske doze praktično je ista za zrak, meka tkiva i kosti (objasnite zašto, uzimajući u obzir: 1. iznad 100 keV dominantan proces interakcije

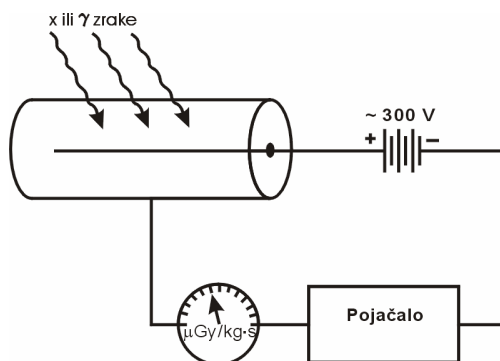
elektromagnetnog zračenja i materije je Comptonovo raspršenje i 2. apsorbirana se doza odnosi na jediničnu masu tvari).



SLIKA 1.9 Omjer (f) apsorbirane i ekspozicijske doze ovisi o energiji fotona različito za razna tkiva.

Uočimo da izloženo vrijedi samo za X i gama zračenja, jer ekspozicijska doza nije definirana za čestična zračenja. Razlog tome je što čestična zračenja, osim na ionizaciju molekula zraka, jedan dio energije (ovisno o energiji) izravno potroše i na njihovu ekscitaciju, te na zagrijavanje sredstva (povećanje kinetičke energije molekula). Slično se događa i u slučaju valnih zračenja niskih energija u teškim materijalima, što objašnjava ovisnost faktora f o energiji fotona u kostima (Slika 1.9).

Često ne znamo karakteristike izvora polja zračenja, ali njegove učinke možemo neposredno izmjeriti. Mjerenja brzine ekspozicijske doze vrše se **ionizacijskim komorama**. Najčešće se radi se o posudi sa zrakom na atmosferskom tlaku u kojoj su pozitivna i negativna elektroda. Kada zračenje uđe u posudu i ionizira zrak oslobođeni se pozitivni ioni skupljaju na katodi, a elektroni na anodi. Time se stvara struja u vanjskom krugu koja se može mjeriti (SLIKA 1.10).



SLIKA 1.10 Prenosiva ionizacijska komora (Cutie Pie) sastoji se od posude s plinom, izvora visokog napona i uređaja za mjerenje jakosti proizvedene struje.

U ionizacijskim komorama elektrode su na potencijalu čije električno polje samo prikuplja ione oslobođene primarnom ionizacijom. Naime, električno polje nije dovoljno za ubrzavanje iona, čime se izbjegavaju sekundarne ionizacije.

Ionizacijske se komore koriste kada su potrebna precizna mjerenja polja zračenja, što je osobito važno u planiranju radioterapije.

Nasuprot tome, u tzv. **Geiger-Müllerovim (GM) brojačima** napon je veći i primarni ioni, na putu prema elektrodama stvaraju 'lavinu' sekundarnih iona. Posljedično GM brojači ne mjere brzinu ekspozicijske doze, već samo učestalost ionizacija. Ipak njihova je prednost što, zbog unutrašnjeg pojačanja 'signala', mogu detektirati ionizirajuća zračenja relativno malih energija. U praksi se koriste za nadzor i detekciju prisutnosti izvora zračenja, kada nije potrebna osobita preciznost.

IONIZACIJA JE BIOLOŠKI ŠTETNA

Ionizacijska zračenja mogu značajno oštetiti stanice organizma, ovisno o:

- (i) dijelu tijela koje je izloženo (stanice koje se brzo dijele su najosjetljivije)
- (ii) apsorbiranoj dozi
- (iii) vrsti ionizirajućeg zračenja
- (iv) brzini kojom je doza primljena (duže vrijeme omogućava oporavak)

Primjeri radijacijskih učinaka su: kožne opekline, mučnina, gubitak dlakavosti, sterilnost, katarakta, oštećenje koštane srži, promjene u genetskom materijalu i indukcija raznih karcinoma. Vrlo velike doze mogu uzrokovati smrt u roku od nekoliko dana.

Radijacija oštećuje stanice ionizirajući biološki važne molekule poput DNA, što je **neposredni učinak**, ili uzrokujući kemijske promjene intracelularne vode, što je **posredni učinak**. Interakcijom radijacije i vode mogu nastati **slobodni radikali** H i OH. Oni su električki neutralni, ali imaju nesparene elektrone i vrlo su reaktivni. Njihovim spajanjem može nastati vodikov peroksid (H_2O_2), snažan oksidans koji oštećuje DNA, enzime i druge biološki važne molekule. Posredni učinci radijacije su češći od neposrednih jer vode ima puno više od molekula DNA (oko 10^7 puta).

Učinci radijacije mogu biti **hereditarni** ili **somatski**. Hereditarni nastaju zbog oštećenja stanica koje učestvuju u reprodukciji i prenose se na potomstvo. Somatski učinci pogađaju samo osobu koja je bila izložena zračenju.

Biološke učinke radijacije također dijelimo na **stohastične** (podložne slučaju) i **ne-stohastične**. Stohastični učinci nastaju zbog mutacije stanica. Oni nemaju prag, već mogu nastati i posljedicom malih apsorbiranih doza zračenja. Međutim, vjerojatnost njihovog pojavljivanja proporcionalna je primljenoj dozi. U drugu ruku, ukoliko se pojavi, ozbiljnost stohastičnog učinka ne ovisi o primljenoj dozi ('ili-ili'). Svi hereditarni učinci su stohastični, kao i neki somatski (npr. karcinogeneza).

Ne-stohastični učinci nastaju zbog smrti stanica ili trajnog oštećenja koja onemogućava da se stanica dijeli. Nastaju tek iznad specifičnog praga apsorbirane

doze i ozbiljnost im raste s njenom veličinom. Svi ne-stohastični učinci su somatski (npr. eritem, katarakta, leukopenija, glomerulonefritis, sterilnost).

Doze primljene u slikovnoj dijagnostici ionizirajućim zračenjem manje su od većine pragova ne-stohastičnih učinaka radijacije. Stoga je dijagnostička uporaba X zraka i radionuklida uglavnom povezana sa stohastičnim radijacijskim rizicima.

Biološka šteta koju uzrokuju ionizirajuća zračenja ne ovisi samo o apsorbiranoj dozi, već i o vrsti zračenja. Naime, veći broj ionizacija unutar jedne stanice (ili jedne makromolekule) biološki je nepovoljnije od istog broja ionizacija (dakle i iste apsorbirane energije) raspoređenih unutar više stanica (makromolekula). Neutroni i alfa čestice ioniziraju vrlo gusto, tako da je učestalost nepopravljivih, višestrukih oštećenja makromolekula veća nego u slučaju gama zraka ili beta čestica. Zbog toga je uveden pojam **ekvivalentne doze**:

$$\text{Ekvivalentna doza} = Q \text{ Apsorbirana doza}$$

gdje je Q tzv. **faktor kvalitete**. Za alfa čestice Q iznosi 20, za neutrone od 5 do 20 (ovisno o njihovoj energiji), a za beta čestice, gama i X fotone 1. Ako se apsorbirana doza izražava u grejima, jedinica ekvivalentne doze je **sivert (Sv)**. Stara je jedinica **rem** (1 rem=0.01 Sv).

Osim toga, osjetljivost na izlaganje zračenju (tzv. radio-senzitivnost) jako ovisi o vrsti tkiva. Zbog toga je uvedena još jedna veličina: **efektivna ekvivalentna doza**. Svakom se dijelu tijela pripisuje težinski faktor, koji odgovara specifičnoj radio-senzitivnosti. Efektivna ekvivalentna doza jednaka je umnošku odgovarajućeg težinskog faktora i ekvivalentne doze tog dijela tijela. Jedinica joj je sivert.

NAJVIŠE ZRAČENJA PRIMAMO OD PRIRODNIH IZVORA

Svi smo stalno u polju ionizirajućih zračenja niskih intenziteta, što zovemo **pozadinskim zračenjem**. Glavni uzrok pozadinskom zračenju su prirodni izvori radioaktivnosti. Od njih je najznačajniji alfa-emiter radon, karika u lancu raspada U-228 (TABLICA 1.3). To je plin, koji izlazi iz stijena koje sadrže uran (većina ga ima u tragovima, granitne najviše), te osobito iz rudnika urana. Zbog toga izlaganje radonu jako ovisi o zemljopisnom položaju i dobu dana (najviše je ujutro, kada je zrak miran). Također je primijećeno da je u nekim zgradama akumuliranje radona puno veće nego u drugim. Prosječno je u 1 m³ zraka oko 10⁶ atoma radona. Drugi prirodni izvori pozadinskog zračenja su kozmičke zrake (gama zrake ogromne energije), te prirodni radionuklidi u zemlji, građevinskim materijalima i hrani.

Čovjekova aktivnost, putem proizvodnje umjetnih izvora zračenja, odgovorna je za manji dio ukupnog pozadinskog zračenja. Primjeri su ispuštanje radionuklida zbog nesreća u nuklearnim elektranama, radioaktivni otpadni materijali, te proizvodnja uređaja široke potrošnje koji sadrže radionuklide (svjetleće kazaljke satova, detektori dima i sl.).

Neki od nas primaju dodatne doze zbog radioloških pretraga ili profesionalnog izlaganja. Prosječna apsorbirana doza zbog dijagnostičke uporabe elektromagnetnih ionizirajućih zračenja (uglavnom X zraka) čini preko 95 % od apsorbirane doze

zbog svih umjetnih izvora ionizirajućeg zračenja. Radioterapijske doze se ovdje ne uzimaju u obzir.

Detalji prikazani u TABLICI 1.7 samo su prosječne vrijednosti. Neke osobe mogu dobiti puno veće doze, ovisno o tome gdje žive, čime se bave, potrebi za dijagnostičkim postupcima i sl.

Tablica 1.7 Prosječna efektivna ekvivalentna doza stanovnika Velike Britanije (1991).

Izvor	Doza/ μ Sv	Postotak	Napomena
<i>Prirodni izvori</i>			
Radon	1300	50.1	
Gama zrake iz zemlje i građevinskog materijala	350	13.5	
Prirodni radionuklidi u hrani	300	11.6	
Svemirska zračenja	260	10.0	Avionske posade mogu dobiti do 10 puta više
<i>Umjetni izvori</i>			
Medicinska uporaba	370	14.3	Isključujući radioterapiju
Profesionalno izlaganje	7	0.27	
Radioaktivne padaline	5	0.19	Ovo opada od 1962., osim rasta 1986. zbog nesreće u Černobilu
Ispuštanja radionuklida	0.4	0.02	
Uređaji široke potrošnje	0.4	0.02	Satovi sa svjetlećim kazaljka, detektori dima, itd.