

# RADIOAKTIVNOST I IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE

---

**Radinić, Zvonimir**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2024**

*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:128:879740>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-28**



**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

Stručni diplomski studij Sigurnost i zaštite

Zvonimir Radinić

# **RADIOAKTIVNOST I IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE**

DIPLOMSKI RAD

Karlovac, 2023.

Karlovac University of Applied Sciences

Safety and Protection Department

Graduate study of Safety and Protection

Zvonimir Radinić

**RADIOACTIVITY AND IONIZING  
RADIATION**

Final paper

Karlovac, 2023.

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel sigurnosti i zaštite  
Stručni diplomski studij Sigurnost i zaštite

Zvonimir Radinić

# **RADIOAKTIVNOST I IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: dr.sc. Slaven Lulić

Karlovac, 2023.



## PREDGOVOR

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno uz pomoć izvora koji su navedeni u literaturi i znanjem koje sam stekao tijekom studija.

Želim se zahvaliti i svom profesoru i mentoru dr. sc. Slavenu Luliću na povjerenju i strpljenju koje mi je ukazao i što mi je bio na raspolaganju tijekom pisanja ovog rada. Iskustvom, savjetima i znanjem mi je uvelike pomogao i olakšao pisanje ovoga rada.

## SAŽETAK

U ovome radu ću objasniti što je ionizirajuće zračenje, kako ono utječe na čovjeka, iz kojih izvora dolazi, vrste zračenja te način prolaska kroz materiju kako zbrinjavamo radioaktivni otpad i kako računamo radioaktivni raspad. Spomenuti ćemo i neke bolesti ili ozljede uzrokovane zračenjem te naprave za otkrivanje zračenja ( detektori)

Ključne riječi: ionizirajuće zračenje, vrste zračenja, otkrivanje zračenja, radijacijskeozljede i bolesti

## 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 ionizirajućeg zračenja i radioaktivnosti .....	3
3. Ionizirajuće zračenje.....	4
3.1. Vrste ionizirajućeg zračenja .....	4
3.2. Međudjelovanje ionizirajućeg zračenja s materijom .....	8
4. Radioaktivnost .....	12
4.1. Radioaktivni raspad.....	13
4.2. Radioaktivni otpad .....	13
4.3. Zbrinjavanje radioaktivnog otpada.....	14
5. Primjena zračenja .....	15
5.1. Industrija .....	16
5.2. Energetika .....	17
5.3. Medicina .....	17
5.4. Znanost.....	17
5.5. Vojna primjena .....	18
6. Utjecaji ionizirajućeg zračenja .....	19
6.1. Biološki utjecaj ionizirajućeg zračenja .....	19
6.2. Doze ionizirajućeg zračenja.....	20
7. Mjerni instrumenti .....	23
7.1. Ionizacijska komora.....	23
7.2. Maglena komora .....	24
7.3. Geiger-Mullerov brojač .....	25
7.4. Komora na iskre.....	27
8. Zaštita od ionizirajućeg zračenja .....	28
8.1. Fizikalno- tehnička zaštita .....	28
8.2. Kemijska zaštita .....	28
8.3. Biološka zaštita .....	29
8.4. Zakonska podloga .....	29
9. Zaključak .....	31
10. Popis literature.....	32
11. Popis slika.....	33



## 1. UVOD

Radionuklidi (radioaktivni elementi) nalaze se svuda oko nas i to najčešće u hrani, tlu, zraku, vodi, tj. u svim živim organizmima. Zemlja je radioaktivna od samog postanka. Radionuklida ima oko 60 vrsta, a mogu se podijeliti po tome kako su nastali pa tako imamo one koji su nastali kao posljedica djelovanja kozmičkih zraka, one koji su posljedica ljudske tehnologije te one koji su oduvijek prisutni na zemlji. Ljudski rod nije bio upoznat s opasnostima od ionizirajućeg zračenja prije otkrića radioaktivnosti i njegovog biološkog utjecaja.

Ionizirajuće zračenje je dio spektra elektromagnetskog zračenja frekvencija iznad  $3 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$ . Svi oni valovi i zrake velike energije koje iz ljuske atoma mogu izbaciti elektrone i tako ionizirati atom nazivamo ionizirajućim zrakama. Kada se foton svojom velikom energijom sudari s molekulama tvari, uzrokuje ionizaciju tvari i kidanje veza između molekula što u konačnici dovodi do razaranja tkiva. Glavne karakteristike ovog visokofrekvencijskog zračenja ( $f > 10^{15} \text{ Hz}$ ) su kratke valne duljine i visoke energije te u njih ubrajamo rendgenske (X- zrake), gama i kozmičke zrake.

Prirodna zračenja primamo od Sunca koje ispušta infracrveno zračenje, rendgensko zračenje, mikrovalove, radio-valove, vidljivu svjetlost te ultraljubičasto zračenje. Prirodna zračenja nastala su još u vremenu kada se formirala Zemljina kora, a neka su čak i nastala putem kozmičkog zračenja što nam govori da im je izvor negdje izvan Sunčevog sustava. Zračenja iz nuklearnog oružja, uređaja koji se koriste u medicini i nuklearnih reaktora nazivamo umjetnim zračenjima.

Usprkos svim negativnim posljedicama zračenja, ono ipak ima široku primjenu u gospodarstvu, znanosti, poljoprivredi, medicini i raznim drugim djelatnostima u kojima ona korisna strana zračenja utječe na poboljšanje kvalitete života.

Zračenje se može koristiti za dijagnostiku, konzerviranje hrane i namirnica, uništavanje insekata i nametnika, otkrivanje pukotina i mana u cjevovodima, industrijskim građevinama i postrojenjima. Iako je široka primjena ionizirajućeg zračenja gdje vidimo pozitivne posljedice, loša strana i negativne posljedice su ipak malo ekstremnije. Ovisno o izloženosti (jačini i vremenu) ionizirajućem zračenju, ono može biti jako opasno po život i

zdravlje ljudi koji direktno rade s njime ili su mu indirektno izloženi. Štetni su i po okoliš, međutim taj je rizik u nekoj mjeri društveno prihvaćen zbog svoje efektivne koristi. Rizik se treba smanjivati i ograničavati zakonskim, tehnološkim, organizacijskim i administrativnim mjerama jer je nemoguće potpuno otkloniti opasnost djelovanja ionizirajućeg zračenja.

Kod ljudi ne postoji osjetilo kojim bi mogli zapaziti ionizirajuće zračenje. Iz tog razloga postoje uređaji pomoću kojih otkrivamo količinu zračenja. Postoje tri vrste takvih uređaja, a to su: dozimetri, brojači i vizualizatori tragova.

U nastavku ovog rada bit će riječi o povijesti ionizirajućeg zračenja i radioaktivnosti, vrstama i primjeni tog zračenja i njegovom međudjelovanju s materijalima, generalnoj primjeni, ali i zaštiti od negativnih posljedica.

## 2. POVIJEST IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA I RADIOAKTIVNOSTI

W.C. Röntgen otkrio je misteriozne X-zrake (rendgenske zrake) 1895. godine, a Antoine Henri Becquerel je 1896. godine primijetio nevidljivo zračenje uranijevih soli. Takvo je zračenje kroz zaštitni papir utjecalo na fotografsku ploču što je rezultiralo time da elektroskop gubi električni naboj. Uranijeve soli u mraku fluoresciraju, npr. kalijev uranil sulfat u mraku svijetli slabom zelenkastom svjetlošću. Becquerel je daljnjim istraživanjem otkrio da uranijevi spojevi koji uzrokuju zračenje ioniziraju zrak (ionizirajuće zračenje), prolaze kroz papir, pločice od aluminijske i bakra te izazivaju fluorescenciju. Djeluju na našu kožu i klice biljaka. Te zrake imaju slična svojstva kao i rendgenske zrake, ali je 1899. otkrio da se razlikuju od rendgenskih zraka po tome što skreću u magnetskom polju.

Maria Curie-Sklodowska 1911. godine dobila je Nobelovu nagradu za kemiju zbog otkrića kemijskog elementa pod nazivom polonij, a 1935. godine otkrila je da se na zračenje može utjecati zagrijavanjem, kemijskim reakcijama, električnom strujom i sl. Otkrila je, također, da se radioaktivni kemijski elementi pretvaraju jedni u druge, a da njihov raspad ne ovisi o starosti pojedinog atoma. Prva je uvela pojmove „radioaktivnost“ i „radioaktivni element“. Henri Becquerel i Pierre i Marie Curie su 1903. godine podijelili Nobelovu nagradu za fiziku.

Godine 1899. Ernest Rutherford otkrio je da se zračenje radija dijeli na dvije komponente koje se različito apsorbiraju u tvarima. Alfa-zrakama je nazvao slabo prodornu komponentu, a beta-zrakama jako prodornu komponentu.

Paul Ulrich Villard u svom je istraživanju 1900. godine otkrio još prodorniju komponentu koju je nazvao gama-zraka. Rutherford je uz pomoć Fredericka Soddy-a 1902. godine na temelju analize gibanja zraka u magnetskom polju objasnio prirodu radioaktivnosti.

Wolfgang Pauli postavio je hipotezu o postojanju neutrina 1930. godine. Neutrin je bio neuhvatljiva čestica za tadašnje detektore koja odnosi dio energije u beta-raspadu. Prvu strogu teoriju beta-raspada koja govori da prijelaz neutrona u proton ili obrnuto uzrokuje slabo međunuklearno djelovanje, a pritom dolazi do apsorpcije elektrona i neutrina postavio je Enrico Fermi 1933. godine.

### 3. IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE

Ionizirajuće zračenje možemo definirati kao pojavu prijenosa energije u obliku fotona ili masenih čestica koji ima dovoljnu količinu energije da ionizira tvar pri međudjelovanju s kemijskom tvari. Prilikom promjene stanja materije kao posljedica nastaje ionizirajuće zračenje. Kada su u pitanju promjene u energiji ili u sastavu atoma ili jezgre emitiraju se fotoni ili druge čestice, a u međudjelovanju dolazi do izmjene energije i same strukture tvari. Takve posljedice mogu biti korisne ili jako štetne po zdravlje i život.

Posljedice djelovanja ionizirajućih zračenja ne vidimo odmah nego mora proći određeno vrijeme nakon izloženosti. Čovjek može biti izložen minimalnoj dozi zračenja ili smrtonosnoj dozi zračenja, ali neće u tom trenutku ništa osjetiti jer ljudski organizam nema razvijeno osjetilo za registriranje izloženosti zračenju. Posljedice zračenja mogu biti vidne nakon par sati, dana, tjedana, mjeseci ili godina i zbog toga je opravdan čovjekov strah kada su u pitanju zračenje i njegove posljedice. Zato je bitno biti upoznat sa osnovnim karakteristikama i svojstvima zračenja i kako ono djeluje na živa bića i organizme.

Ionizirajuće zračenje može se sastojati od snopa čestica visokih energija (proton, alfa-čestice ili beta-čestice) ili elektromagnetskog zračenja visoke frekvencije (gama-zračenje, rendgensko zračenje, UV zračenje). Ionizirajuće zračenje može imati poguban učinak na molekule tvari i biološka tkiva.

#### 3.1. VRSTE IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

Rendgensko i gama zračenje su glavne dvije vrste ionizirajućeg zračenja, ali i ultraljubičasto elektromagnetsko zračenje također može uzrokovati ionizaciju nekih tvari.

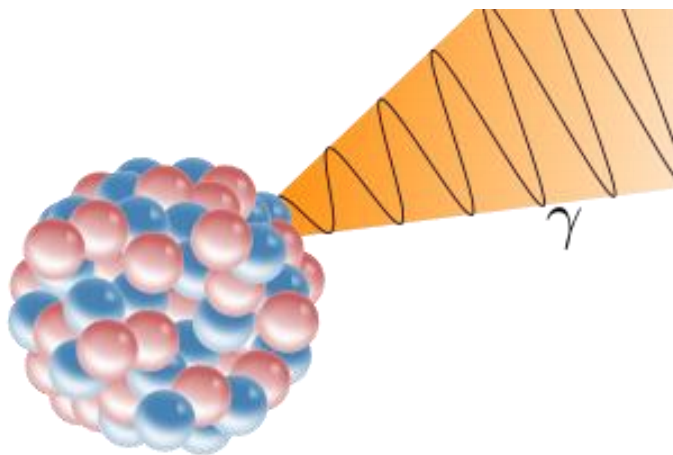
##### a. Gama zračenje

Naziv dolazi od jedne od komponenti zračenja prirodno radioaktivnih tvari. Gama zračenje sastoji se od elektromagnetskih valova kratkih valnih duljina ( $10^{-13}\text{m}$ ). Danas se, bez obzira na porijeklo, svako elektromagnetsko zračenje koje ima tu valnu duljinu naziva gama-zračenjem. Valna duljina nije jedini način na koji ju možemo opisati. Često takvu vrstu

zračenja možemo opisati i energijom fotona tog zračenja. Do emisije gama zračenja dolazi kada jezgra radioaktivnog atoma ima prevelike energije. Neutron iz jezgre se pretvara u proton i beta česticu. Pri tome jezgra atoma izbacuje beta česticu no i dalje ima previše energije i zbog toga se emitira gama foton da bi se stabilizirala. Radioaktivni elementi koji emitiraju gama zrake su najrašireniji izvor zračenja. Osim u medicini, gama zrake koriste se i za poboljšanje fizikalnih svojstava drva i plastike kao i za ispitivanje metalnih dijelova u industriji. Gama zrake postoje samo kada posjeduju energiju. Kada nestane energija nestaju i gama zrake.

Napoznatiji atomi koji emitiraju gama čestice su:

Kobalt-60 (steriliziranje medicinske opreme, pasteriziranje hrane, liječenje karcinoma), cezij-137 i tehnecij-99.



Slika 1: Slikoviti prikaz gama zračenja [2]

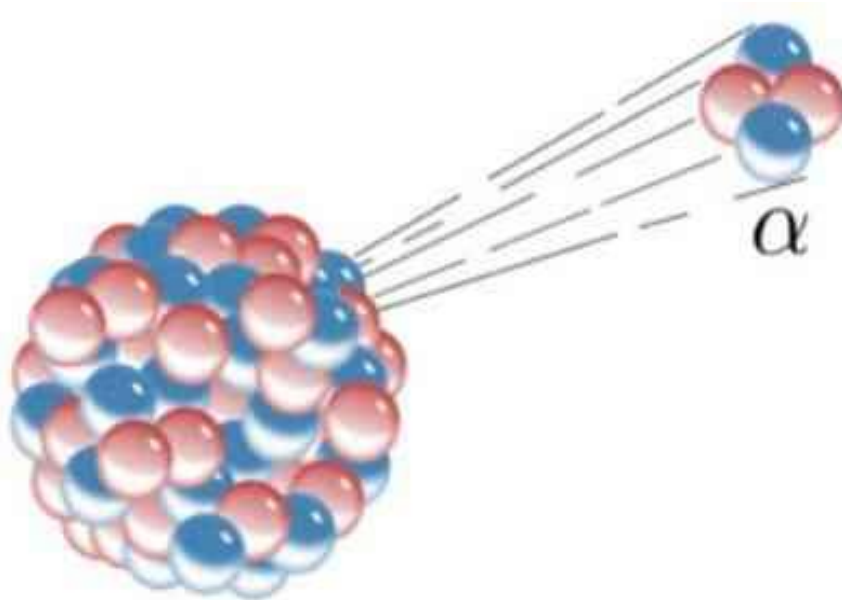
### **b. Rendgensko zračenje**

Često se naziva X- zračenje, a čine ga elektromagnetski valovi kratkih valnih duljina ( $10^{-10}$  m- $10^{-13}$  m) nazvani po jednoj od komponenti prirodno aktivnih tvari. Postoji i posebna vrsta koja se naziva zakočno zračenje, a nastaje kada elektroni u blizini atomske jezgre značajno mijenjaju svoju brzinu (iznos ili smjer gibanja). X-zračenje se često opisuje i kao energija fotona tog zračenja.

### c. Alfa zračenje

Alfa čestica identična je jezgri helija, a sastoji se od dva protona i dva neutrona. Zbog svoja dva protona ima naboj +2, a možemo ju opisati kao relativno tešku i visokoenergetsku subatomsku česticu. Kada je omjer neutrona i protona u jezgri prenizak emitira se alfa čestica kako bi se uspostavila ravnoteža i taj proces nazivamo alfa raspad. Atomi koji emitiraju alfa čestice su u većini slučajeva veliki atomi, drugim riječima imaju visoke atomske brojeve. Mnogo je prirodnih elemenata koji emitiraju alfa čestice, a svi ti atomi imaju atomski broj najmanje 82. Najpoznatiji i najvažniji atomi koji emitiraju alfa čestice su: plutonij-236 (94), americij-241, uran-238 (92), radij-226 (88), radon-222 (86) i torij-232 (90). Oni su prisutni u različitim količinama gotovo u svim stijenkama, tlu i vodi. Neke alfa čestice gibaju se na brzini 1/20 brzine svjetlosti i zbog toga u zraku potroše svu energiju što dovodi do vezanja za slobodne elektrone čime nastaje helij.

Alfa zračenje zbog jakog ionizirajućeg djelovanja vrlo brzo gubi kinetičku energiju i ne prodire duboko u tvar. Zbog toga ju može zaustaviti već i tanki list papira.



Slika 2: Slikoviti prikaz alfa zračenja [3]

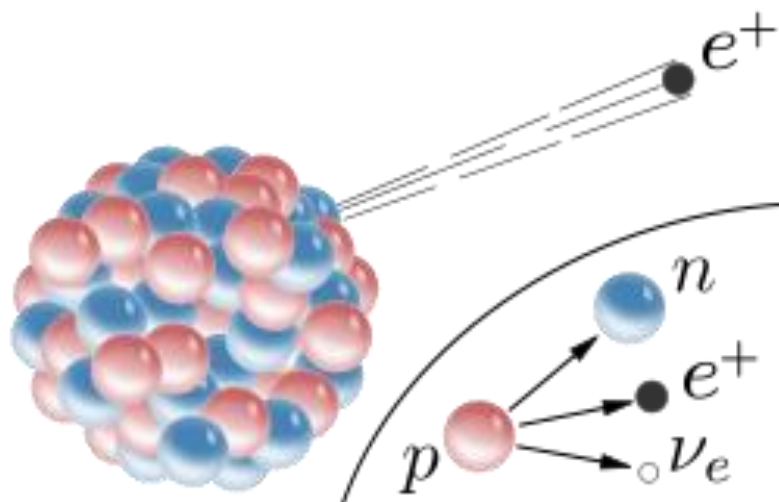


#### d. Beta zračenje

Beta zračenje definiramo kao elektron ili pozitron koji nastaje pretvorbom neutrona u proton u atomskim jezgrama radioaktivnih elemenata zbog djelovanja slabe nuklearne sile. Beta čestice same po sebi nisu radioaktivne iako ih emitiraju radioaktivni atomi. Njihova energija u obliku brzine razbijanjem kemijskih veza nanosi štetu svim živim bićima i tako stvara ione. Beta čestice emitiraju se kada je omjer neutrona i protona u jezgri prevelik. Neutron se pretvara u proton i elektron samo što proton ostaje u jezgri, a elektron se izbacuje. Često je praćena i emisijom gama zraka, a nakon izbacivanja beta čestice još uvijek ima višak energije koji se otpušta u obliku gama fotona.

Najpoznatiji atomi beta čestica su: fosfor-32, tricij, ugljik-14, kobalt-60, jod-129 i 131, cezij-137 i stroncij-90.

Beta atomi imaju raznu primjenu, pogotovo u medicinskoj dijagnostici i liječenju. Najčešće se koriste za liječenje očiju i raka kostiju, a u industrijske svrhe koristi se za mjerenje debljine tankih materijala. Ovi atomi putuju zrakom i lako se zaustavljaju čvrstim materijalima, a kada ostane bez energije, beta čestica se ponaša kao i svaki drugi elektron.



Slika 3: Slikoviti prikaz beta zračenja [4]

### e. Neutronska zračenje

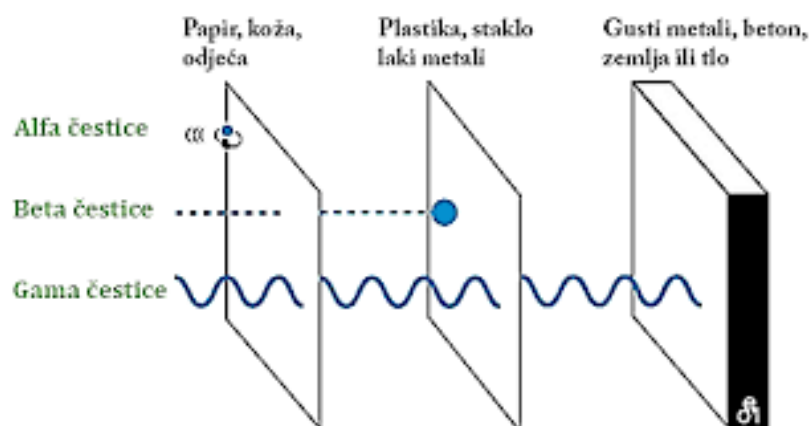
Neutronska zračenje možemo opisati kao roj brzih neutrona koji su po masi slični protonima i vrlo lako prodiru kroz tvar jer nemaju električni naboj. Ono može biti posljedica i nuklearnih reakcija. Tijekom nuklearne reakcije u nuklearnim reaktorima nastaje vrlo snažno neutronska zračenje, a energija mu iznosi oko 10MeV ili manje.

### 3.2. MEĐUDJELOVANJE IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA S MATERIJOM

Kada ionizirajuće zračenje djeluje na materiju ili prolazi kroz nju, dolazi do ionizacije. Pri prolasku, energija ionizirajućeg zračenja prenosi se na elektrone koji se nalaze u atomima ozračene materije i pri tome gubi energiju ve dok moć prodiranja potpuno ne oslabi da nije više štetno. Pri čestičnom zračenju, čestice se u trenu prolaska kroz materiju sudaraju s atomima materije i predaju im svoju kinetičku energiju. Energija čestica smanjuje se dok se broj ioniziranih atoma povećava. Što je čestica veća, veću energiju predaje materiji i kada joj preda svu energiju samo se ugasi ili nestane u materiji.

Alfa čestice su jako sitne i njih zaustavlja list papira, koža ili sloj zraka. Beta čestica ima manju masu i rjeđe se sudara s elektronima materije, ima duži put prodiranja pa sukladno tome i duži put zaustavljanja u materiji što ju čini opasnijom.

Slikoviti prikaz međudjelovanja navedenih čestica s materijom može se vidjeti na Slici 4.

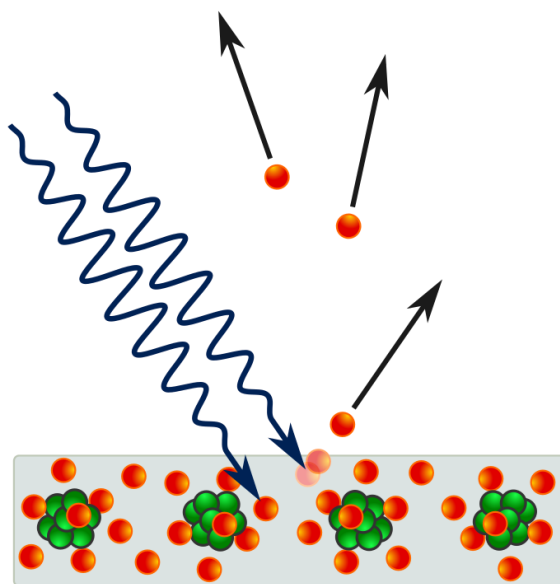


Slika 4: Slikoviti prikaz međudjelovanja čestica s materijom [5]

Foton je osnovni djelić energije zračenja koja se giba brzinom svjetlosti i nema masu niti naboj. Zbog toga ih gledamo kao pakete energije i oni se ne sudaraju s materijom kao čestice koje imaju masu. Međudjelovanje fotona s materijom se odvija na drugačiji mehanizam u odnosu na čestice koje imaju masu, a u nastavku će biti objašnjeni ti mehanizmi.

#### a. Fotoelektrični efekt

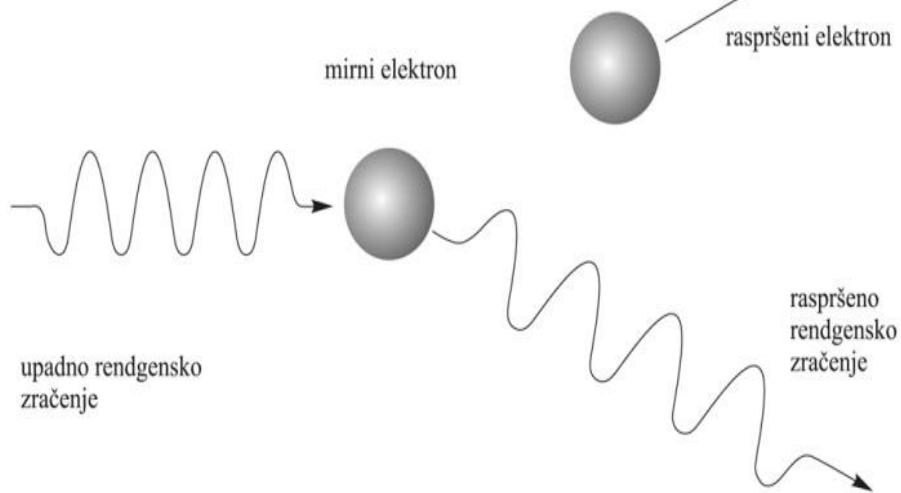
Pri fotoelektričnom efektu foton se sudara s elektronom u elektronskom omotaču materije i predaje mu svu svoju energiju, a ako je ta energija veća od energije vezanja elektrona za atom, taj se elektron oslobađa iz atoma i ostavlja ga s viškom pozitivnog naboja. Tada dolazi do ionizacije pri čemu foton nestaje. Takav proces može se dogoditi samo ako je energija fotona ispod određene granice, a ako je energija viša od te granice, događa se Comptonov efekt. Na Slici 5 vidljiv je slikoviti prikaz ovog fotoelektričnog efekta.



Slika 5: Slikoviti prikaz fotoelektričnog efekta [6]

## b. Comptonov efekt

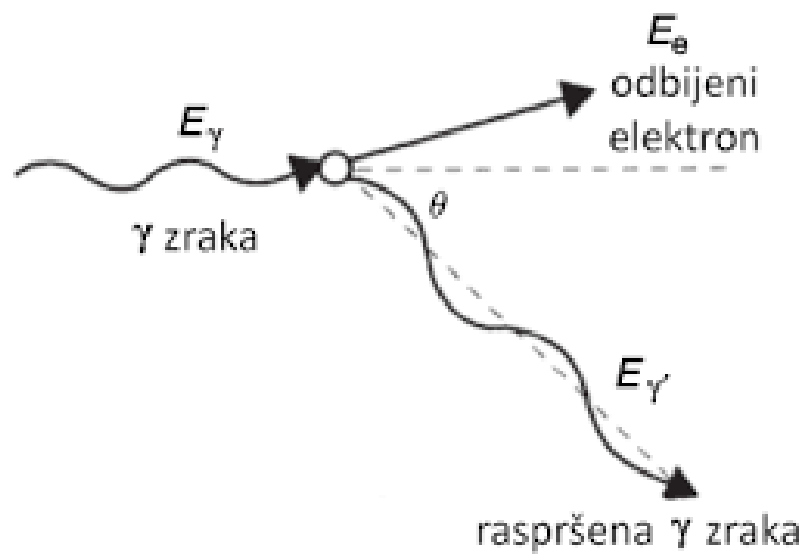
Kod Comptonovog procesa foton se također sudara s elektronom u elektronskom omotaču materije, ali mu predaje dio svoje energije i izbacuje ga iz omotača. Na takav način se ionizira atom, a foton odlazi na način da se rasprši pod pravim kutem i sa smanjenom energijom. Takva vrsta raspršenja predstavlja veliki problem u zaštiti od ionizirajućeg zračenja. U nastavku, na Slici 6, vidljiv je slikoviti prikaz ovog opisanog Comptonovog efekta.



Slika 6: Slikoviti prikaz Comptonovog efekta [7]

## c. Nastanak para elektron- pozitron

Proces nastanka para elektron-pozitron događa se kada je energija fotona veća od određenog praga, a prolaskom takvog fotona u blizini jezgre atoma materije foton nestane i tako nastane par elektron-pozitron koji putuje u suprotnom smjeru i sa sobom odnosi preostalu kinetičku energiju. U nastavku, na Slici 7, može se vidjeti ovaj opisani proces nastanka para elektron-pozitron.



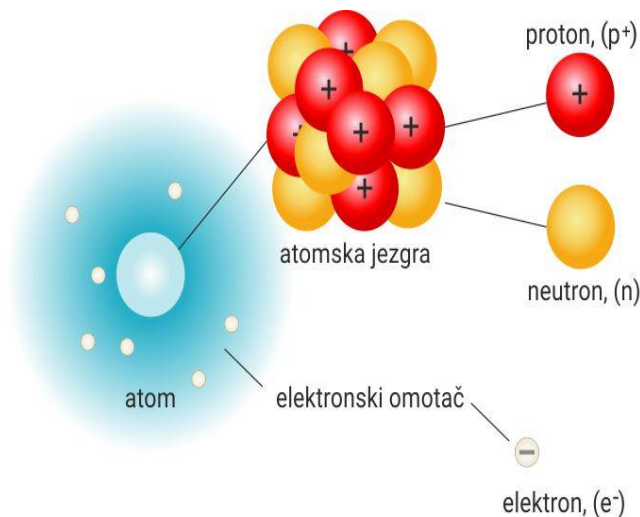
*Slika 7: Slikoviti prikaz nastanka para pozitron-elektron [8]*

## 4. RADIOAKTIVNOST

Radioaktivnost definiramo kao spontano emitiranje alfa i beta čestica iz kemijske tvari. Emitiranje čestica je često praćeno i emisijom elektromagnetskih valova, a kemijski elementi prelaze iz jedne u druge. Tijekom tog procesa dolazi do oslobađanja kinetičke energije emitiranih čestica ili energije elektromagnetskih valova. Radioaktivne tvari su sve one tvari koje u sebi sadrže atome nestabilnih jezgara, a svojim raspadom proizvode ionizirajuće zračenje. Svaka atomska jezgra je posebna i ima sebi svojstveno vrijeme poluraspada. Kada atomi nastoje prijeći iz nestabilnog stanja jezgre u stabilno, ispušta se energija, a takva promjena kada se jezgra mijenja bez vanjskog utjecaja pri čemu emitira elektromagnetsko zračenje ili čestice nazivamo radioaktivnim raspadom dok čestice i fotone koji se emitiraju nazivamo radioaktivnim zračenjem. Radioaktivnost još možemo opisati i kao svojstvo nekih atoma da im se jezgre spontano mijenjaju, a pri tome imitiraju elektromagnetsko zračenje ili čestice.

Točno vrijeme raspada za pojedinu jezgru ne možemo znati, ali možemo odrediti koliko će se jezgri raspasti u proteklom vremenu ( $t$ ) od trenutka kada smo počeli mjeriti. Nikakvi fizikalni ili kemijski postupci ne mogu utjecati na raspad jezgre. Postoje tri vrste radioaktivnog raspada: alfa, beta i gama raspad. Tijekom radioaktivnog raspada važno je zadovoljiti zakone očuvanja energije, odnosno da vrijednost očuvane veličine za jezgru ima istu vrijednost prije i poslije raspada.

Naziv atom dolazi od grčke riječi atomos (nevidljiv), a on se sastoji od protona, neutrona i eelektrona. Proton i neutron se nalaze u jezgri, a elektron se nalazi u elektronskom omotaču oko jezgre. Proton je nositelj pozitivnog naboja, elektron negativnog, a neutron je električki neutralan. Protoni i neutroni imaju gotovo jednaku masu dok je masa elektrona do 1800 puta manja. Atom je najmanji dio svakog elementa koji dolaze u raznim oblicima (smjese, kemijski spojevi, elementarno stanje), a na Zemlji se nalazi 90 kemijski elemenata koji su različito zastupljeni (nekih ima više, a nekih manje).



Slika 8. Slikoviti prikaz građe atoma[9]

#### 4.1. RADIOAKTIVNI RASPAD

Za pojedine se jezgre ne može točno reći kada će se raspasti, ali se može izračunati koliko će se te tvari raspasti nakon određenog vremenskog intervala „t“.

Zakon radioaktivnog glasi:  $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ , pri čemu  $N(t)$  označava broj raspadnutih jezgara,  $N_0$  označava početni broj jezgara,  $\lambda$  – konstanta radioaktivnog raspada. Nakon nekog vremena  $t$  ostalo je:  $\Delta N = N_0 - N(t)$ , pri čemu  $\Delta N$  označava broj neraspadnutih jezgara.

$T_{1/2}$  je vrijeme poluraspada, odnosno vrijeme koje je potrebno da se raspadne polovica nestabilnih jezgara. Vrijeme poluraspada je karakteristično za svaki izotop, a veza između konstante radioaktivnog raspada i vremena poluraspada izražava se izrazom:  $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ . Broj raspada u jedinici vremena nazivamo aktivnost i označavamo ju mjernom jedinicom 1 becquerel (1 Bq).

#### 4.2. RADIOAKTIVNI OTPAD

Radioaktivnim otpadom smatramo svaki materijal koji u sebi sadrži ili je kontaminiran radionuklidima, a ne može se preraditi ili ga nije isplativo preraditi. Najbolji primjer je nuklearno gorivo koje se nakon prerade ponovno može koristiti kao gorivo. Kako vrijeme prolazi tako se i radioaktivnost otpada smanjuje (ovisi o vremenu poluraspada radionuklida u otpadu). U nekim slučajevima radioaktivnost nakon par dana može biti nezatna ili može

ostati opasna još stotinama, čak i tisućama godina. Radioaktivni otpad dijeli se prema sadržaju radionuklida te vremenu poluraspada na nekoliko vrsta objašnjenih u nastavku.

- a. **Vrlo nisko radioaktivni otpad** sadrži zanemarivu specifičnu aktivnost stoga nije opasan za okoliš i zdravlje ljudi te se može zbrinjavati na isti način kao i standardni komunalni otpad.
- b. **Nisko radioaktivni otpad** sadrži radionuklide s kratkim vremenom poluraspada, sadrži malu specifičnu aktivnost i zanemariv udio radionuklida s dugim vremenom poluraspada, a zbrinjava se u površinskim odlagalištima.
- c. **Srednje radioaktivni otpad** jest otpad koji sadrži radionuklide s kratkim vremenom poluraspada, zbrinjava se u površinskom odlagalištu, a otpad koji sadrži radionuklide s dugim vremenom poluraspada zbrinjava se u podzemnim odlagalištima.
- d. **Visoko radioaktivni otpad** sadrži velik udio radionuklida u obliku fizijskih produkata i dugoživićih elementa koji se stvaraju u jezgri reaktora, a zbrinjava se u dubokim podzemnim odlagalištima.

### **4.3. ZBRINJAVANJE RADIOAKTIVNOG OTPADA**

Radioaktivni otpad koji treba zbrinuti potječe iz raznih izvora poput medicine, industrije, znanosti i slično te takav otpad nazivamo institucionalnim otpadom. Osim njega, obavezno zbrinjavanje odnosi se i na radioaktivni otpad i istrošeno nuklearno gorivo. Hrvatska u odnosu na ostale države svijeta ima male količine radioaktivnog otpada koji većinski proizvodi Nuklearna elektrana Krško. Zbrinjavanje radioaktivnog otpada podrazumijeva sve administrativne i operativne postupke kojima se otpad uklanja iz naše okoline. Način zbrinjavanja ovisi o vrsti otpada, količini i njegovoj aktivnosti.



## 5. PRIMJENA ZRAČENJA

Zračenje ima vrlo široku primjenu u raznim područjima života poput medicine, industrije te u tehnološkim i znanstvenim istraživanjima. Iako zračenje generalno ima štetne posljedice, njegovo korištenje u malim količinama u medicini može pomoći pri liječenju raka ili tumora te za dijagnostiku. Pomoću X-zraka koje emitiraju rentgenski aparati, liječnici dobivaju slike organa i tkiva ljudskog tijela i na osnovu toga mogu lakše postaviti dijagnozu. S druge strane, zračenje se pri uništavanju tumora može koristiti na dva načina, a to su unutarnje (brahiterapija) i vanjsko ozračivanje (teleterapija).

Osim pri spomenutoj dijagnostici, zračenje se može koristiti i u medicinskim istraživanjima i testiranjima lijekova. Pomaže pri otkrivanju volumena tjelesnih tekućina, mjerenju vrlo niskih koncentracija određenih tvari u tijelu, pokretanju trajne elektrostimulacije srca, steriliziranju medicinske opreme (igle, kirurški elementi itd). Zračenje se kao terapija najviše koristi u onkologiji, a u nuklearnoj medicini se male količine radionuklida daju pacijentu kao terapija ili u svrhu dijagnoze.

U industriji i istraživanjima zračenje se može koristiti na 4 načina opisana u nastavku.

### a. Kao obilježavač

Koristi se za otkrivanje mjesta curenja cijevi, mjerenje brzine i načina prolaska tekućih tvari, ispitivanje mehanizma kemijskih reakcija, ispitivanju istrošenosti od korozije, određivanje starosti predmeta itd.

### b. Na način da se karakteristike zračenja mijenjaju prolaskom kroz materijal

Ovaj način podrazumijeva mjerenje gustoće, mjerenje debljine sloja, mjerenje razine tekućine u zatvorenim spremnicima, ispitivanje kvalitete varova, detektori dim itd.

### c. Na način da se karakteristike materijala mijenjaju prolaskom zračenja

Ovaj način uključuje konzerviranje hrane, baterijsku sterilizaciju, istraživanje bioloških mutacija i katalitičko djelovanje na kemijske reakcije.

d. Kao izvor energije

## 5.1. INDUSTRIJA

Jedna od najbitnijih primjena zračenja u industriji je sterilizacija ionizirajućim zračenjem. Takvom vrstom sterilizacije se potpuno uništavaju i odstranjuju svi mikroorganizmi bez da se materijali izlažu visokim temperaturama ili jakim kemikalijama. Koristi se čak i u prehrambenoj industriji za proizvodnju hrane i uzgoju novih vrsta bilja te za sterilizaciju voća i povrća (uništavanje mikroba i mikroorganizama) što dovodi do produženog roka trajanja hrane bez negativnog utjecaja na zdravlje ljudi ili kvalitetu proizvoda.

Industrijskom radiografijom dobijamo sliku unutrašnjosti proizvoda tj. koristi se za provjeru ispunjenosti tekućinom u limenkama ili nekoj drugoj vrsti spremnika, može se koristiti i za otkrivanje grešaka u materijalu.

U građevini i geotehnici koriste se nuklearni densimetri za kontrolu izvedbe radova i za dobivanje informacija o vlažnosti i gustoći tla.

Radioaktivni izotopi su se u prošlosti nalazili u detektorima dima i u gromobranima.

Kada je riječ o detektorima dima onda govorimo o americiju-241 koji se nalazi u ionizacijskoj komori detektora dima. Kada bi došlo do požara, čestice dima koje bi ušle u komoru narušile bi stabilnu struju koju proizvode radioaktivne čestice te bi došlo do aktivacije detektora.

Kobalt-60, europij-152i europij-154 nalaze se u gromobranima. Oko posude u kojoj se nalazi izvor ionizirajućeg zračenja dolazi do ionizacije zraka što dovodi do povećanja vodljivosti zraka. Ioniziraćuje polje proteže se u promjeru od 300 metara iznad gromobrana i ima oblik stošca okrenutog prema gore.

Gromobrani i detektori su povučeni iz upotrebe jer bi u slučaju oštećivanja komore došlo do nekontroliranog širenja zračenja.

## 5.2. ENERGETIKA

Najviše otpada stvara se pri radu nuklearnih elektrana i u svim fazama nuklearnog gorivnog ciklusa, od kopanja rude pa sve do razgradnje nuklearnih postrojenja.

## 5.3. MEDICINA

U medicini se zračenje koristi za dijagnostiku i liječenje. U dijagnostici se koriste uređaji koji proizvode ionizirajuće zračenje kako bi dobili unutarnju sliku pacijentovog tijela. Najčešći su uređaji za kompjutersku tomografiju i rendgenskog uređaja. Za liječenje se koristi radioterapija u kojoj se koristi biološko ionizirajuće zračenje na stanice organizma radi postizanja željenih mutacija ili uništavanje određenih stanica. Dijeli se na 3 vrste: teleradioterapija (liječenje s izvorom udaljenim od bolesnika), brahiterapija (liječenje unošenjem izvora ionizirajućeg zračenja u organizam) i sistematsko zračenje (primjena radioaktivnih lijekova).

## 5.4. ZNANOST

Mnoge znanstvene institucije poput sveučilišta, instituta koriste se izvorima ionizirajućeg zračenja za eksperimentalna istraživanja, edukativnim programima, radu u laboratoriju itd. Izvori ionizirajućeg zračenja se najčešće koriste za aktivacijsku analizu, istraživanje starosti materijala, istraživanje utjecaja ionizirajućeg zračenja na živa bića, istraživanje svemira itd. Za određivanje starosti materijala koristi se radioizotopno datiranje za određivanje starosti materijala promjenom koncentracija radionuklida tijekom vremena. Ako je u tom slučaju poznato vrijeme poluraspada, broj početnih i novonastalih radionuklida u uzorku može se odrediti starost materijala. Kako bi se odredila starost fosila i drugih organskih tvari koristi se datiranje radioaktivnog izotopa ugljika-14 koji nastaje na

gornjim slojevima atmosfere. Ugljik-14 se nakuplja u organizmu samo dok je organizam živ. Kod biljaka se nakupljanje događa procesom fotosinteze, a kod životinja dok se hrane biljkama.

#### 5.5. VOJNA PRIMJENA

Najčešća primjena ionizirajućeg zračenja u vojne svrhe je pokretanje podmornica, ledolomaca, nosača zrakoplova i proizvodnja nuklearnog oružja. Ledolomci, nosači zrakoplova i nuklearne podmornice pokreću se pomoću toplinske energije koja se stvara u nuklearnom reaktoru i pokreće propelere. Nuklearno oružje dijeli se na dvije vrste, a to su atomska bomba (fisijska bomba) u kojem se masa fisijskog materijala stavlja u superkritičnu masu, tj. nalazi se određena količina materijala koji je potreban da bi se pokrenule nuklearne lančane reakcije te hidrogenska ili termonuklearna bomba koja proizvodi energiju iz nuklearne fuzije.

## 6. UTJECAJI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

Zemlja je od svog nastanka radioaktivna i puna radioaktivnih elemenata (oko 60 ih ima na zemlji) koji se nalaze posvuda oko nas (zrak, voda, hrana, tlo i sva živa bića) u različitim dozama. Dijelimo ih na one koji su tu od postanka zemlje, one koji su nastali zbog posljedica tehnologije i one koji su nastali zbog djelovanja kozmičkih zraka.

### 6.1. BIOLOŠKI UTJECAJ IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

Biološkim utjecajem ionizirajućeg zračenja smatramo sve promjene koje zračenje izaziva na živim stanicama, organima ili cijelom tijelu. Kada zračenje prolazi kroz tijelo, ono ionizira molekule što može dovesti do promjena, oštećenja ili razaranja organskih makromolekula u tijelu. Biološki utjecaj možemo podijeliti na dvije vrste, a to su somatski efekt i genetski efekt. Pod somatskim efektom smatramo pojave koje su se pojavile samo na ozračenom pojedincu, a pod genetskim efektom smatramo one efekte koji ostavljaju posljedice na potomstvo ozračene osobe. Efekti zračenja ovise o vremenu izloženosti, učestalosti, jačini zračenja i raspodjeli doze po tijelu, a istraživanjem je utvrđeno da je biološki efekt veći ovisno o tome koliko je već puta primljena doza. Drugim riječima, odnos je linearan i što smo više izloženi zračenju posljedice će biti veće i štetnije.

Deterministički učinci nastaju pri primjeni velikih doza zračenja i vidljivi su ubrzo nakon zračenja, a pojavljuju se kao gubitak velikog broja stanica. Pojavljuju se samo ako je primjenjena veća doza od određenog praga doze. Zavisno o tome koliko je velik postotak uništenih stanica u tkivu ili organu, funkcija organa će biti za toliko oslabljena, a u nekim slučajevima, kada je taj gubitak stanica jako velik, može i doći i do smrti organizma.

Stohaistički učinci su karakteristični jer je vjerojatnost da do njih dođe proporcionalna primljenoj dozi i može ih izazvati vrlo mala doza, odnosno ne postoji prag ispod kojeg se on ne može pojaviti. Ne može ih se predvidjeti kao što se može za deterministički učinak. Kada se pojave onda su posljedice veoma ozbiljne i teške (pojava malignih tumora, nasljedne promjene, mutacije itd.).

Neka istraživanja pokazala su da se u malobrojnim slučajevima mogu dobiti i korisni rezultati u smislu da stanica nakon izloženosti malim dozama zračenja može postati otpornija na zračenje. Također, starija tkiva, organizmi i organi su otporniji od mlađih, a najviše unutarnji organi, koštana, srž, sjemenske stanice, jajnici i embrij. Na Slici koja slijedi prikazana je tablica s pregledom učinaka zračenja na ljudsko tijelo.

	Posljedice	Uzrok
trenutne	anemija, krvarenje	zmanjenje broja eritrocita i pločica (a)
	sklonost infekcijama	zmanjenje broja bijelih krvnih stanica i stanica što oblažu sluznicu crijeva, oštećenje kože (b)
	gubitak tjelesne težine	
	sterilnost	smrt spermatogonija i oocita
	smrt	(a) ili (b) ili razaranje živčanih stanica
nakon nekog vremena	genetska mutacija	kemijska oštećenja nukleinske kiseline
	oštećenje embrija	zračenje za vrijeme organogeneze
	izazivanje karcinoma	somatske mutacije
	katarakt	zračenje uzrokuje zamućenje leće

Slika 9: Tablica učinaka zračenja na tijelo [10]

## 6.2. DOZE IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

Čovjek u određenom trenutku može primiti dozu zračenja u kontroliranim ili nekontroliranim uvjetima. Postoji nekoliko vrsta doza zračenja koje možemo razvrstati na nekoliko skupina, a svaki od njih se razlikuje po izvoru zračenja ili količini zračenja.

Dopuštenim dozama smatramo doze koje čovjek prima zbog neke svoje aktivnosti i za koje se pretpostavlja da neće ostaviti negativan učinak na ljudsko tijelo. Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja (ICPR) je preporučila model ALARA koji se zalaže da sve doze moraju biti toliko male da budu u skladu sa ekonomskih i društvenim čimbenicima.

Kritičnim dozama smatramo doze koje uzrokuju teška oštećenja zdravlja, a nerijetko i smrtne slučajeve. Smatramo da su kritične doze zračenja sve one koje su veće od 0,25 Sv.

Propisi nalažu da se u slučaju izlaganja kritičnoj dozi mora obaviti specijalistički liječnički pregled.

Svaki čovjek navikao je na prirodno ozračivanje kojim smo okruženi od nastanka Zemlje. Stoga je sljedeća vrsta prirodna doza zračenja koja potječe od kozmičkog zračenja (20%-30%) i zračenja okoline (79%-80%). Takvo zračenje iznosi 1-3 mSv na godinu i pretpostavka je da ta količina zračenja ne uzrokuje znatne biološke posljedice.

Kao posljednju vrstu imamo i natkritične doze, a to su one koje su više od kritičnih i smatramo ih jako opasnim, posebno ako su primljene jednokratnim ozračivanjem u kratkom vremenskom razdoblju. Pri velikim nezgodama u radu sa izvorima zračenja ili u slučaju korištenja nuklearnog oružja, ispuštaju se natkritične doze zračenja. Svi koji su ozračeni dozama višim od 3Sv teško obolijevaju, a u dozama većim od 6Sv dolazi do smrti kroz nekoliko dana. Zbog toga natkritičnu dozu smatramo pragom smrtnosti. Kada tijelo nije ozračeno, smrtnost je mnogo manja, posebno ako nisu ozračeni glava i trup. Ionizacijsko zračenje iznad 1Sv uzrokuje promjenu krvne slike, a ispod 1Sv nisu vidljive ozbiljnije promjene, ali postoji veliki rizik od oboljenja od karcinoma.

Aktivnost	Razina (mSv)
Kozmičko zračenje pri komercijalnom letu avionom New York –Tokio	0.01
Röntgen pluća	0.05
Godišnja doza prirodnog zračenja	0.4
Röntgen abdomena	0.6
Mamografija	0.7
Dozvoljena doza umjetnog zračenja u godini	1
CT glave	2

Slika 10: Tablica izloženosti zračenju u svakodnevnom životu [10]

Doze ionizirajućeg zračenja predstavljaju prenijetu količinu energije ionizirajućeg zračenja masi tvari koja je ozračena, a posljedica toga je ionizacija atoma, odnosno

molekula. Djelovanje ionizirajućeg zračenja prikazujemo s dvije veličine. Prva je apsorbirana doza koju označavamo slovom „D”, a definiramo kao količinu energije koju je neka tvar primila po jednom kilogramu mase. Mjerna jedinica je J/kg, a oznaka je Gy (grej). Minimalne doze zračenja se označuju sa jedinicom miligrej (mGy). Druga je ekvivalentna doza koju označavamo slovom „H”, a njome iskazujemo škodljiv učinak na tkivo koje je izloženo zračenju. Mjerna jedinica ekvivalentne doze svert (Sv), a izračun se sastoji od umnoška apsorbirane doze i faktora učinka  $H = D \cdot Q$ .



## 7. MJERNI INSTRUMENTI

Zračenje je teško izmjeriti, a s obzirom na to da se ne može registrirati vlastitim osjetilima, moramo se poslužiti mjernim instrumentima. Postupak mjerenja možemo opisati kao skladištenje radijacije, a količina skladištene energije po jedinici mase neke tvari nazivamo apsorbirana doza. Mjerna jedinica kojom iskazujemo vrijednost apsorbirane doze je gray (Gy), a definiramo ju kao joule po kilogramu ( $\text{J kg}^{-1}$ ). Svaka vrsta zračenja ima različit utjecaj na živa bića i njihove stanice, a utjecaj se opisuje faktorom Q. Računom apsorbirane doze ne možemo utvrditi biološki utjecaj zračenja i zbog toga moramo definirati ekvivalentnu dozu. Kada pomožimo vrijednost apsorbirane doze sa faktorom Q dobijemo vrijednost ekvivalentne doze, a mjerna jedinica je sivert (Sv). Britanski fizičar Louis Harold Gray (1905.- 1965.) je osnovao radiologiju i bavio se istraživanjem učinka zračenja na živo tkivo i biološke sustave. Zbog njegovog velikog istraživačkog utjecaja mjerna jedinica za apsorbiranu dozu je nazvana po njemu. Sivert (Sv) mjerna je jedinica koja je dobila naziv po Rolfu Sievertu, švedskom liječniku i fizičaru koji je svoju karijeru posvetio mjerenju doziranja radijacije i istraživanjem o biološkim efektima radioaktivnosti i zaštiti od zračenja. Mjernom jedinicom (Sv) označujemo ekvivalentnu dozu ionizirajućeg zračenja.

Osim mjernih jedinica Gy i Sv imamo i mjernu jedinicu Bekerel (Bq) kojom mjerimo aktivnost radioaktivnog uzroka. Bekerel (Bq) označuje jedan radioaktivni raspad u sekundi, a zbog velike aktivnosti uzoraka koristi se i veća mjerna jedinica kiri (Ci), a  $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ .

Mjernih instrumenata ima puno i raznih vrsta, a u nastavku će biti spomenuta četiri koja se najčešće koriste.

### 7.1. IONIZACIJSKA KOMORA

Ionizacijska komora je dozimetar za otkrivanje i mjerenje jakosti ionizirajućeg zračenja pomoću plina, a sastoji se od plina koji je pod tlakom i dvije elektrode različitih potencijala. Mjerenje se provodi na način da se sakupljaju ionski parovi koji nastaju u plinu u električnom polju komore. Iako u većini slučajeva ne znamo izvore zračenja,

njegov utjecaj možemo izmjeriti. Ionizacijska komora se koristi pri planiranju radioterapije jer daje precizne podatke prilikom mjerenja. Komora radi na principu prolaska fotona ili neke druge nabijene čestice određene energije koji pobuđuju čestice plina koje se nalaze u komori. Zbog toga u plinu nastaju parovi elektron-ion koji se gibaju prema elektrodama koje su pod električnim naponom. Kao što je već spomenuto, ionizacijska komora se sastoji od elektroda, a one su smještene unutar metalne posude. Elektrode su izolirane od stijenki, a s vanjske strane su povezane u istosmjerni strujni krug i s baterijom koja daje napon 1500 V. Posuda je ispunjena zrakom ili nekim drugim plinom pod nižim tlakom od atmosferskog. Na Slici 11. u nastavku prikazano je kako izgleda jedna takva ionizacijska komora.



*Slika 11: Ionizacijska komora [11]*

## 7.2. MAGLENA KOMORA

Maglenu komoru konstruirao je britanski fizičar i meteorolog Charles Wilson 1927. godine te je za svoje otkriće dobio Nobelovu nagradu. Nazivamo ju još i Wilsonova maglena komora. Ovim instrumentom je moguće registrirati staze električki nabijenih čestica, a posebno alfa čestica i elektrona koji se emitiraju iz radioaktivni materijala. Maglena

komora ispunjena je smjesom vodene pare i zraka, a da bi se kondenzirala mora imati centre kondenzacije. Instrumentom se prate tragovi ionizirajućeg zračenja koji su za kameru i oko nevidljivi, a ioni koji prolaze kroz ionizirajuće čestice postaju centri kondenzacije i zbog toga prolaz čestice postaje vidljiv u obliku gustog niza sitnih kapljica. Drugim riječima, nabijena čestica svojim prolaskom kroz komoru ionizira čestice zraka. Kako izgleda maglena komora prikazano je na Slici 12.

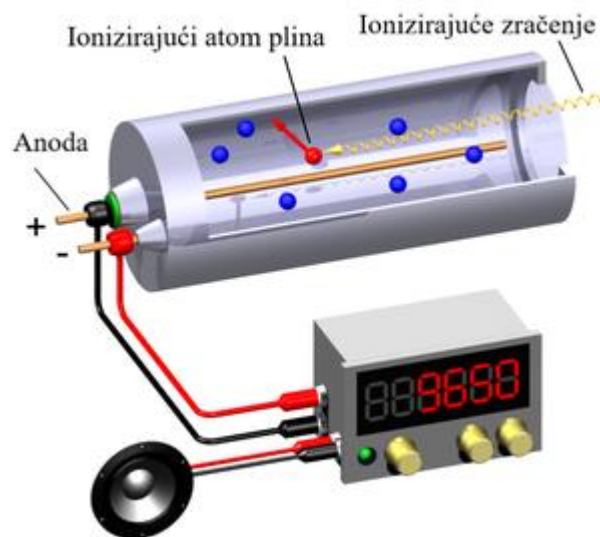


Slika 12. Maglena komora [12]

### 7.3. GEIGER-MULLEROV BROJAČ

Geiger-Mullerov brojač je uređaj koji se danas najčešće koristi. Njegove najveće prednosti su to što ne zahtijeva veliku potrošnju energije, dosta je jeftin i lagan te ima široku primjenu kao detektor zračenja. Izveden je u obliku elektronske cijevi, a razlikujemo dvije vrste Geiger-Mullerove cijevi: s otvorom na kraju i bez otvora na kraju. Cijev s otvorom na jednom svom kraju koristi se za detekciju alfa čestica, niskoenergetskih beta čestica i niskoenergetskih rendgenskih zraka. Cijev na jednom svom kraju ima otvor kojeg prekriva tanki sloj materijala kroz koje zračenje lako prolazi, a na drugom kraju se nalazi električni spoj s anodom. Od materijala najčešće koristi liskun zbog svoje male mase po jedinici površine. Cijev bez otvora se razlikuje samo po tome što nema otvora. U praksi se koriste za detekciju i nadzor prisutnosti izvora zračenja kada nije potrebna posebna preciznost. Geiger – Mullerov brojač može registrirati alfa, beta i gama zračenje no ne može ih

razlikovati pa je zbog toga najbolji kada se želi utvrditi samo postojanje radijacije. Kada su u pitanju alfa i beta zračenje onda je efikasnost gotovo stopostotna, a za gama zračenje je znatno manja. Glavni dio brojača je bakrena cijev u kojoj se pod niskim tlakom nalazi plin (najčešće neon ili argon), a u cijevi se nalazi pozitivno nabijena žica koja čini anodu, a katodu čini plašt. Tijekom ulaska zračenja u cijev nastaje ionizacija plina što rezultira nastankom struje od pozitivno nabijenih iona i izbačenih elektrona. Ioni se ubrzano gibaju prema katodi, a elektroni prema katodi i obrnuto. Taj proces se višestruko ponavlja i tako se nakratko zatvara strujni krug i na otporniku koji se nalazi u vanjskom djelu strujnog kruga nastaje naponski impuls koji se odmjeravaju u elektroničkom brojaču. U nastavku se na Slici 13 i Slici 14 može vidjeti prikaz ovakvog Geiger-Mullerovog brojača.



*Slika 13: Slikoviti prikaz Geiger-Mullerovog brojača [13]*



*Slika 14: Geiger-Mullerov brojač [13]*

#### 7.4. KOMORA NA ISKRE

Sastoji se od niza paralelnih i tankih elektroda u hermetički zatvorenoj kutiji ispunjenoj plinovima helijem, neonom ili njihovom smjesom. Spada u detektore prve kategorije, a radi na način da između elektroda dovoljno visoki napon da se ne dogodi električni izboj između njih. Za detekciju čestica je potreban scintilacijski detektor. Oni su smješteni na periferiji komore i u trenutku kada registriraju prolaz ionizacijske čestice uključuje se visoki napon. Nabijene čestice prolaskom postanu ioni koji omogućuju izboj koji se očituje nizom iskri duž putanje čestica te na taj način kamera može registrirati stazu čestice.

## 8. ZAŠTITA OD IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

Zaštita od ionizirajućeg zračenja je skup svih mjera i postupaka u svrhu smanjenja izloženosti zračenju na prihvatljivu razinu. Problematika zaštite od zračenja nije tako jednostavna i zahtijeva rad niz stručnih međunarodnih organizacija koji sukladno svojim saznanjima u istraživanju donose svoje preporuke. Zakon o zaštiti zračenja u Hrvatskoj je propisan u skladu sa tim preporukama.

Od zračenja se možemo štititi na tri osnovna načina, a to su dovoljna udaljenost od izvora, što kraće vrijeme izlaganja te korištenje štita. Intenzitet zračenja opada s kvadratom udaljenosti i na tome se temelji važan dio zaštite. Drugim riječima, poveća li se udaljenost od izvora ionizirajućeg zračenja dva puta, intenzitet će se smanjiti četiri puta. Koliko je osoba ozračena ovisi i o vremenu izlaganja - što je izlaganje duže za isto toliko će osoba biti ozračena što znači da su u proporcionalnom odnosu. Kada ionizirajuće zračenje prolazi kroz neki materijal ono slabi i zbog toga se osim udaljenosti i vremenu izlaganja koriste i štitovi za zaštitu od zračenja. Bitan je i materijal od kojeg je građen štit, isto tako kao i debljina materijala, vrsta ionizirajućeg zračenja te način korištenja štita. No, u svakom slučaju je bolje s bilo kojim štitom nego bez njega. Štit može biti betonski zid, olovne rukavice, naočale, zaštitne pregače i sl.

### 8.1. FIZIKALNO- TEHNIČKA ZAŠTITA

Fizikalno-tehnička zaštita definirana je Zakonom, a uključuje: nadzor nad izvršavanjem zakonskih propisa u vezi s projektiranjem i izgradnjom radioloških ustanova, projektiranje i izgradnju dijagnostičkih prostorija, zaštitu zidova, prozora i vrata radioloških prostorija i zaštitu podova.

### 8.2. KEMIJSKA ZAŠTITA

Kada govorimo o kemijskoj zaštiti, radi se o kemijskim radioprotektorima koji smanjuju štetne biološke učinke zračenja. Mehanizam zaštite temelji se na čišćenju slobodnih radikala i na popravljanju oštećenja nastalih djelovanjem slobodnih radikala. Koriste se u

radioterapiji za liječenje tumora uz pomoć kemijskih tvari poput cisteina, cistamina, amifostina. Kemijski radioprotektori uzimaju se prije izlaganja zračenju, a najnovije generacije i nakon izlaganja.

### 8.3. BIOLOŠKA ZAŠTITA

Biološka zaštita postiže se podizanjem biološke otpornosti organizma uz pomoć vitamina, šećera, čajeva s taninom, umjetnim snižavanjem temperature onih dijelova tijela koji su najviše izloženi zračenju, umjetnom anemizacijom (smanjivanjem prokrvljenosti) organa ili dijelova tijela koji su izloženi većim dozama zračenja najčešće za osoblje koje je zaposleno u radiologiji, radioterapiji i nuklearnoj medicini.

### 8.4. ZAKONSKA PODLOGA

Zakonodavna zaštita od ionizirajućeg zračenja je veoma važna jer strogim zakonskim propisima i podzakonskim aktima uređuje cjelokupnu problematiku zaštite od ionizirajućih zračenja.

Temeljni akti zakonodavne zaštite od ionizirajućih zračenja u Republici Hrvatskoj su:

- Zakon o zaštiti od ionizirajućeg zračenja i sigurnosti izvora ionizirajućeg zračenja (NN 64/2006)
- Pravilnik o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućih zračenja za obavljanje djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja (NN 58/2018)
- Pravilnik o zdravstvenim uvjetima izloženih radnika i osoba koje se obučavaju za rad u području izloženosti (NN 66/2018)
- Pravilnik o ustroju i provedbi mjera zaštite od ionizirajućeg zračenja (NN 28/2015)
- Pravilnik o uvjetima za primjenu izvora ionizirajućeg zračenja u medicini i dentalnoj medicini (NN 89/2013)

-Državni plan i program mjera zaštite od ionizirajućeg zračenja te intervencija u slučaju izvanrednog događaja (NN 49/2008)

Sve navedeno usklađeno je s preporukama ICRP te zahtjevima Europske zajednice.



## 9. ZAKLJUČAK

Na temelju napisanog rada naučio sam da iako mi kao društvo imamo velike koristi od ionizirajućeg zračenja isto tako moramo biti jako pažljivi jer je i dalje opasno po zdravlje i život ljudi, životinja, biljaka i cijelog okoliša. Zbog toga je važno razumjeti, poznavati i primjenjivati principe sigurnog korištenja zračenja. Nuklearna postrojenja danas uz pomoć zračenja proizvode 17% električne energije u svijetu što čini 7% globalne energije. To pokazuje koliko nam je zračenje bitno. Danas se sve više koristi zračenje iz umjetnih izvora dok u medicini nema adekvatne zamjene ionizirajućem zračenju kada je u pitanju dijagnosticiranje. Rizik od ionizirajućeg zračenja se mora smanjivati i ograničavati tehnološkim, organizacijskim i administrativnim mjerama. Zaštita od zračenja se odnosi na sve ljude koji su izloženi ili mogu biti izloženi zračenju i njegovim posljedicama. Mnogo čimbenika odlučuje o količini ozračenja neke osobe poput vrsta zračenja, trajanju izloženosti, blizini izvora zračenja, individualnoj osjetljivosti i životnoj dobi izloženoj osobi, o apsorbiranoj dozi itd. Izravne posljedice na čovjeku nisu uvijek vidljive isti tren već se mogu manifestirati godinama kasnije u obliku tumora, oštećenja genetskog materijala itd. Zračenje je svuda oko nas i zato imamo uređaje pomoću kojih možemo otkriti njihovu prisutnost, vrstu zračenja i koliko smo ozračeni. U zaštitu od zračenja se ulaže dosta kroz istraživanja i nove moderne metoda zaštite, pogotovo nakon nesreće u Černobilu nakon koje se naučilo jako puno u vezi samog zračenja, njegovih posljedica, utjecaja na ljude i ostali živi svijet i okolinu te na samo zaštitu od istog.

## 10. POPIS LITERATURE

- [1] <https://www.radioaktivniotpad.org/> Pristupljeno 28.06.2023.
- [2] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Gama-%C4%8Destica#/media/Datoteka:Gamma\\_Decay.svg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Gama-%C4%8Destica#/media/Datoteka:Gamma_Decay.svg) Pristupljeno 28.06.2023.
- [3] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Alfa\\_raspad#/media/Datoteka:Alpha\\_Decay.svg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Alfa_raspad#/media/Datoteka:Alpha_Decay.svg) Pristupljeno 28.06.2023.
- [4] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Beta-%C4%8Destica#/media/Datoteka:Beta-minus\\_Decay.svg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Beta-%C4%8Destica#/media/Datoteka:Beta-minus_Decay.svg) Pristupljeno 28.06.2023.
- [5] <https://www.fond-nek.hr/radioaktivnost/> Pristupljeno 30.06.2023.
- [6] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Fotoelektri%C4%8Dni\\_u%C4%8Dinak#/media/Datoteka:Photoelectric\\_effect\\_in\\_a\\_solid\\_-\\_diagram.svg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Fotoelektri%C4%8Dni_u%C4%8Dinak#/media/Datoteka:Photoelectric_effect_in_a_solid_-_diagram.svg) Pristupljeno 30.06.2023.
- [7] <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=12332> Pristupljeno 02.07.2023.
- [8] <https://repozitorij.pmf.unizg.hr/islandora/object/pmf%3A1552/datastream/PDF/view> Pristupljeno 02.07.2023.
- [9] <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/e78bfca5-654d-4dcc-b431-7b505feb6fa4/kemija-1/m02/j01/index.html> Pristupljeno 09.07.2023.
- [10] <https://repozitorij.vuka.hr/islandora/object/vuka%3A2338/datastream/PDF/view> Pristupljeno 09.07.2023.
- [11] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Ionizacijska\\_komora#/media/Datoteka:Ionisation\\_chamber\\_made\\_by\\_Pierre\\_Curie,\\_c\\_1895-1900.\\_\(9660571297\).jpg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Ionizacijska_komora#/media/Datoteka:Ionisation_chamber_made_by_Pierre_Curie,_c_1895-1900._(9660571297).jpg) Pristupljeno 09.07.2023.
- [12] <https://repozitorij.fizika.unios.hr/islandora/object/fizos%3A6/datastream/PDF/view> Pristupljeno 09.07.2023.
- [13] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Geigerov\\_broja%C4%8D](https://hr.wikipedia.org/wiki/Geigerov_broja%C4%8D) Pristupljeno 10.07.2023.
- [14] <https://civilna-zastita.gov.hr/podrucja-djelovanja/radioloska-i-nuklearna-sigurnost/propisi/235> Pristupljeno 10.07.2023.
- [15] [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018\\_06\\_53\\_1062.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_06_53_1062.html) Pristupljeno 05.07.2023.
- [16] <https://repozitorij.vuka.hr/islandora/object/vuka%3A2182/datastream/PDF/view> Pristupljeno 05.07.2023.

## 11. POPIS SLIKA

Slika 1: Slikoviti prikaz gama zračenja [2] .....	5
Slika 2: Slikoviti prikaz alfa zračenja [3] .....	6
Slika 3: Slikoviti prikaz beta zračenja [4] .....	7
Slika 4: Slikoviti prikaz međudjelovanja čestica s materijom [5].....	8
Slika 5: Slikoviti prikaz fotoelektričnog efekta [6] .....	9
Slika 6: Slikoviti prikaz Comptonovog efekta [7].....	10
Slika 7: Slikoviti prikaz nastanka para pozitron-elektron [8].....	11
Slika 8: Slikoviti prikaz građe atoma [9].....	12
Slika 9: Tablica učinaka zračenja na tijelo [10] .....	20
Slika 10: Tablica izloženosti zračenju u svakodnevnom životu [10] .....	21
Slika 11: Ionizacijska komora [11].....	24
Slika 12: Maglena komora [12] .....	25
Slika 13: Slikoviti prikaz Geiger-Mullerovog brojača [13] .....	26
Slika 14: Geiger-Mullerov brojač [13] .....	27