

# NEKE PRIMJENE NEIONIZIRAJUĆEG I IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

---

**Kihalić, Jadranka**

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

**2020**

*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:128:563313>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-29**



**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 REPOZITORIJ

Veleučilište u Karlovcu

Odjel sigurnosti i zaštite

Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Jadranka Kihalić

# **NEKE PRIMJENE NEIONIZIRAJUĆEG I IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2020. godina

Karlovac University of Applied Sciences

Safety and Protection Department

Professional graduate study of safety and protection

Jadranka Kihalić

**SOME APPLICATIONS OF NON-  
IONIZING AND IONIZING RADIATION**

FINAL PAPER

Karlovac , 2020 year

Veleučilište u Karlovcu

Odjel sigurnosti i zaštite

Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Jadranka Kihalić

# **NEKE PRIMJENE NEIONIZIRAJUĆEG I IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor: dr. sc. Slaven Lulić, v. pred.

Karlovac, 2020. godina

## ZAVRŠNI ZADATAK

U završnom radu bit će govora o nekim primjenama neioniziranog zračenja i ioniziranog zračenja. Govorit će se o primjenama ionizirajućeg zračenja u medicinskim pretragama.

## PREDGOVOR

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći se navedenim izvorima podataka i znanjem koji sam stekla za vrijeme studija.

Zahvaljujem svom mentoru dr. sc. Slavenu Luliću na ukazanom povjerenju i pruženoj pomoći tijekom izrade završnog rada kao i svim profesorima.

Također bih željela zahvaliti svojoj obitelji i prijateljima na potpori i razumijevanju tijekom cijelog studiranja koji je uz posao bio izrazito zahtjevan. Ponekad sam mislila da ću odustati, ali moja obitelj, prijatelji kao i mentor podupirali su moju upornost, nisu mi zamjerali tvrdoglavost te su mi bili oslonac tijekom cijelog školovanja dajući mi uvijek novu snagu i poticaj.

## SAŽETAK

Ovaj rad daje kratki pregled trenutnih spoznaja o djelovanju i primjenama elektromagnetskog zračenja na materijale i ljudsko zdravlje. Elektromagnetsko zračenje / valovi imaju široki raspon svakodnevnih primjena koje uključuju komunikaciju mobilnim telefonima , kuhanje, gledanje, i tretiranje kancerogenih bolesti. U radu je diskutirana podjela elektromagnetskog zračenja u kategorije kao što su ionizirajuće i neionizirajuće zračenje te su dane i prezentirane neke od glavnih primjena za svako područje. Poseban naglasak je stavljen na procese radioaktivnosti i primjenu u suvremenoj medicini kako u dijagnostičkim tako i u terapijskim postupcima.

## ABSTRACT

This work provides a short overview of current knowledge addressing effects and applications of electromagnetic radiation on materials and human health. Electromagnetic radiation/ waves have a vast range of practical everyday applications that includes such diverse uses as communication by cell phone, cooking, vision, and treating cancer. Discussion on how electromagnetic radiation is classified into categories such as ionizing and nonionizing radiation is given in this paper and some of the main applications for each range are presented. Radioactivity and its application in modern medicine, both in diagnostic and therapeutic processes is emphasized.

# SADRŽAJ

ZAVRŠNI ZADATAK	I
PREDGOVOR	II
SAŽETAK	III
1. UVOD	1
1.1. Predmet i cilj rada	1
1.2. Izvori podataka i metode prikupljanja	2
2. TEORIJSKI DIO	3
2.2. Spektar elektromagnetskog zračenja	3
3. METODE KORIŠTENE U RADU	8
4. REZULTATI I RASPRAVA	9
4.1. Neionizirajuće zračenje	9
4.1.2. Radiovalno i mikrovalno zračenje	10
4.1.3. Zračenje ekstremno niskih frekvencija.	13
4.1.4. Mjere zaštite od neionizirajućeg zračenja	14
4.2. Ionizirajuće zračenje	15
4.3. Radioaktivnost	16
4.3.1. $\alpha$ raspad	18
4.3.2. Beta raspadi	20
4.3.3. Gama zračenje	24
4.3.4. Međudjelovanje radioaktivnog zračenja i tvari	25
4.3.5. Radioaktivni nizovi	25
4.3.6. Umjetna radioaktivnost	26
4.4. Primjena radioaktivnosti u medicini	27
4.4.1. Primjena radioaktivnosti u medicinskoj dijagnostici	28



4.4.2. Terapija radioaktivnim izvorima	33
5. ZAKLJUČCI	34
6. LITERATURA	36
7. PRILOZI	37
7.1. Popis simbola	37
7.2 Popis slika	38
7.3. Popis tablica	39

# 1. UVOD

## 1.1. Predmet i cilj rada

Predmet rada je prikaz elektromagnetskog zračenja općenito, opis svojstava neionizirajućeg i ionizirajućeg zračenja te primjena ovih zračenja. Također je prikazan utjecaj obje vrste zračenja na ljude i primjena u medicini.

Elektromagnetsko zračenje je svuda oko nas bilo kao prirodno zračenje ili ono stvoreno ljudskim odnosno antropogenim djelovanjem. U današnje vrijeme se koriste čak i u svakodnevnom životu mnogi uređaji koji generiraju elektromagnetsko zračenje. Stoga je poznavanje vrsta zračenja i utjecaja na živi i neživi svijet od izuzetnog značaja, posebice u okviru koncepta zaštite na radu.

Cilj ovog rada je dati pregled i ukazati na djelovanja elektromagnetskog zračenja, posebno na zdravlje ljudi kako bi se mogle prepoznati situacije u kojima je nužno provjeriti, odnosno procijeniti i/ili izmjeriti intenzitet zračenja kojem su osobe u pojedinim situacijama izložene.

U radu je dan pregled djelovanja zračenja na zdravlje ljudi, posebice u svijetlu postupaka vezanih uz zaštitu na radu i općenito zaštitu ljudi od štetnog djelovanja zračenja kao i medicinskim primjenama u dijagnostici i liječenju.

Naime ljudi nemaju osjetila za ionizirajuće zračenje te čak i kod smrtonosnih doza zračenja neće u trenutku ozračivanja primijetiti da se nešto dogodilo. Jednako opasno može biti naravno i dugotrajno izlaganje malim dozama zračenja. Stoga je upravo prepoznavanje situacija koje su potencijalno opasne iznimno značajno za zaštitu zdravlja. Međutim zračenje se može koristiti u kontroliranim situacijama za dijagnostičke postupke i liječenje što je posebno obrađeno ovim radom.

Elektromagnetski valovi/zračenje nastaju međudjelovanjem električnog i magnetskog polja izvora, a promjene polja se šire prostorom.

Raspon svih valnih duljina odnosno frekvencija elektromagnetskih valova se naziva spektrom. Raspon frekvencija je od 3 Hertza (dalje u tekstu Hz) do  $10^{23}$

Hz. Elektromagnetski val/zračenje se širi prostorom kao val određene valne duljine , a djeluje na tvari kao čestica. Što je frekvencija vala veća to je i energija zračenja veća te je utjecaj na tvari značajniji.

U ovom radu se elektromagnetsko zračenje promatra kao neionizirajuće i ionizirajuće odnosno ovisno o posljedicama koje uzrokuje na organizme. Ionizirajuće zračenje je specifično po tome što ljudi nemaju osjetilo za zapažanje zračenja. Izravne posljedice za živi svijet su najčešće zakašnjele i teško ih je neposredno povezati s uzrokom. Stoga je ovo zračenje i posebno opasno, jer ga možemo detektirati tek mjernim uređajima što u određenim realnim situacijama nije uvijek moguće. Čovjek može biti izložen i smrtonosnoj dozi ionizirajućeg zračenja, a da toga u trenutku ozračivanja uopće nije svjestan pa se ne može niti zna zaštititi. Posebno je u određenim radnim procesima moguće da dođe do opasne izloženosti ili pak do dugotrajne izloženosti manjim dozama što također utječe na zdravlje [1].

Iz svega rečenog slijedi da je u okvirima zaštite na radu važno znati i razumijeti kako i kada zračenje utječe na zdravlje ljudi, ali i koje su praktične primjene zračenja u određenim procesima posebice u medicini u dijagnostičkim postupcima kao i kod liječenja.

## 1.2. Izvori podataka i metode prikupljanja

U radu su predočene informacije korištenjem dostupne relevantne literature.

## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. Općenito o elektromagnetskom zračenju

Zračenje je pojava širenja energije kroz prostor u obliku valova ili energetske čestice (eng. radiation).

Obzirom na način djelovanja na tvari odnosno količinu energije koja međudjeluje s tvarima zračenje obično promatramo kao ionizirajuće ili neionizirajuće. Energija ionizacije je energija nužna da atom ili molekula u plinovitom stanju izgubi jedan elektron. Zračenje čije su energije veće od 10 eV može izbaciti elektron iz atoma ili molekule te nastaju ioni. Ioni su atomi i molekule koji imaju višak ili manjak elektrona u odnosu na neutralno stanje.

Izvori zračenja se obično promatraju obzirom na način postanka kao prirodni i umjetni odnosno antropogeni izvori nastali ljudskim djelovanjem.

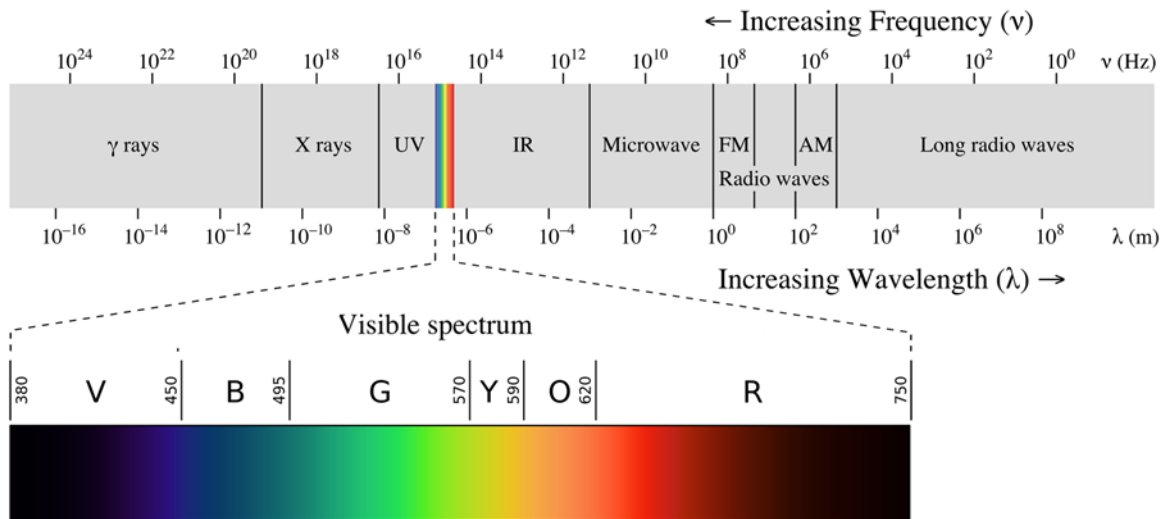
Izvori ionizirajućeg zračenja su radioaktivni materijali koji emitiraju  $\alpha$ ,  $\beta$ , ili  $\gamma$  zračenje odnosno redom jezgre helija, elektrone ili pozitrone te fotone. Medicinske radiografske pretrage su umjetni izvori X-zraka, međutim ove zrake mogu nastati i prirodnim putem uslijed djelovanja kozmičkog zračenja na plinove u visokoj atmosferi.

### 2.2. Spektar elektromagnetskog zračenja

Elektromagnetsko zračenje/valovi su širenje energije električnog i magnetskog polja kroz prostor. Elektromagnetsko zračenje i osnovne čestice tvari pokazuju dualnu prirodu odnosno kroz prostor se šire kao val, a međudjeluju s tvarima kao čestice.

Na slici 1. predložen je spektar elektromagnetskog zračenja ovisno o frekvenciji odnosno valnoj duljini vala. Spektar (lat. spectrum: pojava, priviđenje) je raspodjela intenziteta određene mjerene veličine koji su predloženi ovisno o nekoj fizikalnoj veličini. Pojam spektar ovdje će se koristiti u značenju spektar elektromagnetskog zračenja. Za razumijevanje spektra elektromagnetskog zračenja potrebno je definirati osnovne veličine:

- valna duljina je udaljenost između najbliže dvije točke iste elongacije i iste faze na valu,
- frekvencija je broj titraja koje neki val izvede u jedinici vremena,
- valni broj je broj valnih ciklusa u jedinici duljine.

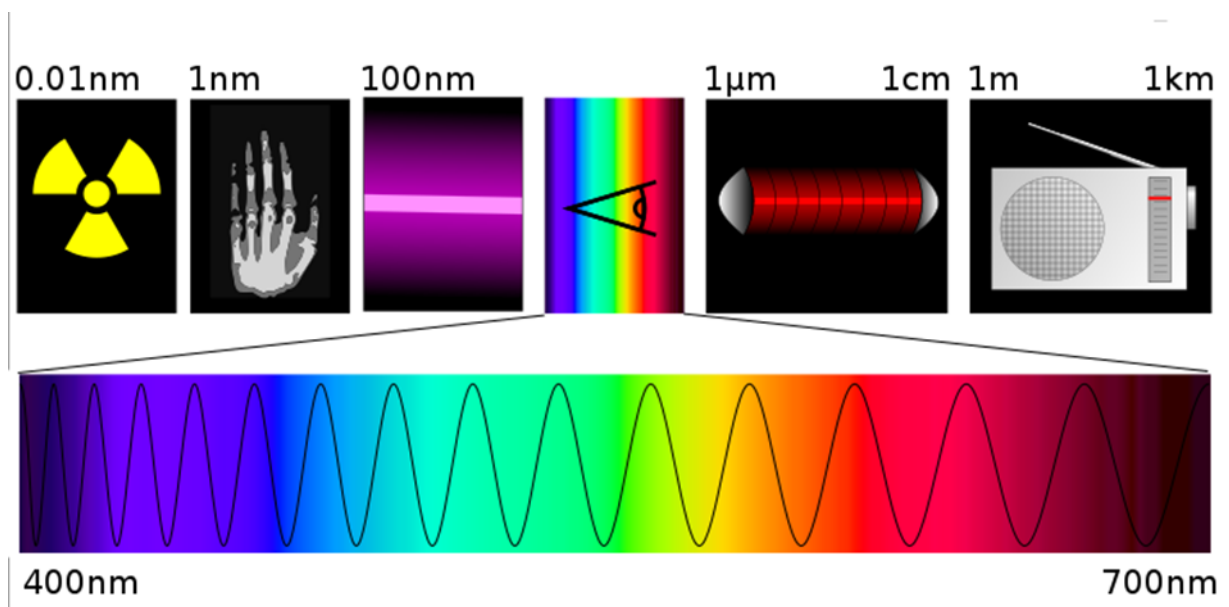


Slika 1: Spektar elektromagnetskog zračenja s istaknutim dijelom vidljive svjetlosti (Izvor <https://hr.wikipedia.org>)

Zračenje najvećih energija (ujedno najkraćih valnih duljina i najvećih frekvencija) su  $\gamma$  zrake, zatim slijede X-zrake, ultravioletne zrake, vidljiva svjetlost, mikrovalovi te kratki i dugi radio valovi. Treba primijetiti kako uobičajeno za područje većih energija koristimo izraz “zrake” odnosno zračenje dok za područje frekvencija manjih od frekvencija vidljive svjetlosti koristimo izraz “valovi”.

$\gamma$  i X zrake te dio ultraljubičastog zračenja (dalje u tekstu UV zračenje) imaju dovoljne energije za ionizaciju atoma i molekula. Područje UV zračenja blisko vidljivoj svjetlosti, vidljiva svjetlost, infracrveno zračenje i mikro valovi nemaju energiju koja može uzrokovati ionizaciju, međutim mogu uzrokovati titranje atoma i molekula koje se manifestira kao toplina. Smatra se da radio valovi nemaju biološko djelovanje.

Na slici 2. spektrar je predložen simbolima pojedinih zraka odnosno valova uz pridružene pripadne valne duljine.



Slika 2: Simboličan prikaz elektromagnetskog spektra s podacima o pridruženim valnim duljinama

Zračenja koja je proizveo čovjek nazivamo umjetna zračenja, a možemo ih okarakterizirati kao elektrosnog tj. kao još jednu vrsta onečišćenja cijelog planeta. Prirodna i umjetna zračenja mogu biti promjenjive prirode ili statička polja. Za primjer statične prirode je električno i magnetsko polje Zemlje, a to znači da tijekom dužeg perioda promatranja polja imaju konstantan iznos. Prirodna zračenja može otkriti senzor kao rezultat jednog ili dva procesa. Umjetna zračenja se dogode kada instrument na daljinsko očitavanje šalje svoj energetski puls prema Zemljinoj površini. Izvori umjetnog zračenja su jaki radio, bazna stanica, kompjuteri, dalekovodi, električna vozila, elektrane, trafostanice, industrijska postrojenja.

Sva ugrijana tijela zrače elektromagnetske valove. Kada se grije neko tijelo, znači da se u njega ulaže energija čime se atomima povećava energija te prelaze u pobuđena stanja i počinju titrati. Jezgre atoma nose naboje, pa tako prilikom titranja atoma dolazi do titranja naboja. U točkama prostora oko naboja postoji električno polje, a ako se naboj giba znači da se uz električno polje pojavljuje i magnetsko polje. Naboj koji titra predstavlja izvor elektromagnetskog

vala. Termalni efekt zračenja karakterizira povećanje temperature. Elektromagnetska polja uzrokuju promjenjivu polarizaciju molekula i atoma koji čine ćelije rezultirajući velikom toplinom. Prekomjerna toplina može uzrokovati oštećenje pojedinih organa i cijelog ljudskog organizma. Posebno štetno je za organe kao što su oči, mozak, bubreg itd. Kako bi se ljudi zaštitili od posljedica djelovanja elektromagnetskog zračenja koriste se različiti načini i mjere kao što su vrijeme, udaljenost, zaštita izvora zračenja, smanjivanje jakosti zračenja direktno na izvoru, daljinsko praćenje, liječnički pregledi i sl.

Elektromagnetski spektar je skupni pojam. Odnosi se na cijeli opseg frekvencija elektromagnetskog zračenja i njihovih pripadajućih valnih duljina fotona. Svi elektromagnetski valovi putuju istom brzinom u vakuumu (brzinom svjetlosti). Cjelokupna distribucija obuhvaća širok raspon frekvencija i valnih duljina, a sastoji se od mnogih podskupina, obično nazvanih dijelovima elektromagnetskog spektra. Različiti dijelovi nose različita imena na temelju razlika u ponašanju emisija, transmisija i apsorpcija odgovarajućih valova te na temelju njihovih različitih praktičnih primjena. Nema preciznih prihvaćenih granica između bilo kojeg od ovih susjednih dijelova, tako da rasponi imaju sklonost preklapanja. Cijeli elektromagnetski spektar od najnižih do najviših frekvencija (najduže do najkraće valne duljine) uključuje sve radio valove (npr. komercijalni radio i televizija, mikrovalovi, radari), infracrveno zračenje, vidljiva svjetlost, ultraljubičasto zračenje, X zrake i gama zrake [4]. Električno i magnetsko polje su vezani u jednu specifičnu cjelinu i ne odvajaju se jedno od drugog. To je poznato iz činjenice da se pomoću magneta može inducirati struja, a oko svakog vodiča detektirati magnetsko polje. Spektar elektromagnetskog zračenja je pojam u fizici koji određuje specifičnosti ovog zračenja.

Promjene u energijskim razinama elektrona odražavaju se uglavnom na ultraljubičastim i vidljivim spektrima, a infracrveni spektri potječu od vibracijske i rotacijske energije.

Vidljivi spektar odgovara nizu boja što nastaje raspodjelom bijele Sunčeve svjetlosti (disperzija duginih boja) od ljubičaste, preko plave, zelene, žute i narančaste do crvene.

Emisijski spektar daje informaciju o fizikalnim i kemijskim svojstvima izvora zračenja i karakterističan je za svaki izvor. Emisijski spektar nastaje raščlanjivanjem (na primjer s pomoću prizme ili optičke rešetke) emitiranoga zračenja užarenih tijela.

Apsorpcijski spektar nastaje raščlanjivanjem zračenja propuštenoga kroz tvari koje djelomično propuštaju, a djelomično apsorbiraju elektromagnetsko zračenje na svojstven, selektivan način.

Elektromagnetski spektar se prema djelovanju na tvari dijeli na:

- ionizirajuće zračenje,
- neionizirajuće zračenje.



### 3. METODE KORIŠTENE U RADU

Obzirom na postavljene ciljeve rada korištena je metoda sinteze postojećih podataka o primjenama i djelovanju neionizirajućeg i ionizirajućeg zračenja u svrhu izrade rada. Nisu provedeni eksperimentalni postupci budući da obzirom na temu nisu primjereni.

## 4. REZULTATI I RASPRAVA

### 4.1. Neionizirajuće zračenje

Neionizirajuća zračenja su bilo koja vrsta elektromagnetskog polja i elektromagnetskih valova frekvencije niže od 3 000 000 GHz ili ultrazvuk frekvencije niže od 500 MHz, a koji u međudjelovanju s tvarima ne stvaraju ione, tj. nemaju dovoljnu energiju da potpuno izbace elektrone iz njihove orbite i tako uvjetuju nastanak iona. Ion je čestica (atom) ili skupina atoma (molekula) koja je električno nabijena zbog razlike u broju protona i elektrona odnosno nije u neutralnom stanju.

U područje neionizirajućeg zračenja ubrajamo:

1. Optičko zračenje (ultraljubičasto, vidljivi spektar i , infracrveno),
2. Radiovalno i mikrovalno zračenje,
3. Zračenje ekstremno niskih frekvencija.

#### 4.1.1. Optičko zračenje

Ultraljubičasto zračenje obuhvaća elektromagnetsko zračenje s valnim duljinama manjim od onih koje ima vidljiva svjetlost, a većim od onih koje imaju X-zrake, u rasponu od 10 nm do 400 nm, i energiji fotona od 3 eV do 124 eV. Ultraljubičasto zračenje se emitira kada pobuđeni atomi prelaze iz višeg energetskeg stanja u niže, otpuštajući pri tom fotone energija u području ultraljubičastog zračenja. Ultraljubičasto zračenje je štetno za naš organizam jer može uzrokovati crvenilo kože, ubrzava starenje kože, a pri velikim izlaganjima može dovesti i do raka kože, te oštećenja vida. Izvori ultraljubičastog zračenja su Sunce, laseri, uređaji za kvarcanje itd.

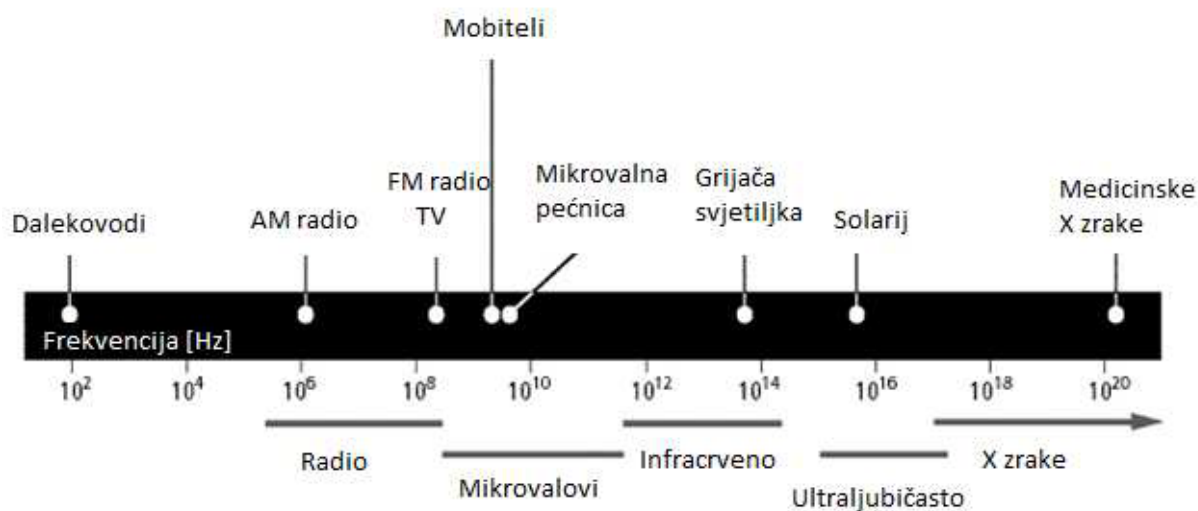
Ljudsko oko reagira samo na vrlo ograničeni raspon valnih duljina elektromagnetskih valova, tj. na vidljivu svjetlost, međutim, ono odlično raspoznaje i vrlo male razlike unutar tog raspona. Te male razlike nazivamo boje. Boje su male frekvencijske razlike u području vidljive svjetlosti. Najkraću valnu duljinu imaju ljubičasta i plava svjetlost, a najdužu crvena svjetlost. Bijela svjetlost sastavljena je od kontinuiranog niza svih boja vidljivog spektra.

Infracrveno zračenje čine elektromagnetski valovi valne duljine između 750 nm i 3 mm. Za ljudsko oko infracrveno zračenje je nevidljivo, ali se djelovanje može zamijetiti na koži kao osjećaj topline. Neki od izvora infracrvenog zračenja su varenje, proizvodnja stakla i čelika, infracrveni grijači i svjetiljke itd.

#### 4.1.2. Radiovalno i mikrovalno zračenje

Mikrovalovi su elektromagnetsko zračenje u spektralnom području između  $10^8$  Hz i  $10^{12}$  Hz, dok su radiovalovi u području između  $10^4$  Hz i  $10^8$  Hz. Za razliku od optičkog zračenja, mikrovalno i radiovalno zračenje prodire dublje i može djelovati na unutarnje organe. Izvori radiovalnog i mikrovalnog zračenja su mobiteli, antene mobilnih telekomunikacija, TV i radio odašiljačke antene, radar, mikrovalna pećnica, te satelitske antene. Što se tiče mobitela, odnosno bezžičnih komunikacijskih sustava, oni rade na nekoliko frekvencija elektromagnetskog spektra.

Na slici 3. je prikazan elektromagnetski spektar i naznačeni umjetni izvori određenih dijelova spektra.



Slika 3: Elektromagnetski spektar i umjetni izvori pojedinih dijelova spektra

Mobilni radio telekomunikacijski sustavi koriste frekvencije od 800 MHz do 900 MHz u radiovalnom spektru kao i odašiljači koji koriste frekvencijsko područje od 1850 MHz do 1990 MHz. Antene mobilnih telekomunikacija postavljaju se na visokim mjestima kao što su krovovi zgrada, tornjevi, ali vodeći računa da su definirana područja u Prostornim planovima više ili niže razine na kojima se takovi uređaji smiju postaviti obzirom na blizinu naselja (Prostorni Plan uređenja regionalne ili lokalne razine). U tehničkom smislu ove antene postavljaju se u tri grupe po tri antene, jedna antena u svakoj grupi emitira signale mobilnim jedinicama, a druge dvije antene u grupi primaju signale od mobilnih jedinica. Zračenje ovih antena je veliko samo u njihovoj bližoj okolini. Količina zračenja za pojedinca bila bi opasna jedino kada bi se popeo na visinu na kojoj antena emitira signal udaljenosti oko pola metra, ali u to područje je ulaz zabranjen, osim za telekomunikacijske službe.

Količina zračenja kojoj čovjek može biti izložen ovisi o frekvenciji zračenja. Ovisno o kanalu, antene odašilju na različitim frekvencijama, koje se kreću od 550 kHz za radio antene, do 800 MHz za TV antene. Operativna snaga radio stanice se kreće oko nekoliko stotina vata, a za televizijske stanice iznosi i do milijun vata, dok intenzitet elektromagnetnog polja ovisi o više faktora, a to su dizajn antene, tip stanice, visina antene, snaga odašiljana, te sama udaljenost od antene.

Pobrojati ćemo još neke od izvora zračenja a to su: radari, mikrovalne pećnice, point-to-point mikrovalne antene, satelitske antene te prenosivi bežični radio uređaji ili walkie-talkie.

Radari se koriste u razne svrhe i u raznim životnim prilikama, kao što su prognoze vremena, vojni radari, radari za nadzor i kontrolu zračnog prometa. Opasnost od frekvencije emitiranog zračenja imaju najviše službe koje rade u njihovoj blizini, posebno za vrijeme emitiranja signala.

Mikrovalne pećnice koje se danas nalaze skoro u svakom kućanstvu, rade tako da kroz hranu šalje neionizirajuće zračenje. Voda i masti kao primjer, upijaju energiju iz mikrovalova u procesu dielektričnog zagrijavanja. Dielektrično zagrijavanje je proces u kojem elektromagnetno zračenje zagrijava dielektričnu tvar, a prouzročeno je rotacijom dipola. Ta rotacija predstavlja toplinu koja se

širi dok se dipoli sudaraju s drugim molekulama. Ovisno o efikasnosti zagrijavanja dipolnog momenta možemo istaknuti da tekuća voda zagrijava se brže od masti i šećera iz razloga šta ima veći dipolni moment. Mjerenja i analize potvrdile su da su pećnice sigurne za kućnu i industrijsku upotrebu. Fizika ima i u ovom slučaju objašnjenje da li mikrovalovi izlaze kroz otvore za hlađenje mikrovalne pećnice ili kroz mrežu na vratima, a to je upravo Faraday-ev kavez, tako da se mikrovalovi ne šire izvan pećnice, jer ta fina nalijepljena mreža od provodljivog materijala ne dopušta prolaz mikrovalovima relativno duge valne duljine, istodobno propušta svjetlost koje je puno manje valne duljine. Mikrovalovi ne prolaze kroz otvore isključivo zbog svojih osnovnih fizikalnih svojstava. Kako bi se izbjegla opasnost od nekontroliranog zračenja, mikrovalne pećnice prekidaju svoj rad čim se vrata otvore, stoga je to jedna od važnih mjera opreza.

Slikom 4 prikazan je Faraday-ev kavez.



Slika 4 Faraday-ev kavez

Point-to-point mikrovalne antene su antene koje služe za odašiljanje podatkovnih i zvukovnih poruka kao i veza između kablovskih TV studija i odašiljačkih antena. Te antene odašilju i primaju vrlo male nivoe energije, nekoliko vata, što je manje nego radiostanice. Prilikom emitiranja mikrovalni signal putuje kao direktna zraka od odašiljačke antene do primajuće s minimalnim napajanjem mikrovalne energije. Ova antena ne predstavlja nikakvu opasnost za zdravlje ljudi.

Satelitske antene se koriste za odašiljanje i primanje signala u orbiti oko Zemlje. Kod satelitskih antena koje samo primaju signale nema nikakve opasnosti na zdravlje ljudi, što se tiče samog zračenja. Satelitske antene koriste veliku energiju, posebno ako prenose energiju do nekog satelita te su vrlo uske i visoko usmjerene što ne utječu direktno na zdravlje ljudi, ali zbog sigurnosnih razloga pristup ovakvim antenskim sustavima je strogo zabranjen.

Walkie-talkies su bežični prenosivi radio uređaji koji se koriste za slanje i primanje poruka, male snage i preko relativno malih udaljenosti. Sama štetnost ovakvih uređaja na zdravlje ljudi nije eksperimentalno dokazana.

#### 4.1.3. Zračenje ekstremno niskih frekvencija.

Treće područje neionizirajućeg zračenja je zračenje ekstremno niskih frekvencija. To područje uključuje izmjeničnu struju i neionizirajuće zračenje od 1 Hz do 300 Hz. Kako su to niske frekvencije, valne duljine do 1000 km, stvaraju statička elektromagnetska polja. Utjecaj zračenja ekstremno niskih frekvencija ovisi isključivo o jačini izvora magnetnog polja, udaljenosti od izvora i vremena provedenog u magnetskom polju. Mjerenjima je dokazano da se jaka magnetska polja nalaze u blizini generatora, velikih električnih motora te električnih kablova, kao i u blizini fotokopirnih uređaja, električnih pila i bušilica te sušila za kosu.

Tablica 1 Prosječna jakost magnetnog polja na udaljenosti 15 cm od uređaja

ELEKTRIČNI UREĐAJ	Jakost magnetnog polja (mG)
Sušilica za kosu	300
Mikrovalna pećnica	200
Električni brijlač	100
Mikser	70
Aparat za kavu	7
TV	7

#### 4.1.4. Mjere zaštite od neionizirajućeg zračenja

Mjere zaštite od neionizirajućeg zračenja definirane su kroz odredbe Zakona o zaštiti od neionizirajućeg zračenja (NN 91/10, NN 114/18). Člankom 7. propisane su sljedeće mjere:

1. Propisivanje graničnih razina i kontrola izloženosti ljudi neionizirajućem zračenju,
2. Proračun i procjena razina zračenja u okolišu izvora neionizirajućeg zračenja,
3. Mjerenje razine zračenja u okolišu izvora neionizirajućeg zračenja,
4. Vremensko ograničavanje izloženosti ljudi neionizirajućem zračenju,
5. Označivanje izvora neionizirajućeg zračenja i prostora u kojim su smješteni,
6. Uporaba zaštitne opreme pri radu s izvorima neionizirajućeg zračenja ili radu u prostorima s neionizirajućim zračenjem,
7. Određivanje uvjeta za smještaj, nabavu i uporabu izvora neionizirajućeg zračenja,
8. Obrazovanje i stručno usavršavanje rukovatelja vezano uz zaštitu od neionizirajućeg zračenja,
9. Utvrđivanje i praćenje zdravlja osoba koje su na radnim mjestima izložene neionizirajućem zračenju,

10. Osobna ili uzajamna zaštita ljudi od izlaganja neionizirajućem zračenju,
11. Osiguranje stručnih radnika, tehničkih, financijskih I drugih uvjeta za provedbu mjera zaštite od neionizirajućeg zračenja,
12. Vođenje evidencije o izvorima neionizirajućeg zračenja i o izloženosti rukovatelja izvorima neionizirajućeg zračenja,
13. Nadzor nad izvorima neionizirajućeg zračenja nad primjenom mjera zaštite.

#### 4.2. Ionizirajuće zračenje

Ionizirajuće zračenje izbija elektrone iz atoma i molekula, zbog čega u tvarima nastaju pozitivno i negativno nabijene čestice (molekule ili njihovi dijelovi) – koje se nazivaju ionima. Kemijska reaktivnost iona uzrokuje oštećenja u živim tkivima.

Ionizirajuće zračenje neobična je prirodna pojava, bitno različita od mnogih drugih prirodnih pojava koje danas poznajemo. Ta se različitost ponajprije očituje u tome što čovjek, a koliko znamo i ostala živa bića, nemaju osjetilo za zapažanje zračenja. Izravne posljedice djelovanja ionizirajućeg zračenja na živi svijet većinom su zakašnjele i teško ih je povezati s uzrokom.

Čovjek je većinu drugih prirodnih pojava primjećivao od davnine, postupno ih upoznao i njima se koristio kao npr. električne pojave primjenjujemo tek nešto više od jednog stoljeća, a čovjek ih je oduvijek zapažao, bar kao munju i grom.

Isto tako čovjek može biti izložen i smrtonosnoj dozi ionizirajućeg zračenja, a da u samom trenutku ozračivanja ništa ne osjeti. Posljedice ozračivanja, bez osjetilne veze s uzrokom zapažanja, se mogu manifestirati tek nakon nekog vremena, od nekoliko sati do nekoliko dana ili čak godina, što ovisi o vrsti i svojstvima tog zračenja. Otuda je i sasvim razumljiv čovjekov strah od te nepoznate i ne osjetilne pojave. Katastrofe kao što su požari, poplave, potresi vidljivi su uzroci čovjekovih nesreća, patnji, za razliku od ionizirajućeg zračenja koje je za mnoge ljude, bez obzira na mnoge korisne primjene, tajnovit neprijatelj pred kojim se čovjek osjeća bespomoćnim. Iz tog razloga je poznavanje osnovnih ionizirajućih zračenja, međudjelovanja zračenja s tvarima,



a posebno djelovanja zračenja na živa bića, neobično važno u ovo naše vrijeme sve veće primjene zračenja i to ne samo stručnom nego i psihološkom smislu. Pojave ionizirajućeg zračenja zapažene su prvi puta polovicom 19. stoljeća pri proučavanju električnih struja u plinovima. Julius Plucker je 1858. godine po svjetlucanju razrijeđenog plina koji se nalazio između elektroda pod visokim naponom, zapazio neke „zrake“ koje iz blizine katode struje prema anodi. Nazvao ih je katodnim zrakama. U sljedećih desetak godina Wilhelm Hittorf, Viliam Crookes i drugi istraživači dokazali su da se katodno zračenje prostire pravocrtno, velikim brzinama i da su to negativno naelektrizirane čestice. Uz niz otkrića koji su uslijedili, čovječanstvo kao da je čekalo otkriće Rontgena (1895 godine). On je istražujući katodno zračenje i propuštajući ga kroz tzv. Lenardov prozorčić (da bi katodno zračenje izašlo iz staklene cijevi Philipp Lenard je u stijenci cijevi načinio otvor zatvoren samo tankom berilijskom pločicom), zapazio svjetlucanje kojem se uzrok mogao pripisati nekome nevidljivom zračenju koje je izbijalo iz onih mjesta na cijevi na koje je upadalo katodno zračenje. To novo zračenje uzrokovalo je niz pojava, prije svega ionizaciju tvari i niz popratnih pojava. Vrlo je prodorno, a oslabljuju ga tek tvari izrazito velike gustoće. Rontgen ga je nazvao X-zrakama, a poslije njemu u počast nazvano je rendgenskim zračenjem. Nakon toga je počela medicinska dijagnostička primjena .

Sva istraživanja ionizirajućeg zračenja koja su nakon toga uslijedila osim rendgenskog, bila su prvenstveno važna za fundamentalna znanstvena istraživanja. Za širu javnost zračenje je postalo zastrašujući pojam pojavom nuklearnog oružja 1945. godine, te njegov razvoj i brojni pokusi, posebno šezdesetih godina. Taj strah od „atoma“ i zračenja prenio se i na druge primjene zračenja, prije svega od posljedica mogućih nesreća u nuklearnim elektranama koje su od sedamdesetih godina prošlog stoljeća, pojavom svjetske energetske krize, postale vrlo važan izvor energije.

#### 4.3. Radioaktivnost

Radioaktivnost je svojstvo nekih vrsta atomskih jezgri da se spontano mijenjaju ili dijele, i pri tome odašilju čestice i elektromagnetske valove. Takove jezgre se nazivaju radionuklidima, a emitirane čestice i elektromagnetski valovi se nazivaju radioaktivnim zračenjem. Takva spontana promjena nestabilnih jezgri zove se radioaktivni raspad.

Radioaktivno zračenje je ionizirajuće zračenje (kao što je i kozmičko i rendgensko zračenje, pa čak i ultraljubičasto zračenje).

Prirodnu radioaktivnost otkrio je Henri Becquerel 1896. godine uočivši da uranijeve soli emitiraju nevidljivo zračenje koje djeluje na fotografsku ploču kroz zaštitni papir slično rendgenskim zrakama te da pod utjecajem toga zračenja elektroskop gubi naboj. Primijetio je da uranijeve soli stalno u mraku fluoresciraju. Daljnjim ispitivanjem, Becquerel je pronašao da zračenje koje izazivaju uranijevi spojevi ionizira zrak (ionizirajuće zračenje), izaziva fluorescenciju i prolazi kroz papir, pločice aluminijske i bakra. Kroz zatvoreni spremnik ono djeluje na fotografsku ploču, a djeluje i na našu kožu i klice raznih biljaka.

Maria Curie-Sklodowska otkrila je 1898. godine da se na zračenje ne može utjecati električnom strujom, zagrijavanjem, kemijskim reakcijama i sl. odnosno da se radioaktivni kemijski elementi pretvaraju jedni u druge i da vjerojatnost raspada ne ovisi o starosti pojedinog atoma. Irene Joliet-Curie i Frederic Joliet-Curie prvi su 1934. umjetno izazvali radioaktivnost i proizveli umjetni radionuklid stabilnog kemijskog elementa.

Do radioaktivnoga raspada dolazi zbog nestabilnosti atomske jezgre. Neke su atomske jezgre prirodno nestabilne, a neke to mogu postati kad na njih djeluju čestice visoke energije.

Radioaktivni raspad je pretvorba jedne atomske jezgre u drugu uz emitiranje ili  $\alpha$ -čestica ili  $\beta$ -čestica ili  $\gamma$ -zračenja.

Procese u kojima dolazi do radioaktivnog raspada objašnjavamo osnovnim prirodnim zakonitostima odnosno zakonima očuvanja fizikalnih veličina:

- a) električnog naboja
- b) mase-energije
- c) količine gibanja

- d) momenta količine gibanja  
 e) nukleonskog (masenog) broja

Svojstva čestica koje sudjeluju u nuklearnim reakcijama prikazana je tablicom

Tablica 2: Svojstva čestica koje sudjeluju u nuklearnim procesima

**IMENA, SIMBOLI I OSOBINE ČESTICA KOJE SUDJELUJU U NUKLEARNIM PROCESIMA**

IME	SIMBOL	MASENI BROJ	MASA/u	NABOJ
proton	$p, {}^1_1p, {}^1_1H$	+1	1,007277	+1
neutron	$n, {}^1_0n$	1	1,008665	0
elektron	$e, e^-, {}^0_{-1}e, \beta^-$	0	0,000548	-1
pozitron	$e^+, {}^0_{+1}e, \beta^+$	0	0,000548	+1
foton	$h\nu, \gamma$	0	0	0
neutrino antineutrino	$\nu$ $\bar{\nu}$	0 0	0 0	0 0

$$1u = 1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

4.3.1.  $\alpha$  raspad

$\alpha$  raspad je specifičan za jezge s velikim brojem nukleona, npr. pri čemu se emitira  $\alpha$ -čestica odnosno jezgra helija. Time se velika jezgra brzo riješi 4 nukleona. Prilikom raspada ostaje očuvan maseni i redni broj.

Općenita reakcija za alfa raspad ima oblik prema izrazu (1).



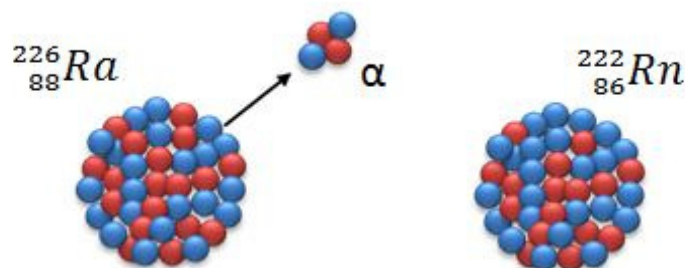
Ovom jednadžbom je prikazano da jezgra X masenog broja A nakon raspada prelazi u jezgru Y čiji je maseni broj manji za 4, a protonski broj Z manji za 2 pri čemu se emitira jezgra helija odnosno alfa čestica.

Jezgru X koja se raspada zovemo još i radioaktivna jezgra koja se raspada (roditelj), a jezgru Y koja nastaje raspadom nazivamo novonastala radioaktivna jezgra (kćer)

Kao primjer pokazat ćemo raspad alfa emitera radija (Ra).

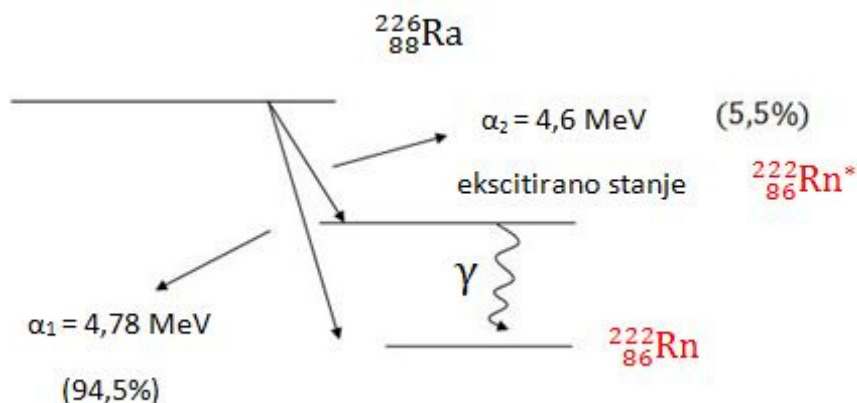


Raspadom jezgre radija nastaje Radon uz emisiju alfa čestice. Ovaj raspad možemo predočiti sljedećom slikom.



Slika 5:  $\alpha$  raspad radija-226

Novonastala jezgra u osnovnom je stanju kod čistih alfa emitera, a u pobuđenom (ekscitiranom) stanju je kod alfa-gama emitera kod kojih ista nije u osnovnom stanju već se prijelaz u osnovno stanje odvija uz emisiju gama zračenja.



Slika 6: Energijski dijagram raspada radija-226

Alfa čestica nosi ogromnu energiju, ali obzirom da ima i relativno veliku masu domet joj je u zraku svega 2 do 8 cm, dok domet u tkivima iznosi tek 0,03 mm.

Alfa čestica se može saprati, skinuti s površine tkiva, zaustavlja ju čak list papira, međutim postaje iznimno opasna ako uđe u organizam. Interakcija s tvari kroz koju prolazi je iznimno jaka, jer stvara veliki broj ionskih parova po jedinici puta, a ogromnu energiju koju posjeduje može pohraniti u samo jednoj stanici. Zbog toga je biološka efikasnost alfa zračenja izrazito visoka, što znači da je njegovo štetno djelovanje jako izraženo.

U medicinskoj dijagnostici ova vrsta raspada se koristila u samim počecima primjene, ali se od toga odustalo. Danas se radi na istraživanjima kako usmjeriti odnosno bolje fokusirati alfa zračenja na stanice na koje želimo djelovati, a da ne bude dodatnih djelovanja zračenja. Posebno bi u liječenju karcinoma mogla biti zanimljiva primjena alfa zračenja. U današnje vrijeme razvijaju se metode koje bi iskoristile veliku biološka efikasnost alfa zračenja te bi se lokalnom primjenom u ciljano područje mogla isporučiti lokalno visoka doza zračenja dovoljna da se unište stanice karcinoma a poštedi okolno zdravo tkivo.

Iako se radij-226 nekada široko primjenjivao u terapiji karcinoma, kasnije ga se prestalo koristiti zbog njegove radio toksičnosti.

Alfa-gama emiter  $^{241}\text{Am}$  upotrebljava se u nuklearnoj medicini u svrhu kalibracije.

#### 4.3.2. Beta raspadi

U beta raspade spadaju:

- beta minus ( $\beta^-$ ) raspad,
- beta plus ( $\beta^+$ ) raspad ili pozitronski raspad,
- uhvat elektrona.
- široku primjenu u medicini.

U medicini su svoju široku primjenu našli radioaktivni izotopi koji se raspadaju beta raspadom.

Beta minus raspad prikazujemo formulom



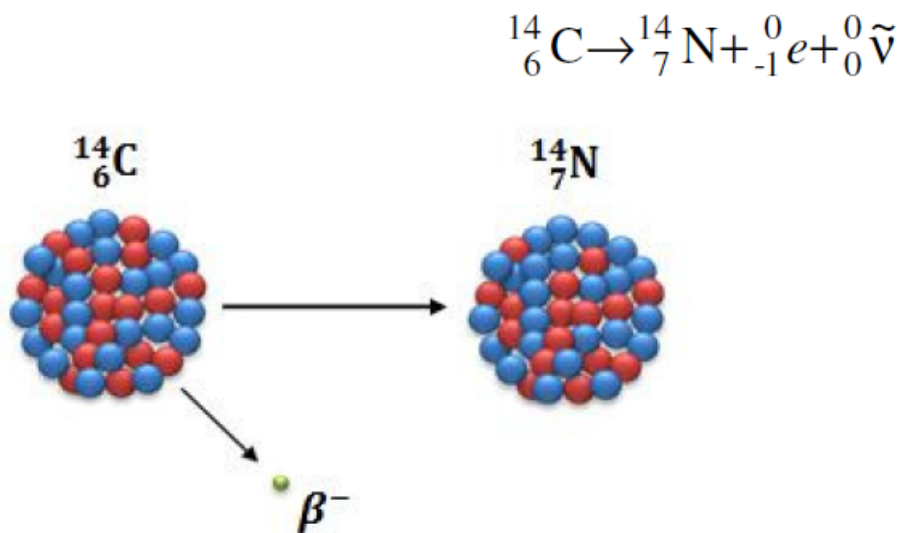
$$= \beta^- \quad (5)$$

Beta minus čestica ionizira tvar kroz koju prolazi i stoga je to ionizirajuće zračenje.

Antineutrino je čestica bez naboja, čija je masa puno manja od mase elektrona, a sa tvari kroz koju prolazi ostvaruje vrlo slabu povezanost. Spektar beta raspada je kontinuiran budući da antineutrino dijeli energiju koja nastaje beta minus raspadom s emitiranom beta česticom.

Za potrebe medicinske aplikacije u akceleratorima čestica ili nuklearnim reaktorima moguće je proizvesti beta minus emitere, a ima ih i u prirodi. Novonastala jezgra u osnovnom je stanju kod čistih beta emitera, a u pobuđenom (ekscitiranom) stanju je kod beta-gama emitera kod kojih ista nije u osnovnom stanju već se prijelaz u osnovno stanje odvija uz emisiju gama zračenja.

Primjer  $\beta^-$  raspada je reakcija u kojoj izotop ugljika prelazi u dušik što je predočeno sljedećom slikom i jednačbom.

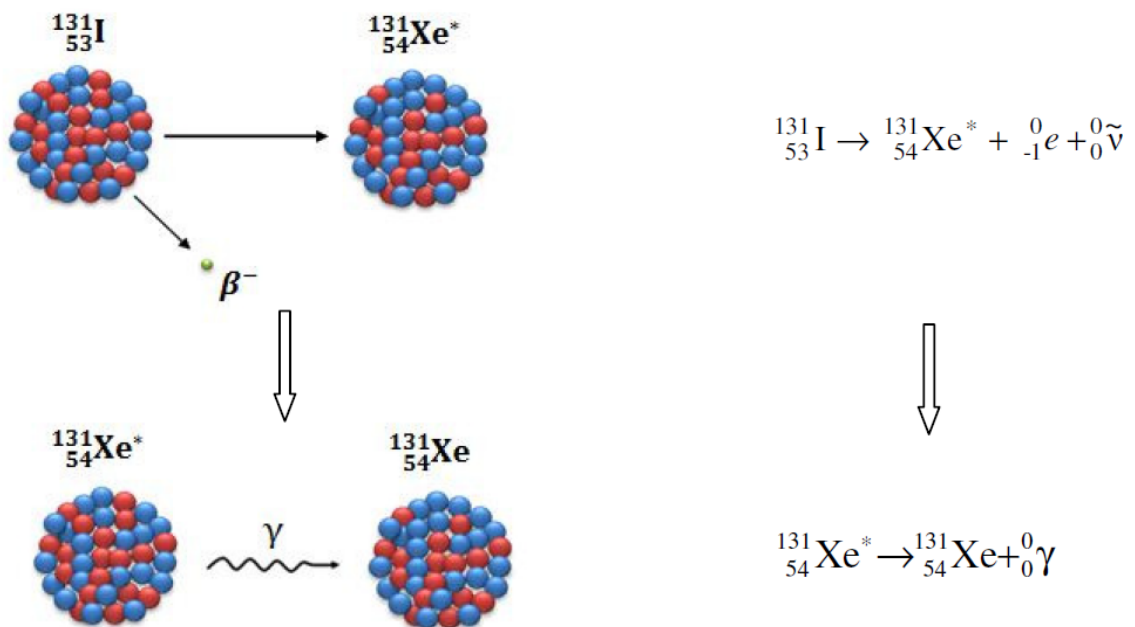


Slika 7: Raspad C-14

Primjena beta minus emitera nije praktična ako je detektor zračenja izvan tijela pacijenta, a ukoliko je izvor beta minus čestica u pacijentu, doseg čestica iznosi nekoliko milimetara.

Beta minus gama emiteri se koriste u velikom broju medicinskih aplikacija, za razliku od čistih beta minus emitera. Tako je primjerice za ispitivanje štitne žlijezde široka primjena jod-131, koji je beta - gama emiter. U tkivu se apsorbira emitirana beta -minus čestica, a emisijom gama zračenja ksenon iz pobuđenog stanja prelazi u osnovno. Gama zračenje radi svoje elektromagnetne prirode ima mnogo veću dubinu prodiranja te se uz pomoć pogodnih detektora koji se nalaze izvan pacijenta (gama kamera) može dalje detektirati.

Beta minus gama emiteri mogu se koristiti osim u dijagnostici i u radioterapiji karcinoma.



Slika 8: Raspad I-131

Nestabilne jezgre s manjkom neutrona podložne su beta plus raspadu. Nakon što jezgra doživi beta plus raspad ostaje joj isti broj nukleona, a proton iz jezgre transformira se u neutron, a sve to uz emisiju beta plus čestice (pozitrona) i neutrina.

$N$  se poveća za jedan,  $Z$  se smanji za jedan,  $A$  ostaje isti, te se novonastali element u periodnom sustavu pomiče za jedno mjesto u lijevo.

$$\rightarrow + + \quad (6)$$

$$\rightarrow + + \quad (7)$$

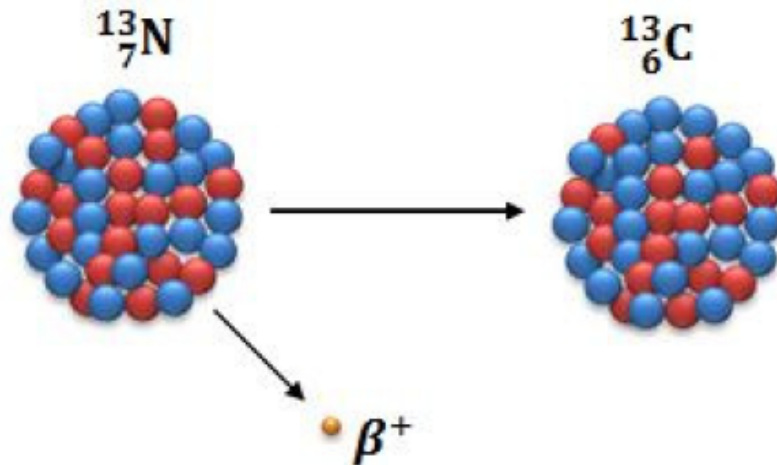
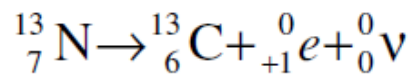
$$= \beta^+ \quad (8)$$

Beta plus čestica (pozitron) predstavlja antičesticu elektrona (ista masa i naboj suprotnog predznaka). Neutrino čestica veoma male mase i bez naboja. Kad se pacijentu u dijagnostičke svrhe aplicira pozitronski emiter, on se zaustavlja nakon emisije pozitrona, obično nekoliko milimetara od mjesta gdje je nastao u tjelesnim tkivima. Nakon što se sudari s obližnjem elektronom, obje česte se ponište (anihiliraju) i nastaju dva fotona elektromagnetnog zračenja svaki energije 511keV-a koji napuštaju mjesto anihilacije u suprotnim smjerovima, pod kutom od  $180^\circ$ .



Nakon beta plus raspada neke jezgre ostanu u pobuđenom stanju, te se iz njega u osnovno stanje vraćaju u osnovno stanje emisijom gama zračenja.

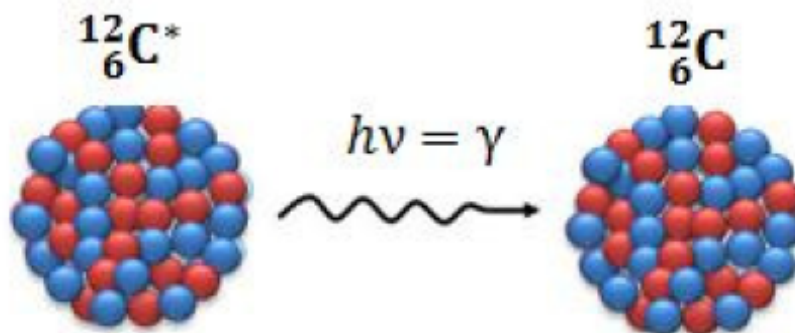




Slika 9: Raspad N-13

#### 4.3.3. Gama zračenje

U slučaju kada jezgra koja je doživjela raspad (alfa ili beta) ostane u pobuđenom stanju tada nastaje gama zračenje, što nije raspad u pravom smislu. Do emisije gama zračenja dolazi pri povratku u stanje niže energije. Prilikom emisije gama zračenja ne dolazi do promjene ni atomskog ni masenog broja, jer je gama zračenje fotonske (elektromagnetske) prirode. U tom procesu emitira se energija pa jezgra dolazi u stabilnije stanje.

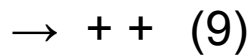


Slika 10: Emisija gama zračenja

Samo mali dio raspada odvija se tako da radioaktivna kćer ostane u takozvanom metastabilnom stanju, što označavamo malim slovom m uz maseni broj, dok se

većina gama zraka emitira gotovo trenutno po raspadu.

U nuklearnoj medicini tako se raspada najčešće korišteni radioizotop tehnecija.



Poslije beta minus raspada Mo-99, nastaje metastabilni tehnecij koji se raspada gama emisijom.



$^{99m}\text{Tc}$  zbog svojih osobina (energija, vrijeme poluraspada) najkorišteniji je radioizotop u medicini.

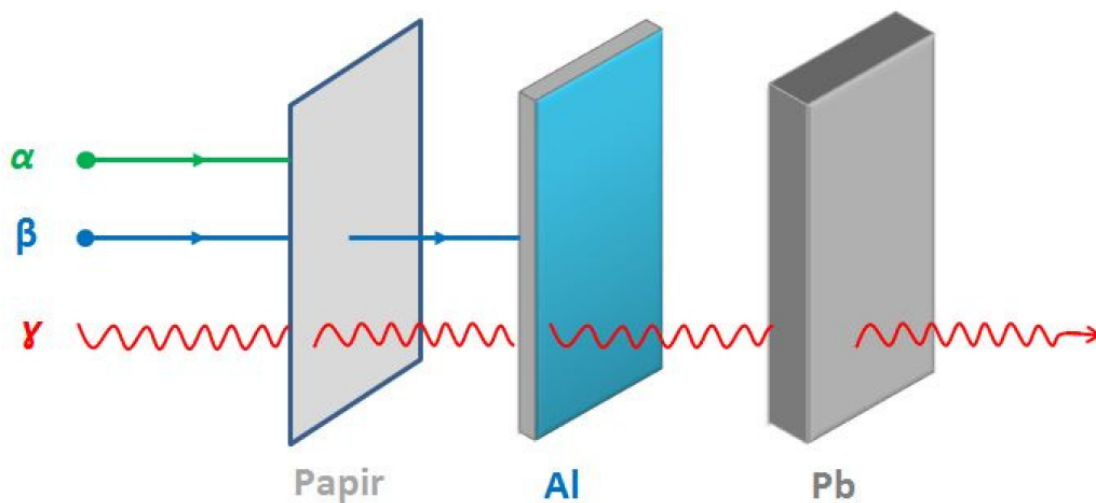
#### 4.3.4. Međudjelovanje radioaktivnog zračenja i tvari

Zbog različite prirode zračenja nastalih pri radioaktivnim raspadima (masa, naboj, energija), različita je i njihova prodornost, odnosno domet.

Alfa čestice (jezgre helija) može zaustaviti sloj papira, par cm zraka ili sloj izumrlih stanica kože, međutim ako dospiju unutar organizma izrazito su opasne.

Beta minus čestice (elektroni), zaustavlja sloj aluminija ili par metara zraka.

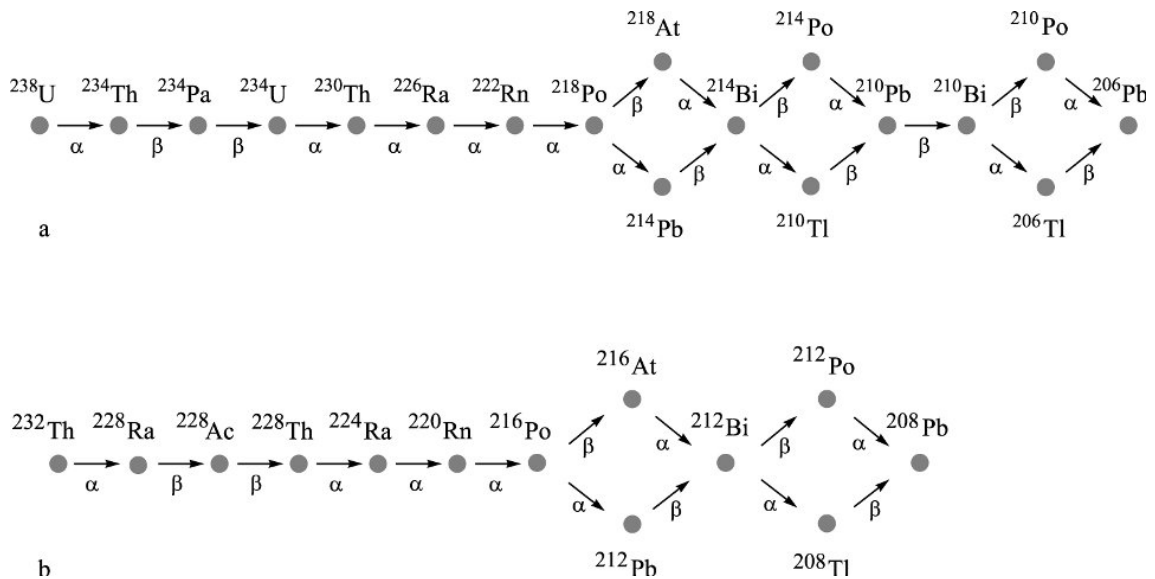
Opasnost predstavlja kočno X-zračenje koje nastaje njegovim prolaskom kroz tvar, ili gama zračenje koje se emitira ako jezgra poslije emisije beta čestice ostane u pobuđenom stanju. Gama zračenje (elektromagnetne prirode), ima najveću dubinu prodiranja. Gama zračenje ne može u potpunosti zaustaviti ni olovna ploča debljine par milimetara. Najbolje ga apsorbiraju materijali velikog atomskog broja (olovo) i velike gustoće.



Slika 11: Prodornost alfa, beta i gama zračenja

#### 4.3.5. Radioaktivni nizovi

Radioaktivni nizovi su skupine prirodnih radionuklida koji nastaju jedni od drugih, početni je onaj s najduljim vremenom poluraspada, a konačni su stabilni radionuklidi. Maseni broj atomske jezgre prirodnom radioaktivnošću može se promijeniti samo za 4, brojevima koji zadovoljavaju  $A=4n+k$ , gdje je  $n$  prirodni broj, a  $k= 0,1,2,3$ . Na zemlji prirodno postoje samo produkti triju nizova: uranijeva, aktinijeva i torijeva (slika 11.) Prirodna radioaktivnost potječe od oko 60 prirodnih radionuklida koji se nalaze u vodi, zraku i tlu.



Slika 12: Radioaktivni nizovi (a. uranijev niz, b. torijev niz)

#### 4.3.6. Umjetna radioaktivnost

Danas kao glavni izvor umjetnih radioaktivnih elemenata služe nuklearni reaktori i akceleratori. Tijekom drugog svjetskog rata i pedeset godina poslije razvijeno je nuklearno oružje, a radioaktivnost razarajuće djeluje na ljude i sve žive organizme, kontaminirajuće djeluje na zrak, zemljište i materijalne tvorevine.



Slika 13: Eksplozija iznad Hirošime – nuklearno oružje

#### 4.4. Primjena radioaktivnosti u medicini

Maligne bolesti danas su jedan od dva najčešća uzroka smrti uz kardiovaskularne bolesti i kod nas i u svijetu. Procjenjuje se da će svaki četvrti stanovnik Zemlje oboliti od ove opake bolesti nazvane tumor - rak.

Jedan od uvjetno rečeno klasičnih načina liječenja tumora jest radioterapija.

Radioaktivni izvori osim zbog svojih specifičnih osobina našli su široku primjenu u medicini i u biologiji. Osim stabilnih atoma posjeduju i atome s nestabilnim atomskim jezgrama (radionuklide) koje se raspadaju u procesu radioaktivnosti pri čemu zrače prodorno ionizirajuće zračenje ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ).

Koristi se pri dijagnosticiranju različitih vrsta oboljenja u radioizotopnoj dijagnostici, testiranju lijekova i u medicinskim istraživanjima. Pomoću njih se određuje volumen tjelesnih tekućina, mogu se mjeriti vrlo niske koncentracije pojedinih tvari u organizmu, mogu se pokretati elektrostimulatore srca, te se snažnim izvorima visoke aktivnosti i energije može sterilizirati medicinska oprema, lijekovi i sredstva kao što su kirurški instrumenti, igle, otopine za kontaktne lece itd.

U onkologiji radioaktivni izotopi koriste se kao izvori ionizirajućeg zračenja u terapijske svrhe.

Izvori zračenja koji se koriste u medicini mogu biti otvoreni izvori ionizirajućeg zračenja i zatvoreni izvori ionizirajućeg zračenja [3].

Jedan od uvjetno rečeno klasičnih načina liječenja tumora jest radioterapija.

U nuklearnoj medicini za terapijske i dijagnostičke svrhe upotrebljavaju se male količine medicinskih pripravaka otvorenih radionuklida koji se daju pacijentu

U nuklearnoj medicini kod dijagnostičkih pretraga ili terapija koriste se male količine medicinskih pripravaka otvorenih radionuklida koji se primjenjuju kod pacijenta a isto se koriste i u laboratorijskim pretragama.

U radioterapiji se koriste zatvoreni izvori ionizirajućeg zračenja. Povijesno je za uporabu radioaktivnih izotopa u medicini bilo vezano niz otkrića i spoznaja o strukturi tvari.

Pregledno su u nastavku dana najznačajnija otkrića kronološkim redom:

1896. godine francuski fizičar Henri Becquerel otkrio je pojavu radioaktivnosti,

1898. godine Marie Curie uspjela je izolirati radij,

1930. godine proizvedeni su prvi umjetni ciklotronski radioizotopi,

krajem Drugog svjetskog rata, razvojem nuklearnih tehnologija, osigurala se dovoljna količina radioaktivnih izotopa proizvedenih u nuklearnim reaktorima koji su se mogli rutinski primijeniti u medicini.

Nakon brojnih istraživanja i novih spoznaja u kemiji, fizici, biologiji, tehničkim znanostima i medicini, posljednji veliki korak u primjeni radioaktivnosti u medicini načinjen je u području slikovne dijagnostike. U ovoj oblasti su se integriranjem sofisticiranih uređaja za slojevita snimanja koje koristi nuklearna medicina i uređaja dijagnostičke radiologije dobili najmoćniji takozvani fuzijski uređaji koji koriste komparativne prednosti slikovnih dijagnostika obje specijalističke grane medicine.

#### 4.4.1. Primjena radioaktivnosti u medicinskoj dijagnostici

U odjelima nuklearne medicine gdje se obavlja većina pretraga, koriste se otvoreni radioaktivni izotopi u dijagnostičke svrhe. Činjenica je da se radioaktivni izotop istog kemijskog elementa ponaša kemijski jednako kao i stabilni kod primjene otvorenih radionuklida.

Kemijskim postupcima nije ih moguće razlikovati. Biološki uzorak može se obilježiti ili se takav izotop može ugraditi u kemijski spoj radioaktivnim izotopom nekog kemijskog elementa čime se dobiva radioobilježivač ili radiofarmak. Spoj koji je obilježen radioaktivnošću, ponaša se isto kao i neobilježen spoj, te ukoliko se unese u organizam, prati iste fiziološke putove, a obzirom da je radioaktivan zrači ionizirajuće zračenje koje se može detektirati pogodnim uređajima.

Za detekciju zračenja u dijagnostičkim pretragama nuklearne medicine koriste se relativno niske aktivnosti radiofarmaka, a koje istovremeno ne djeluju fiziološki.

Mjerenje volumena tjelesnih tekućina omogućeno je primjenom otvorenih radioizotopa uz pomoć razrjeđenja. Također primjena otvorenih radioaktivnih izotopa omogućava mjerenje tvari koje se u niskim koncentracijama nalaze u organizmu ( $10^{-14}$  mol/L), kao i ispitivanja koja omogućavaju uvid u morfologiju i funkciju ispitivanih organa.

Neovisno na činjenicu da li se mjerenja obavljaju na pacijentima ili na biološkim uzorcima, detektori ionizirajućeg zračenja koji se nalaze unutar uređaja mogu detektirati radioaktivne među milijunima stabilnih izotopa bez obzira da li se radi o biološkim uzorcima (mjerenja in vivo), pacijentima kojima je apliciran radiofarmak (mjerenja in vivo) ili se radi o kombiniranoj metodi (in vivo-in vitro) mjerenja.

Obzirom da su za mjerenja koja se obavljaju na biološkim uzorcima (mjerenja in vitro), nužni posebni uređaji, osoblje obučeno za rad sa opremom i uređajima, kao i posebno opremljene prostorije koje odgovaraju uvjetima rada, mjerenja se uglavnom obavljaju na odjelima nuklearne medicine.

Radioimunološka ispitivanja spadaju u ovu kategoriju mjerenja.

Niske koncentracije tvari (virusa, hormona, lijekova, enzima i tvari koje se ne mogu mjeriti u standardnoj laboratorijskoj dijagnostici), mogu se odrediti na osnovi emisije i detekcije ionizirajućeg zračenja radioaktivnošću obilježenih spojeva radioimunološkim tehnikama [3].

Najpoznatije tehnike su:

RIA (radioimunoesej),

IRMA (imunoradiometrija),

CPBA (tehnika kompetitivnog vezanja za protein) i

RRA (radioreceptorska tehnika).

Prilikom dolaska na odjel nuklearne medicine pacijentu se uzima uzorak krvi nakon čega odlazi kući i nije izložen štetnom djelovanju ionizirajućeg zračenja. Uzorak tjelesne tekućine u epruveti dovodi se u kontakt s odgovarajućim radionuklidom obilježenim spojem. Ovo metode danas se široko primjenjuju te su znatno unaprijedile istraživanja fiziologije i patologije čovjeka. U mnogim područjima medicine, posebno u području endokrinologije, alergologije itd., danas se u kliničkoj praksi koriste rezultati laboratorijskih analiza.

RIA je najpoznatija i najstarija radioimunološka tehnika. Znanstvenici su tom metodom uspjeli 1960. godine, izmjeriti koncentraciju inzulina u plazmi. Rosalyn Sussman Yalow dobila je Nobelovu nagradu za medicine za razvoj RIA tehnike 1977. godine.

Danas se rutinski koriste radioimunološke metode, te se tim metodama u organizmu mogu mjeriti koncentracije tvari (do 10-14mol/L). Sama mjerenja zasnivaju se na specifičnoj reakciji te se na taj način mjere količine bilo koje tvari protiv koje se mogu proizvesti antitijela (protutijela).

Antigen uzorka krvi, čiju koncentraciju treba odrediti i Antigen poznate koncentracije obilježen radioaktivnim izotopom (\*Ag ), natječu se za slobodna mjesta na ograničenom broju antitijela stalne koncentracije. Nastaje spoj antigen-antitijelo. Nakon odvajanja slobodnih, od antigena vezanih za protutijelo, aktivnost obilježenog slobodnog antigena \*Ag ili obilježenog vezanog antigena \*AgAt mjeri se u detektorima beta ili gama zračenja, a ovisi o vrsti radioaktivnog izotopa kojim je načinjeno obilježavanje. Za obilježavanje antigena najčešće se koristi  $^3\text{H}$  i  $^{14}\text{C}$  koji su beta emiteri ili  $^{125}\text{I}$  koji je gama emiter.

Iz krvnog uzorka očitavanje nepoznate koncentracije neobilježenog antigena obavlja se iz konstruirane standardne krivulje uz pomoć poznatih količina antigena

RIA, IRMA, CPBA i RRA su pouzdane, specifične i relativno jeftine, in vitro kvantitativne tehnike koje koriste radioaktivnošću obilježene spojeve i pri kojima pacijent nije izložen štetnom djelovanju ionizirajućeg zračenja. Isto tako prilikom uporabe otvorenih radioaktivnih izotopa potrebno je osigurati specifične



zahtjeve zaštite od zračenja osoblja i posebne procedure vezanih za manipulaciju i skladištenje otvorenih radioaktivnih izotopa.

-

U različitim područjima medicine široka je primjena metode izotopnog razrjeđenja (dilucije) koju možemo ubrojiti u in vitro-in vivo mjerenja. Navedena metoda koristi se za određivanje volumena tjelesnih tekućina (plazme, krvi ukupne količine vode u organizmu itd.), ukupne mase eritrocita, vremena preživljavanja eritrocita itd. Prilikom metode izotopnog razrjeđenja, pacijentu se intravaskularno injektira poznata količina radionuklida poznate aktivnosti, što će poslužiti kao radioindikator. Ista količina odnosno volume krvi izvadi se nakon što je proteklo vrijeme potrebno da se radioizotop ravnomjerno distribuira unutar krvotoka. Na osnovu smanjenja aktivnosti izvađenog uzorka krvi može se izračunati volumen u kojem je došlo do razrjeđenja.

U tu svrhu najčešće se koristi metastabilni tehnecij  $^{99m}\text{Tc}$ . Rijetka pojava alergijske reakcije je prednost metode izotopnog razrjeđenja kao i sa stajališta zaštite od zračenja da se za ispitivanja mogu koristiti veoma male aktivnosti radioaktivnog izvora.

Prilikom pretraga in vivo pacijentu se apliciraju dijagnostičke doze gama emitirajućih radiofarmaka injekcijom, oralno ili inhalacijom. Budući da su kemijski identični, radiofarmak unesen u organizam prati iste metaboličke putove kao i onaj koji nije radioaktivan. Izvana se pogodnim uređajima mogu pratiti ili se njihova distribucija, odnosno nakupljanje slikovno prikazuje zbog njihova prodornog gama zračenja. Nakupljanje radiofarmaka u pojedinim organima nije konstantno u vremenu pa mogu se pratiti i metabolički procesi u organizmu, odnosno kinetika pojedinih procesa. Tako dobivene dijagnostičke informacije daju mogućnost ispitivanja i morfologije i funkcije ispitivanih organa, što je jedna od njihovih glavnih prednosti. Po tome se metode nuklearne medicine razlikuju od većine drugih dijagnostičkih postupaka koji ne koriste otvorene radioaktivne izotope. Pretrage u nuklearnoj medicini imaju smisla ukoliko se primjenjuju na živim organizmima, jer u tom slučaju prate metaboličke procese, za razliku od dijagnostičkih pretraga koje koriste ultrazvuk

ili rendgensko zračenje u dijagnostičkoj radiologiji te ga možemo primjeniti i na organizmu koji nije živ.

Scintigrami (lat. scintilla-iskra) su slike dobivene u nuklearnoj medicini koje predstavljaju dvodimenzionalni prikaz raspodjele radiofarmaka u određenom organu ili dijelu tijela.

Uz planarne slike u klasičnom radionuklidnom oslikavanju koje predstavljaju dvodimenzionalne slike imamo i trodimenzionalne radionuklidne distribucije koje nastaju iz jedne projekcije. U nuklearnoj medicini tomogrami su dvodimenzionalne slike radionuklidne distribucije unutar odabranog presjeka trodimenzionalnog objekta koji nastaju prikupljanjem podataka iz mnogo projekcija oko pacijenta. Uz pomoć računala, rekonstrukcijom daju prikaze tankih dijelova tijela (slojevita snimanja).

Scintigrafija se dijeli na statičku odnosno morfološku scintigrafiju i dinamičku scintigrafiju.

Statička scintigrafija primarno služi za promatranje morfologije (spora dinamika) iako statički scintigram ujedno odražava funkciju, a predstavlja prikaz raspodjele radiofarmaka unutar nekog organa.

Pacijent mora pričekati neko vrijeme nakon apliciranja radiofarmaka, dok se odgovarajuća količina radiofarmaka veže u organu kojeg se promatra. Gama kamerom se nakon toga vrši snimanje i slike se analiziraju.

„Vruće lezije“ predstavljaju područja gdje se radioobilježivac (radiofarmak) vezao

više nego u normalnom nalazu, što upućuje na intenzivniju metaboličku aktivnost

promatranog organa. „Hladne lezije“ upućuju na manjak radioobilježivaca u odnosu na normalan nalaz. Rad parnih organa, kao što su bubrezi i pluća može se komparirati statičkom scintigrafijom.

Kod dinamičke scintigrafije istovremeno ili neposredno prije intravenoznom aplikacijom radiofarmaka, počinje snimanje gama kamerom koja je

povezanom s računalom. Čitavo vrijeme fiziološkog procesa traje snimanje fiziološkog procesa, odnosno sat vremena kod snimanja bubrega te nekoliko minuta kad se snima srce.

S obzirom na vrstu radioaktivnih izotopa koje koriste, u nuklearnoj medicini postoje jednofotonske tehnike i dvofotonske tehnike.

Skener ili scintigraf linearnim gibanjem odnosno skeniranjem iznad ispitivanog organa prikuplja podatke o zračenju koji pristižu iz pacijenta na detektor.

U nuklearnoj medicini skeneri su prvi uređaji koji su omogućavali dvodimenzionalni prikaz, dok je gama kamera najčešće upotrebljavan uređaj.

Prilikom medicinske obrade iz pacijenta prikuplja se gama zračenje pomoću kamere sa ugrađenim detektorom gama zračenja, na temelju tih podataka kasnije se može izraditi do stotinjak slika u jednoj sekundi.

Kolimator je nekoliko centimetara debela olovna ploča izbušena velikim brojem kanalice koje su okomito postavljene na površinu scintilatora. Tako se osigurava da fotoni gama zračenja koji su pristigli na scintilator potječu točno od izvora ispod njega, što znači da kolimator određuje smjer pristiglog zračenja.

#### 4.4.2. Terapija radioaktivnim izvorima

U terapiji zračenjem koristi se biološko djelovanje radioaktivnih zračenja na stanice živih organizama. Ionizirajuća zračenja prolaskom kroz tvar kao i onih nastalih kao posljedica radioaktivnih raspada, dolazi do procesa u kojima se energija zračenja pohranjuje u tvari. Zračenje može neizravni ili izravno ionizirati atome i molekule tvari kroz koju prolazi ostavljajući u tvari parove pozitivnih i negativnih iona. Ionizacija može pokrenuti biokemijske promjene, ukoliko su zračenju izloženi živi organizmi, te dolazi do oštećenja DNA stanica. Sve vrste ionizirajućih zračenja u interakciji sa stanicama živih organizama mogu izazvati promjene u njihovoj funkciji, promjene na genima, poremećaje u dijeljenju, te smrt same stanice. Ovakav učinak zračenja koristi se u terapiji radioaktivnim zračenjem a najviše u području onkologije.

Ukoliko se u cilju izlječenja pacijenta koristi zračenje kažemo da se liječenje provodi radikalnom terapijom. Terapija ionizirajućeg zračenja provodi se u cilju

uništenja bolesnih tumorskih stanica a isto tako i poštede okolnih zdravih stanica. Terapijom radioaktivnog zračenja koja se provodi kod pacijenta izložene su tumorske stanice isto tako zračenju su izložene i zdrave stanice koje također stradavaju. Planiranjem terapije zračenjem mora se uzeti u obzir veliki broj čimbenika koji ovise i o vrsti zračenja, odnosno osobinama samog radijacijskog snopa i o osjetljivosti i položaju određenog tipa karcinoma na zračenje.

Uništenje bolesnih tumorskih stanica je cilj svake terapije ionizirajućim zračenjima uz što veću moguću poštedu okolnih zdravih struktura.

Zračenje se također koristi i u slučajevima kod pacijenata koji nemaju dobru prognozu liječenja, kako bi se pacijentu smanjili bolovi odnosno vrši se palijativna radioterapija.

U tehnici zračenja cijelog tijela kojom se organizam priprema za transplantaciju koštane srži koristi se biološki utjecaj zračenja.

## 5. ZAKLJUČCI

Prisutnost elektromagnetskog zračenja u našem okruženju okolišu i potencijalna štetnost po ljudsko zdravlje predstavljaju proturječno znanstveno, tehničko i socijalno pitanje. Usprkos do sada nepoznatim rizicima koji možda postoje uslijed izloženosti, elektromagnetska polja su tehnološki produkt koji se nužno rabi u svakodnevnom životu. Elektromagnetska polja ekstremno niskih frekvencija uzrokuju biološke učinke koji ponekad mogu dovesti do negativnih učinaka na zdravlje. Možemo iz svega zaključiti da postoji biološki učinak koji se javlja kad izlaganje elektromagnetskim poljima uzrokuje fiziološke promjene. Biološki učinak može se otkriti mjerenjem ili opažanjem. Onaj negativni učinak je znatno znatno opasniji i javlja se kad je biološki učinak izlaganja polju izvan normalnog raspona koje organizam može kompenzirati.

U realnoj situaciji ljudi su uvijek izloženi zračenju iz više izvora elektromagnetnog zračenja istodobno. Od izloženosti elektromagnetnom zračenju ima se smisla štititi jedino ako su ona posljedica ljudske djelatnosti ili same tehnologije općenito, ali teško ako su ona prirodna zračenja.

Istraživanje, proučavanje i kontroliranje zračenja poraslo je krajem 80-tih godina dvadesetog stoljeća (mogući razlog Černobilska nesreća 1986), kao i sami brzi razvoj mikroelektronike koji je ubrzao razvoj novih tehnologija. Vodeći se svjetskom praksom i Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada u Zagrebu nabavio je prvu profesionalnu opremu, terenski uređaj RAHAM koji služi za mjerenje snage neionizirajućeg zračenja u prostoru.

U vrijeme pisanja ovog diplomskog rada i osobno sam izložena raznim vrstama zračenja i vjerujem da će sva svjetska istraživanja doprinijeti da u budućnosti svi zajedno doprinesemo što manjem štetnom djelovanju, a što većoj koristi. Smatram da ljudi nisu dovoljno educirani i mišljenja su da se negativni učinci događaju nekom drugom. Mnogi znanstvenici zalažu se za rješavanje ovog nedovoljno istraženog problema, kojim se ne bavi samo fizika kao prirodna znanost već treba uključiti i mnoge druge tehničke znanosti, a i sve za dobivanje točnih rezultata o stvarnom utjecaju neionizirajućeg zračenja na zdravlje ljudi i života u našem okruženju.

## 6. LITERATURA

- [1] **Jakobović Z:** „*Ionizirajuće zračenje i čovjek*“, Školska knjiga Zagreb, (1991.), ISBN 86-03-99228-2
- [2] **Šantić A:** „*Biomedicinska elektronika*“, Školska knjiga Zagreb, (1975.), ISBN 9530316372
- [3] **Janković S. I Eterović D.:** Fizikalne osnove i klinički aspekti medicinske dijagnostike, Medicinska naklada, Zagreb, (2002), ISBN 953-176-176-0
- [4] „*Hrvatska enciklopedija*“, Leksikografski zavod “Miroslav Krleža”, Zagreb, (1991.), ISBN 953-6036-29-0

## 7. PRILOZI

### 7.1. Popis simbola

X jezgra atoma

Y jezgra atoma

A maseni broj

Z broj protona

elektron

proton

h Planck-ova konstanta

$\alpha$  alfa čestica

$\beta$  beta čestica

$\gamma$  gama zračenje

## 7.2 Popis slika

<a href="https://hr.wikipedia.org">Slika 1: Spektar elektromagnetskog zračenja s istaknutim dijelom vidljive svjetlosti (Izvor <a href="https://hr.wikipedia.org">https://hr.wikipedia.org</a>)</a>	4
<a href="#">Slika 2: Simboličan prikaz elektromagnetskog spectra s podacima o pridruženim valnim duljinama</a>	5
<a href="#">Slika 3: Elektromagnetni spektar i umjetni izvori pojedinih dijelova spektra</a>	10
<a href="#">Slika 4 Faradayev kavez</a>	12
<a href="#">Slika 5: <math>\alpha</math> raspad radija-226</a>	19
<a href="#">Slika 6: Energijski dijagram raspada radija-226</a>	19
<a href="#">Slika 7: Raspad C-14</a>	21
<a href="#">Slika 8: Raspad I-131</a>	22
<a href="#">Slika 9: Raspad N-13</a>	23
<a href="#">Slika 10: Emisija gama zračenja</a>	24
<a href="#">Slika 11: Prodornost alfa, beta i gama zračenja</a>	25
<a href="#">Slika 12: Radioaktivni nizovi (a.uranijev niz, b.torijev niz)</a>	26
<a href="#">Slika 13: Eksplozija iznad Hirošime – nuklearno oružje</a>	27



### 7.3. Popis tablica

<a href="#"><u>Tablica 1 Prosječna jakost magnetnog polja na udaljenosti 15 cm od uređaja</u></a>	14
<a href="#"><u>Tablica 2: Svojstva čestica koje sudjeluju u nuklearnim procesima</u></a>	18