

# DETEKTORI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

---

**Tintor, Slaven**

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

**2022**

*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:128:669094>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-27**



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

*Repository / Repozitorij:*

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



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel Sigurnosti i zaštite  
Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Slaven Tintor

# **DETEKTORI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2022.

Karlovac University of Applied Sciences  
Safety and Protection Department  
Professional graduate study of Safety and Protection

Slaven Tintor

# **IONIZING RADIATION DETECTORS**

FINAL PAPER

Karlovac, 2022.

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel Sigurnosti i zaštite

Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Slaven Tintor

# **DETEKTORI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA**

ZAVRŠNI RAD

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

Karlovac, 2022.



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Trg J.J.Strossmayera 9

HR-47000, Karlovac, Croatia  
Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510  
Fax. +385 - (0)47 - 843 - 579

## **VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**

Stručni / specijalistički studij: Specijalistički studij

Usmjerenje: Zaštita od požara  
godine

Karlovac, 2022.

## **ZADATAK ZAVRŠNOG RADA**

Student: Slaven Tintor

Matični broj: 0416616050

Naslov: Detektori ionizirajućeg zračenje

Opis zadatka: U završnom radu ukratko će se objasniti pojedine vrste ionizirajućeg zračenja.

Također bit će objašnjeno kako detektori ionizirajućeg zračenja rade te gdje se primjenjuju.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

02/2022

06/2022

06/2022

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

dr. sc. Lulić Slaven prof. v. š.

Ivan Štedul v. pred.

## **PREGOVOR**

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći se svim izvorima koji su navedeni u literaturi i znanjem koje sam stekao tijekom studiranja.*

*Zahvaljujem se svom profesoru i mentoru dr.sc. Slavenu Luliću na ukazanom povjerenju i susretljivošću te što mi je bio na raspolaganju u svakom trenutku pisanja ovog rada. Svojim znanjem, iskustvom i savjetima mi je pomogao da ovaj rad uspješno završim u predviđenom roku.*

*Na kraju bi se zahvalio cijeloj svojoj obitelji na ukazanom razumijevanju i pruženoj podršci tokom pisanja ovog rada, i tokom cijelog vremena mog studiranja.*

## **SAŽETAK**

U završnom radu pobliže će se objasniti rad detektora koji se koriste za detekciju ionizirajućeg zračenja. Također će se opisati na koji način pomažu ljudima u obavljanju određenih zadaća vezanih za ionizirajuća zračenja, te sve ostale bitne činjenice. Pisat će se i o vrstama zračenja, njihovom korištenju u svakodnevnom životu i štetnim djelovanjima na čovjeka i ostale žive organizme.

Ključne riječi: detektori ionizirajućeg zračenja, vrste zračenja, zaštita od zračenja.

## **ABSTRACT**

The final paper will explain in more detail the operation of detectors used to detect ionizing radiation. It will also describe how they help people perform certain tasks related to ionizing radiation, and all other important facts. Types of radiation, their use in everyday life and harmful effects on humans and other living organisms will also be written about.

Key words: ionizing radiation detectors, types of radiation, radiation protection.

# SADRŽAJ

ZAVRŠNI ZADATAK.....	I
PREDGOVOR .....	II
SAŽETAK .....	III
SADRŽAJ .....	IV
1. UVOD .....	1
2. POVIJEST IONITIRAJUĆEG ZRAČENJA I RADIOAKTIVNOSTI .....	3
3. IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE-RADIOAKTIVNOST .....	5
3.1 Ionizirajuće zračenje .....	5
3.2 Vrste ionizirajućeg zračenja .....	5
3.3 Radioaktivnost .....	8
3.4 Primjena zračenja .....	9
4. DETEKTORI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA .....	12
4.1 Povijest detekcije zračenja .....	12
4.2 Mjerenje zračenja i mjerne jedinice .....	12
4.3 Detektori ionizirajućeg zračenja .....	13
4.4 Geiger-Müllerov brojač .....	15
4.5 Proporcionalni brojač .....	16
4.6 Višeanodni proporcionalni brojač .....	18
4.7 Scintilacijski brojač .....	19
4.8 Ionizacijska komora .....	21
4.9 Maglena komora .....	22
4.10 Komora na iskre .....	24
4.11 Komora na mjehuriće .....	26
4.12 Poluvodički detektori .....	27
4.13 Černekoljev brojač .....	30
4.14 Neutronske detektor .....	31
4.15 Neutrino detektor .....	32
4.16 Osobni dozimetri .....	32
5. UTJECAJ IONIZACIJSKOG ZRAČENJA .....	35
5.1 Biološki utjecaj zračenja .....	35
5.2 Doze ionizacijskog zračenja .....	36
5.3 Karakteristične doze i vrste izloženosti ionizacijskom zračenju .....	37



6. ZAKONSKA PODLOGA .....	40
6.1 Načela zaštite od ionizacijskog zračenja: opravdanost, optimizacija, ograničenje zračenja .....	40
6.2 Propisi kojima je regulirana zaštita od ionizacijskog zračenja .....	40
6.3 Organizacija zaštite od ionizacijskog zračenja u Republici Hrvatskoj .....	40
7. ZAKLJUČAK .....	42
8. LITERATURA .....	43
9. POPIS SLIKA .....	45
10. POPIS TABLICA .....	46

# 1. UVOD

Svijet u kojem živimo radioaktivan je od samog svog postanka. Postoji oko 60 radionuklida (radioaktivnih elemenata), koje možemo pronaći bilo gdje na zemlji i to u hrani, tlu, vodi, zraku tj. u svim živim organizmima. Po tome kako su nastali dijele se na one koji nastaju kao posljedica djelovanja kozmičkih zraka, one koji su posljedica ljudske tehnologije, te one koji su oduvijek prisutni na Zemlji. Radioaktivne tvari i ionizirajuće zračenje su stalna i prirodna pojava u svemu što nas okružuje te u brojnim ljudskim djelatnostima. U novije vrijeme sve je raširenija uporaba umjetnih izvora ionizirajućeg zračenja. Ljudski rod nije bio svjestan opasnosti od ionizirajućeg zračenja prije otkrića radioaktivnosti i njegovog biološkog utjecaja.

Ljudi i ostala živa bića nemaju osjetilo za opažanje ionizirajućeg zračenja, pa tako čovjek može biti izložen smrtonosnoj dozi ionizirajućeg zračenja, a da u samom trenutku ozračivanja ništa ne osjeti. Posljedice njegovog djelovanja zapažaju se tek nakon nekog vremena, što može biti od nekoliko sati do čak nekoliko godina, ovisno o jačini zračenja i periodu izloženosti zračenju. Zbog toga možemo reći da je ionizirajuće zračenje je neobična pojava, a razlikuje se od svih drugih prirodnih pojava koje poznajemo.

Ionizirajućim zrakama zovemo valove, zrake velike energije koje mogu iz ljuske atoma izbaciti elektrone i time ionizirati atom. Ionizirajuće zračenje je dio spektra elektromagnetskog zračenja frekvencija iznad  $3 \cdot 10^{15}$  Hz. Za ovo zračenje je karakteristična velika energija fotona koja pri sudaru fotona s molekulama tvari uzrokuje kidanje veza između molekula i ionizaciju tvari, što ima za posljedicu razaranje tkiva. Ovu vrstu visokofrekvencijskog zračenja ( $f > 10^{15}$  Hz) karakteriziraju kratke valne duljine i visoke energije i tu spadaju rendgenske (X-zrake), gama zrake, kozmičke zrake.

Prirodna zračenja potječu još iz vremena dok se zemljina kora formirala, a neka su nastala kao posljedica kozmičkog zračenja što znači da im je izvor izvan našeg Sunčevog sustava. Prirodna zračenja primamo i od Sunca koje ispušta infracrveno zračenje, rendgensko zračenje, mikrovalove, radio-valove, vidljivu svjetlost, te ultraljubičasto zračenje. Umjetna zračenja proizlaze iz nuklearnog naoružanja, uređaja koji se koriste u dijagnostičkoj medicini, nuklearni reaktori.

Radioaktivne tvari imaju široku primjenu u medicini, znanosti, gospodarstvu, poljodjelstvu, istraživanjima i mnogim drugim ljudskim djelatnostima. Korisna strana ionizirajuće zračenja je da doprinosi ljudima poboljšanju kvalitete življenja, također osigurava i brojna radna mjesta. Ionizirajuće zračenje se koristi za konzerviranje hrane i namirnica, uništavanje insekata i nametnika. U industriji se vrše radiografski postupci za kontrolu bez razaranja kojom se otkrivaju oštećenja i pukotine u brojnim cjevovodima, posudama, inženjerskim postrojenjima i građevinama. Loša strana ionizirajućeg zračenja je da joj ono opasno po život i zdravlje ljudi te ima štetne posljedice po okoliš. Zbog nekontrolirane primjene ionizirajućeg zračenja može doći

do velikih posljedica. Riziku su podložni svi, a najviše oni koji rade sa tim izvorima. Efektivna korist koju uporaba ionizirajućeg zračenja donosi uvjetovana je društveno prihvaćenom riziku u svezi te uporabe. Što se tiče rizika on se mora smanjivati i ograničavati zakonskim, tehnološkim, organizacijskim i administrativnim mjerama, jer je nemoguće u potpunosti otkloniti opasno djelovanje ionizirajućeg zračenja.

Pošto ljudi nemaju osjetilo za zapažanje ionizirajućeg zračenja potrebni su posebni uređaji pomoću kojih se ono može registrirati i izmjeriti. Detektori zračenja su najjednostavniji uređaji pomoću kojih se zapaža zračenje. Danas postoje razne vrste uređaja koji su napravljeni za detekciju i mjerenje zračenja, a može ih se razvrstati u tri osnovne skupine: vizualizatori tragova, dozimetri i brojači. Osim ovih uređaja postoje i razni uređaji posebnih namjena.



Slika 1. Oznaka za radioaktivnost

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

## 2. POVIJEST IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA I RADIOAKTIVNOSTI

Godine 1895. otkrio je W. C. Röntgen zagonetne X-zrake (rendgenske zrake) i izazvao velik interes za svjetlucanje raznih tvari. Prirodnu radioaktivnost otkrio je Antoine Henri Becquerel 1896. uočivši da uranijeve soli emitiraju nevidljivo zračenje koje djeluje na fotografsku ploču kroz zaštitni papir te da pod utjecajem toga zračenja elektroskop gubi električni naboj. Primijetio je da uranijeve soli stalno u mraku fluoresciraju. Tako na primjer, čisti kalijev uranil sulfat u mraku stalno svijetli slabom zelenkastom luminiscentnom svjetlošću. Daljnjim ispitivanjem, Becquerel je pronašao da zračenje koje izazivaju uranijevi spojevi ioniziraju zrak (ionizirajuće zračenje), izazivaju fluorescenciju i prolaze kroz papir, pločice aluminijske i bakra. Kroz zatvoreni spremnik one djeluju na fotografsku ploču, a djeluju i na našu kožu i klice raznih biljaka. Utvrdio je da ti zraci imaju slična svojstva kao rendgenske zrake (X – zrake), pa su se u početku te zrake nazivale i Becquerelove zrake. 1899. je Becquerel pronašao da te zrake skreću u magnetskom polju, pa se razlikuju od rendgenskih zraka, koje ne skreću u magnetskom polju.

Maria Curie-Skłodowska otkrila je 1898. da se na zračenje ne može utjecati električnom strujom, zagrijavanjem, kemijskim reakcijama i sl., da se radioaktivni kemijski elementi pretvaraju jedni u druge i da vjerojatnost raspada ne ovisi o starosti pojedinog atoma. Zajedno sa suprugom Pierre Curie otkrili su novi kemijski element nazvan polonij u čias Poljske, rodnom mjestu Marie. Prva je uvela pojmove „radioaktivnost“ i „radioaktivni element“. Henri Becquerel, Pierre i Marie Curie 1903. godine podijelili su Nobelovu nagradu za fiziku, a osam godina kasnije Marie Curie za otkriće polonija i radija dobiva Nobelovu nagradu za kemiju.

Ernest Rutherford otkrio je 1899. da se zračenje radija može podijeliti u dvije komponente, koje se različito apsorbiraju u tvarima. Slabo prodornu komponentu, koja je jako ionizirala zrak, nazvao je alfa-zrakama, prodorniju komponentu beta-zrakama.

Francuski fizičar Paul Ulrich Villard već je 1900. otkrio još prodorniju komponentu zračenja, gama-zrake. Rutherford i Frederick Soddy (1902) na temelju analize gibanja zrakâ u magnetskome polju objasnili su prirodu radioaktivnosti.

Wolfgang Pauli postavio je 1930. hipotezu o postojanju neutrina, tadašnjim detektorima neuhvatljive čestice koja odnosi dio energije u beta-raspadu. Enrico Fermi postavio je 1933. prvu strogu teoriju beta-raspada koja pretpostavlja da prijelaz neutrona u proton ili obratno uzrokuje slabo nuklearno međudjelovanje, a pritom dolazi do simultane emisije, odnosno apsorpcije elektrona i neutrina. Irène Joliot-Curie i Frédéric Joliot-Curie prvi su 1934. umjetno izazvali radioaktivnost i proizveli umjetni radioizotop stabilnog elementa [1].



Slika 2. Maria Skłodowska Curie i Pierre Curie u svom laboratoriju

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

## 3. IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE-RADIOAKTIVNOST

### 3.1 Ionizirajuće zračenje

Ionizirajuće zračenje je pojava prijenosa energije u obliku fotona (kvanti elektromagnetskog zračenja) ili masenih čestica, a koje ima dovoljno energije da u međudjelovanju s kemijskom tvari ionizira tu tvar. Ionizirajuće zračenje posljedica je promjene stanja materije u mikrosvijetu. To su promjene u energiji ili u sastavu atoma ili atomske jezgre, pri čemu se emitiraju fotoni ili druge čestice. U međudjelovanju s tvari dolazi do izmjene energije i izmjene strukture ozračene tvari. Takve posljedice mogu biti korisne, ali i vrlo štetne.

Ljudska osjetila nisu razvijena da bi mogla registrirati ionizirajuća zračenja, za razliku od mnogih drugih pojava u prirodi. Izravne posljedice djelovanja ionizirajućeg zračenja na živi svijet većinom su zakašnjele i teško ih je povezati s uzrokom. Čovjek može biti izložen sa smrtonosnom dozom ionizirajućeg zračenja, a da u samom tom trenutku ozračivanja ništa ne osjeti. Posljedice ozračivanja, bez osjetilne veze s uzrokom zapažaju se tek nakon nekog vremena, od nekoliko sati do nekoliko dana ili čak godina. Taj proces ovisi o vrsti i svojstvima tog zračenja. Zbog toga je opravdan čovjekov strah kada je u pitanju zračenje i posljedice koje izaziva. Zato je posebno važno u stručnom i psihološkom smislu poznavanje osnovnih svojstava ionizirajućeg zračenja, kako je međudjelovanja zračenja s tvari, a posebno djelovanja zračenja na živa bića i organizme.

Ionizirajuće zračenje se može sastojati od snopa čestica visokih energija (protona, alfa-čestica ili beta-čestica) ili elektromagnetskoga zračenja visoke frekvencije (gama-zračenje, rendgensko zračenje, ultraljubičasto zračenje). Ionizirajuće zračenje može imati poguban učinak na molekule tvari, a posebno na biološka tkiva.

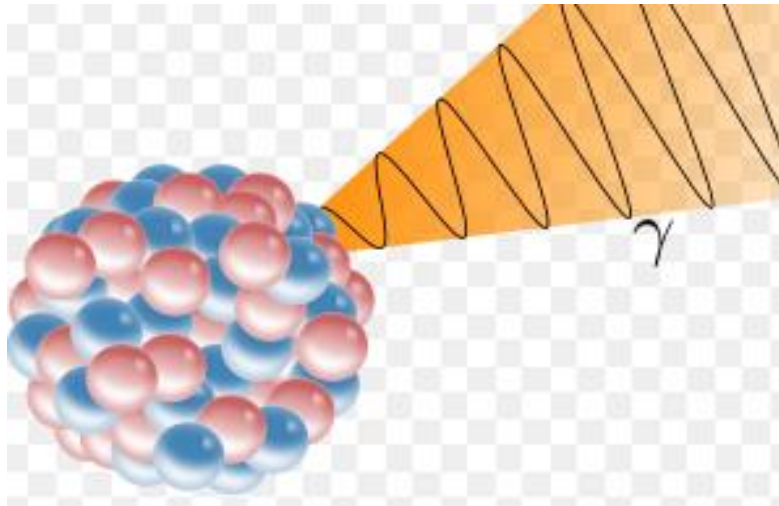
### 3.2 Vrste ionizirajućeg zračenja

Elektromagnetsko ionizirajuće zračenje obuhvaća rendgensko zračenje i gama zračenje, iako ionizaciju nekih tvari može uzrokovati i ultraljubičasto elektromagnetsko zračenje.

Rendgensko zračenje- rendgensko zračenje čine elektromagnetski valovi kratkih valnih duljina, od 10-10 do oko 10-13 m. Često se naziva i X-zračenjem. Posebna vrsta rendgenskog zračenja je tzv. zakočno zračenje (njem. bremsstrahlung) koje nastaje kad elektroni značajno mijenjaju svoju brzinu u blizini atomske jezgre, bilo iznos, bilo smjer gibanja.

Gama-zračenje- gama zračenje čine elektromagnetski valovi valnih duljina kraćih od 10-13 m, nazvani prema jednoj od komponenti zračenja prirodno radioaktivnih tvari, a danas se općenito gama-zračenjem naziva svako elektromagnetsko zračenje tih valnih duljina, bez obzira na porijeklo. Osim valnom duljinom, gama zračenje često se opisuje

i energijom fotona tog zračenja. Gama zračenje nastaje energijskim prijelazima nestabilnih atomskih jezgri radioaktivnih tvari, anihilacijom čestica i usporavanjem vrlo brzih nabijenih čestica. Pri nuklearnim reakcijama u zvijezdama nastaju fotoni vrlo velikih energija, i oni su jedna od komponenti kozmičkog zračenja što prožima Svemir. To primarno kozmičko zračenje kontinuiranog je spektra, a u međudjelovanju s atmosferom Zemlje stvara sekundarno kozmičko zračenje još uvijek je velikih energija.

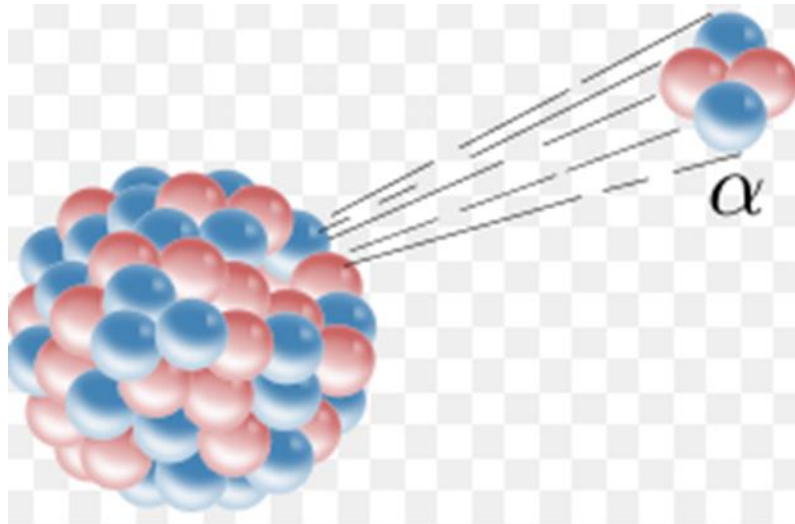


Slika 3. Slikoviti prikaz gama zračenja

Izvor: hr.wikipedia.org

Zračenje masenim česticama - zračenje masenim česticama nastaje raspadom atomske jezgre, a osnovna svojstva su brzina, količina gibanja, električni naboj, energija čestice i masa čestice. Brzina masenih čestica, iako vrlo velika, manja je od brzine svjetlosti. Količina gibanja umnožak je mase i brzine čestice. Električni naboj je svojstvo mnogih čestica koje čine zračenje (elektrona, pozitrona, protona, atomskih jezgri), i uvijek je cjelobrojni umnožak elementarnog naboja,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

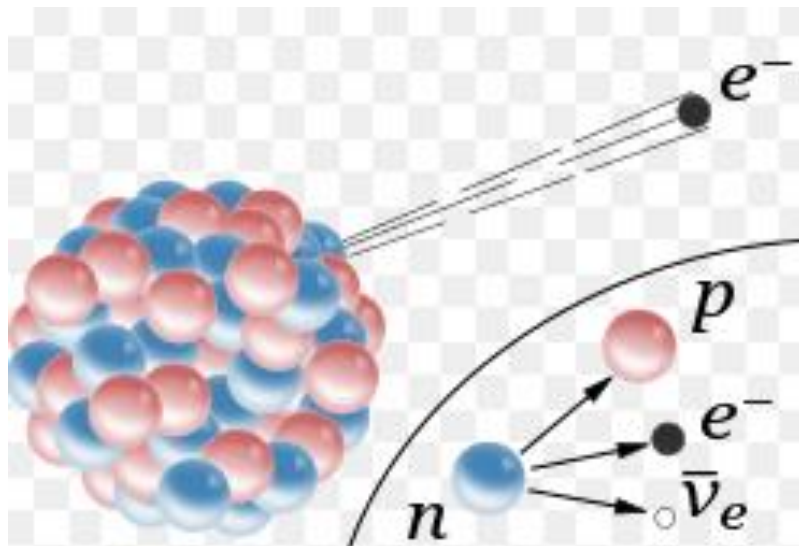
Alfa zračenje- alfa zračenje roj je čestica koje se sastoje od dva protona i dva neutrona, tj. jezgre helija-4. Energija alfa-čestica koje izbacuju atomske jezgre iznosi nekoliko MeV. U zraku mogu preći tek nekoliko centimetara.



Slika 4. Slikoviti prikaz alfa zračenja

Izvor: hr.wikipedia.org

Beta zračenje- Beta zračenje je svako zračenje koje se sastoji od elektrona ( $\beta^-$ ) ili pozitroni ( $\beta^+$ ). Takvo se zračenje spontano emitira nestabilnim atomskim jezgrama.



Slika 5. Slikoviti prikaz beta zračenja

Izvor: hr.wikipedia.org

Neutronska zračenje - neutronska zračenje je roj brzih neutrona, po masi slični protonima. Vrlo lako prodiru kroz tvar jer nemaju električni naboj. Neutronska zračenje može biti posljedica nuklearnih reakcija. Komponenta je kozmičkog zračenja i zračenja



iz nestabilnih teških jezgri. Vrlo snažno neutronske zračenje nastaje u nuklearnim reaktorima tijekom nuklearne lančane reakcije. Energija neutrona kod neutronske zračenja iznosi od oko 10 MeV pa niže. Ako se energija neutrona smanji na energije manje od 1 eV, nazivaju se termičkim neutronima.

Ostala zračenja se nazivaju prema česticama od kojih se sastoje: protonsko, deuterijsko, tricijsko, teškoionsko, i drugo. Takva zračenja mogu nastati u nuklearnim procesima, dio su kozmičkog zračenja, a nastaju i u nuklearnim reaktorima ili nuklearnim eksplozijama [2].

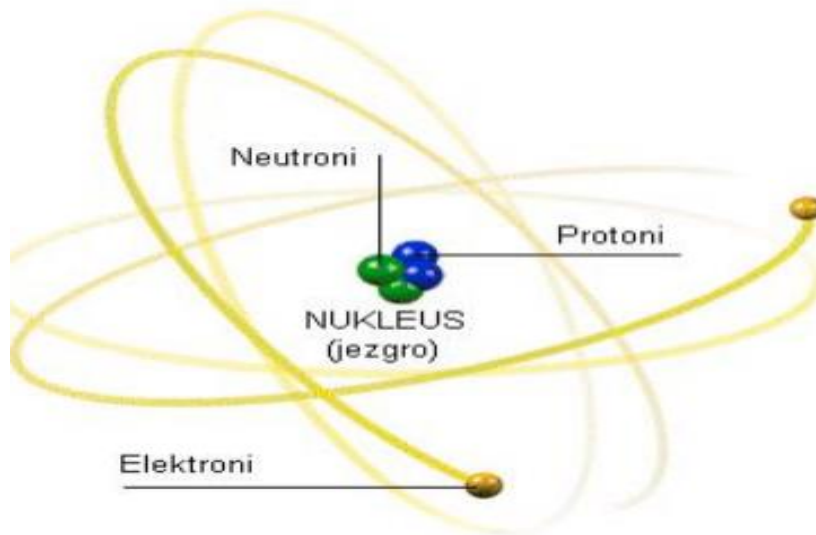
### 3.3 Radioaktivnost

Radioaktivnost ili radioaktivno zračenje je spontano emitiranje alfa-čestica i beta-čestica iz kemijske tvari, često praćeno i emisijom gama elektromagnetskih valova, pri čemu kemijski elementi prelaze iz jednih u druge te se oslobađa energija u obliku kinetičke energije emitiranih čestica ili energije elektromagnetskih valova. Svaka atomska jezgra ima karakteristično vrijeme poluraspada. Radioaktivne tvari jesu tvari koje sadrže atome s nestabilnim jezgrama koje svojim raspadom proizvode ionizirajuće zračenje. Atomi s nestabilnim jezgrama su atomi čija je jezgra nestabilna, tj. spontano se mijenja nastojeći, u jednom ili više koraka, doći u stabilno stanje, ispuštajući pri tome energiju. Takva promjena kada se jezgra mijenja bez vanjskog utjecaja pri čemu se emitira elektromagnetsko zračenje ili čestice zove se radioaktivni raspad, a čestice i fotone koje jezgra pri tome emitira radioaktivno zračenje. Dakle, radioaktivnost je svojstvo nekih atoma da im se jezgre spontano mijenjaju i pri tome imitiraju elektromagnetsko zračenje ili čestice.

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

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

normalnom stanju imamo uvijek jednak broj protona i elektrona. Proton je nositelj jediničnog pozitivnog električnog naboja, a elektron je nositelj jediničnog negativnog električnog naboja, dok je neutron električki neutralan [5].



Slika 6. Građa atoma

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

### 3.4 Primjena zračenja

Radioaktivni izotopi i zračenje našli su vrlo široku primjenu u tehnološkim i znanstvenim istraživanjima, te u medicini, industriji.

U medicini se zračenje i radioaktivni izotopi koriste za liječenje raka (terapija) i otkrivanje bolesti (dijagnostika). Korištenjem X-zraka iz rentgenskih aparata mogu se dobiti slike različitih organa i tkiva ljudskog tijela koje pomažu liječnicima u postavljanju dijagnoza. Različite vrste zračenja koriste se za uništavanje tkiva tumora ili vanjskim ozračivanjem (teleterapija) ili unutarnjim ozračivanjem stavljanjem izvora zračenja u tumorsko tkivo (brahiterapija).

Također se koriste pri dijagnosticiranju različitih vrsta oboljenja u radioizotopnoj dijagnostici, medicinskim istraživanjima i testiranjima lijekova. Pomoću njih mogu se određivati volumeni tjelesnih tekućina, mjeriti vrlo niske koncentracije pojedinih tvari u organizmu, pokretati trajne elektrostimulatore srca, ili se snažnim izvorima visoke aktivnosti i energije može sterilizirati medicinska oprema, lijekovi i sredstva (igle, kirurški instrumenti, otopine zakon taktne leće itd). U terapijskoj primjeni radioaktivni izotopi koriste se kao izvori ionizirajućeg zračenja najčešće u onkologiji. U nuklearnoj

medicini koriste se male količine medicinskih pripravaka otvorenih radionuklida koji se apliciraju pacijentu u dijagnostičke ili terapijske svrhe, ili se koriste u specifičnim laboratorijskim pretragama, dok se u radioterapiji koriste zatvoreni izvori ionizirajućeg zračenja.

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 (SPECT18, PET19) i uređaja dijagnostičke radiologije (CT20, MR21) dobili najmoćniji takozvani fuzijski uređaji (SPECT/CT, SPECT/MR, PET/CT, PET/MR). Ovi danas najmoćniji dijagnostički uređaji koriste komparativne prednosti slikovnih dijagnostika obje specijalističke grane medicine [4].

Primjena zračenja u industriji i istraživanjima može se kategorizirati u sljedeća četiri tipa:

1. zračenje se koristi kao obilježavač
2. karakteristike zračenja se mijenjaju prolazom kroz materijal
3. karakteristike materijala se mijenjaju prolazom zračenja
4. zračenje se koristi kao izvor energije.

1. Primjene u kojima se zračenje koristi kao obilježavač uključuju: otkrivanje mjesta curenja cijevi, mjerenje načina i brzine protoka fluida, praćenje različitih materijala, istraživanje metabolizma, ispitivanje mehanizama kemijskih reakcija, ispitivanju istrošenosti i korozije, određivanje starosti predmeta i određivanje visokih temperatura metalnih površina.






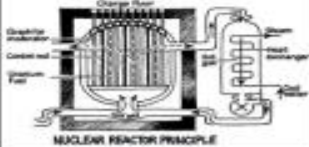

2. Primjene u kojima se koristi da se karakteristike zračenja mijenjaju prolazom kroz materijal uključuju: mjerenje gustoće, mjerenje debljine sloja, mjerenje razine tekućine u zatvorenim spremnicima, ispitivanje kvalitete varova, otkrivanje plastičnih eksploziva, istraživanje nalazišta nafte, detektiranje šupljina u materijalu, utvrđivanje nečistoća i elemenata u tragovima, ispitivanje kvalitete odljeva, otkrivanje defekata u materijalu, te detektore dima.

3. Primjene u kojima se koristi da se karakteristike materijala mijenjaju prolazom zračenja uključuju: konzerviranje hrane, bakterijska sterilizacija, modifikacija polimera, kontrola insekata, istraživanje bioloških mutacija i katalitičko djelovanje zračenja na kemijske reakcije. Raspadom radioaktivnog nuklida oslobađa se energija koja se apsorpcijom emitiranog zračenja u okolnom mediju pretvara u toplinu tako da se spremnik koji sadrži odgovarajući radioaktivni natrij-24 nuklid može koristiti kao izvor toplinske energije. Ugradnjom uređaja koji direktno pretvara toplinsku energiju u

električnu spremnik postaje generator električne energije. Takvi toplinski i električni generatori na bazi radioaktivnih izotopa koriste se u istraživanjima svemira [3].

## 4. DETEKTORI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

### 4.1 Povijest otkrića i detekcije zračenja

	1895.	Röntgen otkriva X-zrake i uzroke flouescencije
	1898.	Marie i Pierre Curie otkrivaju radioaktivne elemente radij (Ra) i polonij (Po)
	1905.	Einstein postavlja relaciju između mase i energije $E = mc^2$
	1913.	Bohr predlaže model atoma
	1910. – 1926.	Eksperimenti s balonima u višoj atmosferi potvrđuju postojanje kozmičkog zračenje
	1942.	Fermi ostvaruje prvu samoodržujuću lančanu reakciju. Počinje era kontroliranog otpuštanja nuklearne energije u nuklearnim reaktorima
	1979.	Nobelova nagrada Hounsfieldu i Cormacku za izum CT skenera

Slika 7. Kratka povijest otkrića zračenja

Izvor: silverstripe.fkit.hr

## 4.2 Mjerenje zračenja i mjerne jedinice

Samo zračenje nije lako izmjeriti. Pošto se ono ne može registrirati vlastitim osjetilima, potrebno je da ga mjerimo neizravno. Postupak mjerenja možemo smatrati deponiranjem radijacije. Količina deponirane energije po jedinici mase u materijalu naziva se "apsorbirana doza". Izvedena SI jedinica apsorbirane doze je gray (Gy) što predstavlja joule po kilogramu ( $\text{J kg}^{-1}$ ). Ako se energija od 1 J apsorbira u 1 kg tvari govorimo o apsorbiranoj dozi od 1 Gy. Ovako definirana doza ne govori ništa o biološkim učincima apsorbiranog zračenja. Svaka vrsta zračenja ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) ima drugačiji utjecaj na žive stanice, koji se opisuje faktorom Q. Zato se definira ekvivalentna doza, koju dobijemo tako da apsorbiranu dozu pomnožimo faktorom Q. Jedinica za ekvivalentnu dozu je sivert (Sv).

Gray je dobio ime po britanskom fizičaru Louisu Haroldu Gray (1905. – 1965.), osnivaču radiobiologije koja se bavi učincima zračenja na živo tkivo i biološke sustave.

Sivert (skraćeno Sv) je SI izvedena mjerna jedinica kojima se izražava ekvivalentna doza ionizirajućeg zračenja. Naziv nosi po švedskom fizičaru i liječniku Rolfu Sievertu, koji je poznat po svojim radovima na mjerenju doziranja radijacije zajedno sa svojim istraživanjem o biološkim efektima radioaktivnosti i zaštiti od zračenja [7].

Aktivnost radioaktivnog uzorka mjeri se u bekerelima (Bq). Aktivnost od 1 Bq znači jedan radioaktivni raspad u sekundi. Kako su aktivnosti uzoraka često vrlo velike u upotrebi je i veća jedinica kiri (Cu). 1 Cu iznosi  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq [6].

Bekerel je nazvan prema francuskom fizičaru Antoineu Henriu Becquerelu. Kako su aktivnosti atomskih jezgri radioaktivnih uzoraka često vrlo velike, u upotrebi je i veća jedinica: kiri (Ci), 1 Ci iznosi  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq, koja nije SI mjerna jedinica [8].

## 4.3 Detektori ionizirajućeg zračenja

Pošto ljudi nemaju razvijena osjetila kojim bi mogli opažati ionizirajuća zračenja koja se pojavljuju oko njih potrebno je koristiti posebne uređaje- detektore pomoću kojih će se moći detektirati ta zračenja. Detektori zračenja su najjednostavniji uređaji pomoću kojih se vrši zapažanje zračenja. Na samim početcima korišteni su detektori su detektori čiji se signal mogao izravno vidjeti, dok su detektori današnjice u biti „električni“. Pošto čestice oslobađaju određenu energiju detektori ih detektiraju i pretvaraju u signal dostupan ljudskoj percepciji.

Općenito možemo reći daje princip rada svih detektora zračenja isti- odgovor na energiju pohranjenu zračenjem u materijalu od kojeg su građeni. Informacija pohranjena u detektoru se pretvara u električni signal i dalje elektronički odnosno

računalno obrađuje. Pod pojmom detektor često se osim uređaja podrazumijeva i pripadajuća elektronika.

Do međudjelovanja zračenja i materije dolazi kada određene zrake prolaze kroz neku određenu tvar. Tim se međudjelovanjem stvaraju pozitivni ioni i elektroni u samoj materiji. Ovisno o osobini ionizacije materije kroz koju zračenje prolazi, postoje različite metode detekcije zračenja, time i različiti detektori zračenja. Postoji mnogo uređaja za detekciju i mjerenje ionizirajućeg zračenja. Oni se mogu razvrstati u tri osnovne skupine: vizualizatori tragova, dozimetri i brojači. Također osim ovih gore nabrojanih postoje i razni uređaji posebnih namjena npr. za promatranje slike prozračenih predmeta (fluorescentni zastori i elektronički pretvornici), za razlučivanje pojedinih vrsta zračenja po energijama, masama čestica (analizatori, spektrometri).

### Brojači ili detektori

To su uređaji pomoću kojih se registriraju i broje pojedine naelektrizirane čestice, a i fotoni, npr. gama zračenja. Takvi su uređaji Geiger-Müllerov brojač, scintilacijski brojač, poluvodički brojač, te mnogi drugi brojači. Suvremeni brojači mjere istodobno s više detektora i više mjernih kanala, pa se prostorni raspored radioaktivne tvari u nekoj drugoj tvari može vrlo točno odrediti (npr. gama kamere za medicinsku dijagnostiku).

### Vizualizatori tragova

To su uređaji pomoću kojih se na temelju nekog međudjelovanja mogu privremeno ili trajno vidjeti tragovi čestica ili fotona u tvari. Primjeri takvih uređaja su radiografski sloj i Wilsonova maglena komora. Primjenjuju se prije svega u znanstvenim istraživanjima, gdje se promatranjem i mjerenjem tragova čestica i fotona mogu saznati mnoga njihova svojstva.

### Dozimetri

To su uređaji pomoću kojih se mjeri energija (doza) koju je zračenje predalo tvari. Takvim uređajima pripada radiografski sloj kojemu se mjeri zacrnjenje što ga je uzrokovalo zračenje, ionizacijske komore u kojima se mjeri jakost ionizacijske struje ili električno pražnjenje, luminiscentni slojevi na kojima se mjeri jakost svjetla što ga je uzrokovalo zračenje, kemijski dozimetri za koje se mjere u njima nastale kemijske promjene, itd.

#### 4.4 Geiger-Müllerov brojač

Geiger-Müllerov brojač (naziv je dobio po Hansu Geigeru i Waltheru Mülleru) često se skraćeno naziva i Geigerov brojač ili G-M brojač. To je uređaj koji se danas najčešće upotrebljava. Ovaj uređaj ne zahtijeva veliku potrošnju energije, relativno je jeftin i lagan te se široko primjenjuje kao prijenosni detektor zračenja. Izveden u obliku elektronske cijevi.

Postoje dvije osnovne vrste Geiger – Müllerove cijevi: cijev s otvorom na kraju i cijev bez otvora na kraju. U otvoru na jednom svom kraju koristi se za detekciju  $\alpha$  – čestica, niskoenergetskih  $\beta$  – čestica i niskoenergetskih rendgenskih zraka. Ova vrsta cijevi ima cilindričan oblik te na jednom svom kraju ima otvor koji je prekriven tankim slojem materijala kroz koji nisko prodorno zračenje lako prolazi. Liskun je uobičajen materijal koji se koristi u ovom slučaju zbog svoje male mase po jedinici površine. Na drugom kraju cijevi se nalazi električni spoj s anodom. Cijev bez otvora na kraju se razlikuje od prethodne po tome što nema otvora. Postoje dvije glavne podvrste ove cijevi koje koriste različite mehanizme kako bi dobile rezultat na brojaču; cijev s debelim stjenkama i cijev s tankim stjenkama.

#### Princip rada

Najvažniji dio tog brojača je bakrena cijev koja je ispunjena plinom (npr. neon ili argon) pod niskim tlakom i unutar koje se nalazi pozitivno nabijena žica. Katoda je plašt cijevi koji je nabijen negativno, a anoda je tanka metalna žica koja prolazi kroz os cijevi. Kad zračenje uđe kroz otvor (prozorčić) dolazi do ionizacije plina pa unutar cijevi nastaje struja i to od pozitivno nabijenih iona i izbačenih elektrona. Ioni se ubrzano gibaju prema katodi, a elektroni prema anodi i pritom u plinu uzrokuju daljnju ionizaciju. Taj proces ionizacije se višestruko ponavlja i nastaje tzv. elektronska lavina. Brzina širenja lavine je od 2 do 4cm po mikrosekundi tako da potpuna ionizacija plina u cijevi uobičajene veličine traje svega nekoliko mikrosekundi. Time se nakratko zatvara strujni krug i na otporniku u vanjskome dijelu kruga nastaje naponski impuls. Ti se impulsi odbrojavaju u elektroničkom brojaču. Neki brojači imaju i mali zvučnik i slušalice za zvučnu indikaciju zračenja (strujni impuls se pretvara u zvuk). Geigerovi brojači ne mjere brzinu ekspozicijske doze, već samo učestalost ionizacija. Ipak njihova je prednost što, zbog unutrašnjeg pojačanja "signal", mogu detektirati ionizirajuća zračenja relativno malih energija.

U praksi se koriste za nadzor i detekciju prisutnosti izvora zračenja, kada nije potrebna posebna preciznost. Geiger-Müllerov brojačem se mogu registrirati alfa, beta i gama zračenje, iako ih ne može razlikovati. Zbog tih i nekih drugih ograničenja, najbolji je za uporabu kad se želi samo pokazati postojanje radijacija i njena gruba procjena. Efikasnost ovog brojača je gotovo stopostotna za alfa i beta zračenja, dok je puno manja za gama zračenje.



Ovi brojači za očitavanje mogu biti digitalni ili analogni, a u posljednje vrijeme sve se više koriste moderni uređaji koji su direktno spojeni na računalo ili mrežu. Na samom uređaju najčešće postoji opcija za izradu zvučnih signala koji predstavljaju broj otkrivenih ionizacijskih događaja. Ovi klikovi koje odašilje brojač su lako prepoznatljivi i povezuju se s Geiger – Müllerovim brojačem.



Slika 8. Primjer Geiger-Müllerova brojača

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

#### 4.5 Proporcionalni brojač

Proporcionalni brojač je mjerni instrument koji se koristi za brojanje čestica ionizirajućeg zračenja i za mjerenje njihove energije. To je uređaj vrlo sličan Geigerovom brojaču, isto spada u grupu plinsko-ionizirajućih detektora, ali su elektrode na manjem naponu od napona okidanja, pa se izbjegava zasićenje i ne dolazi do prostiranja lavina duž cijele žice. Snaga signala je razmjerna energiji upadnog zračenja, pa se može odrediti upadna energija (ako je cjelokupno zračenje apsorbirano).

Proporcionalni brojač je pogodan za mjerenja alfa-čestica. Brojač prebrojava i beta-čestice, ali kao spektrometar za beta-čestice obično ne služi. Brojač teško mjeri spektre nižih energija. Kod mjerenja gama zračenja bitno je da je proporcionalni brojač punjen plinom, jer mu je efikasnost mala. Upotrebom teškog plina efikasnost može dostići 10%. Koristi se i za mjerenje rendgenskog zračenja.

## Princip rada

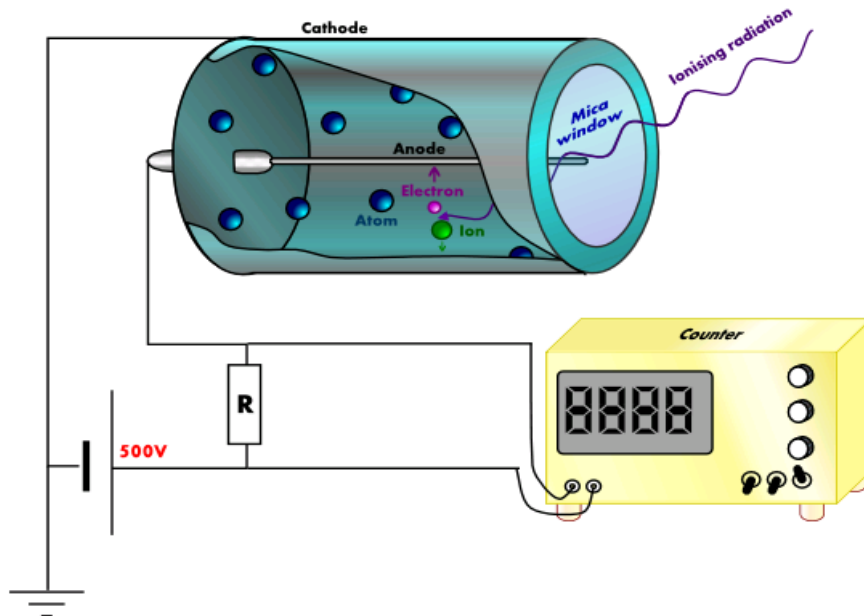
Proporcionalni brojač sastoji se od šuplje cijevi napunjene plemenitim plinom. Kućište brojača je uzemljeno, a sredinom prolazi tanka žica koja je anoda i nalazi se na visokom naponu od 1,5 do 2 kV. Foton zračenja koji uđe u brojač ionizirat će plemeniti plin, na primjer ksenon. Energija potrebna za nastanak takvog para je 20,8 eV. Ako ionizaciju izazove alfa-zračenje energije 8,04 keV, ono može proizvesti  $8040/20,8 = 387$  parova, a ako u brojač uđe zračenje dvostruko veće energije nastat će dvostruko veći broj takvih parova, dakle broj parova je proporcionalan energiji zračenja koje je ušlo u brojač.

Zbog visokog napona anode, elektroni nastali na taj način ubrzano se kreću prema njoj, a pozitivno nabijeni ioni kreću se sporije prema kućištu. S porastom brzine elektrona raste i njihova kinetička energija, pa imaju sposobnost ionizacije atoma na koje na svom putu naiđu. Na taj način dolazi do amplifikacije (pojačanja), tj. do porasta broja parova elektron-pozitivno nabijeni ion ( $10^4 - 10^7$  ovisno o naponu).

Kada elektroni dopiju do anode, smanjit će se pozitivni naboj na kondenzatoru spojenom na anodu, odnosno nastat će električni signal čiji napon je razmjern energiji zračenja koja ga je izazvala (vrijedi za određeni napon na brojaču). Kod Geigerovog brojača zbog previsokog napona gubi se proporcionalnost. Ovisno o debljini prozorčića, o kojoj ovisi apsorpcija, brojač je ili zataljen sa stalnim tlakom plemenitog plina ili kroz njega takav plin struji, pa razlikujemo PC i FPC.

Za fotone manje energije, postavljaju se tanki prozori, od npr. plastike koji blokiraju zračenje većih energija (preko nekoliko 100 eV). Na visokim energijama, brojač je ograničen uvjetom da cjelokupno zračenje mora da bude apsorbirano unutar brojača. Koriste se različiti plinovi : argon, metan, ksenon, ugljikov dioksid i njihove mješavine, na atmosferskom tlaku. Uobičajena mješavina plinova je 90% argona i 10% metana, poznata kao P-10.

Proporcionalni brojač kod datiranja ugljikom-14: može se koristiti proporcionalni brojač. Potrebno je određenim kemijskim postupcima dobiti neki plin, koji sadrži sav ugljik iz uzorka, a istovremeno se može koristiti kao radni plin u brojaču. Ovisno o laboratoriju, kao brojački plin upotrebljavaju se ugljikov dioksid, metan, acetilen ili benzen. Proporcionalni brojač se sastoji obično od valjkaste katode i anode u obliku tanke centralne žice. Između njih je razlika potencijala od nekoliko tisuća volti. Beta-čestice nastale raspadom ugljika, koji je sastavni dio molekula brojačkog plina, ioniziraju na svom putu molekule plina, ostavljajući za sobom trag koji se sastoji od pozitivnih iona i elektrona. Elektroni se ubrzavaju prema anodi i u njenoj blizini, gdje je električno polje najjače, proizvode lavine parova ion-elektron, koji se sakupljaju na anodi, proizvodeći električne signale. Svaki beta raspad stvori jedan impuls i on se detektira elektroničkim putem [9].



Slika 9. Proporcionalni brojač

Izvor: hr.wikipedia.org

#### 4.6 Višeanodni proporcionalni brojač

To je mjerni instrument za otkrivanje i mjerenje elementarnih čestica ionizirajućeg zračenja, a predstavlja usavršeni oblik Geigerovog brojača i proporcionalnog brojača. Ovi instrumenti obično su naprave koaksijalnog geometrijskog rasporeda: tanka žica (anoda), postavljena je uzduž osi valjkaste katode. Sustav je nepropustan za zrak i puni se inertnim plinom (obično smjesa argona i ugljikovog dioksida, argona i metana i slično).

##### Princip rada

Georgij Harpak (Georges Charpak) sa suradnicima je razvio 1968. višeanodni proporcionalni brojač, u kojem je niz usporednih tankih žica (anoda), bilo razapeto simetrično, između dviju paralelnih ploča (katoda), za što je dobio Nobelovu nagradu za fiziku 1992. Prolaskom neke čestice ionizirajućeg zračenja kroz sustav (okomito na ravninu anoda), stvaraju se parovi elektron-ion u području dviju anodnih žica, uz koje se sekundarnom ionizacijom (kao i u običnom proporcionalnom brojaču), stvara lavina parova elektron-ion. Omjer električnih impulsa na dvjema anodama je mjera mjesta prolaska žestice između njih. Kako je razmak žica malen (oko 2 mm), moguće je u dimenziji okomito na anode, odrediti položaj putanje električki nabijene čestice s točnošću oko 0,5 mm.

Između katoda i anoda je visok napon oko 5 kV. Svaka anoda je spojena na posebno predpojačalo, a impulsi iz predpojačala vode se u elektroničko računalo radi obrade i registriranja. Donje anode određuju trag čestica u smjeru x, a gornje u smjeru y. Takvi detekcijski sustavi upotrebljavaju se u mnogim složenim sustavima za istraživanje u fizici elementarnih čestica i u nuklearnoj fizici. Koristi se i za magnetske spektrometre, koji se primjenjuju u istraživanju nuklearnih reakcija u području energije iznad 20 MeV, te za određivanje prostorne raspodjele rendgenskog zračenja (na primjer za proučavanje ogiba rendgenskog zračenja) [10].



Slika 10. Povlačna komora- jedan oblik višeanodnog proporcionalnog brojača

Izvor: hr.wikipedia.org

#### 4.7 Scintilacijski brojač

Prvi uređaj za promatranje radioaktivnih zraka je konstruirao William Crookes 1903. i nazvao ga spintariskop (grčki spinter znači iskra). On se sastoji od metalnog valjka duljine oko 40 mm, na čijem dnu se nalazi fluorescentni zaslon prevučen slojem cinkovog sulfida.

Scintilacija ili svjetlucanje je pojava u nuklearnoj fizici i fizici elementarnih čestica da neki materijali (scintilatori), kada su ozračeni ionizirajućim zračenjem stvaraju fotone vidljive svjetlosti. Materijali mogu biti u rasponu od relativno malog do velikog atomskog broja Z. Stoga su pogodni i za detekciju električki nabijenih čestica (alfa-čestice, beta-čestice), ali i za vrlo prodorne gama zrake. Naime, upadno zračenje proizvodi ionizaciju i pobuđenje atoma.

## Princip rada

Scintilator je materijal koji gama zračenje pretvara u vidljivu svjetlost (scintilacija) i tako ga određuje ili detektira. Kada neki materijali apsorbiraju ionizirajuće zračenje, dio upijene energije pobudi atome sredstva u viša energijska stanja, iz kojih se vraćaju emisijom vidljive svjetlosti. Pojava se zove luminiscencija ili bljeskovi emitirane svjetlosti scintilacije. Zbog toga se slike dobivene korištenjem scintilacijskih detektora nazivaju scintigrami. Intenzitet i trajanje pojedinačne scintilacije premali su za rutinsku detekciju. Stoga se koriste pojačivači ili fotomultiplikatorske cijevi. Scintilator i fotomultiplikatorska cijev zajedno čine scintilacijski brojač.

Dio energije koju gama zraka ostavlja u scintilatoru, a koji se kasnije vraća u obliku scintilacija (svjetlosni bljesak), gotovo je neovisan o energiji gama zrake. Zbog toga i zbog stalnog pojačanja u fotomultiplikatorskoj cijevi, izlazni električni puls razmjern je energiji apsorbirane gama zrake. Ta činjenica omogućava uporabu scintilacijskih brojača kao dozimetara i mogućnost odabiranja samo onih događaja koji rezultiraju pulsom određene veličine, tj. spektralnu analizu. U potonjem je slučaju nužna uporaba elektroničkog sklopa koji se zove diskriminator veličine pulsa. Njegova je funkcija da propušta samo one pulseve čija je veličina (napon) u tzv. prozoru, iznad donjeg, a ispod gornjeg praga prozora. Na taj način možemo izdvojeno registrirati samo jedan u smjesi više radionuklida i, što je još važnije, izdvajati razne načine apsorpcije game zrake.

Neke od primjena metoda scintilacijskih mjerenja: radioimunoesej (RIA)- to je najvažnija direktna nuklearno-medicinska pretraga. RIA metodom moguće je točno izmjeriti vrlo niske koncentracije hormona, lijekova i drugih tvari, koje nije moguće registrirati standardnom laboratorijskom dijagnostikom. Metoda se zasniva na obilježavanju ispitivane tvari (ili njenog antitijela) radionuklidom; gama kamera- može se koristiti u medicini primjenom u „gama kamerama“ za snimanje malih organa – najčešće štitnjače, itd [11].



Slika 11. Gama kamera  
Izvor: hr.wikipedia.org

## 4.8 Ionizacijska komora

Ionizacijska komora je detektor za otkrivanje i mjerenje jakosti ionizirajućega zračenja. Glavni su joj dijelovi zatvorena cilindrična komora, u kojoj se nalazi plin pod određenim tlakom, i dvije elektrode s različitim električnim potencijalima. To je jedan od prvih detektora ionizirajućega zračenja kojemu se načelo detekcije zasniva na sabiranju ionskih parova koji nastaju u plinu u električnom polju komore. Ionizacijska komora služi za mjerenje brzine ekspozicijske doze ionizirajućeg zračenja. Često ne znamo karakteristike izvora polja zračenja, ali njegove učinke možemo neposredno izmjeriti. Ionizacijske se komore koriste kada su potrebna precizna mjerenja polja zračenja, što je osobito važno u planiranju radioterapije. One imaju sličnu građu kao i Geigerovi brojači, ali drugačije električno polje i drugačiji način baždarenja. One mjere apsorbiranu dozu u zraku.

### Princip rada

Prolaskom fotona ili neke nabijene čestice dovoljne energije kroz komoru, ioniziraju se ili pobuđuju molekule plina uzduž staze čestice. Tako u plinu nastaju parovi elektron-ion. Elektrode komore su pod električnim naponom, pa se elektroni i ioni gibaju prema elektrodama.

Ionizacijska komora se sastoji uglavnom od metalne posude, u čijoj se unutrašnjosti nalaze dvije metalne ploče, koje su izolirane od stijenki posude i električki su s vanjske strane povezane u istosmjerni električni krug, s baterijom koja daje napon oko 1500 V. U istosmjernom električnom krugu se nalazi i galvanometar za mjerenje jačine električne struje. Posuda je ispunjena zrakom ili nekim drugim plinom, pod tlakom nižim od atmosferskog tlaka. U takvim uvjetima nema električne struje u zatvorenom krugu, jer zrak ili plin u posudi zbog slabe ionizacije ne provodi struju i ustvari djeluje kao izolator. Ali, čim kroz zidove komore ili kroz prozorčić od tinjca (liskun) ili najlona, prođe ionizirajuće zračenje (alfa-čestice, beta-čestice, gama zrake, rendgenske zrake itd.), u unutrašnjosti komore između dvije ploče kondenzatora pod naponom, pojavit će se slaba električna struja (najmanje oko 10-15 A). Pošto je ta struja nastala zbog izazvane ionizacije plina u komori, nazivamo je ionizacijska struja. Tako se pojavljuje ionizacija plina u komori izazvano ionizirajućim zračenjem izvana.

Ionizacijskom komorom ne mogu se brojiti pojedine atomske čestice, niti elektromagnetsko zračenje, nego se samo mjeri intenzitet ionizacijske struje. Pošto je intenzitet ionizacijske struje srazmjernan nastalom broju parova iona, a njihov broj zavisi od jačine ionizirajućeg zračenja (radioaktivnost), izlazi da je intenzitet ionizacijske struje srazmjernan intenzitetu ionizirajućeg zračenja. Prema tome, razumljivo je da ionizacijska komora služi za otkrivanje, a i mjerenje intenziteta, uglavnom gama zračenja i rendgenskog zračenja [12].



Slika 12. Prenosiva ionizacijska komora

Izvor: hr.wikipedia.org

#### 4.9 Maglena komora

Maglena komora ili se još naziva i Wilsonova maglena komora. Ovaj mjerni instrument je konstruirao britanski meteorolog i fizičar Charles Wilson. Za svoje otkriće 1927. godine je dobio Nobelovu nagradu. Wilsonova komora je prvi mjerni instrument kojim se mogla zabilježiti (registrirati) staza električki nabijenih čestica, posebno alfa-čestica i elektrona emitiranih iz radioaktivnih materijala.

Ovim mjernim instrumentom se prate tragovi ionizirajućeg zračenja (alfa-čestice, beta-čestice, gama zrake, rendgenske zrake i tako dalje), a sastoji se od komore u kojoj je prezasićena vodena para, kojoj da bi se kondenzirala nedostaju centri kondenzacije, te je za oko i kameru nevidljiva. Ioni koje stvori prolaz ionizirajuće čestice, postaju centri kondenzacije i prolaz čestice postaje vidljiv u obliku gustog niza sitnih kapljica.

U osnovi je to posuda ispunjena smjesom zraka i vodene pare, u kojoj se brzim povećanjem njezina obujma (volumena) s pomoću pokretne membrane i klipa, zbog pada tlaka i temperature, postiže prezasićenost zraka vodenom parom, pri čem dolazi do kondenzacije vodene pare duž staze nabijene čestice. Prolaskom kroz komoru, nabijena čestica ionizira molekula zrake, koje tako postaju središta kondenzacije. Na tom osnovnom načelu razvijena je i maglena komora (specijalna Wilsonova komora kojoj je rad kontroliran Geiger-Müllerovim brojilima) i komora s mjehurićima.

## Princip rada

Konstrukcija maglene komore je danas usavršena, ali promatranje i fotografiranje ionizirajućeg zračenja se i dalje zasniva na tragovima magle, koja nastaje kondenzacijom vodene pare na ionima, dobivenim prolaskom tih čestica kroz zrak u zatvorenoj posudi. Pri snižavanju temperature zraka sa zasićenom parom nastaje prezasićena vodena para, povlačenjem klipa i povećanjem obujma u posudi (jednadžba stanja idealnog plina), zbog čega dolazi do njenog kondenziranja na sitnim česticama, ionima.

Maglena komora se sastoji od metalnog valjka (promjera 100 do 150 mm), koji je s donje strane zatvoren pokretnim klipom. Valjak je s gornje strane nepropusno zatvoren staklenom pločom, kroz koju se promatra unutrašnjost komore. S bočne strane je stakleni prozorčić, kroz koji se unutrašnjost komore obasjava s vidljivom svjetlošću. Ispod staklene ploče obično se nalazi metalna mreža, koja je vodljivom žicom vezana za jedan pol jake električne baterije (oko 250 V). Drugi pol ove baterije je vezan žicom za metalni valjak.

Prije rada maglene komore mora se na gornju površinu klipa staviti malo vode, zbog čijeg isparavanja će se zrak zasititi vodenom parom. Pokusima je utvrđeno da se postiže bolja kondenzacija vodene pare u komori kad je u vodi dodano malo metilnog ili etilnog alkohola. Kad se klip naglo povuče prema dolje, zbog adijabatskog širenja u komori, zrak se ohladi. Pošto duž putanje ionizirajućeg zračenja nastaje ionizacija zraka, pojavit će se kondenzacija vodene pare na ionima. Promatrač koji gleda kroz staklenu ploču primjetit će putanje iona u vidu bijelih tankih tragova magle. Ovi tragovi magle mogu se i fotografirati.

Otkriće maglene komore vrlo je značajno za otkrivanje atomske strukture, jer su tragovi magle u komori siguran dokaz postojanja atoma i ionizirajućih čestica. Ali, njen je nedostatak što poslije svakog stvaranja tragova magle, treba potrajati par sekundi dok komora bude u mogućnosti ponovno otkriti tragove novih čestica. U međuvremenu, može se pojaviti neki događaj koji se neće primijetiti.

**Difuzijska maglena komora-** pošto maglena komora ne može da radi neprekidno, Alexander Langsdorf je 1939. konstruirao difuzijsku maglenu komoru, koja ostaje stalno osjetljiva na ionizirajuće zračenje, dok je god u komori prisutna zaliha hlapljive tekućine, kao što je metilni alkohol. Zasićeni prostor s parom postoji stalno u sredini komore, jer se u gornjem dijelu održava stalna temperatura od 30 °C, a pri dnu oko -70 °C. Ova komora je vrlo pogodna za istraživanje elementarnih čestica visoke energije [13].





Slika 13. Originalna maglena komora napravljena u Cavendishev laboratoriju

Izvor: hr.wikipedia.org

#### 4.10 Komora na iskre

Komora na iskre ili iskrička komora je detektor čestica: to je uređaj koji se koristi u fizici čestica za detekciju električno nabijenih čestica. Najviše su korišteni kao alati za istraživački rad od 1930-ih do 1960-ih i od tada su zamijenjeni drugim tehnologijama kao što su silicijski detektori i drift komore. Danas se komore za iskre uglavnom nalaze u znanstvenim muzejima i obrazovnim organizacijama, gdje se koriste za demonstraciju i izvođenje pokusa iz područja fizike čestica i astrofizike.

Komora na iskre se sastoji od metalnih ploča smještenih u zapečaćenu kutiju napunjenu plinom poput neona ili helija ili mješavinom ta dva plemenita plina. Te metalne ploče predstavljaju elektrode. One mogu biti različitih oblika (kugle, šiljci, tanke žice). Prve komore na iskre su koristile sustav tankih, međusobno paralelnih, volframovih žica, promjera 0,2 mm, dužine 40 mm, udaljenih međusobno 1,5 mm do druge elektrode, ravne mjedene ploče, i taj je sustav pokazao veliku stabilnost.

#### Princip rada

Između navedenih ploča (elektroda) vlada visoki napon, no ne dovoljno visok da bi se dogodio električni izboj među njima. Ioni, koje stvori prolaz nabijene čestice,

omogućuju lokalni izboj u obliku niza iskri te na taj način kamera može registrirati stazu čestice.

Kada nabijena čestica iz izvora ionizirajućeg zračenja putuje kroz kutiju, ona ionizira plin između ploča. Ova bi pojava ionizacije bi obično ostala nevidljiva. Međutim, ako se između svakog susjednog para ploča može primijeniti dovoljno visok napon prije nego što ta ionizacija nestane, tada se mogu stvoriti iskre duž putanje koju uzima ta zraka, i ona postaje vidljiva kao linija iskri.

Komora na iskricice ima nižu rezoluciju od nekih drugih detektora (komora sa mjehurićima) ali uz pomoć pomoćnih detektora, postaju korisni u potrazi za vrlo rijetkim događajima.



Slika 14. Komora na iskricice u muzeju fizike, u Rimu

Izvor: hr.wikipedia.org

#### 4.11 Komora na mjehuriće

Komora na mjehuriće ili komora s mjehurićima je detektor ionizirajućega zračenja u kojem se promatraju mjehurići nastali djelovanjem zračenja na tekućinu u komori. Izumio ju je D. Glaser 1952.

To je mjerni instrument kojim se prate tragovi ionizirajućeg zračenja (alfa-čestice, beta-čestice i općenito sve elementarne čestice te gama zrake i rendgenske zrake), a sastoji se od komore u kojoj je prozirna pregrijana tekućina u kojoj ioni stvoreni prolaskom ionizirajuće čestice omogućuju stvaranje mjehurića bilježeći na taj način stazu čestice. Komora na mjehuriće radi vrlo slično kao maglena komora, s tom razlikom da se njen rad zasniva na superzasićenoj tekućini, dok se kod maglene komore rad zasniva na superzasićenoj pari.

## Princip rada

Komora na mjehuriće radi na osnovu pregrijane tekućine, a to može biti tekući eter, tekući vodik, dušik, izopentan i drugo. Kada kroz pregrijanu tekućinu prođe neka ionizirajuća čestica, stvoreni ioni postaju jezgre za stvaranje mjehurića pare u pregrijanoj tekućini jer na tim mjestima nastaje vrenje tekućine. Pod jakim osvjetljenjem tada se vide tragovi putanja iona kao neprekinute bijele linije, koje čine sitni mjehurići pare upotrebjene tekućine, nanizani jedan do drugog.

Komora na mjehuriće obično ima i homogeno magnetsko polje, tako da nabijene čestice pod utjecajem Lorentzove sile putuju po spirali čija je zakrivljenost određena omjerom električnog naboja i mase čestice, te njenom brzinom. U komoru je ugrađeno nekoliko kamera kako bi se putanje čestica mogle pratiti u tri dimenzije. Rezolucija kamera može biti i do nekoliko mikrometara. Mjereći zakrivljenost putanje može se odrediti količina gibanja čestice.

Uz komoru na mjehuriće veže se otkriće slabe nuklearne sile 1973. godine te W i Z bozona 1983. Ipak, danas se toliko ne upotrebljava, jer su je zamijenili višeanodni proporcionalni brojač i komora na iskre. Putanje čestica rekonstruiraju se računalom [14].

Prednost rada ovog uređaja je velika brzina operacije te korištenje tekućine visoke gustoće. Nedostaci ovog uređaja su da je nemoguće odmah početi sa radom zbog inercije i drugih fizičkih parametara, te dosta ovom metodom dobivenih rezultata ne predstavlja nikakav znanstveni interes.



Slika 15. Komora na mjehuriće

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

## 4.12 Poluvodički detektor

Poluvodički detektor je uređaj koji radi na temelju promjene električne vodljivosti poluvodičkog kristala zbog ionizacije zračenjem. Masena čestica ili foton koji prođu kroz zaporni sloj uzrokuju strujni impuls. Zračenje uzrokuje mnogo veću ionizaciju u poluvodičkom kristalu nego u plinu zbog toga što je gustoća mnogo veća, a energija potrebna za proizvodnju parova mnogo manja.

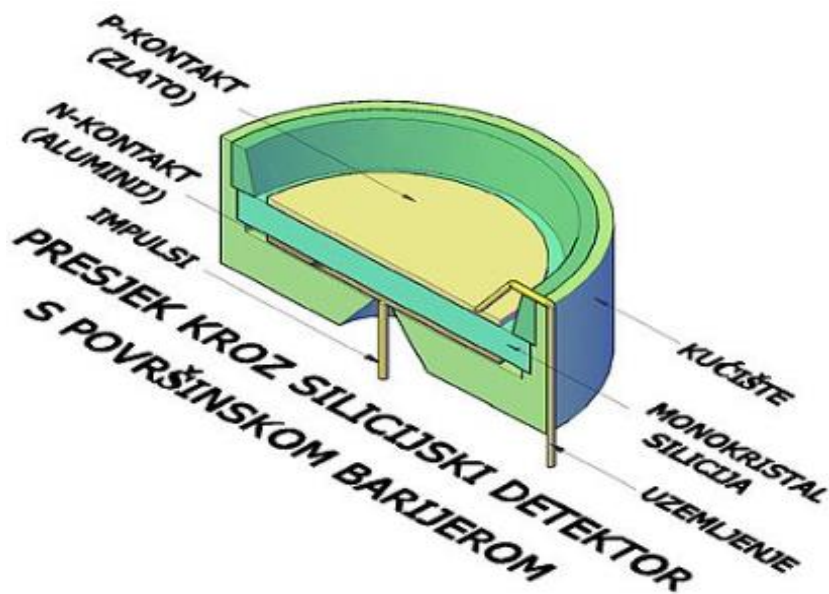
Daje izvrsne rezultate u otkrivanju fotona (gama zračenje, rendgensko zračenje) i električki nabijenih čestica (alfa-čestica, beta-čestica) kod ionizirajućeg zračenja. Izrađuju se od monokristala silicija ili germanija visoke čistoće. Ti su detektori poluvodičke diode.

### Princip rada

U radnim su uvjetima poluvodički detektori spojeni na visok napon u zapornom smjeru, kojim se postiže električno polje u osjetljivom sloju detektora. Teži se u izradi i upotrebi tih detektora da se postignu što je moguće manje zaporne struje, jer se time smanjuje šum brojača i poboljšava razlučivanje. Prolaskom električki nabijene čestice kroz osjetljivi sloj detektora (iz kojeg su zapornim električnim poljem uklonjeni pokretni nosioci naboja) stvaraju se pokretni nosioci, elektroni u vodljivoj vrpici i šupljine u valentnoj vrpici, koji se pod djelovanjem električnog polja kreću prema pozitivnoj, odnosno negativnoj elektrodi detektora. Stvara se električni signal, koji je proporcionalan gubitku energije čestice u osjetljivom sloju detektora.

Što se tiče vrste poluvodičkih detektora u upotrebi je mnogo vrsta poluvodičkih detektora, a najzastupljeniji su silicijski detektor s površinskom barijerom, silicijski detektor s povlačenim litijem ili Si(Li) detektor, germanijski detektor s povlačenim litijem ili Ge(Li) detektor i detektor od germanija posebno visoke čistoće ili HPGe detektor.

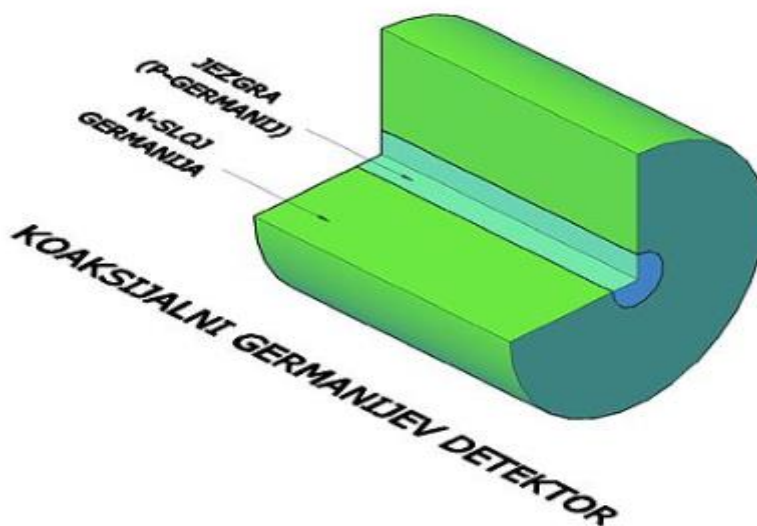
**Silicijski detektor s površinskom barijerom** izrađuju se od monokristala silicija tipa N, na kojemu se oksidacijom stvara sloj tipa P. Kontakt na sloju P načinjen je neparavanjem zlata ili rodija, a na osnovnom sloju N neparavanjem aluminijske. Priključivanjem detektora na zaporni napon (tip N na pozitivan, a tip P na negativan priključak naponskog izvora) stvara se uz spoj N-P osjetljivi sloj iz kojeg su uklonjeni pokretni nosioci naboja. Ako se želi postići veća debljina osjetljivog sloja, potreban je silicij veće čistoće (električni otpori u području 10 do 100  $\Omega\text{m}$ ), te kvalitetna obrada i izolacija, kako bi se mogao primijeniti visok zaporni napon. Za neke primjene, kao što je otkrivanje teških iona, kojima je doseg relativno kratak, upotrebljavaju se detektori male debljine osjetljivog sloja [15].



Slika 16. Silicijski detektor s površinskom barijerom

Izvor: hr.wikipedia.org

**Si(Li) detektor** se izrađuje s većom debljinom osjetljivog sloja i poboljšanim energetskim razlučivanjem. Osnovni postupci u izradi tih detektora su: nanošenje metalnog litija na monokristal silicija tipa P, zagrijavanje radi pospješivanja difuzije litijevih iona u monokristal, te povlačenje litijevih iona kroz kristal na temperaturi oko 400 °C, primjenjujući snažno električno polje.



Slika 17. Koaksijalni Ge(Li) detektor

Izvor: hr.wikipedia.org

**HPGe detektor** se izrađuje od germanija visoke čistoće (primjese su u tim monokristalima oko  $1 : 10^{12}$ , pa su to izrazito najčišće poznate tvari). Kako je njihova otpornost na temperaturi tekućeg dušika vrlo velika, na zapornim naponima 1000 V postižu se osjetljivi slojevi debljine oko 7 mm, a na 3 500 V i do 12 mm. Izvedbe HPGe detektora vrlo su slične izvedbama Ge(Li) detektora, a i njihova su detekcijska svojstva podjednaka. Mnogo su skuplji, ali se mogu (kada se duže vremena ne mjeri) zagrijati i držati na sobnoj temperaturi. Preporučuje se da se HPGe detektori ne zagrijevaju i ne hlade često zbog mogućih strukturnih oštećenja nosača monokristala, kontakata i slično.



Slika 18. Detektor od germanija posebno visoke čistoće ili HPGe detektor

Izvor: hr.wikipedia.org

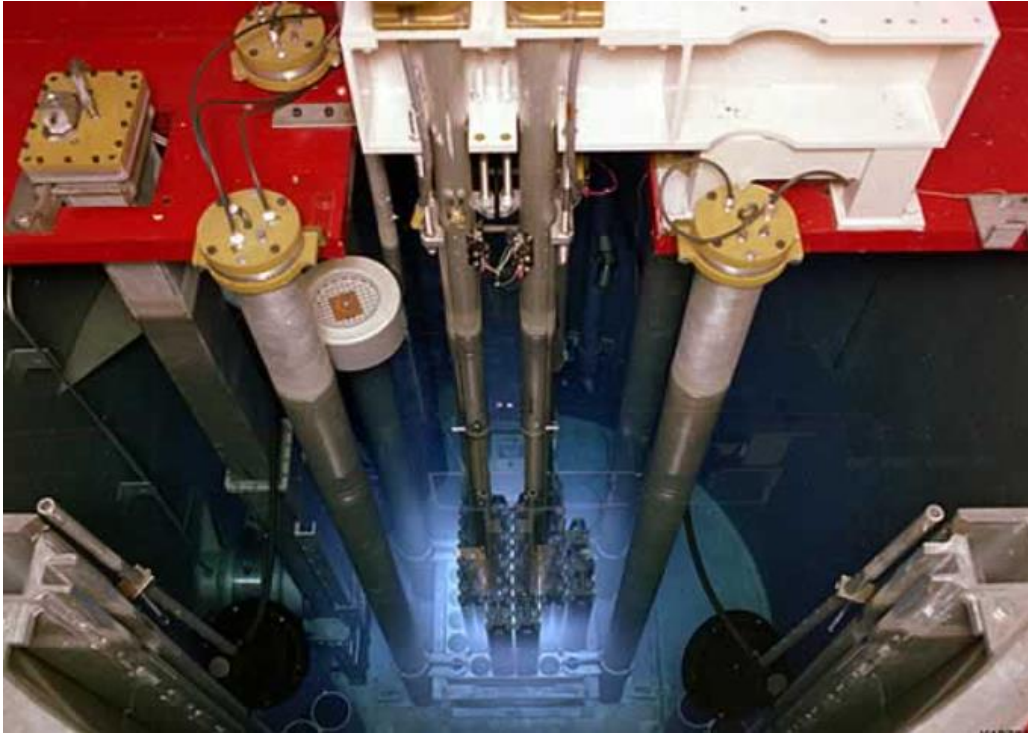
#### 4.12 Čerenkovljev brojač

Čerenkovljev brojač je ustvari pojava koju je uočio i opisao Pavel A. Čerenkov. On je to otkrio dok je istraživao luminiscenciju otopina uranijevih soli pod utjecajem tvrdoga gama-zračenja pod vodstvom Sergeja Ivanoviča Vavilova a objasnili su je Ilja Mihajlovič Frank i Igor Jevgenjevič Tamm 1937. godine. Oni su za to objašnjenje 1958. godine dobili Nobelovu nagradu.

Čerkovljevo zračenje je emisija elektromagnetskoga zračenja koje nastaje kada brze električki nabijene čestice (elektroni, protoni, mezoni) prolaze kroz optičko sredstvo koje nije vakuum brzinom većom od brzine širenja svjetlosti u istome sredstvu. Ovaj efekt je vidljiv golim okom: ako npr. elektroni iz betatrona ulaze u običnu vodu, ona emitira plavičastu svjetlost [16].

Također ovaj efekt uz svjetlosni udarni val stvara plavičastu svjetlost, udarni zvučni val stvara i popratnu tutnjavu. Udarni val slični zvuku proboja zvučnog zida. Brzina čestica iz elektromagnetskog zračenja može se odrediti iz smjera koje je to zračenje emitirano. U današnje vrijeme Černekovljev dektor je dosta moderniziran i unaprijeđen, te se koristi u mnogobrojnim istraživanjima.





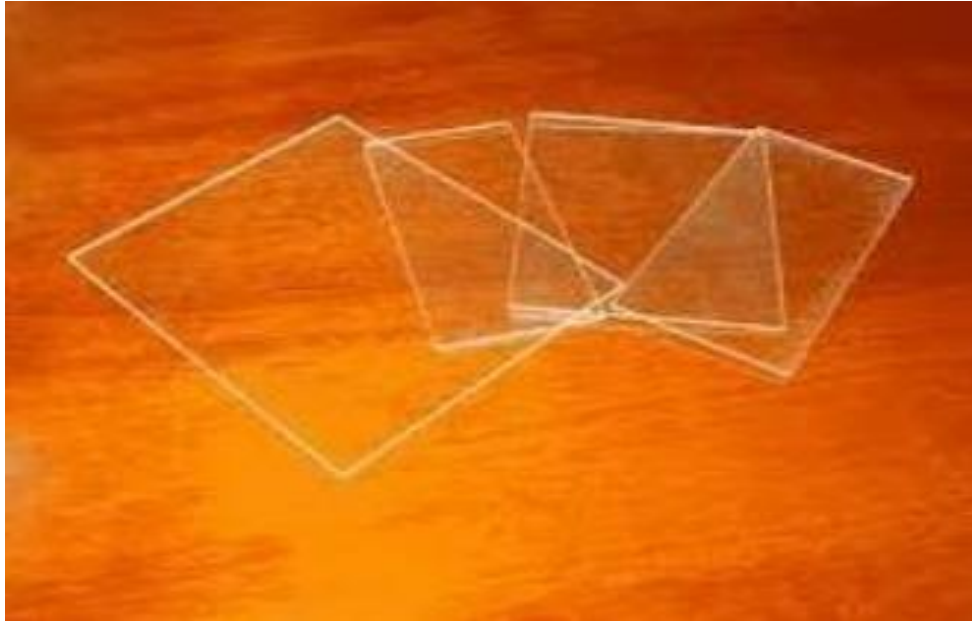
Slika 19. Čerenkovljevo zračenje u nuklearnom reaktoru.

Izvor: hr.wikipedia.org

#### 4.13 Neutronske detektore

Neutrone je izuzetno teško otkriti jer oni nemaju električni naboj. Otkrivaju se pomoću nuklearnih reakcija kojima se stvaraju sekundarne nabijene čestice. Ponekad se za usporeenje neutrona koristi parafin. On se koristi da bi se povećala efikasnost uhvata neutrona. Ovakvi se detektore koriste za promatranje neutronske zračenja u blizini nuklearnih elektrana i akceleratora čestice. Detektore ove vrste koriste za promatranje neutronske zračenja u blizini akceleratora čestice i nuklearnih elektrana [17].

Generalno, detekcija neutrona vrši se pomoću nuklearnih reakcija iz kojih nastaju nabijene čestice poput alfa čestice, protona itd. Svi oblici neutronske detektore uključuju kombinaciju materijala pogodnih za takvu reakciju i određenog detektore, npr. čvrstog detektore nuklearnih tragova. Pri detekciji neutronske zračenja mogu se koristiti čvrsti detektore nuklearnih tragova. Oni su napravljeni od konverzijske folije koja sadrži <sup>10</sup>B i CR-39 koji bilježi alfa čestice nastale nakon što se neutron uhvate na konverzijskoj foliji. Rukovanje njima jednostavno jer su lagani i mali. To je njihova prednost. Ovakvi detektore ne zahtijevaju poseban izvor energije, i oni su pasivni. Oni se nakon obrade mogu pohraniti i čuvati. Nakon izlaganja zračenju razdvajanjem konverzijske folije od detektore nuklearnih tragova detektore se jednostavno deaktivira. Nakon obrade detektore je moguće je pohraniti i čuvati.



Slika 20. Čvrsti detektor nuklearnih tragova CR-39

Izvor: hr.wikipedia.org

#### 4.14 Neutrino detektori

Neutrini su otkriveni relativno kasno, i to 1956. godine. Otkriven je eksperimentalno pomoću suvremene skupe tehnologije.

Neutrino je teško registrirati jer međudjeluju vrlo slabo s materijom. Neutrino detektori moraju biti obujmom izuzetno veliki. Na primjer, za otkriće Sunčevih neutrina često se koriste velika količina, i to na tisuće tona deuterijevog oksida (teška voda). Ako se dogodi međudjelovanje neutrina s materijom, stvorit će se elektron koji se giba brže od svjetlosti u toj materiji. Stožac svjetlosti koje takav elektron proizvede koristi se za određivanje energije i smjera neutrina [2].

#### 4.15 Osobni dozimetri

Dozimetar se koristi za zaštitu ljudi koji rade na radnim mjestima gdje postoje jaki izvori radioaktivnosti. Dozimetar je mjerni instrument koji osoba koja radi u tim specifičnim uvjetima nosi na sebi. Nosi se obično na prsima i ne smije biti s ničim prekriven jer u suprotnom slučaju izmjerena količina zračenja će biti smanjena, tj. netočna. Gdje se kreće osoba sa njom mora biti i dozimetar. On ima svojstvo da registrira ukupno ozračenje koju je osoba primila, tj. tzv. apsorbiranu dozu [18].

Kao osobni dozimetar upotrebljava se termoluminescentni dozimetar, radiografski film, ionizacijska komora za integralno registriranje. Zbog mnogih dobrih svojstava kao što su jednostavnost, pouzdanost, dobro razlučenje raznih vrsta zračenja, najčešće se kao



dozimetar upotrebljava filmski dozimetar. Razvijeni film na kojem ostaje registrirana količina zračenja ostaje kao trajni dokument. Praćenje ozračenost osoblja koje radi s izvorima ionizirajućeg zračenja vrši se stalnim i pravilnim nošenjem osobnog dozimetra. On se najčešće nosi na gornjem džepu radnog odijela za vrijeme rada i izloženosti osobe koja je mogla biti izložena zračenju.

### Vrste dozimetara

Najraširenije i zakonski priznate su dvije vrste mjerenja: filmski dozimetar i termoluminiscentni dozimetar (TLD). Kod oba dozimetra prolazom zračenja dolazi do određenih procesa koje zračenje izaziva predajom energije: zacrtnjenje filma ili podizanje elektrona na više energetske stanje. Prilikom očitavanja, razvijanja filma ili očitavanja u posebnom čitaču, uočava se učinak zračenja, zacrtnjenje ili određena krivulja kod TLD-a. Primljene doze mogu se odrediti baždarenjem serije dozimetra poznatim dozama i uz baždarne krivulje.

Danas su podjednako koriste obje metode, i svaka ima prednosti i mane. Uglavnom, TLD su pogodniji od filmskih dozimetara jer ostaju u budućnosti kao trajni zapis, tj. dokument o primljenoj dozi. Osjetljivost obje vrste dozimetara je gotovo ista, a točnost ovisi o načinu baždarenja, energiji zračenja, servisu i drugim čimbenicima. Osnovni nedostatak i jednog i drugog dozimetra je odgođeno dobivanje rezultata ozračenja. Ono se dobiva tek nakon razvijanja i očitavanja u čitaču nakon proteka vremena u kojem je nošen. Zbog toga su danas popularne brojne verzije dozimetara s izravnim trenutnim očitavanjem primljene doze: penkala dozimetar, elektronski dozimetar i sl., koji se lokalno koriste kao dodatni dozimetar uz službenu dozimetriju koja se obvezno provodi filmskim dozimetrima ili TLD-ima [18].



Slika 21. Primjer osobnog dozimetra

Izvor: hr.wikipedia.org

**Filmski dozimetar-** kod ove vrste dozimetra ionizirajuća zračenja djeluju na fotografsku ploču i izazivaju zacrnenje. Stupanj zacrnenja srazmjeran je dozi koja je apsorbirana. Obično je jedan dio filma prekriven tankim slojem olova, kako bi se moglo razlikovati zacrnenje koje je uzrokovano prodornim gama zračenjem, od zacrnenja nastalog beta-česticama. U slučaju da se treba mjeriti prisustvo sporih neutrona, onda se jedan dio filma pokriva tankim slojem kadmija. Zbog svoje jednostavnosti i prihvatljive cijene ovaj osobni dozimetar se dosta upotrebljava. Također ima i svojih nedostataka, a to je da za svaku vrstu filma treba raditi kalibracijsku krivulju, jer je stupanj zacrnenja dosta zavisao od energije rendgenskih ili gama zraka.

**Termoluminiscentni dozimetar-** ovi osobni dozimetri napravljeni su od kalcijevog fluorida ili litijevog fluorida i aktivirani su manganom. Kao nosač osjetljive mase (kristala) služi metalna pločica. Ona se se pri mjerenju apsorbirane doze ionizirajućeg zračenja zagrijava električnom strujom. Ozračeni kristali zrače na temperaturi od 400 °C do 1000 °C svjetlost valnih duljina od 390 do 500 nm. Njezin intenzitet je srazmjeran apsorbiranoj dozi, i mjeri se posebnim instrumentom- fotomultiplikatorom. Njime se mogu mjeriti i doze od 0,1 mGy (miligrej). Uređaji za očitavanje i bilježenje doze nešto su složeniji od filmskih dozimetara, ali posljedično tome i sama točnost je veća. Oni se najviše upotrebljavaju za kao osobni dozimetri. Njihovim ponovnim zagrijavanjem, vrijednost doze se briše, te se mogu ponovno iskoristiti za mjerenje.

## 5. UTJECAJ IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

Svijet u kojem živimo radioaktivan je od svog postanka. Oko 60 radionuklida (radioaktivnih elemenata) postoje na svijetu. Oni se nalaze svugdje oko nas- u zraku, hrani, vodi, tlu a time i u svim živim bićima. Po svom nastanku dijele se na one koji su tu od postanka zemlje, one koji su nastali kao posljedica ljudske tehnologije i one koji nastaju djelovanjem kozmičkih zraka.

### 5.1 Biološki učinci ionizirajućeg zračenja

Biološkim efektima zračenja nazivamo promjene koje zračenje izaziva na živim stanicama, organima ili cijelom tijelu. Prolaskom kroz tijelo zračenje ionizira molekule što može dovesti do promjena, oštećenja ili razaranja organskih makromolekula tijela. Ti fizikalno-kemijski procesi u tkivima mogu izazvati cijeli niz bioloških promjena čiji je krajnji cilj biološka reakcija na zračenje. Biološki efekti zračenja mogu se pojaviti kao somatski efekti i kao genetski efekti. Pod somatskim efektima smatramo pojave na ozračenom pojedincu, a pod genetskim efektima biološke efekte u potomstvu ozračene osobe ako je došlo do oštećenja na nasljednom mehanizmu.

Biološki efekti zračenja ovise o raspodjeli doze po tijelu učestalosti i trajanju zračenja. Istraživanjem je utvrđeno da koliko je puta veća primljena doza toliko je puta veći i biološki efekt, tj. da je taj odnos linearan. Također biološki efekti zračenja ovise o osjetljivosti pojedinih tkiva na zračenje i djelotvornosti pojedinih vrsta zračenja. Zračenje prolaskom kroz tijelo ionizira molekule što može direktno djelovati na ozračenu osobu i na potomke ozračene osobe, prijenosom genetskog materijala.

Biološko djelovanje zračenja na žive organizme također stvara skup efekata koji se mogu podjeliti kao: deterministički (nestohatički) i stohastički učinci.

**Deterministički** učinci pojavljuju se kao posljedica gubitka velikog broja stanica, nastaju primjenom velikih doza zračenja i vidljivi su brzo nakon zračenja. Potreban tzv. „prag“ ili određena količina zračenja da bi učinak bio vidljiv. Pojavljuju se samo ukoliko je doza veća od određenog praga doze. Ozbiljnost efekta zavisi od primljene doze (zamućenje ocnog sočiva, sterilitet te malformacije u razvoju ploda). Ukoliko je postotak uništenih stanica u nekom organu ili tkivu velik, tada funkcija organa ili tkiva može biti oslabljena, a u pojedinim slučajevima gubitak stanica dovest će i do smrti organizma.

**Stohaistički** učinci karakteristični su jer je vjerojatnost da do njih dođe proporcionalna primljenoj dozi. Što se tiče ovih efekata ne postoji prag doze ispod koga se on ne može pojaviti, tj. može ih izazvati i veoma mala doza zračenja. Ukoliko se pojave, uvijek su veoma ozbiljni i teški (pojava malignih tumora, nasljedne promjene, mutacije), tj. nema relacije doza - efekt. Zbog toga ih se niti ne može predvidjeti, kao što se to može učiniti za točno određeni - determinirani učinak, nego ih se može samo statistički predvidjeti.

Stohastički učinci mogu nastati u somatskim, ali i u spolnim stanicama, pa se promjene mogu prenijeti na potomstvo (nasljedne promjene, indukcija leukemija, mentalna retardacija, malformacije, smrt ploda).

Osim negativnog učinka na stanice, u malobrojnim slučajevima, zračenjem se mogu dobiti neki korisni rezultati. Razlikuje se osjetljivost pojedinih stanica na zračenje, ali i individualna osjetljivost pojedinih stanica. Određena istraživanja su pokazala da postoji mogućnost da male doze zračenja mogu utjecati na stanicu da postane otpornija na zračenje. Također je utvrđeno da su manje osjetljiva tkiva starija tkiva i stariji organi, a mnogo su više osjetljiva mlađa tkiva i organi koji se obnavljaju, prije svega unutrašnji organi, koštana srž, sjemene stanice, jajnici, očne leće, a posebno embrij.

Tablica broj 1. Učinci zračenja na biološke molekule [19].

	Posljedice	Uzrok
trenutne	anemija, krvarenje	smanjenje broja eritrocita i pločica (a)
	sklonost infekcijama	smanjenje 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

## 5.2 Doze ionizirajućeg zračenja

Doze ionizirajućeg zračenja predstavljaju količinu predane energije ionizirajućeg zračenja određenoj masi tvari, jer ionizirajuća zraka prolazeći kroz tvar se sudara s atomima i predaje im svoju energiju, što za posljedicu ima ionizaciju atoma, odnosno molekula. Djelovanje ionizirajućeg zračenja može se prikazati dvjema veličinama, i to kao apsorbirana doza i ekvivalentna doza.

**Apsorbirana doza-** (skraćeno doza) oznaka joj je „D“. To je količina energija što je ozračena tvar upija po jednom kilogramu mase. Jedinica doze je džul po kilogramu J/kg ,a oznaka joj je Gy( grej). Male doze iskazuju se jedinicom miligrej( mGy) ,tisuću puta manjom od greja:  $1\text{Mgy}=10^{-3}\text{gy}$ .

**Ekvivalentna doza-** ili dozni ekvivalent. Iskazuje škodljiv učinak na tkivo izloženo zračenju. Oznaka joj je „H“ iskazuje. Ekvivalentna doza se iskazuje umnoškom apsorbirane doze i faktora učinka- oznaka joj je „Q“ određene vrste zračenja na organizam ili pojedine organe:  $H = D \cdot Q$ . Jedinica ekvivalentne doze je sivert- oznaka je Sv. Najčešće se rabe milisivert- oznaka je mSv;  $1\text{mSv} = 10^{-3}\text{Sv}$ , i mikrosivert- oznaka  $\mu\text{Sv}$ ;  $1\mu\text{Sv} = 10^{-6}\text{Sv}$ .

Tablica broj 2. Letalna i najveća dopuštena doza zračenja [19].

Vrsta	Letalna doza LD <sub>50/30</sub> (Sv)
pas	3.5
miš	4-6
majmun	6
čovjek	6-7
štakor	6-10
žaba	7
daždenjak	30
puž	80-200

### 5.3 Karakteristične doze i vrste izloženosti ionizirajućem zračenju

Količina doze zračenja koje čovjek u određenom trenutku primi ili bi je mogao primiti u kontroliranim ili ne kontroliranim i nepredviđenim situacijama možemo razvrstati u određene skupine, i to: na prirodne doze, dopuštene doze, granične doze, kritične i natkritične doze.

**Prirodna doza:** Čovjek je prilagođen prirodnom ozračivanju, koje se na površini Zemlje mijenja u velikom spektru vrijednosti. Kad spominjemo prirodnu dozu zračenja onda znamo da ona potječe od kozmičkog zračenja (20 do 30 %) i zračenja okoline (79 do 80 %). Prirodna ekvivalentna doza zračenja procjenjuje se na oko 1 do 3 mSv na godinu. Čovjek je priviknut na takve doze i pretpostavka je se da one ne uzrokuju znatnije biološke učinke (osim ako se prirodne mutacije smatraju nekim dijelom posljedica prirodnog ozračivanja).

**Dopuštena doza:** pod njima se smatraju doze koje čovjek prima zbog ljudskog aktivnosti i za koje se predpostavlja da ne uzrokuju ozbiljnije biološke učinke. Dopuštene doze uvijek su manje od graničnih doza, propisanih za pojedine skupine ljudi, pojedince ili za pojedine situacije. 16. Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja preporučila je princip ALARA (eng. As low as it is reasonably achievable), što znači da sve doze moraju biti toliko male koliko je to razumno s obzirom na ekonomske i društvene činitelje.

**Granične doze:** to su doze koje su zakonskim aktima propisane vrijednosti dozimetrijskih veličina i koje se ne smiju prekoračiti ljudskim djelovanjem. One se ne odnose se na ozračivanje u medicinske svrhe ili prirodno ozračivanje. Granice ozračenja za radnike izložene ionizacijskom zračenju primjenjuje se na zbroj godišnjih profesionalnih ozračenja od svih djelatnosti i aktivnosti za koje je ishođeno odobrenje za obavljanje djelatnosti ili rješenje o registraciji, profesionalnog ozračenja radnom na radnim mjestima i drugim profesionalnim ozračenjem.

Tablica broj 3. Godišnje granice ozračenja za radnike, pripravnike, studente i stanovništvo [20].

Tip osoba	Godišnje granice ozračenja (mSv):			
	efektivna doza	ekvivalentna doza za:		
		očnu leću	Kožu	Ekstremitete
Izloženi radnici	20 mSv	20 mSv	500 mSv	500 mSv
Pripravnici i studenti u dobi od 16 do 18 godina	6 mSv	15 mSv	150 mSv	150 mSv
Stanovništvo	1 mSv	15 mSv	50 mSv	

**Kritične doze:** to su doze koje uzrokuju već teška oštećenja zdravlja i prve smrtno slučajevne. U današnje vrijeme smatra se da su za čovjeka kritične doze ionizirajućeg zračenja one koje su veće od 0,25 Sv, tj 250 mSv. Propisano je da se nakon jednokratno primljene tolike doze mora obaviti specijalistički liječnički pregled.

**Natkritične doze:** Sve doze ionizirajućeg zračenja koje su više od kritične smatraju se vrlo opasnim, posebno ako su primljene jednokratnim ozračivanjem, i to u kratkom vremenskom razdoblju. Do takvih količina ozračivanja dolazi pri velikim nezgodama u

radu s izvorima zračenja i u slučaju korištenja nuklearnog naoružanja. Procjenjuje se da nakon doza viših od 3 Sv svi ozračeni teško oboljevaju (uz pojavu prvih smrtnih slučajeva), a nakon doza viših od 6 Sv svi koji su ozračeni umiru kroz nekoliko dana. Zbog toga se ta doza smatra pragom smrtnosti. Ako nije ozračeno cijelo tijelo smrtnost je mnogo manja, posebno ako nisu ozračeni glava i trup. Pri ozračivanju udova, pri radu s izvorima zračenja, javljaju se teška oštećenja kože koja mogu prerasti u maligne tumore, ali se također mogu i izliječiti. Iznad 1 Sv, ionizacijsko zračenje uzrokuje promjenu krvne slike, a ispod 1 Sv nisu vidljive njene značajnije promjene, ali je veliki rizik oboljenja od karcinoma.

Tablica broj 4. Izloženost zračenju u svakodnevnom životu[19].

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

## 6. ZAKONSKA PODLOGA

### 6.1 Načela zaštite od ionizirajućeg zračenja: opravdanost, optimizacija i ograničenje zračenja [21]

Tri su osnovna načela zaštite od ionizirajućeg zračenja: opravdanost, optimizacija i ograničenje zračenja. Svi koji koriste izvore ionizirajućeg zračenja obvezni su mjerama radiološke sigurnosti osigurati provedbu načela ograničenje ozračenja, optimizacije i opravdanosti.

**Načelo ograničenja zračenja-** ono se provodi na način da se ograniči izloženost pojedinca do djelatnosti koje su izvor ionizirajućeg zračenja i nuklearne djelatnosti. Također mjere koje se primjenjuju zbog nuklearne i radiološke sigurnosti moraju osigurati da izloženost osoba ionizirajućem zračenju neće prijeći zakonom utvrđene granice.

**Načelo optimizacije-** zaštite od ionizirajućeg zračenja u odnosu na nuklearne djelatnosti i djelatnosti s izvorima i ionizirajućeg zračenja omogućuje se provođenjem mjerama zaštite koji će izvore ionizirajućeg zračenja smanjiti na razumne veličine i koje će biti unutar propisanih vrijednosti uvažavajući sve potrebne čimbenike. Sukladno ovim načelom trajanje i opseg svakog postupka usmjeren na provođenje potrebne zaštite, a u odnosu na intervencije mora postići što veći mogući pozitivni učinak.

**Načelo opravdanosti-** bilo koja aktivnost kojom se pojedinac izlaže ionizirajućem zračenju mora imati više koristi nego štete za pojedinca i društvo kao opravdanje za rizike koji mogu nastati prilikom izlaganja ionizirajućem zračenju tog pojedinca. Također da bi se ovo načelo se postiglo svaka intervencija mora rezultirati tako mora ublažiti posljedice koje je izazvao izvanredni događaj, a naročito izlaganje ljudi ionizirajućem zračenju zbog izvanrednog događaja mora biti smanjeno na najmanju moguću mjeru.

### 6.2 Propisi kojima je regulirana zaštita od ionizirajućeg zračenja

Zaštita od ionizirajućeg zračenja u Republici Hrvatskoj počiva na važećim zakonima:

1. Zakon o radiološkom i nuklearnoj sigurnosti („Narodne novine“ broj 141/13,39/15)
2. Zakon o prijevozu opasnih tvari („Narodne novine“ broj 79/07)

### 6.3 Organizacija zaštite od ionizirajućeg zračenja u Republici Hrvatskoj

Organizacijska infrastruktura zaštite od ionizirajućeg zračenja u Republici Hrvatskoj je prikazana sljedećom shemom:



**Državna uprava**

**VLADA  
REPUBLIKE HRVATSKE**

**DRŽAVNI ZAVOD ZA  
RADIOLOŠKU I NUKLEARNU  
SIGURNOST**

**Ovlaštene ustanove**

**OVLAŠTENI STRUČNI  
TEHNIČKI SERVISI**

**OVLAŠTENE MEDICINE RADA**

**Korisnici**

**MEDICINA**

**INDUSTRIJA**

**VETERINA**

**ZNANOST**

**OSTALO**

## 7. ZAKLJUČAK

Detektori ionizacijskog zračenja su veliki laboratorijski uređaji koji se koriste za otkrivanje širokog spektra čestica. Također se nazivaju i detektorima zračenja, jer su zračenje i nabijene čestice često sinonim. Osnovni princip rada detektora je pretvorba energije zračenja u signal dostupan ljudskoj percepciji.

Možemo reći da su detektori čestica visoko specijalizirani uređaji koji se koriste u jednoj od grana fizike. Mnogi od njih mogu otkriti samo jednu ili nekoliko vrsta zračenja, pa su zbog toga vrlo specifični. Postupno su unapređivani i usavršavani, i njihova primjena je postupno postala sve šira i sve važnija. Danas ne možemo zamisliti bilo kakve životne aktivnosti, poslove i općenito bilo šta što je povezano sa ionizirajućem zračenjem, a da se detektori zračenja ne koriste. Pronalazimo ih kod osoba čija mjesta zaposlenja su nuklearne elektrane, razne medicinske ustanove, u vojnoj industriji, i sl.

Može se također utvrditi da detektori ionizirajućeg zračenja čuvaju život i zdravlje jer očitavanjem jačine zračenja stručne osobe mogu odrediti koje postupke moraju poduzeti da bi se zaštitilo zdravlje i životi ljudi, životinja i cijelog prirodnog okoliša.

## 8. LITERATURA

- [1] <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=51474> pristupljeno 05.03.2022.
- [2] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Ioniziraju%C4%87e\\_zra%C4%8Denje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Ioniziraju%C4%87e_zra%C4%8Denje) pristupljeno 05.03.2022.
- [3] <http://www.nemis.hr/index.php/radioaktivnost/opcenito-o-radioaktivnosti.html> pristupljeno 05.03.2022. u 18:00
- [4] <https://www.google.com/search?q=primjena+zra%C4%8Denja&rlz> pristupljeno 10.03.2022.
- [5] <https://repositorij.vuka.hr/islandora/object/vuka%3A2182/datastream/PDF/view> pristupljeno 06.03.2022.
- [6] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Radioaktivnost> 19.03.2022.
- [7] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Ioniziraju%C4%87e\\_zra%C4%8Denje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Ioniziraju%C4%87e_zra%C4%8Denje) pristupljeno 19.03.2022
- [8] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Bekerel> pristupljeno 19.03.2022.
- [9] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Proporcionalni\\_broja%C4%8D](https://hr.wikipedia.org/wiki/Proporcionalni_broja%C4%8D) pristupljeno 22.03.2022.
- [10] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Vi%C5%A1\\_eanodni\\_proporcionalni\\_broja%C4%8D](https://hr.wikipedia.org/wiki/Vi%C5%A1_eanodni_proporcionalni_broja%C4%8D) pristupljeno 24.03.2022.
- [11] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Scintilacija> pristupljeno 24.03.2022.
- [12] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Ioniziraju%C4%87e\\_zra%C4%8Denje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Ioniziraju%C4%87e_zra%C4%8Denje) pristupljeno 1.4. 2022.
- [13] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Maglena\\_komora](https://hr.wikipedia.org/wiki/Maglena_komora) pristupljeno 04.04.2022.
- [14] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Komora\\_na\\_mjehuri%C4%87e](https://hr.wikipedia.org/wiki/Komora_na_mjehuri%C4%87e) pristupljeno 13.04.2022.
- [15] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Poluvodi%C4%8Dki\\_detektor\\_\(radioaktivnost\)](https://hr.wikipedia.org/wiki/Poluvodi%C4%8Dki_detektor_(radioaktivnost)) pristupljeno 16.04.2022.
- [16] <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=13279> pristupljeno 16.04.2022.
- [17] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Ioniziraju%C4%87e\\_zra%C4%8Denje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Ioniziraju%C4%87e_zra%C4%8Denje) pristupljeno

16.04.2022.

[18] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Dozimetar> pristupljeno 18.04.2022.

[19] [https://www.pmf.unizg.hr/\\_download/repository/RED\\_PREDAVANJA\\_2017\\_18\\_2.pdf](https://www.pmf.unizg.hr/_download/repository/RED_PREDAVANJA_2017_18_2.pdf), pristupljeno 24.04.2022.

[20] Pravilnik o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja (NN 38/2018), pristupljeno 24,04,2022.

[21] [https://www.icrp.org/docs/ICRP\\_Publication\\_103-Annals\\_of\\_the\\_ICRP\\_37\(2-4\)-Free\\_extract.pdf](https://www.icrp.org/docs/ICRP_Publication_103-Annals_of_the_ICRP_37(2-4)-Free_extract.pdf) pristupljeno 25.04.2022.

## 9. POPIS SLIKA

SLIKA 1. Oznaka za radioaktivnost .....	2
SLIKA 2. Maria Skłodowska Curie i Pierre Curie u svom laboratoriju .....	4
SLIKA 3. Slikoviti prikaz gama zračenja .....	6
SLIKA 4. Slikoviti prikaz alfa zračenja .....	7
SLIKA 5. Slikoviti prikaz beta zračenja .....	7
SLIKA 6. Građa atoma .....	9
SLIKA 7. Kratka povijest otkrića zračenja .....	12
SLIKA 8. Primjer Geiger-Müllerova brojača .....	16
SLIKA 9. Proporcionalni brojač .....	18
SLIKA 10. Povlačna komora- jedan oblik višeanodnog proporcionalnog brojača .....	19
SLIKA 11. Gama kamera .....	21
SLIKA 12. Prenosiva ionizacijska komora .....	22
SLIKA 13. Originalna maglena komora napravljena u Cavendishev laboratoriju .....	24
SLIKA 14. Komora na iskre u muzeju fizike, u Rimu .....	25
SLIKA 15. Komora na mjehuriće .....	27
SLIKA 16. Silicijski detektor s površinskom barijerom .....	28
SLIKA 17. Koaksijalni Ge(Li) detektor .....	29
SLIKA 18. Detektor od germanija posebno visoke čistoće ili HPGe detektor .....	29
SLIKA 19. Čerenkovljevo zračenje u nuklearnom reaktoru .....	30
SLIKA 20. Čvrsti detektor nuklearnih tragova CR-39 .....	31
SLIKA 21. Primjer osobnog dozimetra .....	33

## 10. POPIS TABLICA

TABLICA 1. Učinci zračenja na biološke molekule .....	36
TABLICA 2. Letalna i najveća dopuštena doza zračenja .....	37
TABLICA 3. Godišnje granice ozračenja za radnike, pripravnike, studente i stanovništvo.....	38
TABLICA 4. Izloženost zračenju u svakodnevnom životu.....	39