

# IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE I UČINCI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

---

Đurina, Mirna

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:526231>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-23**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Veleučilište u Karlovcu

Odjel Sigurnosti i zaštite

Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Mirna Đurina

# **IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE I UČINCI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2021.

Karlovac University of Applied Sciences

Safety and Protection Department

Professional graduate study of Safety and Protection

Mirna Đurina

**IONIZING RADIATION AND EFFECT OF  
IONIZING RADIATION**

FINAL PAPER

Karlovac, 2021.

Veleučilište u Karlovcu

Odjel Sigurnosti i zaštite

Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Mirna Đurina

# **IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE I UČINCI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor: dr.sc. Slaven Lulić, prof. v. š.

Karlovac, 2021.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
ODJEL SIGURNOSTI I ZAŠTITE

**ZAVRŠNI ZADATAK**

Student: Mirna Đurina

Matični broj: 0422417026

Naslov: Ionizirajuće zračenje i učinci ionizirajućeg zračenja

Opis zadatka: U završnom radu će se obraditi nastanak ionizirajućeg zračenja kao i pregled učinaka ionizirajućeg zračenja

Zadatak zadan:

4/2021.

Rok predaje:

10/2021.

Predviđeni datum obrane:

11/2021.

Mentor:

dr.sc. Slaven Lulić, prof. v. š.

Predsjednik ispitnog povjerenstva:

Filip Žugčić, mag. ing. el. pred.

## **SAŽETAK**

U završnom radu objasnit će se ionizirajuće zračenje, njegovo otkriće i djelovanje, vrste zračenja kao i prolazak zračenja kroz materiju. Opisat će se kako izračunati broj jezgara koje će se raspasti nakon određenog protoka vremena i o utjecaju zračenja na čovjeka i mogućim ozljedama uzrokovanim ionizirajućim zračenjem. Pisat će se i o detektorima ionizirajućeg zračenja i njihovoj primjeni.

Ključne riječi: ionizirajuće zračenje, otkriće zračenja, vrste zračenja, radijacijske ozljede.

## **SUMMARY**

The final paper will explain ionizing radiation, its discovery and action, types of radiation and the passage of radiation through matter. It will describe how to calculate the number of nuclei that will disintegrate after a certain lapse of time and about the impact of radiation on humans and possible injuries caused by ionizing radiation. It will also be written about ionizing radiation detectors and their application.

Keywords: ionizing radiation, radiation detection, types of radiation, radiation injuries.

## SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Povijest otkrića radioaktivnosti.....	3
3. Radioaktivnost-ionizacija i vrste zračenja.....	7
3.1. Izotopi .....	8
3.2. Radioaktivnost.....	9
3.2.1. Alfa raspad ( $\alpha$ -raspad).....	9
3.2.2. Beta raspad ( $\beta$ -raspad).....	11
3.2.3. Gama raspad ( $\gamma$ -raspad).....	13
4. Mjerne jedinice i utjecaj zračenja na čovjeka .....	15
4.1. Mjerne jedinice.....	15
4.2. Učinci ionizirajućeg zračenja na čovjeka .....	17
4.2.1. Patogeneza radijacijskih ozljeda .....	19
4.2.2. Akutna radijacijska bolest .....	19
4.2.3. Oštećenja kože ionizirajućim zračenjem.....	27
4.2.3.1. Akutni radiodermatitis (Radiodermatitis acuta) .....	27
4.2.3.2. Kronični radiodermatitis (Radiodermatitis chronica).....	28
4.2.4. Kasni učinci zračenja .....	29
5. Detektori ionizirajućeg zračenja.....	32
5.1. Wilsonova maglena komora i difuzijska komora.....	33
5.2. Komora ne iskre .....	34
5.3. Komora na mjehuriće .....	35
5.4. Čerenkovljev brojač .....	36
5.5. Scintilacijski detektor .....	36
5.6. Plinski detektori .....	37
5.7. Ionizacijska komora .....	37
5.8. Proporcionalni brojač .....	38
5.9. Geiger-Müllerov brojač.....	38
5.10. Poluvodički brojač.....	39
6. Zaključak.....	40
7. Literatura .....	41
8. Popis slika i tablica.....	42

## 1. Uvod

Ionizirajuće zračenje i radioaktivne tvari su prirodna i stalna pojava u svemu što nas okružuje te u brojnim djelatnostima ljudi. Štoviše, sve je raširenija uporaba umjetnih izvora ionizirajućeg zračenja. Čovjek nije bio svjestan opasnosti od ionizirajućeg zračenja prije otkrića radioaktivnosti i njegovog biološkog utjecaja. Ionizirajuće zračenje je neobična pojava, a razlikuje se od svih drugih prirodnih pojava koje poznajemo. Ljudi i ostala živa bića nemaju osjetilo za opažanje ionizirajućeg zračenja, pa tako čovjek može biti izložen smrtonosnoj dozi ionizirajućeg zračenja, a da u samom trenutku ozračivanja ništa ne osjeti. Posljedice njegovog djelovanja zapažaju se tek nakon nekog vremena, što može biti od nekoliko sati do čak nekoliko godina, ovisno o jačini zračenja i periodu izloženosti zračenju.

Ionizirajuće zračenje je ustvari zračenje koje ima dovoljno veliku energiju, da u međudjelovanju s tvari ionizira tu tvar, tj. predaje dio ili svu svoju energiju tvari što mijenja svojstva ozračenog tvari. Kod predaje energije dolazi do promjene energijskog stanja atoma ili sastava atoma i atomske jezgre pri čemu se emitiraju fotoni ili neke od elementarnih čestica. Posljedice pri međudjelovanju zračenja i tvari mogu biti pozitivne i negativne, a izvori ionizirajućeg zračenja mogu biti prirodni i umjetni.

Prirodna zračenja potječu iz vremena formiranja Zemlje, a neka su nastala kao posljedica kozmičkog zračenja što znači da im je izvor izvan našeg Sunčevog sustava. Također prirodna zračenja primamo i od Sunca koje ispušta radio-valove, mikrovalove, infracrveno zračenje, vidljivu svjetlost, ultraljubičasto zračenje te rendgensko zračenje. Umjetna zračenja su posljedica korištenja tehnologije, odnosno čovjek ih je sam proizveo, a to su razni nuklearni reaktori, nuklearno oružje i dijagnostički medicinski uređaji.

Ionizirajuće zračenje se upotrebljava u razne svrhe, kao npr. za konzerviranje hrane i namirnica, uništavanje insekata i nametnika. U industriji se vrše radiografski postupci za kontrolu bez razaranja kojom se otkrivaju oštećenja i pukotine u brojnim cjevovodima, posudama, inženjerskim postrojenjima i građevinama. Radioaktivne tvari imaju široku primjenu u gospodarstvu, medicini, poljodjelstvu, znanosti, istraživanjima i mnogim drugim ljudskim djelatnostima. Ionizirajuće zračenje doprinosi milijunima ljudi ne samo poboljšanje kvalitete življenja, već osigurava i brojna radna mjesta u tim djelatnostima.



Primjena ionizirajućeg zračenja uz korisnu stranu donosi i opasnost po život i zdravlje ljudi te štetne posljedice po okoliš. Nedovoljno kontrolirana primjena izvora ionizirajućeg zračenja može dovesti do prave nacionalne nesreće, tako da su riziku najviše podloženi oni koji rade s tim izvorima, ali i svekoliko pučanstvo. Efektivna korist koju uporaba ionizirajućeg zračenja donosi uvjetovana je društveno prihvaćenom riziku u svezi te uporabe. Ipak rizik se mora ograničavati i smanjivati administrativnim, organizacijskim i tehnološkim mjerama jer se opasnost kojom je popraćeno izlaganje ionizirajućem zračenju ne može u potpunosti ukloniti.

## 2. Povijest otkrića radioaktivnosti

Wilhelm Conrad Röntgen 1895. godine je otkrio rendgenske zrake, koje je vodilo prema otkriću radioaktivnosti. Röntgen je pri izvođenju pokusa s katodnim zrakama u vakuumskoj cijevi, u zamračenoj sobi, opazio svjetlucaje fluorescentnog zastora. Cijev je nakon toga prekrio crnim kartonom i ustvrdio da zastor i dalje svjetluca iako je udaljen nekoliko koraka od cijevi. Zaključio je da je cijev proizvela „nevidljivu zraku“ koja prolazi kroz crni karton, te novootkrivene zrake je nazvao X-zrake. Dodatnim pokusima pokazalo se kako X-zrake prolaze kroz neke tvari i kroz ljudsko tkivo i kosti, koje ih drugačije apsorbiraju te na fotografskoj ploči mogu ostaviti otisak. 28. prosinca 1895. godine Fizičkom zavodu Sveučilišta u Würzburgu izložio je svoj rad, s kojim je bio priložen snimak ruke Röntgenove žene na fotografskoj ploči. Röntgenovo otkriće X-zraka brzo se proširilo svijetom, te su se već početkom 1896. godine počele primjenjivati u medicini (dijagnostika, radioterapija), tehnici, kemijskoj, keramičkoj i farmaceutskoj industriji, znanosti, fizici, kemiji, biologiji, kriminalistici, umjetnosti, arheologiji i dr. X-zrake su brzo nazvane imenom pronalazača „rendgenske zrake“.

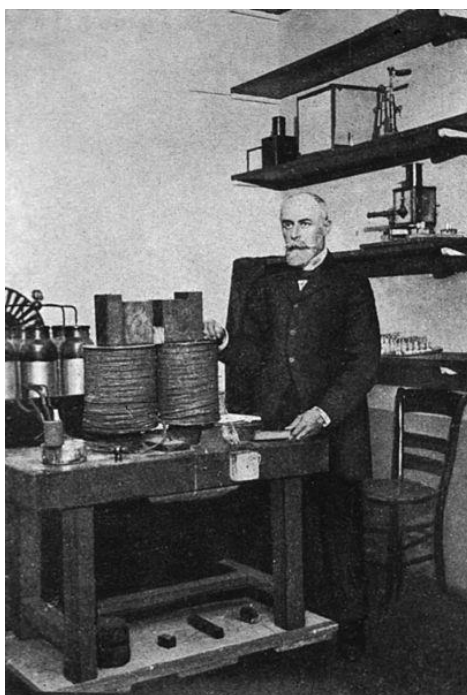


Slika 1. Rendgenski snimak ruke, najvjerojatnije gospođe Röntgen

Izvor: [hr.wikipedia.org](http://hr.wikipedia.org)

Nakon otkrića rendgenskog zračenja mnogi znanstvenici u drugim državama su željeli raditi na tim fenomenima, jedan od njih je bio francuski fizičar Henri Becquerel. Proučavajući fluorescenciju tvari, Becquerel je htio istražiti rad Wilhelma Röntgena, koristeći mineral uranijeve soli, fotografsku ploču i crni nepropusni papir.

Fotografsku ploču je umotao u crni nepropusni papir, na zamotanu fotografsku ploču je postavio mineral i ostavio ga nekoliko sati na Sunčevom svjetlu. Nakon pokusa na fotografskoj ploči je ostao jasan otisak minerala, po čemu je Becquerel pretpostavio da mineral dok fluorescira na Sunčevom svjetlu, ispušta zrake koje prolaze kroz crni nepropusni papir. Becquerel je provodio pokuse u danima punih Sunca, no kako je bila veljača i nekoliko dana je bilo oblačno, odgodio je eksperiment i ostavio je zamotanu fotografsku ploču i mineral u ladici radnog stola. Nekoliko dana kasnije, odnosno 1. ožujka 1896. godine odlučio je razviti fotografsku ploču koja nije bila izložena na Sunčevom svjetlu jer je sutradan trebao izložiti svoje postignuće Pariškoj akademiji. Mineral je, bez prethodnog osvjetljivanja Sunčevim svjetlom, ipak ostavio trag na fotografiji.

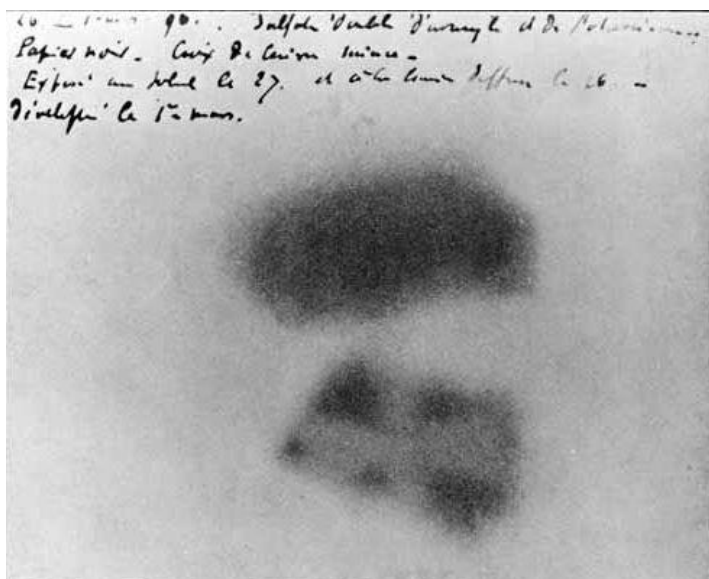


Slika 2. Henri Becquerel u svom laboratoriju

Izvor: [www.wikiwand.com](http://www.wikiwand.com)

Nakon daljnjeg istraživanja, dokazao je da uranijeve soli emitiraju energiju bez ikakvog vanjskog uzročnika kao što je Sunčeva svjetlost. Zaključio je da uranijeve soli ispuštaju nevidljive zrake koje imaju slična svojstva kao rendgenske zrake (X-zrake), pa ih je na osnovi toga nazvao „uranijeve zrake“, a kasnije su se u njegovu čast nazivale i Becquerelovim zrakama.

Kako bi provjerio domet zraka, izvodio je mnogo eksperimenata tijekom kojih je između fotografske ploče i minerala postavljao različite križeve i kovanice. Na slici broj 3. se vidi sjena metalnog križa koji je postavljen između fotografske ploče i minerala, koja se danas opisuje kao apsorpcija gama zraka u metalima. Becquerel je također otkrio da zračenje koje izazivaju uranijevi spojevi ioniziraju zrak, izazivaju fluorescenciju, prolaze kroz papir, aluminij i bakar, te da djeluju na fotografsku ploču, ljudsku kožu i klice raznih biljaka.



Slika 3. Prikaz Becquerelova pokusa

Izvor: [hr.wikipedia.org](http://hr.wikipedia.org)

23. ožujka 1896. godine Becquerel je pokazao rezultate pokusa na sastanku Pariške akademije znanosti, sugerirajući da je otkrio neku vrstu fosforescencije, ali ne uobičajenu već „nevidljivu i dugoročnu“. Becquerel je otkrio da svi spojevi urana imaju ovo svojstvo, a intenzitet zračenja ne ovisi o temperaturi. Iste godine Becquerel se uvjerio da zračenje koje je otkrio nije fosforescencija, ali dugo nije želio prihvatiti tu činjenicu. Nakon toga se vratio proučavanju fosforescencije ostavljajući teoriju „uranovih zraka“ nedovršenom.

Becquerelovo istraživanje postalo je temeljem rada bračnog para Pierrea i Marie Curie. Pierre je zajedno sa svojim bratom Jacquesom konstruirao vrlo osjetljivi kvarcni elektrometar pomoću kojega je Marie mjerila uzorke. Marie Curie počela je mjeriti aktivnost svih tada poznatih elemenata, kao rezultat studije bilo je moguće otkriti radioaktivnost brojnih tvari. Također je otkrila da su zrake svojstvo svojstveno određenom elementu, bez obzira na temperaturu, čistoću njegovog sastava i vanjsko zračenje. Curie je došla do hipoteze kako se u nekim rudama nalaze novi elementi koji imaju veći intenzitet zračenja od uranija.



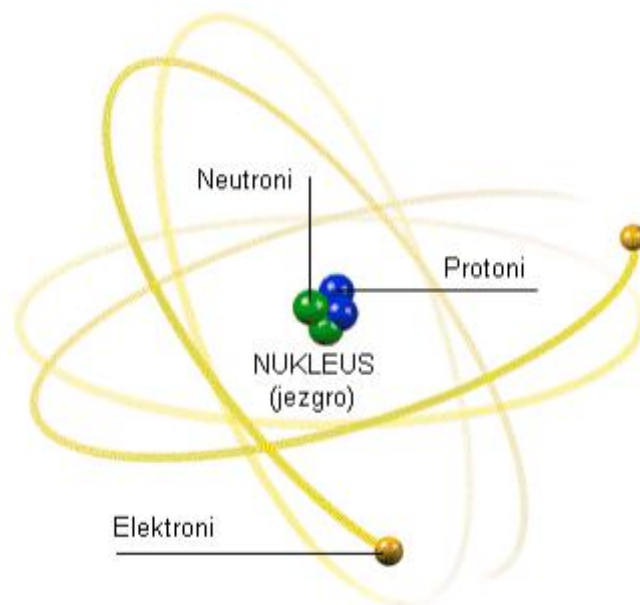
Slika 4. Maria Skłodowska Curie i Pierre Curie u svom laboratoriju

Izvor: [hr.wikipedia.org](http://hr.wikipedia.org)

Novim pokusom su kemijskim putem razdvojili pojedine elemente iz uzoraka i otkrili novi kemijski element koji je 300 puta aktivniji od uranija. Predložili su da s novi element nazove polonij u čast Poljske, rodnog mjesta Marie Curie. Nakon otkrića polonija supružnici Curie su nastavili sa pokusima i otkrili određenu radioaktivnu tvar koja je aktivnija od urana i po svojim kemijskim svojstvima se ponaša slično kao barij, te su za novi kemijski element predložili naziv radij, zbog njegovog jakog intenziteta radioaktivnosti. Marie Curie je prva uvela pojmove „radioaktivnost“ i „radioaktivni element“. Henri Becquerel, Pierre i Marie Curie 1903. godine podijelili su Nobelovu nagradu za fiziku, a osam godina kasnije Marie Curie za otkriće polonija i radija dobiva Nobelovu nagradu za kemiju.

### 3. Radioaktivnost-ionizacija i vrste zračenja

Na planeti Zemlji se nalazi 90 prirodnih kemijskih elemenata, ti elementi grade sve tvari, žive i nežive na Zemlji, a nalaze se u građama kao smjese, kemijski spojevi ili u elementarnom stanju. Ti elementi su različito zastupljeni, nekih je više, a neki su vrlo rijetki. Najmanji dio nekog elementa koji još uvijek ima kemijska svojstva tog elementa, se naziva atom. Atom kao naziv dolazi iz grčkog jezika atomos što znači nevidljiv, ali to ipak nije točno. Sam atom je građen od sastavnih, još sitnijih čestica koje se nazivaju proton, neutron i elektron. Jezgra atoma sadrži se od protona i neutrona, dok se elektron nalazi u omotaču koji obavija jezgru. U jednom atomu koji se nalazi u normalnom stanju imamo uvijek jednak broj protona i elektrona. Proton je nositelj jediničnog pozitivnog električnog naboja, a elektron je nositelj jediničnog negativnog električnog naboja, dok je neutron električki neutralan.



Slika 5. Građa atoma

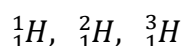
Izvor: [www.dokumen.tips](http://www.dokumen.tips)

U prirodi je atom kao cjelina električki neutralan, jer se naboji protona i elektrona međusobno kompenziraju. Broj protona koji je jednak broju elektrona označuje se slovom  $Z$ , dok se broj neutrona označuje slovom  $N$ . Zbrojem ta dva broja  $Z+N$  dobivamo broj  $A$  koji nazivamo atomskim brojem mase, što je ukupni broj protona i neutrona u jezgri.

Svaki kemijski element karakteriziran je brojem protona u atomskoj jezgri, dakle broj protona unutar atomske jezgre određuje o kojem se kemijskom elementu radi. Broj neutrona ne utječe na kemijsku vrstu elementa. Tako na primjer vodik sadrži 1 proton, kisik 8 protona, a uran čak 92 protona. Kemijski elementi do broja 92 (uran) se mogu naći u prirodi, svi elementi preko tog broja se mogu proizvesti umjetnim putem. Jezgra 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 kod ovog pravila i upravo o njima će biti riječi u sljedećim točkama ovog rada.

### 3.1. Izotopi

Izotopi su atomi istog kemijskog elementa s jednakim brojem protona  $Z$ , ali sa različitim brojem neutrona  $N$ . Naziv izotop potječe od grčkih riječi isos-isti i topos-mjesto, što u prijevodu znači „na istom mjestu“, jer se svi ti atomi nalaze na istom mjestu u periodnom sustavu i predstavljaju istu vrstu elementa. Izotopi jednog kemijskog elementa imaju jednaka kemijska svojstva jer im se elektronski omotači praktički ne razlikuju. To je zato jer su neutroni električki neutralne čestice pa ne utječu na gibanje elektrona u elektronskom omotaču. Osim kemijskih svojstva i mnoga druga svojstva izotopa istog elementa gotovo su ista zato jer i ona ovise o svojstvima elektronskog omotača, a to su čvrstoća, viskoznost, boja, miris i okus. Međutim, izotopi istog elementa se razlikuju masom jezgre, što znači da se razlikuju i masom atoma. Izotopi određenog elementa ponekad se razlikuju i po jednoj vrlo bitnoj osobini, a to je da su jezgre nekih izotopa određenog elementa u vremenu nepromjenjive, tj. stabilne, dok su jezgre njegovih drugih izotopa podložne burnim promjenama svoje strukture. Npr. vodik ima tri izotopa:



to su vodik, deuterij (teški vodik) i tricij (radioaktivni vodik). Prvi izotop vodika nema niti jedan neutron, drugi ima jedan, a treći ima čak dva neutrona. Tricij je nestabilan izotop, tj. radioaktivan je i nakon određenog vremena se raspada uz oslobađanje energije. To se događa zbog prisutnosti neutrona u jezgri koji tu jezgru destabilizira. Takvi nestabilni izotopi se nazivaju još i radioizotopi.

## 3.2. Radioaktivnost

Radioaktivne tvari jesu tvari koje sadrže atome s nestabilnim jezgrama koje svojim raspadom proizvode ionizirajuće zračenje. Atomi s nestabilnim jezgrama su atomi čija je jezgra nestabilna, tj. spontano se mijenja nastojeći, u jednom ili više koraka, doći u stabilno stanje, ispuštajući pri tome energiju. Takva promjena kada se jezgra mijenja bez vanjskog utjecaja pri čemu se emitira elektromagnetsko zračenje ili čestice zove se radioaktivni raspad, a čestice i fotone koje jezgra pri tome emitira radioaktivno zračenje. Dakle, radioaktivnost je svojstvo nekih atoma da im se jezgre spontano mijenjaju i pri tome imitiraju elektromagnetsko zračenje ili čestice.

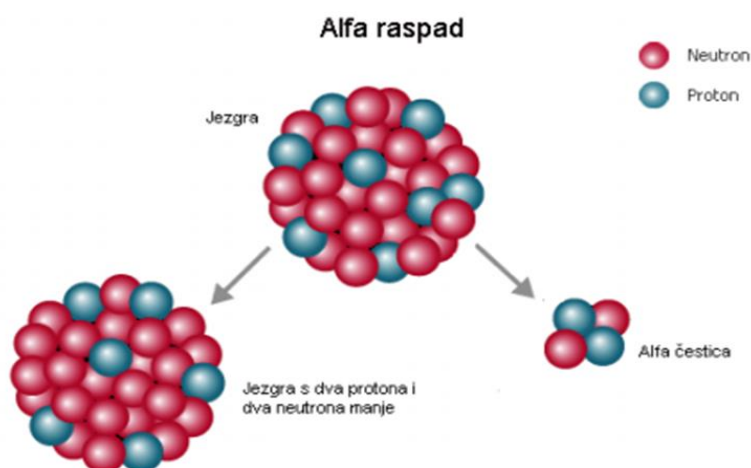
Za pojedinu jezgru se ne može znati kad će se raspasti, ali se može odrediti koliko će se jezgri raspasti nakon određenog vremena  $t$  koje protekne od trenutka kad počnemo mjeriti. Na spontani raspad radioaktivne jezgre ne može se utjecati nikakvim fizikalnim ili kemijskim postupcima. Radioaktivna zračenja ubrajamo u ionizirajuća zračenja, jer ioniziraju atome tvari na koju padaju. Radioaktivni raspadi moraju zadovoljiti nekoliko zakona očuvanja energije, podrazumijevajući da vrijednost očuvane veličine nakon raspada ima jednaku vrijednost kao i za jezgru prije raspada. Postoje tri vrste radioaktivnih raspada, to su alfa, beta i gama raspad.

### 3.2.1. Alfa raspad ( $\alpha$ -raspad)

Pretvaranje jedne atomske jezgre u drugu uz emitiranje alfa-čestica naziva se alfa raspad. Jezgra se raspada na manju jezgru, u tom se procesu maseni broj smanjuje za 4, a atomski broj za 2 uz oslobađanje alfa-čestice. Alfa-čestica je zapravo jezgra atoma helija, odnosno 2 protona i 2 neutrona. Do raspada dolazi zbog neuravnoteženog broja protona i neutrona u atomskoj jezgri. Neke atomske jezgre prirodno su nestabilne i raspadaju se u nekom vremenskom intervalu, tj. vremenu poluraspada, dok su neke atomske jezgre stabilne, ali mogu postati nestabilne ako se na njih djeluje česticama koje posjeduju veliku energiju. Atomi koji emitiraju alfa čestice uglavnom su vrlo veliki atomi, tj. imaju visoke atomske brojeve. Ustvari njihove masivne jezgre imaju prevelik omjer protona u odnosu na neutrone. Kod alfa raspada atomska jezgra mijenja svoju atomsku masu i redni broj jezgre, tako da novo nastala jezgra tim raspadom pripada drugom kemijskom elementu



za razliku od atomske jezgre prije alfa raspada, te tako imaju i različita kemijska svojstva. Zračenje alfa čestica može zaustaviti i list papira, zbog svoje relativno velike mase, nije prodorno te u zraku ima domet svega nekoliko centimetara (2-8 cm). Određeni atomi imaju prenizak omjer protona i neutrona u atomskoj jezgri, tada jezgra emitira alfa-česticu kako bi se uspostavila ravnoteža.



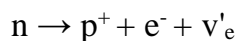
Slika 6. Alfa raspad

Izvor: [www.radioaktivniotpad.org](http://www.radioaktivniotpad.org)

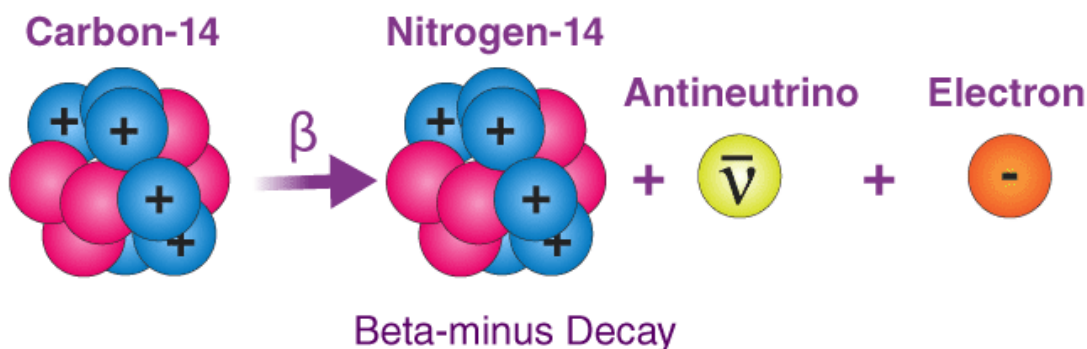
Prirodno nestabilni atomi koji emitiraju alfa-čestice imaju atomski broj najmanje 82, a najvažniji od njih su: americij-241 (atomski broj 95), plutonij-239 (94), uran-238 (92), torij-232 (90), radij-226 (88), radon-222 (86). Alfa emiteri zastupljeni su u različitim količinama u gotovo svim stijinama, tlu i vodi. Nakon alfa raspada, nastale čestice se zbog velike mase i električnog naboja gibaju relativno sporo i u zraku potroše svu energiju nakon nekoliko centimetara, tada na sebe vežu slobodne elektrone i postaju helij. U nekim industrijskim procesima pozitivan naboj alfa čestica može biti koristan, naprimjer radij se koristi za liječenje karcinoma, dok polonij služi za neutraliziranje statičkog elektriciteta u mnogim industrijama. Alfa čestice privlače slobodne elektrone zbog svog pozitivnog naboja i tako smanjuju statički naboj. Za stvaranje električne struje kod nekih detektora dima koristi se emisija alfa čestica americija. Unutar komore alfa čestice se sudaraju s molekulama zraka i oslobađaju elektrone. Električna struja se stvara unutar komore između pozitivno i negativno nabijenih pločica, a rezultat tome su pozitivno nabijeni ioni i negativno nabijeni elektroni. Alarm se aktivira kada nabijene čestice i čestice dima u dodiru jedne sa drugom prekinu strujni krug.

### 3.2.2. Beta raspad ( $\beta$ -raspad)

Druga vrsta radioaktivnog raspada atomskih jezgara je beta raspad, koji je izazvan utjecajem slabe nuklearne sile. Kod tog raspada atomska jezgra zrači elektron ili pozitron, atomska masa se ne mijenja nego se samo atomski broj poveća ili smanji za jedan, što znači da se atomska jezgra pretvori u novi kemijski element, koji je u Periodnom sustavu elemenata prethodni ili slijedeći redni broj. Danas su poznate dvije vrste beta raspada, a to su beta plus raspad ( $\beta^+$ ) i beta minus raspad ( $\beta^-$ ). Beta minus raspad naziva se još i elektronsko zračenje, to je ustvari promjena jezgre pri kojoj dolazi do apsorpcije elektrona ili pozitrona i antineutrina ili neutrina. Pri čemu se maseni broj ne mijenja, a redni broj atoma se promjeni za jedan. Kod beta minus raspada nestabilne atomske jezgre koje imaju višak neutrona mogu spontano ostvariti raspad, gdje se neutron raspada u proton, uz zračenje elektrona i antineutrina.



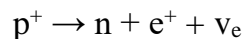
Taj postupak se obično događa u nuklearnim reaktorima, ako ima nestabilnih atomskih jezgri s viškom neutrona u nuklearnom gorivu.



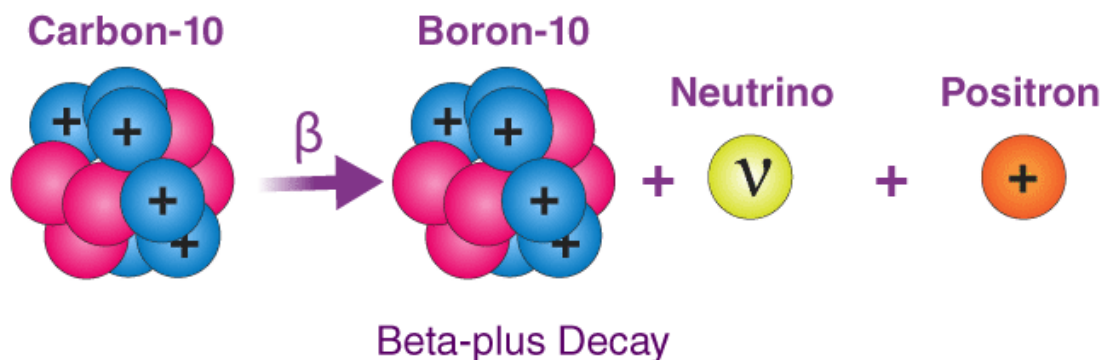
Slika 7. Beta minus raspad

Izvor: [www.byjus.com](http://www.byjus.com)

Do beta plus raspada može doći prilikom umjetno izazvane radioaktivnosti, pri čemu nestabilne atomske jezgre koje imaju višak protona mogu spontano ostvariti raspad. Proton se raspada u neutron, uz zračenje pozitrona (antičestice elektrona) i neutrina. Maseni broj atoma ostaje isti, a atomski broj se smanji za jedan.



Beta plus raspad može se dogoditi samo unutar atomske jezgre. Nuklearna energija vezanja novonastalog kemijskog elementa pri tome je veća od nuklearne energije vezanja kemijskog elementa iz kojeg je radioaktivni raspad započeo.



Slika 8. Beta plus raspad

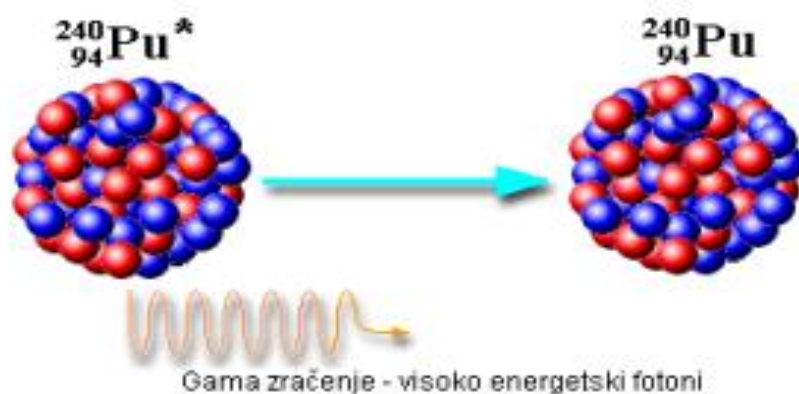
Izvor: [www.byjus.com](http://www.byjus.com)

Beta zračenje u zraku ima domet od nekoliko metara i prodornije je nego alfa zračenje. Može prouzročiti oštećenja na koži i očima kao vanjski radioaktivni izvor, a zaustaviti ga može već tanki sloj aluminijske folije. Beta čestice su ekvivalentne elektronima, jedina razlika je što beta čestice potječu iz jezgre, a elektroni se nalaze u omotaču.

Iako beta čestice same po sebi nisu radioaktivne, emitiraju ih radioaktivni atomi. Beta emiteri se primjenjuju u mnogim znanostima, osobito u medicinskoj dijagnostici i liječenju, ali i u raznim industrijskim instrumentima koji služe za mjerenje debljine vrlo tankih materijala.

### 3.2.3. Gama raspad ( $\gamma$ -raspad)

Gama raspad je malo specifičniji za razliku od alfa i beta raspada. Gama raspad je jedna vrsta emisije gama zraka, što znači da kod tog raspada zapravo ne dolazi do pravog raspada jedne jezgre u drugu. To je prijelaz između stanja više pobuđenosti atomske jezgre u stanje niže pobuđenosti ili u osnovno stanje. Elektromagnetsko zračenje visoke frekvencije koje se pritom emitira naziva se gama-zračenje. Gama zračenje je jako prodorno zračenje, to je ista vrsta zračenja kao i rendgensko zračenje, ali se međusobno razlikuju po načinu nastanka. Da bi se intenzitet gama zračenja iz radioaktivnog izvora umanjio oko sto puta (ovisno o izvoru), potreban je štiti od nekoliko centimetara olova ili oko pet puta deblji beton. Gama zrake su fotoni s najviše energije u elektromagnetskom spektru, a emitiraju ih jezgre nekih radioaktivnih atoma.

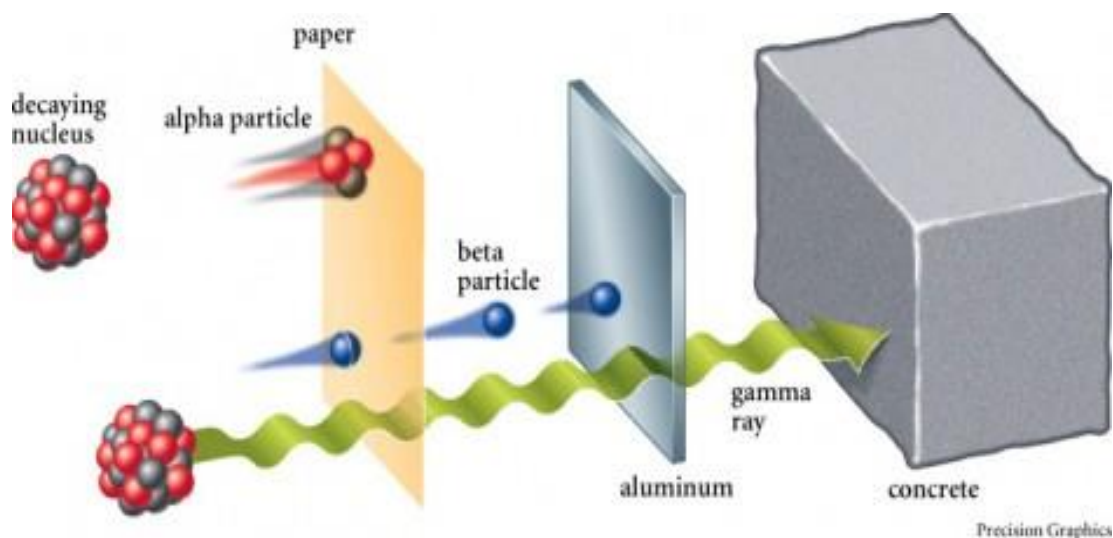


Slika 9. Gama raspad

Izvor: [www.zir.nsk.hr](http://www.zir.nsk.hr)

Gama fotoni imaju vrlo visoku energiju otprilike 10000 puta veću od energije fotona u vidljivom dijelu elektromagnetskog spektra, ali nemaju masu ni električni naboj. Zbog visoke energije gama čestice putuju brzinom svjetlosti, a domet u zraku im je od nekoliko desetaka metara do par kilometara. Mogu proći kroz mnogo vrsta materijala, čak i kroz ljudsko tkivo, ali ne čine te materijale radioaktivnim. Emiteri gama zraka kao što su kobalt, cezij i tehnecij, najviše se koriste za steriliziranje medicinske opreme, pasteriziranje hrane, liječenje karcinoma, istraživanje podzemnih izvora nafte,

dijagnostičke studije u medicini i drugo. Gama zrake se koriste i za ispitivanje metalnih dijelova u industriji, te za poboljšanje fizikalnih svojstava plastike i drva. Gama zrake postoje samo dok imaju energije, kada potroše energiju one prestaju postojati, neovisno bile u zraku ili čvrstom stanju.



Slika 10. Prodornost  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  zračenja

Izvor: [www.repozitorij.fizika.unios.hr](http://www.repozitorij.fizika.unios.hr)

Radioaktivna zračenja se međusobno razlikuju po električnom naboju, prodornosti i po procesima koji dovode do njihove emisije. Na slici broj 9 prikazana je prodornost alfa, beta i gama zračenja gdje se vidi da alfa zračenje koje je u zraku dometa 2 cm do 8 cm, može zaustaviti list papira, domet beta zračenja je do 10 m, a može ga zaustaviti aluminijski lim debeo nekoliko milimetara, a većinu gama zračenja dometa u zraku i do 100 m, može zaustaviti desetak centimetara debela olovna ploča ili oko pet puta deblji beton.

## 4. Mjerne jedinice i utjecaj zračenja na čovjeka

### 4.1. Mjerne jedinice

Na proces radioaktivnog raspada se ne može utjecati ni na koji način, niti se može sa sigurnošću predvidjeti kada će se pojedina radioaktivna jezgra raspasti. Nestabilne jezgre se spontano raspadaju emisijom čestičnog zračenja alfa ili beta, što uobičajeno prati gama zračenje. Međutim postoji mogućnost da se nakon proteka vremena  $t$ , izračuna broj jezgara koje će se raspasti. Broj raspada jezgri u radioaktivnom izvoru koji se dogodi u jedinici vremena zove se radioaktivnost ili aktivnost izvora i obilježava s  $A(t)$ , što je ustvari brzina raspada jezgri.

$$A(t) = -\frac{\Delta N(t)}{\Delta t}$$

ili

$$\frac{\Delta N(t)}{\Delta t} = -\lambda N(t)$$

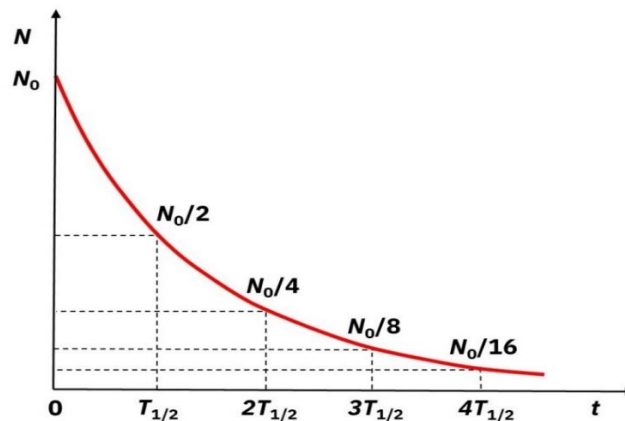
Ako broj radioaktivnih jezgara u uzorku u početnom trenutku označimo sa  $N_0$ , broj neraspadnutih radioaktivnih jezgara sa  $N(t)$  nakon proteka vremena  $\Delta t$ ,  $\Delta N(t)$  predstavlja broj raspadnutih jezgara nakon vremena  $t$ . Predznak minus u jednadžbi znači da se broj radioaktivnih atoma  $N$  tijekom vremena smanjuje. Zakon radioaktivnog raspada može se napisati i u eksponencijalnom obliku:

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

Konstanta raspada radioaktivnog izvora  $\lambda$  ima karakterističnu vrijednost za svaki radionuklid, a jedinica u kojoj se mjeri je  $s^{-1}$ .  $\lambda$  daje vjerojatnost da će se bilo koji individualni atom raspasti u jedinici vremena. Vremenski interval u kojem se raspadne polovina jezgara radioaktivne tvari i koje je, kao i konstanta raspada, svojstveno za određeni radioizotop zove se vrijeme poluraspada i obilježava se sa  $T_{1/2}$ . iz gornje jednadžbe dobivamo vezu između vremena poluraspada i konstante raspada:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Na slici broj 10 prikazan je radioaktivni raspad kao funkcija vremena. Na ordinati se nalazi broj neraspadnutih jezgara  $N$ , a na apscisi vrijeme  $t$ . U početnom trenutku ( $t=0$ ) broj neraspadnutih jezgara je  $N_0$ . Nakon vremena  $t = T_{1/2}$  od početnog broja ostane  $N_0/2$  neraspadnutih jezgara, nakon vremena  $t = 2T_{1/2}$  preostane  $N_0/4$  itd.



Slika 11. Zakon radioaktivnog raspada

Izvor: [www.edutorij.e-skole.hr](http://www.edutorij.e-skole.hr)

Aktivnost radioaktivnog izvora u vremenu se smanjuje na isti način kao i broj njegovih jezgri:

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

Jedinica aktivnosti radioaktivnog izvora u Internacionalnom sustavu mjernih jedinica (SI) je  $s^{-1}$  i zove se bekerel (Bq). Jedan bekerel je jedan raspad u jednoj sekundi. Na donjoj tablici sažeta su glavna svojstva alfa, beta i gama raspada. Najčešći su kombinirani raspad; alfa/gama, beta/gama; dok su "čisti" alfa, beta ili gama emiteri rijetki.

Tablica 1. 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
Beta-plus	Z/N	Z-1/N+2	Pozitron
Gama	Z/N	Z/N	Gama foton

## 4.2. Učinci ionizirajućeg zračenja na čovjeka

Zračenje živih bića izaziva promjene na živim stanicama, organima ili cijelom tijelu, te promjene na živim tkivima, a nazivaju se biološki efekti zračenja. Biološki efekti zračenja ovise o djelotvornosti pojedinih vrsta zračenja i osjetljivosti pojedinih tkiva na zračenje. Zračenje prolaskom kroz tijelo ionizira molekule što može direktno djelovati na ozračenu osobu i na potomke ozračene osobe, prijenosom genetskog materijala. Kad stanica apsorbira zračenje, ona može biti toliko oštećena da prestane normalno funkcionirati i odumre, može izgubiti sposobnost reprodukcije i dalje živjeti, DNA stanice također može biti oštećen tako da su buduće kopije stanice promijenjene. Promijenjena stanica tkiva ili organa, daljnjim razmnožavanjem može biti inicijator raka ako su ozračenjem izazvane mutacije DNK reproduktivnih stanica.

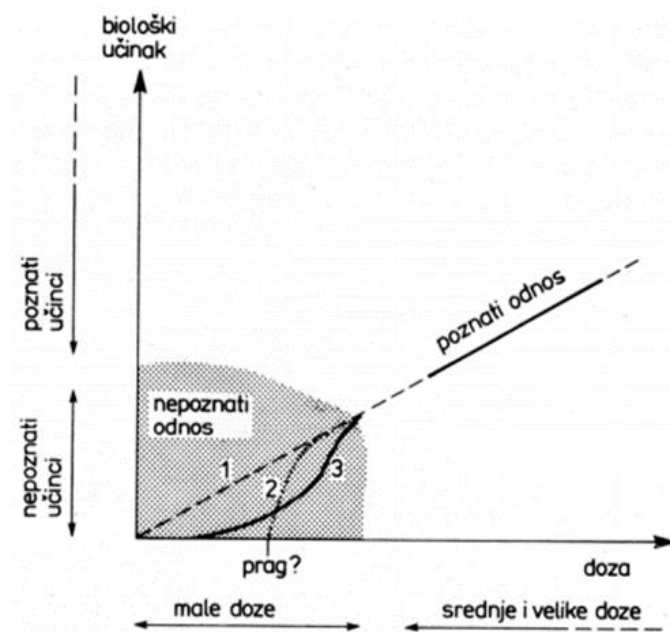
Učinak zračenja izaziva mutacije koje se mogu, ali i ne moraju očitovati kao nasljedne kod potomstva izložene osobe. Svaka osoba ima za isto svojstvo dva gena, svaki od jednog roditelja, pa se mutacije obično ne vide kod prvih potomaka jer je mutirani gen u pravilu recesivan. Štetna posljedica mutacija može nastati jedino u slučaju ako se za isto svojstvo nađu oba gena mutirana. Stanica u većini slučajeva popravlja nastala oštećenja zato što je sustav za sprječavanje promjena u genomu vrlo djelotvoran i od 1000 oštećenja popravi se njih 999. Od 1000 stanica koje se nisu uspjele regenerirati, njih 999 odumre, u konačnici tek jedna od 100000 oštećenih stanica s promijenjenim genetskim kodom preživi.

Još uvijek nije razjašnjeno kako i na koji način se mutirana stanica brani od daljnjeg tijeka prema razvoju karcinoma. Pretpostavka je da veliku ulogu nosi imunološki sustav, ali i neimunološki mehanizam, kao i ostali mehanizmi koji štite organizam od začetka do stvaranja tumora. To su popravak DNK, apoptoza (oblik programirane stanične smrti), terminalna diferencijacija i fenotipska supresija, isti zajedno umanjuju vjerojatnost razvoja oštećene stanice u tumorsku, ali je vrlo teško procijeniti kolika je točno uloga pojedinog od navedenih mehanizama.

Da li će stanica biti oštećena ili ne ovisi o primljenoj količini energije zračenja koja je apsorbirana, o razini i o brzini zračenja. Osim negativnog učinka na stanice, u malobrojnim slučajevima, zračenjem se mogu dobiti neki korisni rezultati. Razlikuje se



osjetljivost pojedinih stanica na zračenje, ali i individualna osjetljivost pojedinih stanica. Neka istraživanja su pokazala da niske doze zračenja mogu stabilizirati stanicu da postane otpornija na zračenje, ali je taj adaptivni mehanizam ograničenog trajanja vjerojatno posljedica vrlo djelotvornog mehanizma u stanicama za sprječavanje promjena u genomu. Može se reći da su manje osjetljiva tkiva starija tkiva i stariji organi, a mnogo su više osjetljiva mlađa tkiva i organi koji se obnavljaju, prije svega unutrašnji organi, koštana srž, sjemene stanice, jajnici, očne leće, a posebno embrij.



Slika 12. Ovisnost bioloških efekata o primljenoj dozi

Izvor: [www.repozitorij.vuka.hr](http://www.repozitorij.vuka.hr)

Biološki efekti zračenja također ovise o trajanju i učestalosti zračenja, te o raspodjeli doze po tijelu. Utvrđeno je da odnos između primljene doze i bioloških efekata zračenja na ljudima linearan, što znači koliko je puta veća primljena doza toliko je puta veći i biološki efekt. Odnos između primljene doze i njenih bioloških efekata za područje malih doza nije poznat, dok je za velike doze taj odnos poznat. Na slici 11. prikazana je ovisnost bioloških efekata o primljenoj ekvivalentnoj dozi. Niti jedna od navedenih pretpostavki nije znanstveno utvrđena te se u praksi postupa razumno i pod principom poznatim pod imenom ALARA princip, a ime mu predstavlja akronim engleskog izraza „*As Low As Reasonably Achievable*“ (što se niže razumno može postići).

#### 4.2.1. Patogeneza radijacijskih ozljeda

Stupanj oštećenja ionizirajućim zračenjem ovisi o količini energije, brzini i vremenu u kojem jedinična masa neke tvari primi energiju zračenja. Efekt zračenja ovisi o mjestu i vrsti oštećenja, funkciji i vrsti ozračene stanice i broju oštećenih stanica. Tkivo normalnom mitozom nadomješta izgubljene stanice kada je brzina primanja doze zračenja mala ili kada su razmaci između primljenih pojedinačnih doza dovoljno dugi. Ista primljena doza kada se primi odjednom može imati i smrtonosni učinak, a ista ta doza primljena kroz duži vremenski period neće nužno za posljedicu imati smrt.

Na ionizirajuće zračenje daleko su osjetljivije nediferencirane stanice, odnosno one stanice koje se neprekidno i brzo dijele, kao što su matične stanice krvotvornog tkiva i spolnih žlijezda, stanice kože i sluznica, a osobito crijevne resice. Stanice koje se rijetko ili nikada ne dijele kao što su mišićne stanice, živčani sustav, koštana i solidna tkiva, slabo su osjetljiva na izloženost zračenju. Visoke lokalne doze zračenja mogu izazvati izravnu smrt stanice, zbog strukturnog oštećenja stanične membrane ili citoplazme. Kada se genetski kod stanice ošteti, a stanica preživi „kopije stanice“ se promijene i može doći do problema sa kromosomskim aberacijama, neoplastičnim rastom, gubitkom supresorskih gena što dovodi do pojave solidnih tumora ili aktivacijom onkogeno (podloga za nastanak leukemije). Utjecaj zračenja na tijelo biti će manji što je ozračeni dio tijela manji bez obzira na veličinu primljene doze.

Postoje dvije vrste izloženosti ionizirajućem zračenju; kronična i akutna izloženost. Kontinuirana izloženost niskim dozama zračenja kroz dugi vremenski period predstavlja kroničnu izloženost, a učinci se mogu vidjeti nakon niza godina. Ti učinci uključuju oštećenja kože, genetske promjene i razvoj malignih i benignih tumora.

#### 4.2.2. Akutna radijacijska bolest

Prekomjerna doza ionizirajućeg zračenja u vrlo kratkom vremenskom periodu (sekunde ili minute) koja oštećuje tkivo ili organe naziva se akutna radijacijska bolest. Ovisno o primljenoj apsorbiranoj dozi ionizirajućeg zračenja, bolest na početku liči prehladi, a traje od nekoliko sati do nekoliko tjedana. Ne postoji specifično liječenje za

ovu bolest, već se poduzimaju sve mjere za prevladavanje oštećenja pojedinih sustava, nadoknada tekućine i krvnih preparata, zaštita od infekcije, bakterija, virusa, gljiva i potpora oporavka oštećenih organskih sustava. Osim apsorbirane doze ovisi i klinička slika bolesti.

Akutna radijacijska bolest je vrlo rijetka i obično nastaje kod profesionalne izloženosti nakon nuklearnih nesreća na radu. Najpoznatiji primjer iz bliske prošlosti je onaj 1986. godine u Černobilu kada je požar oštetiо nuklearnu elektranu. Još jedan poznati slučaj iz 2011. godine kada je nuklearnu elektranu Fukushima na istočnoj obali Japana oštetiо potres.

Simptomi radijacijske bolesti i klinička slika ovise o apsorbiranoj dozi i površini izlaganja, osjetljivosti tkiva pogođenog zračenjem, te načinu kontaminacije (unutarnja ili vanjska). Kod jednokratnih pojedinih efektivnih ozračenja cijelog tijela simptomi su različiti. Ako energija apsorbirana u 1 kg materijala ili tkiva iznosi 1 džul, doza zračenja iznosi 1 grej. Jednom apsorbirana doza od 0.05 do 0.2 Gy (greja) ne izaziva nikakve akutne simptome, dok se nakon četrdesetak dana pri ovim dozama može javiti prolazna oligospermija i postoji mogućnost razvoja karcinoma godinama kasnije.

Subklinički oblik je oblik u kojem nema uobičajenih znakova bolesti, tek su ponekad primijećene promjene na koži kao posljedica lokalne radijacijske ozljede. To je naziv za oštećenje pri apsorbiranoj dozi višoj od 0.2 Gy do približno 0.4 Gy. Znakovi oštećenja koštane srži javljaju se kod ozračenja cijelog tijela dozom od 0.5 Gy. Kada cijelo tijelo apsorbira dozu od najmanje 1 Gy tada se obično pojavljuju prvi znakovi i simptomi radijacijske bolesti. Ozračenje cijelog tijela dozama višim od 6 Gy, prema nekim autorima, smatra se smrtonosnim u roku od dva dana do dva tjedna. Postoje podaci o preživljavanju apsorbiranih doza viših od 8 Gy kod ozračenja velikog dijela tijela, ali ne i cijelog tijela. Klinička slika je različita kod različitih akutno apsorbiranih doza, iako može doći do oštećenja više organa, također različita tkiva reagiraju na različite apsorbirane doze različito.

Prema literaturi klinička slika se obično dijeli u tri oblika/sindroma po prevladavajućim simptomima. Kod akutno apsorbirane doze od 0.7 do 7 Gy dolazi prvenstveno do oštećenja krvnih stanica, tzv. hematopoetski sindrom kod kojeg se karakterizira granulocitopenija, trombocitopenija i supresija imunskog sustava. Simptomi su

povišena temperatura, bakterijemija, zimica, tresavica i hemoragična dijateza, također se javljaju i pneumonije, gljivična oboljenja, krvarenje desni, te upale različitih organa. Pri ozračenju cijelog tijela dozama od 7 Gy uz oštećenje hematopoetskog sustava javlja se i tzv. gastrointestinalni sindrom kod kojeg stanice sluznice tankog i debelog crijeva prestanu obavljati svoju zadaću. Nakon akutnog ozračenja kod navedenih razina ozračenja vjerojatnost za preživljavanje imaju osobe mlađe dobi, oni kojima je tijelo djelomično ozračeno ili su duže vrijeme bili izloženi zračenju i oni kojima je dostupno pravodobno liječenje. CNS sindrom ili cirkulacijsko-neurovegetativni sindrom se javlja kod ozračenja cijelog tijela dozama većim od 20 Gy ili dozama od 40 Gy u području same glave. Kod ovog sindroma dolazi do poremećaja u cirkulaciji neurovegetativnog sustava, a očituje se problemima s optokom krvi u organe, poteškoćama s disanjem, poremećenom probavom i sl.

Svi navedeni sindromi imaju nekoliko stadija, prva po ozračenju se javlja prodromalna faza. Prodromalna faza je faza u kojoj se javljaju simptomi i promjene unutar nekoliko sati do dva tri dana, ovisno o apsorbiranoj dozi, ozračenoj površini te brzini doze, a zatim se simptomi povlače. Nakon ove faze javlja se latentna faza, u njoj nema simptoma, ali se događaju promjene na hematopoetskom aparatu i na sluznici crijeva. Te promjene se kasnije u manifestnoj fazi očituju kliničkom slikom koja odgovara razini ozračenja. Ukoliko ozračeni preživi sve ranije faze nakon manifestne faze ulazi u kasnu fazu (faza oporavka i/ili smrti). U kasnoj fazi se većina pacijenata ili oporave ili umire, a proces oporavka preživjelih traje od nekoliko tjedana do dvije godine. Prestanak simptoma je postepen.

Liječenje akutne radijacijske bolesti ovisi o tijeku bolesti i kliničkoj slici, dakle nema specifičnog liječenja već su terapije usmjerene na prevladavanje depresije koštane srži i oštećenja crijevnog epitela. Infekcije se sprječavaju antibioticima, antivirusnim lijekovima, antifungicima, izolacijom ozračenih, daje se potporna terapija epitelu crijeva i ako je potrebno vrši se transplatacija koštane srži. Anemija se korigira koncentratom eritrocita, a transfuzija trombocita se daje kada im se broj smanji ispod određene količine. Ako se radi transplatacija koštane srži ono se radi isključivo u prvom tjednu nakon ozračenja. Oboljelima se intravenski daje nadomjestak tekućine i elektrolita.

Važno je napomenuti da osoba ozračena vanjskim izvorom zračenja nije izvor zračenja i ne predstavlja opasnost za bolničko osoblje koje ga liječi. Dijagnoza radijacijske bolesti postavlja se na temelju anamneze, kliničke slike i laboratorijskih nalaza. U nastavku je prikazan tijek akutne radijacijske bolesti kod različitih razina apsorbirane doze.

Faze u razvoju bolesti kod akutnog ozračenja cijelog tijela dozom 1-2 Gy:

1. Prodromalna faza:

- Blag oblik bolesti.
- Mučnina se pojavljuje od 1 do 2 sata nakon izloženosti.
- Povraćanje se javlja sa odgodom od 2 do 6 sati nakon ozračenja.
- Nakon 24 sata i mučnina i povraćanje prestaju.
- U početku nastaje leukocitoza (povišeni leukociti) zbog ubrzanog otpuštanja leukocita iz koštane srži.
- CNS simptomi: blaga glavobolja 2 sata nakon izlaganja ili kasnije; javlja se u 10-50% ozračenih.
- Hospitalizacija ranije zdravih osoba kod ove razine izloženosti nije potrebna.

2. Latentna faza:

- Od prestanka prodromalnog perioda najčešće od 10 do 14 dana od dana ozračenja, moguće od 21 do 35 dana nakon prodromalne faze.
- Granulocitopenija nastaje kasnije kada se rezerve leukocita potroše obzirom da su matične stanice nesposobne za daljnje razmnožavanje i samoobmanjivanje.
- Imunološki sustav je oslabljen, s produženim oporavkom u kojem postoji povećani rizik od infekcije.
- Medicinsko praćenje – kontrola leukocita.

3. Manifestna faza:

- Nastupa 30-35 dana nakon prestanka povraćanja.
- Trajanje ovisi o primljenoj dozi.
- Mogući simptomi su opća slabost i umor.
- Smrtnost nije zabilježena kod pacijenata koji su samo ozračeni, dok je kod ranije imunokompromitiranih moguća smrt.
- Anemija se javlja kasnije obzirom da eritrociti u perifernoj krvi žive oko 120 dana.
- Privremeni sterilitet kod muškaraca je uobičajen.

4. Oporavak ili smrt:

- Liječenje je simptomatsko, u većini slučajeva počinje oporavkom koštane srži.
- Kod većine ljudi potpuni oporavak nastupa u roku od nekoliko tjedana do dvije godine.
- Kod pojedinih ljudi smrt nastupa kod izloženosti od 1.2 Gy. 10% ozračenih umire nakon 30 dana.

Faze u razvoju bolesti kod akutnog ozračenja cijelog tijela dozom 2-4 Gy:

1. Prodromalna faza:

- Srednje teški oblik bolesti.
- Ovisno o dozama, povraćanje se javlja od 1 do 2 sata nakon doze oko 4 Gy, a 3 sata nakon doze od 2 Gy.
- Mučnina se javlja od 1 do 6 sati nakon zračenja i traje 1 do 2 sata.
- CNS simptomi: 2 sata nakon izlaganja ili kasnije javlja se blaga glavobolja kod 10 do 50% ozračenih.
- Hospitalizacija nije potrebna, samo kod imunokompromitiranih dovoljno ambulantno praćenje.

2. Latentna faza:

- Traje od 7 do 14 dana, ponekad od 18 do 28 dana, a počinje prestankom prodromalne faze.
- Povećani rizik od infekcija zbog masovnog gubitka leukocita.
- Matične stanice u koštanoj srži umiru iako se oboljeli može osjećati dobro.
- Traje od 1 do 6 tjedana uz medicinsko praćenje.

3. Manifestna faza:

- 30 do 35 dana nakon prestanka povraćanja.
- Traje ovisno o primljenoj dozi.
- Mogući simptomi su opća slabost i umor.
- Mogućnost trajnog steriliteta kod žena.
- Preživljavanje moguće i bez liječenja.

4. Oporavak ili smrt:

- Liječenje se vrši simptomatsko i hospitalizacijom na hematološkom odjelu.
- Oporavak traje od jednog do nekoliko mjeseci.
- 35% ozračenih umire u roku 30 dana od dana ozračenja.

Faze u razvoju bolesti kod akutnog ozračenja cijelog tijela dozom 4-6 Gy:

1. Prodromalna faza:
  - Težak oblik bolesti.
  - Početak povraćanja za manje od 1 sat nakon izlaganja kod 100% ozračenih.
  - Pojava dijareje od blage do izrazite, ovisno o primljenoj dozi i počinje od 3 do 8 sati nakon izlaganja.
  - Umjereni glavobolja od 4 do 24 sata u 50% izloženih.
  - Povišena tjelesna temperatura i groznica od 1 do 2 sata nakon izlaganja u 80 do 100% ozračenih.
  - Liječenje u specijaliziranim bolnicama.
2. Latentna faza:
  - Počinje prestankom prodromalne faze i traje od 8 do 18 dana.
  - Nastaje umjereni gubitak kose u tom periodu.
  - Nužna je hospitalizacija.
3. Manifestna faza:
  - Počinje 18 dana nakon ozračenja i traje od nekoliko tjedana do nekoliko mjeseci.
  - Simptomi: mučnina, povraćanje, dijareja.
  - Težak gubitak tekućine i elektrolita.
  - Klinički učinci: anoreksija, groznica, slabost, krvarenja, infekcije.
  - Potpuni gubitak kose u periodu od 11 do 21 dana.
  - Smrtnost 20-70 % sa početkom u razdoblju od 4 do 8 tjedana.
4. Oporavak ili smrt:
  - Preživljavanje samo uz intenzivno liječenje.
  - Oporavak zahtijeva agresivnu suportivnu skrb.
  - Cijeloživotna kontrola.
  - Trajanje oporavka od nekoliko mjeseci do nekoliko godina.
  - Primarni uzrok smrti je krvarenje.
  - Što je veća doza zračenja to je manja mogućnost preživljavanja.
  - Najveći broj smrti ozračenih se javlja u roku od nekoliko tjedana.

Faze u razvoju bolesti kod akutnog ozračenja cijelog tijela dozom 6-8 Gy:

1. Prodromalna faza:
  - Osobito težak oblik bolesti.
  - Povraćanje počinje za manje od 30 minuta od izlaganja u 100% izloženih.
  - Jaka glavobolja od 3 do 4 sata nakon izlaganja kod 80% izloženih.
  - Smanjena razina svijesti.
  - Visoka tjelesna temperatura od 1 do 2 sata nakon izlaganja.
  - Hitno liječenje u specijaliziranoj bolnici.
2. Latentna faza:
  - Počinje odmah ili nakon tjedan dana od kraja prodromalne faze.
  - Potpuni gubitak kose.
  - Nužna je hospitalizacija.
3. Manifestna faza:
  - Počinje u roku manjem od 7 dana nakon zračenja.
  - Traje mjesecima.
  - Potpuni gubitak kose u razdoblju od 11 dana.
  - Mogući simptomi: anoreksija, groznica, malaksalost, slabost, krvarenje, infekcije, sepsa, mučnina, povraćanje.
  - Teška dijareja uz gubitak tekućine i elektrolita od 6 do 9 dana.
  - Potrebna agresivna i suportivna skrb.
  - Smrtnost od 20 do 70%, s početkom u razdoblju od 4 do 8 tjedana.
4. Oporavak ili smrt:
  - Mala vjerojatnost preživljavanja i uz liječenje.
  - Oporavak zahtjeva agresivnu suportivnu skrb.
  - Presađivanje koštane srži.
  - Cijeloživotna kontrola.
  - Oporavak može trajati godinama.
  - 50% ozračenih umire u razdoblju od 1 do 2 tjedna od ozračenja.



Faze u razvoju bolesti kod akutnog ozračenja cijelog tijela dozom višom od 8 Gy:

1. Prodromalna faza:
  - Letalan oblik bolesti.
  - Kod 100% izloženih povraćanje počinje za manje od 10 minuta nakon izlaganja, a teška dijareja počinje u roku od nekoliko minuta nakon izlaganja.
  - Jaka do neizdrživa glavobolja od 1 do 2 sata nakon izlaganja u 80 do 90% izloženih.
  - Gubitak svijesti od nekoliko sekundi ili minuta odmah nakon izlaganja.
  - Kod izlaganja cijelog tijela dozi od 40 Gy javljaju se grčevi, konfuzije, drhtanje, izraziti nemir i slično.
  - Visoka tjelesna temperatura za manje od 1 sata nakon izlaganja kod 100% izloženih.
  - Obavezno liječenje u specijaliziranim bolnicama, najčešće palijativno.
2. Latentna faza:
  - Trajanje bez latencije, ponekad nekoliko sati.
  - Potpuni gubitak kose.
  - Obavezna hospitalizacija.
3. Manifestna faza:
  - Počinje odmah i traje mjesecima ili godinama ako se izloženi uspije oporaviti.
  - Potpuni gubitak kose deseti dan.
  - Gubitak svijesti.
  - Simptomi: mučnina, povraćanje, dijareja, anoreksija, malaksalost, slabost, krvarenja.
  - Infekcije, rane na koži (15 Gy), ulceracije (20 Gy), gangrena (<30 Gy).
  - Obavezna agresivna i suportivna skrb.
  - Smrtnost je velika bez terapije.
4. Oporavak ili smrt:
  - Preživljavanje izuzetno rijetko, smrt se javlja u razdoblju od nekoliko dana od početka izloženosti.

### 4.2.3. Oštećenja kože ionizirajućim zračenjem

Oštećenja kože ionizirajućim zračenjem uzrokuju rendgenske zrake koje potječu iz aparata namijenjenih za terapiju ili dijagnostiku u medicini, tehnici, industriji i slično.

#### 4.2.3.1. Akutni radiodermatitis (Radiodermatitis acuta)

Može nastati nakon primjene jednokratne doze ionizirajućeg zračenja više od 7 Gy ili nakon višekratne primjene manjih doza. Na koži koja je ozračena nastaju ozljede slične opeklinama i često se nazivaju radijacijske opekline. Akutni radiodermatitis se dijeli u tri stupnja.

Prvi stupanj se, ovisno o dozi zračenja, očituje u obliku tamnocrvenog eritema koji prelazi u hiperpigmentaciju. Prolazno smanjenje sekrecije lojnica i prolazna alopecija (gubitak kose) uzrokuje doza od oko 3.8 Gy. Nakon ozračenja alopecija traje 3 tjedna, a dlaka ponovno naraste nakon 4 do 12 tjedana. Nakon primljene doze zračenja od 8 do 10 Gy pojavljuje se drugi stupanj radiodermatitisa. Boja kože poprima grimizno crvenu boju sa ljubičastim tonom, a moguće su i erozije kože.

Drugi stupanj se obično pojavljuje kod ljudi nakon rendgenske terapije karcinoma kože s višekratno frakcioniranim dozama zračenja. Proces zacjeljivanja započinje obično nakon 4 do 5 tjedana. Ozračeno područje može biti atrofično (smanjenje volumena), s hiperpigmentacijama i teleangiektazijama (proširenje krvnih žila), ovisno o primljenoj dozi. Dlaka se trajno gubi, kao i lojnice i većina znojnice.

Kod trećeg stupnja radiodermatitisa nastaju duboke nekroze (odumiranje stanica) što može dovesti do pojave vrlo bolnih ulceracija (zagnojavanja) kože koje vrlo sporo zacjeljuju. Za liječenje ove bolesti koriste se kortikosteroidne masti, koje djeluju protuupalno i sredstva koja pospješuju stvaranje granulacija i zacjeljivanje.



Slika 13. Radiodermatitis acuta

Izvor: [www.dermnetnz.org](http://www.dermnetnz.org)

#### 4.2.3.2. Kronični radiodermatitis (Radiodermatitis chronica)

Nastaje kao produžetak akutnog radiodermatitisa trećeg stupnja, nakon primljene doze zračenja od 12 do 15 Gy. Može nastati i kod pacijenata zbog čestih terapijskih i dijagnostičkih ekspozicija, pri djelovanju manjih doza, ili kao profesionalno oštećenje radnika koji rade u ioniziranoj sredini.



Slika 14. Radiodermatitis chronica

Izvor: [www.zdravlje.eu](http://www.zdravlje.eu)

Simptomi kod kroničnog radiodermatitisa su rigidna atrofija, teleangiektazija, skleroza (zadebljanje tkiva), poremećaj pigmentacije, hiperkeratoza i nastanak kožnih adneksa (pridruženi organi). Dolazi i do promjena vezivnog tkiva, što može uzrokovati nekrozu i ulkus. Na sluznicama usana i usta također se javlja pojačana salivacija (slinjenje), a kasnije suhoća i eritem. Manje doze zračenja mogu uzrokovati najblaži oblik rendgenskog heilitisa i upalu sluznice usne šupljine, a može se pojaviti čak i nakon prečestog i u kratkom vremenu ponovljenog rendgenskog slikanja zuba. Kod većih doza zračenja dolazi do tropidnog erozivnog i ulceroznog stomatitisa sa pseudomembranama i jakim bolovima. Pseudomembrane su opne izgrađene od fibrina i upalnih stanica te od limfocita koji nastaju kao proizvod upalne reakcije na sluznici ždrijela, grkljana, dišnog trakta i crijeva.

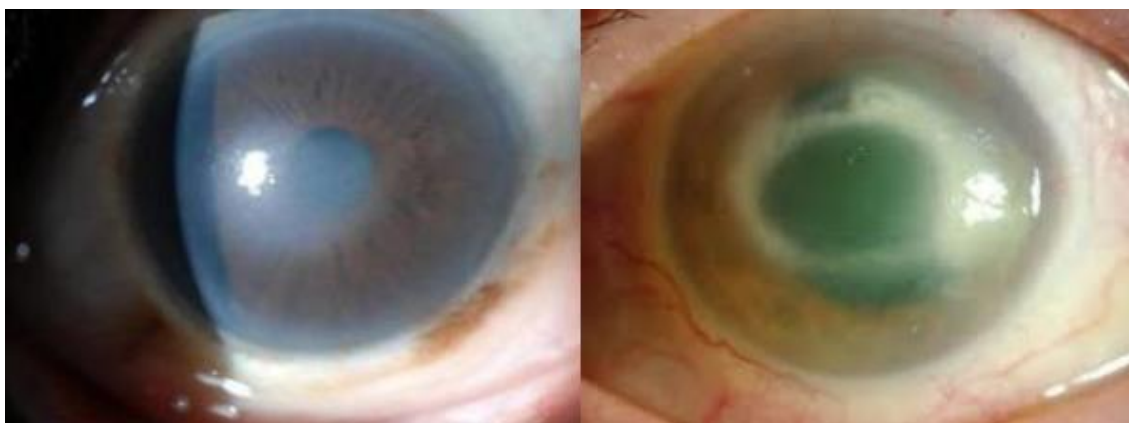
Kasna rendgenska oštećenja u ustima uzrokuju propadanje sluznice, suhoćom zbog gubitka žlijezda, ulceracijama, keratozama, koje su nalik na zadebljane bijele i crvene ranice u ustima. Potrebno je pažljivo njegovati ozračeno područje primjenom sredstava za pospješivanje granulacije i epitelizacije. Pri kroničnim oštećenjima s ulceracijama, najpoželjnije je izvesti plastičnu operaciju uklanjanja bolesnog tkiva. Sve dodatne podražaje koji bi mogli pojačati rendgensku reakciju kao npr. sunčanje, treba izbjegavati, da bi se izbjegla kombinacijska oštećenja.

#### 4.2.4. Kasni učinci zračenja

Mjesecima i godinama nakon izloženosti zračenju putem kliničkih simptoma se javljaju kasni učinci zračenja. Glavni simptomi kasnijih učinaka zračenja su povećana incidencija pojedinih malignih bolesti, sterilitet, kronični radiodermatitis, zamućenje i katarakta leće, deformacije novorođenčadi ranije izloženih roditelja, usporeni rast i fizički ili psihički razvoj kod djece te genetske promjene uključujući i fiksirane kromosomske aberacije. Kronični radiodermatitis je posljedica akutne lokalne doze više od 10 Gy ili duža izloženost ukupnoj dozi višoj od 20 Gy. Nastaje nakon radijacijske opekline, a karakterizira ga atrofična suha koža, bez dlake, kose i pigmentacije. Kromosomske aberacije su rezultat dijagnostičkih postupaka, akcidentalnih situacija i u linearnoj su ovisnosti s apsorbiranom dozom zračenja, a mogu perzistirati desetljećima. Uz primjenu

mjera zaštite na radu u uvjetima profesionalne izloženosti ne očekuju se kromosomske aberacije.

Očna leća je vrlo osjetljiva na ionizirajuće zračenje, već pri jednokratnim apsorbiranim dozama višim od 2 Gy javlja se koagulacija proteina u leći. Započinje kao plak u subkapsularnom stražnjem polu leće i širi se prema prednjem dijelu koteksa. Može prouzročiti zamagljen vid, smečkastu ili žućkastu sliku i točke gdje je vid manje bistar, a latentno razdoblje za nastanak promjena na leći iznosi više od 10 godina.



Slika 15. Katarakta oka

Izvor: [www.bilicivision.hr](http://www.bilicivision.hr)

Zloćudni tumori u odnosu na opću populaciju nemaju veću incidenciju među izloženim radnicima, ako izloženost nije prelazila 0.1 Gy. Prema Znanstvenom komitetu Ujedinjenih naroda za učinke atomskog zračenja (UNSCEAR) male doze zračenja imaju nizak kancerogeni potencijal, samo 4% oboljela od karcinoma se može pripisati ionizirajućem zračenju s tim da je u pitanju ozračenje niskom dozom. Vrste karcinoma koje se povezuju s visokim dozama zračenju su karcinom debelog crijeva, jetre, pluća, dojke, mjehura i leukemija. Latentni period je naziv za vremenski period između izloženosti zračenju i pojave karcinoma. Vremenski period između izloženosti zračenju i pojave bolesti iznosi minimalno 2 godine za leukemiju, a za čvrste tumore iznosi više od 5 godina. Američka nacionalna akademija znanosti objavila je 1998. godine izvještaj o učinku izloženosti radonu na zdravlje koji potvrđuje da je radon drugi po redu uzrok karcinoma pluća u Sjedinjenim Američkim Državama. Procjenjuje se da radon uzrokuje otprilike 15000 smrti od raka pluća godišnje.

U ranoj trudnoći ozračena zdjelica majke može dovesti do deformacije fetusa ili embrija. Ozračenje embrija u ranom preembrionalnom razdoblju (0. do 3. tjedan) odnosno embrionalnom razdoblju (4. do 8. tjedan trudnoće) ili u fetalnom razdoblju (9. tjedan trudnoće do kraja trudnoće) može dovesti do malformacija djeteta. Pri ozračenju u preembrionalnoj i embrionalnoj fazi uništavaju se neke stanice za vrijeme razvoja pojedinih organa, ako embrij, a kasnije fetus preživi, što može izazvati tešku kliničku sliku kod novorođenčeta i kasnije u životu. Učinci ozračenja ploda u maternici promatraju se kao izdvojena kategorija jer mogu uzrokovati smrt djeteta, tjelesne deformacije, mentalnu zaostalost i pojavu raka.

## 5. Detektori ionizirajućeg zračenja

Detektori zračenja su najjednostavniji uređaji pomoću kojih se samo zapaža zračenje, taj uređaj postaje mjerni instrument (brojač) ukoliko s takvim uređajem možemo zapažati pojedine čestice ili fotone te ih možemo brojati. Detektor pohranjuje energiju čestice koja se detektira i pretvara u signal koji je dostupan ljudskoj percepciji. Na mjernim instrumentima je upotrijebljeno kvantitativno poznat odnos između nekog svojstva zračenja koje se mjeri i pojave koju je zračenje izazvalo.

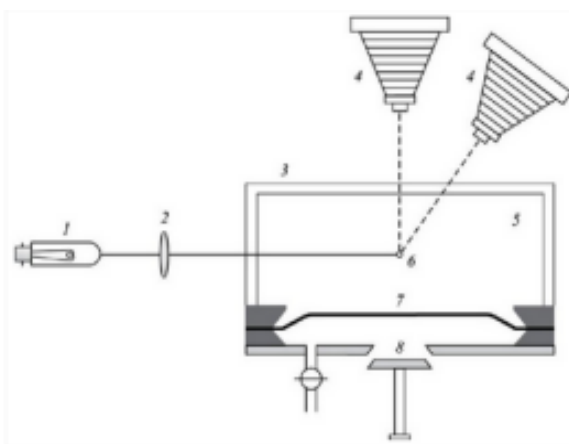
Postoji mnogo uređaja napravljenih za opažanje i mjerenje zračenja, a razvrstani su u tri osnovne skupine: dozimetri, brojači i vizualizatori tragova. Uređaji poput Wilsonove maglene komore i radiografskog sloja su vizualizatori tragova, pomoću kojih se na temelju nekog međudjelovanja mogu privremeno ili trajno vidjeti tragovi čestica ili fotona u tvari. Promatranjem i mjerenjem tragova čestica mogu se saznati mnoga njihova svojstva, pa su se ovi uređaji ranije često primjenjivali u znanstvenim istraživanjima.

Brojači ili detektori su uređaji pomoću kojih se registriraju i broje pojedine naelektrizirane čestice i fotoni, a to su: Geiger-Müllerov brojač, poluvodički brojač i mnogi drugi. Uređaji pomoću kojih se mjeri doza koju je zračenje predalo nekoj tvari nazivaju se dozimetri. Ionizacijske komore te kemijski dozimetri su takvi uređaji, kojima pripada radiografski sloj kod kojeg se mjeri zacrnenje koje je uzrokovalo zračenje.

Postoji i druga podjela detektora, prema rezultatima koje daju, a dijele se u dvije kategorije. U prvu kategoriju detektora spadaju Wilsonova maglena komora, difuzijska maglena komora, komora na iskre, komora na mjehuriće te Čerenkovljev brojač, oni kao rezultat daju sliku staze opisane gibanjem nabijene čestice. Proučavanjem slike moguće je odrediti vrstu čestice, njenu brzinu i naboj, odrediti vrijeme života čestice, njen raspad ili raspršenje i mnoge druge podatke. Detektori koji spadaju u drugu kategoriju su plinski, scintilacijski i poluvodički detektori, koji bilježe prisutstvo zračenja, vrstu zračenja te energiju zračenja.

## 5.1. Wilsonova maglena komora i difuzijska komora

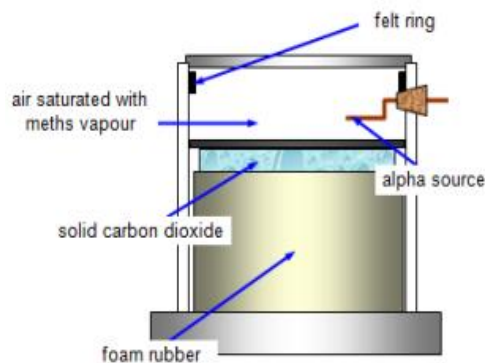
Wilsonovu maglenu komoru 1911. godine konstruirao je britanski fizičar i meteorolog Charles Wilson, a 1927. godine za to otkriće je dobio Nobelovu nagradu. Maglena i difuzijska komora su praktične i jednostavne za uporabu. Maglena komora se sastoji od komore u kojoj je zasićena vodena para, kojoj da bi se kondenzirala nedostaju centri kondenzacije. Izvor radioaktivnog zračenja stavlja se unutar aktivne sredine, naglim povećanjem tlaka para se prvo sabije, a zatim smanjivanjem tlaka dolazi do širenja pare te para prelazi u prezasićeno stanje. Prolaskom samo jedne alfa čestice stvara se tisuću parova iona koji postaju centri kondenzacije. Na takav način formiraju se kapljice tekućine koje stvaraju tragove vidljive ljudskom oku. Fotografiranjem se mogu sačuvati podaci o putanji čestice i odrediti mnoge druge karakteristike čestice. Pošto maglena komora ne može da radi neprekidno, 1939. godine Alexander Langsdorf konstruirao je difuzijsku maglenu komoru koja stalno ostaje osjetljiva na ionizirajuće zračenje, dok god je u komori prisutna zaliha hlapljive tekućine kao što je metilni alkohol. U sredini komore postoji stalno zasićeni prostor s parom, jer se u gornjem dijelu održava stalna temperatura od  $30^{\circ}\text{C}$ , a pri dnu oko  $-70^{\circ}\text{C}$ . Difuzijska komora je vrlo pogodna za istraživanje elementarnih čestica visoke energije. Razlika između maglene i difuzijske komore je u metodi stvaranja magle. Wilsonova maglena komora stvara maglu brzim pomicanjem dijafragme, a difuzijska komora nema pokretnih dijelova i njezin rad je kontinuiran.



Slika 16. Wilsonova maglena komora – 1.bljeskalica, 2.leća, 3.stakleno kućište, 4.fotoaparati, 5.prostor komore, 6.kondenzacijska jezgra, 7.pokretna membrana, 8.klip

Izvor: [www.hr.wikipedia.org](http://www.hr.wikipedia.org)



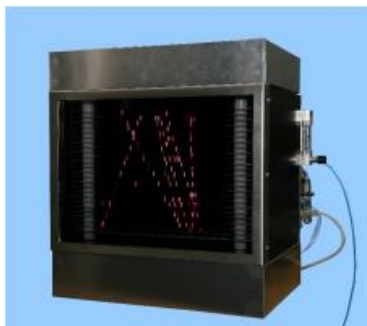


Slika 17. Difuzijska maglena komora

Izvor: [www.repozitorij.fizika.unios.hr](http://www.repozitorij.fizika.unios.hr)

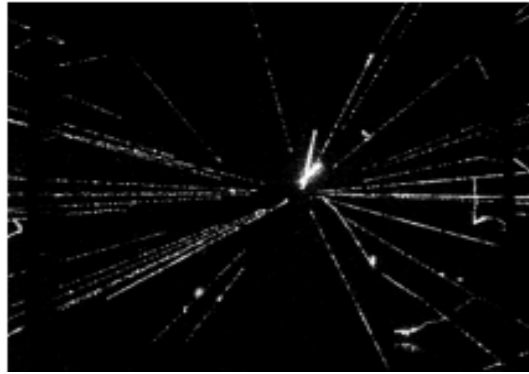
## 5.2. Komora ne iskre

Komora na iskre sastoji se od niza paralelnih i vrlo tankih elektroda u hermetički zatvorenoj kutiji koja je ispunjena plinom (helij, neon ili njihova smjesa) i spada u detektore prve kategorije. Između elektroda vlada visoki napon, koji ipak nije dovoljno visok da bi se dogodio električni izboj među njima. Scintilacijski detektor, koji spada u vrstu detektora druge kategorije, je potreban za detekciju čestica. Onog trena kada scintilacijski detektori smješteni na periferiji komore registriraju prolaz ionizacijske čestice uključuje se visoki napon. Prolaskom nabijene čestice nastaju ioni koji omogućuju izboj koji se očituje nizom iskri duž putanje čestice te na taj način možemo registrirati stazu čestice. Na slici broj 18 prikazano je što se događa unutar komore kada nabijena čestice prolazi kroz komoru.



Slika 18. Komora na iskre

Izvor: [www.hr.wikipedia.org](http://www.hr.wikipedia.org)

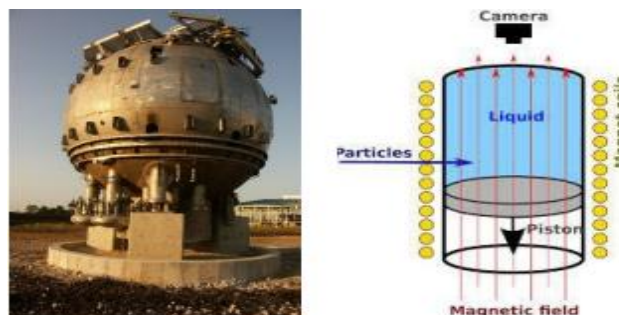


Slika 19. Sudar proton-antiproton snimljen s komorom na iskre

Izvor: [www.hr.wikipedia.org](http://www.hr.wikipedia.org)

### 5.3. Komora na mjehuriće

Mjehurićasta komora ili komora na mjehuriće sadrži u sebi medij bezbojne pregrijane tekućine, to može biti tekući eter, vodik, dušik, izopentan ili neka druga tekućina, a spada u prvu kategoriju detektora. U komori se klipom regulira volumen tekućine, koja se nalazi magnetskom polju. Kamera koja slika trag čestica postavljena je na gornjem dijelu posude, kao što možemo vidjeti na slici 19. Kada ionizirajuća čestica prolazi kroz pregrijanu tekućinu stvaraju se ioni koji postaju jezgre za stvaranje mjehurića pare u pregrijanoj tekućini. Stvoreni mjehurići pod jakim osvjetljenjem pokazuju putanju zračenja i mogu se uočiti neprekinute bijele linije koje čine sitni mjehurići. Komoru na mjehuriće je 1952. godine izumio Donald A. Glaser, a 1960. godine za svoj izum je dobio Nobelovu nagradu. Wilsonova i difuzijska komora su se počele manje primjenjivati nakon izuma ove komore, ali nisu izgubile na važnosti.



Slika 20. Komora na mjehuriće

Izvor: [www.hr.wikipedia.org](http://www.hr.wikipedia.org)

## 5.4. Čerenkovljev brojač

Čerenkovljev brojač je ustvari pojava koju je uočio i opisao Pavel A. Čerenkov, a objasnili su je I. M. Frank i I. J. Tamm, za to su 1958. godine dobili Nobelovu nagradu. To je ustvari elektromagnetsko zračenje koje nastaje prolaskom nabijene čestice kroz medij, u tome mediju brzina čestice je veća od brzine svjetlosti. Brzina čestice se može odrediti iz smjera elektromagnetskog zračenja koje je emitirano. Danas je Čerenkovljev detektor unaprijeđen i koristi se u mnogim istraživanjima.

## 5.5. Scintilacijski detektor

Spada u drugu kategoriju detektora koji bilježe zračenje i vrstu zračenja. Zastor prekriven slojem cinkova fluida bio je prvi scintilacijski detektor koji se koristio, a imao je vrlo široku primjenu. Danas se koriste scintilacijski detektori kao standardni detektori  $\gamma$  – zračenja. Većina zračenja kroz plin prolazi bez ikakve interakcije zato su scintilatori obično čvrsta tijela, iako mogu biti i gusti plinovi i tekućine. Pri međudjelovanju sa zračenjem scintilacijski detektor proizvodi svjetlost koja se pretvara u električni signal koji se nadalje obrađuje elektronski i računalom. Scintilacijski detektor sastoji se od scintilacijskog kristala, tijela scintilatora i fotomultiplikatora.



Slika 21. Scintilacijski kristal okružen raznim scintilacijskim uređajima

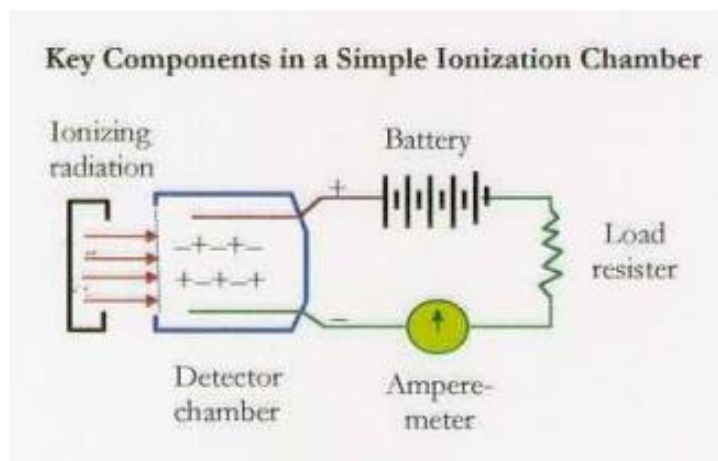
Izvor: [www.hr.wikipedia.org](http://www.hr.wikipedia.org)

## 5.6. Plinski detektori

Plinski detektori rade na principu sakupljanja elektrona i iona stvorenih ionizacijskim zračenjem na elektrode unutar tijela brojača. Postoje tri osnovna tipa plinskih brojača, a to su: ionizacijska komora, proporcionalni brojač i Geiger-Müllerov brojač. Vrlo je važan iznos napona između katode i anode jer određuje o kojem tipu brojača se radi.

## 5.7. Ionizacijska komora

Ionizacijska komora je dozimetar u kojem se otkrivaju i mjere posljedice ionizirajućeg zračenja. Sastoji se od zatvorene cilindrične komore, u kojoj se nalazi plin pod određenim tlakom i dvije elektrode s različitim električnim potencijalima (katoda i anoda). To je jedan od prvih detektora kojemu se načelo detekcije zasniva na sabiranju ionskih parova koji nastaju u električnom polju komore. Radioaktivno zračenje koje dopijeva u aktivnu zapreminu komore ionizira plin. Pod utjecajem električnog polja nastaju pozitivni ioni i slobodni elektroni, koji se nazivaju ionskim parom. Nastali ionski parovi stvaraju strujni signal razmjernan jakosti upadnog zračenja, koji se dalje može oblikovati i pojačavati u izlazni signal, a registrira se mjernim uređajem.



Slika 22. Prikaz glavnih komponenti ionizacijske komore

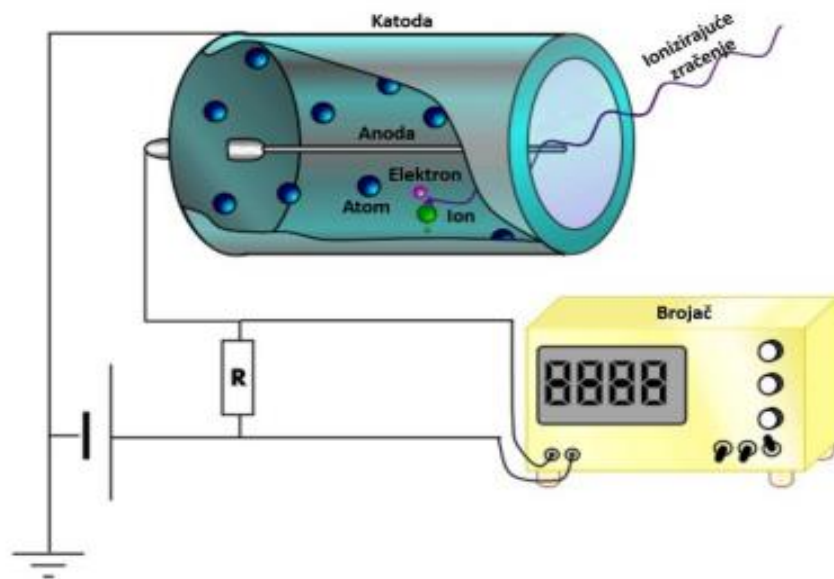
Izvor: [www.physics.mef.hr](http://www.physics.mef.hr)

## 5.8. Proporcionalni brojač

Proporcionalni brojač je nastao unapređenjem ionizacijske komore i njegov princip rada je malo napredniji. Informacije o energiji ionizirajućeg zračenja proporcionalni brojač daje preko anode koja je u obliku tanke žice, čime se postiže dovoljno jako polje u okolici anode da se izazove multiplikacija broja ionskih parova, tako da se dobiju viši naponski pulsovi uz zadržavanje proporcionalnosti s brojem primarno stvorenih ionskih parova.

## 5.9. Geiger-Müllerov brojač

Uređaj koji se danas najčešće upotrebljava za mjerenje ionizirajućeg zračenja je Geiger-Müllerov brojač. Geiger-Müllerov brojač sastoji se od komore ispunjene plinom, najčešće helijem ili argonom, sa žicom u sredini koja je postavljena na visoki napon. Unutar komore se nalaze dvije elektrode između kojih se nalazi razlika od najčešće 400 do 600V. Pri ionizirajućem zračenju, neke molekule plina se ioniziraju izravno dok se neke ioniziraju indirektno pomoću novonastalih elektrona proizvedenih u stjenkama cijevi, te dolazi do stvaranja ionskih parova. Proces ionizacije se višestruko ponavlja i nastaje elektronska lavina. Brzina širenja lavine je od 2 do 4cm po mikrosekundi tako da potpuna ionizacija plina u cijevi uobičajene veličine traje svega nekoliko mikrosekundi. Ovaj detektor može registrirati alfa, beta i gama zračenje, iako ih ne može razlikovati. Najbolji je za uporabu kada se želi samo pokazati postojanje i gruba procjena radioaktivnosti, a njegova efikasnost je stopostotna za alfa i beta zračenje, dok je puno manja za gama zračenje.



Slika 23. Presjek Geiger-Müllerova brojača

Izvor: [www.repozitorij.fizika.unios.hr](http://www.repozitorij.fizika.unios.hr)

### 5.10. Poluvodički brojač

Poluvodički brojač je uređaj koji je baziran na kristalu poluvodiča, najčešće silicija i germanija, kroz kojeg prolazi zračenje što dovodi do stvaranja parova elektron – pozitron, koji se zatim usmjeravaju pomoću električnog polja. U poluvodičkom kristalu zračenje uzrokuje mnogo veću ionizaciju nego u plinu zbog toga što je gustoća mnogo veća, a energija potrebna za proizvodnju parova mnogo manja. Poluvodički brojači imaju visoku moć energijskog razlučivanja čestica, jedini nedostaci su mu relativno dugo vrijeme regeneracije. Zračenje može uzrokovati trajne promjene kristalne rešetke, a samim time i promjenu karakteristika brojača. Ovi detektori se primjenjuju od sredine 20. stoljeća i najbolji su detektori gama zračenja.

## 6. Zaključak

Na temelju napisanog završnog rada mogu zaključiti da je otkriće ionizirajućeg zračenja iznimno važno i korisno iako ima i mnoge štetne učinke na čovjeka i njegovu okolinu. Ionizirajuće zračenje ima vrlo široku primjenu u medicini, industriji te znanstvenim i tehnološkim istraživanjima. Uređaji za dijagnostičku analizu i liječenje malignih bolesti, bio-medicinski istraživački laboratoriji, svi koriste radioaktivne izvore u svrhu spašavanja ljudskih života. Radioaktivni izvori se također koriste i u industriji za sterilizaciju hrane, eksploataciju rude, te za ostale tehničke procese. Nuklearna postrojenja danas proizvode 17% električne energije u svijetu, odnosno 7% globalne energije.

Važno je poznavati i primjenjivati principe i načela sigurne upotrebe izvora ionizirajućeg zračenja. Kod čovjeka ionizirajuće zračenje uzrokuje biološka oštećenja, a jačina oštećenja ovisi o vrsti ionizirajućeg zračenja, vremenu izlaganja, apsorbiranoj dozi, ozračenoj površini, vremenskom periodu u kojem je primljena određena doza, individualnoj osjetljivosti, te životnoj dobi izloženog čovjeka. Kakve će posljedice biti izazvane ionizirajućem zračenju ovisi dakle o mnogo čimbenika.

Izravne posljedice zračenja na čovjeka i živi svijet nisu odmah vidljive. Ionizirajuće zračenje se nalazi svuda oko nas, zbog toga su nam potrebni uređaji koji će detektirati to zračenje i reći nam koliko smo ozračeni ili o kojoj vrsti zračenja se radi. Potreba za sustavnom i organiziranom provedbom mjera zaštite od ionizirajućeg zračenja, proizišla je iz brojnih iskustva iz prošlosti koja su rezultirala ozračenjem pojedinca, visokom riziku po život i zdravlju ljudi, te zagađenje okoliša. Svaka državna zajednica ima obvezu izgradnje sustavnog, kvalitetnog i uređenog sustava zaštite od ionizirajućeg zračenja na svim razinama društvenog ustrojstva. Zaštita od ionizirajućeg zračenja odnosi se na sve ljude koji mogu biti izloženi ionizirajućem zračenju ili posljedicama izlaganja. Također se vodi računa i o budućim naraštajima koji mogu trpjeti posljedice dosadašnjeg izlaganja ionizirajućem zračenju.

## 7. Literatura

- [1] Straka, D., „Becquerelov eksperiment“ (Diplomski rad), Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, 2017.
- [2] Dresto-Alač, B., „Radioaktivnost. Primjena u medicini.“ (interna skripta), 2012.
- [3] Grgić, S., „Djelovanje ionizirajućih zračenja na žive stanice“ (III. Simpozij), Ministarstvo zdravstva Republike Hrvatske, HDZZ, Zagreb, 1999.
- [4] Janković, S., Eterović, D., „Fizikalne osnove i klinički aspekti medicinske dijagnostike“ Medicinska naklada, Zagreb, 2002.
- [5] Sudar, M. „Detektor ionizirajućeg zračenja - Geiger-Müllerov brojač“ (Diplomski rad) Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, 2016.
- [6] Pavić-Brčić, M., „Učinci zračenja na čovjeka i okoliš“ (Diplomski rad), Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2015.



## 8. Popis slika i tablica

Slika 1. Rendgenski snimak ruke, najvjerojatnije gospođe Röntgen.....	3
Slika 2. Henri Becquerel u svom laboratoriju.....	4
Slika 3. Prikaz Becquerelova pokusa.....	5
Slika 4. Maria Skłodowska Curie i Pierre Curie u svom laboratoriju.....	6
Slika 5. Građa atoma.....	7
Slika 6. Alfa raspad.....	10
Slika 7. Beta minus raspad.....	11
Slika 8. Beta plus raspad.....	12
Slika 9. Gama raspad.....	13
Slika 10. Prodornost $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ zračenja.....	14
Slika 11. Zakon radioaktivnog raspada.....	16
Slika 12. Ovisnost bioloških efekata o primljenoj dozi.....	18
Slika 13. Radiodermatitis acuta.....	28
Slika 14. Radiodermatitis chronica.....	28
Slika 15. Katarakta oka.....	30
Slika 16. Wilsonova maglena komora – 1.bljeskalica, 2.leća, 3.stakleno kućište, 4. fotoaparat, 5.prostor komore, 6.kondenzacijska jezgra, 7.pokretna membrana, 8.klip...33	
Slika 17. Difuzijska maglena komora.....	34
Slika 18. Komora na iskre.....	34
Slika 19. Sudar proton – antiproton snimljen s komorom na iskre.....	35
Slika 20. Komora na mjehuriće.....	35
Slika 21. Scintilacijski kristal okružen raznim scintilacijskim uređajima.....	36
Slika 22. Prikaz glavnih komponenti ionizacijske komore.....	37
Slika 23. Presjek Geiger-Müllerova brojača.....	39
Tablica 1. Osnovna svojstva raznih vrsta radioaktivnog raspada.....	16