

# Ionizirajuće zračenje i tehničke primjene

---

Ivanek, Monika

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:981602>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-01**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE I TEHNIČKE PRIMJENE**

**Završni rad**

**Monika Ivanek**

**Osijek, 2023.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Osijek, 21.08.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Monika Ivanek
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	4825, 29.07.2020.
<b>OIB Pristupnika:</b>	81401377984
<b>Mentor:</b>	prof. dr. sc. Tomislav Barić
<b>Sumentor:</b>	,
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Ionizirajuće zračenje i tehničke primjene
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rad:</b>	U završnom radu potrebno je izložiti fizikalne osnove nastanka ionizirajuće zračenja. Opisati pojavu prijenosa energije u obliku fotona ili masenih čestica koje imaju dovoljno energije da u međudjelovanju s kemijskom tvari ioniziraju tu tvar. Opisati utjecaj ionizirajućeg zračenja na zdravlje. Opisati mjerne jedinice ionizirajuće zračenja i najčešće korištenje mjerne instrumente. Pri opisu miernih instrumenata za
<b>Prijedlog ocjene završnog rada:</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	21.08.2023.
<b>Datum potvrde ocjene od strane Odbora:</b>	08.09.2023.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 08.09.2023.

**Ime i prezime studenta:**

Monika Ivanek

**Studij:**

Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

4825, 29.07.2020.

**Turnitin podudaranje [%]:**

9

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Ionizirajuće zračenje i tehničke primjene**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Tomislav Barić

i sumentora ,

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.  
Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

---

**SADRŽAJ**

1. UVOD .....	1
1.1. Zadatak završnog rada .....	1
2. RADIOAKTIVNOST .....	2
2.1. Povijest otkrića radioaktivnosti.....	2
2.1. Vrste zračenja.....	4
2.1.1. Alfa-zračenje.....	5
2.1.2. Beta-zračenje.....	6
2.1.3. Gama-zračenje .....	8
3. IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE .....	12
3.1. Mjerne jedinice .....	12
3.1.1. Aktivnost radioaktivnog izvora.....	12
3.1.2. Apsorbirana doza .....	13
3.1.3. Ekvivalentna doza.....	14
3.1.4. Efektivna doza .....	16
3.2. Mjerni instrumenti .....	17
3.2.1. Ionizacijska komora .....	17
3.2.2. Proporcionalni brojač.....	20
3.2.3. Geiger-Müllerov brojač.....	22
3.2.4. Scintilacijski detektori.....	24
3.2.5. Poluvodički detektori.....	27
3.3. Utjecaj ionizirajućeg zračenja.....	31
3.3.1. Stohastički učinci .....	32
3.3.2. Deterministički učinci.....	33
4. PRIMJENE IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA .....	37
4.1. Medicinske primjene.....	37
4.2. Industrijske primjene .....	40
5. MJERENJE IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA .....	45
5.1. Osnovne informacije.....	45
5.2. Radni elementi .....	46
5.3. Princip rada .....	48
5.4. Prijenos podataka na računalo.....	49
5.5. Održavanje i odlaganje .....	50
5.6. Tehnički podaci.....	51
5.7. Mjerenje .....	52
6. ZAKLJUČAK.....	59

---

7. LITERATURA .....	60
PREGLED SADRŽAJA KORIŠTENE LITERATURE .....	68
SAŽETAK .....	70
ABSTRACT.....	70
ŽIVOTOPIS.....	71
PRILOZI .....	72
Popis korištenih oznaka i simbola.....	72

---

## 1. UVOD

U ovom završnom radu opisat će se početak otkrića radioaktivnosti, od X zrake koje su dovele do prvih rendgenskih fotografija do otkrića novih radioaktivnih elemenata i njihovih izotopa koji su omogućili napredak u mnogim industrijskim i medicinskim granama. Zatim će se usmjeriti na ionizirajuće zračenje i njegovu osnovnu podjelu koja uključuje alfa, beta i gama zračenja.

Nakon toga definirat će se mjerne jedinice ionizirajućeg zračenja među kojima se najčešće upotrebljava apsorbirana, efektivna i ekvivalentna doza. Također, opisat će se mjerni instrumenti koji se koriste za mjerenje ionizirajućeg zračenja, njihova građa i princip rada kao i sheme i grafički prikazi. Glavne vrste detektora ionizirajućeg zračenja dijele se na plinske, scintilacijske i poluvodičke detektore. Objasniti će se biološki učinci koji nastaju kao posljedica izlaganja zračenju te mogu biti stohastički i deterministički uzrokujući pritom razne akutne i kronične bolesti koje mogu dovesti do opekline, raka, ali i genetskih mutacija. Na kraju teoretskog dijela obrazložiti će se medicinske primjene ionizirajućeg zračenja koje se očituju u nuklearnoj medicini, radioterapiji i radiologiji te industrijske primjene poput sterilizacije, polimerizacije, uklanjanje statičkog elektriciteta, ali i mnoge druge.

Na samom kraju obaviti će se mjerenje ionizirajućeg zračenja pomoću Geigerovog uređaja za mjerenje zračenja Voltcraft RM-400. Kako bi se mjerenje obavilo, potrebni su radioaktivni materijali, a kao takvi koristiti će se kalijev bikarbonat, beta emiter i prednja mušica za pušku u kojoj se nalazi svjetleća tricijeva ampula.

### 1.1. Zadatak završnog rada

U završnom radu potrebno je izložiti fizikalne osnove nastanka ionizirajućeg zračenja. Opisati pojavu prijenosa energije u obliku fotona ili masenih čestica koje imaju dovoljno energije da u međudjelovanju s kemijskom tvari ioniziraju tu tvar. Opisati utjecaj ionizirajućeg zračenja na zdravlje. Opisati mjerne jedinice ionizirajućeg zračenja i najčešće korištenje mjerne instrumente. Pri opisu mjernih instrumenata za mjerenje ionizirajućeg zračenja opisati građu i fizikalna načela na kojima se zasniva njihov rad, područja primjene, pogrešku i osjetljivost. Opisati tehničke primjene ionizirajućeg zračenja. Izlaganje je potrebno poduprijeti grafičkim prikazima i shemama.

## 2. RADIOAKTIVNOST

### 2.1. Povijest otkrića radioaktivnosti

Radioaktivnost je karakteristika jezgri atoma. Nestabilna atomska jezgra prolazi kroz niz spontanih promjena pri čemu se oslobađa energija u obliku energetske valova ili čestica. Takva promjena naziva se radioaktivni raspad, a čestice koje pri tome nastaju nazivamo radioaktivno zračenje. Radioaktivnost i radioaktivno zračenje postojali su na Zemlji mnogo prije pojave života, no čovječanstvo je ovu pojavu otkrilo tek posljednjih godina 19. stoljeća [1].

Godine 1895. Wilhelm Conrad Roentgen, njemački fizičar, kao i mnogi drugi u to doba proučavao je električna pražnjenja u vakuumskim cijevima ispunjenim raznim plinovima pri vrlo niskim tlakovima. U pokusima s katodnim zrakama, Roentgen je prekrivio cijev crnim papirom i zamračio sobu te otkrio da fluorescentni zastor, pri određenim udaljenostima od cijevi, svijetli ukoliko bi uključio visoki napon između elektroda u cijevi [2]. Upravo tada otkrio je novu vrstu zraka koje je privremeno nazvao X-zrake [2]. Također, otkrio je da zračenje ne samo da može prodrijeti kroz crni papir, već i kroz debele blokove drveta, knjige pa čak i njegove ruke. Testirajući svoju novootkrivenu teoriju, snimio je slike kostiju ruke koje postaju njegove prve rendgenske fotografije. Rendgenski snimak ruke prikazan je na slici 2.1. [3].

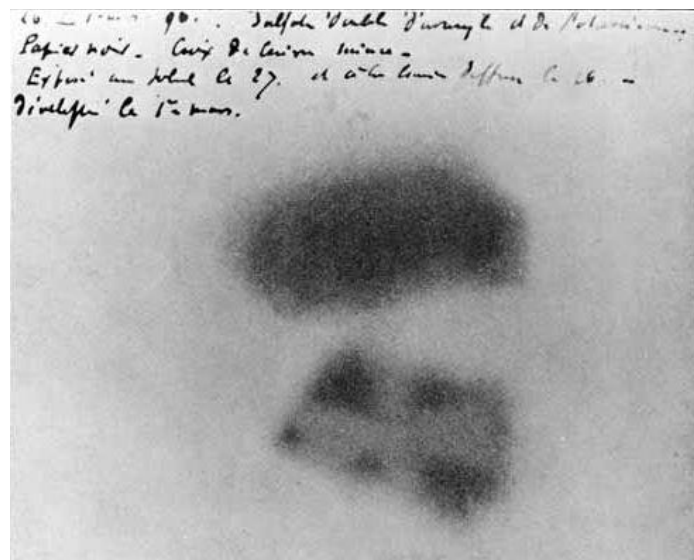


**Slika 2.1.** Rendgenski snimak ruke



Ubrzo nakon otkrića, X-zrake počele su se primjenjivati u medicinskoj dijagnostici. Roentgen je 1901. godine nagrađen prvom Nobelovom nagradom za fiziku kao priznanje za izvanredne zasluge koje je pružio čovječanstvu [4]. Kasnije su X-zrake nazvane rendgenskim zrakama.

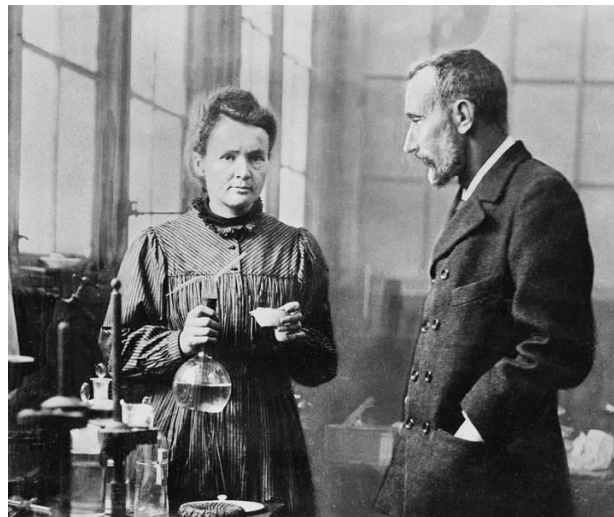
Godinu dana nakon Roentgenova otkrića, Henri Becquerel, francuski znanstvenik, eksperimentirao je sa spojevima koji su mogli emitirati svjetlo nakon izlaganja sunčevoj svjetlosti. Naime, postavio je uranovu sol na fotografsku ploču umotanu crnim papirom za zaštitu od svjetlosti te stavio na prozorsku dasku kako bi spoj urana apsorbirao svjetlosti i počeo svijetliti [5]. Kao što je i očekivao, soli urana uzrokovale su crnjenje ploče unatoč papiru između. Time je potvrdio svoju tezu kojom određene soli urana emitiraju fluorescenciju dok su izložene sunčevoj svjetlosti. Tijekom oblačnog razdoblja, Becquerel nije bio u mogućnosti provoditi svoje eksperimente, stoga je fotografsku ploču i mineral stavio u tamnu ladicu stola. Na njegovo iznenađenje, mineral je ipak ostavio crni trag na ploči iako nije bio izložen sunčevoj svjetlosti [2]. Napravio je daljnja ispitivanja kako bi potvrdio da sunčeva svjetlost uistinu nije potrebna te da uranove soli same emitiraju nevidljivo zračenje. Isprva je pretpostavio da je učinak posljedica dugotrajne nevidljive fosforescencije, no kasnije je otkrio da to ipak nije fosforescencija. Ovim istraživanjem, 1896. godine, otkrivena je radioaktivnost te se danas mjeri u jedinicama bekeleri (Bq) po Henriju Becquerelu [1, 6]. Na slici 2.2. [7] prikazana je Becquerelova fotografska ploča na kojoj se jasno vidi crni trag metalnog križa postavljenog između fotografske ploče i uranove soli.



**Slika 2.2.** Prikaz Becquerelova pokusa

Otkriće radioaktivnosti Henrija Becquerela nadahnulo je Marie i Pierre Curie da nastave istraživati ovaj fenomen [8]. Ispitali su mnoge tvari i minerale tražeći znakove

radioaktivnosti. Marie je dobila uzorke iz geoloških muzeja i utvrdila da je mineral smole radioaktivniji od urana. Bila je to njezina hipoteza da je novi element, znatno radioaktivniji od urana, prisutan u malim količinama u rudi smole. Kako bi potvrdila daljnje otkriće novog elementa uslijedio je proces kemijskog odvajanja i analize [9]. Time je potvrđen novi kemijski element koji je čak 300 puta radioaktivniji od urana. Nazvan je polonij, prema imenu zemlje porijekla Marie Curie (Poljska) [1, 10]. Nedugo nakon toga otkrili su dodatnu radioaktivnu tvar koja se kemijski ponaša gotovo poput čistog barija te su predložili ime radij zbog njegova izrazito jakog intenziteta radioaktivnosti. Godine 1903. Henri Becquerel podijelio je Nobelovu nagradu za fiziku s bračnim parom Curie za otkriće radioaktivnosti [2]. Osam godina poslije, Marie Curie dobila je Nobelovu nagradu za svoja otkrića dotad dva nepoznata elementa u kemiji. Bračni par Curie može se vidjeti na slici 2.3. [11].



**Slika 2.3.** Bračni par Curie

## 2.1. Vrste zračenja

Kako su znanstvenici detaljnije proučavali radioaktivnost, otkrili su da su neki atomi prirodno nestabilni dok su drugi stabilni. Atomi s nestabilnim jezgrama, također poznati pod nazivom radioaktivni atomi, nazivaju se još i radionuklidima [1]. Takvi radioaktivni atomi nastoje postati stabilni te emitiraju čestice i valove visoke energije. Taj proces nazivamo radioaktivni raspad. Razdoblje koje je potrebno za raspad polovice elementarnih čestice ili jezgri promatranog uzorka naziva se vremenom poluraspada [12]. Glavne vrste zračenja koje se emitiraju tijekom radioaktivnog raspada su [2]:

- alfa ( $\alpha$ )-zračenje

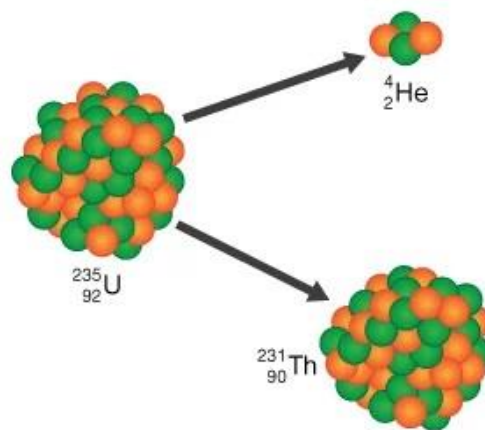
- beta ( $\beta$ )-zračenje
- gama ( $\gamma$ )-zračenje

### 2.1.1. Alfa-zračenje

Alfa zračenje vrsta je radioaktivnog raspada pri kojem neke nestabilne atomske jezgre emitiraju alfa česticu odnosno jezgru atoma helija [13]. Alfa čestice pozitivno su nabijene čestice koje se sastoje od dva protona i dva neutrona. Obično nastaju raspadom najtežih radioaktivnih elemenata kao što su uran-238, radij-226 i polonij-210 [14, 15]. Alfa raspad karakteristično je svojstvo mnogih jezgri s visokim nabojem, to jest jezgri koje sadrže mnogo protona. Simbolički izraz za alfa raspad ima oblik:



pri čemu X označava radioaktivnu jezgru koja se raspada, a Y novonastalu radioaktivnu jezgru čiji se maseni broj (oznaka: A) smanjuje za 4, a broj protona ili atomski broj (oznaka: Z) za 2 uz emitiranje alfa čestice [16]. Alfa raspad možemo vidjeti na primjeru urana-235 koji prikazuje slika 2.4. [17].



**Slika 2.4.** Alfa raspad urana-235

Uran-235 raspada se na torij-231 i alfa česticu te relacija ovog izraza glasi:



Brzina, a samim time i energija alfa čestica kreće se u rasponu 4-10 MeV, no zbog relativno velike mase doseg u zraku ima svega nekoliko centimetara, a u tkivima tek oko 0,03 mm [16]. Učinak alfa čestica na zdravlje najviše ovisi o načinu izlaganja. Alfa zračenje ne predstavlja opasnost ukoliko je izložen vanjski dio tijelo (vanjsko ozračivanje) jer alfa čestice nemaju dovoljno energije da prođu kroz vanjski sloj kože. Međutim, ako dođe do unutrašnjeg ozračivanja, odnosno ulaska u organizam postaje izrazito opasno. Udisanje alfa emitera, kao i gutanje ili apsorpiranje u krvotok, oštećuje osjetljivo živo tkivo te rezultira težim oštećenjima stanice i DNK [15].

Mnogi alfa emiteri prirodno se pojavljuju u okolišu kao već navedeni uran-238 i radij-226 te ostali elementi nastali raspadom urana i torija koji su prisutni u raznim količinama u tlima, stijenkama i vodama. Umjetno proizvedeni alfa emiteri uključuju radioizotope elemenata kao što su plutonij, americij i kurij koji se proizvode u nuklearnom reaktoru [14]. Iako alfa čestice imaju nisku moć prodiranja, još uvijek postoji niz korisnih primjena. Jedna od takvih je detektor dima koji sadrži manje količine americija-241. Dim koji uđe u detektor smanjuje količinu detektiranih alfa čestica i aktivira alarm. Eliminatorsi statičkog elektriciteta za uklanjanje statičkog naboja iz opreme, nuklearne baterije u svrhe svemirskih istraživanja također su jedne od bitnijih primjena. U novije vrijeme istražuju se potencijalne metode alfa zračenja u području radioterapije za liječenje karcinoma [14].

### 2.1.2. Beta-zračenje

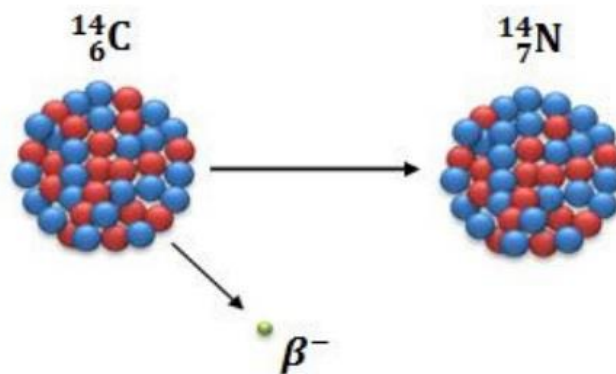
Beta zračenje druga je vrsta radioaktivnog raspada u kojem nestabilna atomska jezgra nastoji postići stabilniju konfiguraciju emitiranjem beta čestice, odnosno brzih elektrona ili pozitrona. Pozitroni su čestice koje se razlikuju od elektrona po suprotnom naboju te predstavljaju antičestice elektrona. Na temelju toga beta zračenje dijeli se na beta minus ( $\beta^-$ ) raspad ili emisiju elektrona i beta plus ( $\beta^+$ ) raspad, odnosno emisiju pozitrona [16].

Do beta minus raspada dolazi kada nestabilna atomska jezgra sadrži višak neutrona. Upravo taj višak raspada se u proton uz istovremeno emitiranje elektrona i antineutrina pri čemu se atomski broj poveća za 1, dok maseni broj ostaje isti [18]. Time se novonastalni element pomiče za jedno mjesto u desno u periodnom sustavu elemenata [16]. Simbolički prikaz beta minus raspada glasi:



gdje  ${}^0_{-1}e$  označava beta minus česticu ( ${}^0_{-1}e = \beta^-$ ), a  ${}^0_0\bar{\nu}$  antineutrino.

Za primjer ćemo uzeti izotop ugljika-14 prikazan na slici 2.5. [16] koji se beta minus raspadom pretvara u dušik-14 i relaciju njihova izraza napisati u obliku:



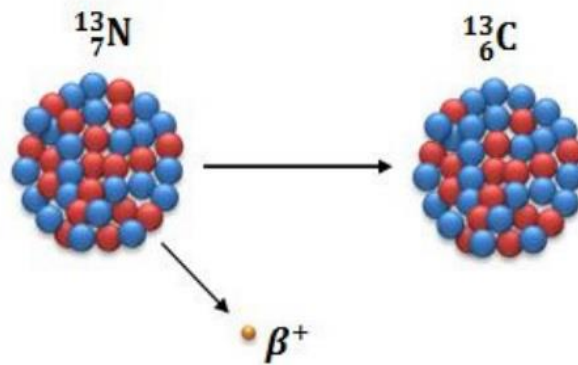
Slika 2.5. Beta minus raspad C-14

Za razliku od beta minus raspada, beta plus raspad ostvaruje se kada nestabilna atomska jezgra posjeduje manjak neutrona. Proton se transformira u neutron uz emisiju pozitrona i neutrina prilikom čega maseni broj ostaje isti, a atomski se broj smanjuje za 1 [18]. Odvija se transmutacija atomske jezgre, odnosno novonastala jezgra u periodnom sustavu pomiče se u lijevo za jedno mjesto [16]. Sukladno tome općeniti izraz glasi:



gdje  ${}^0_{+1}e$  označava beta plus česticu, odnosno  ${}^0_{+1}e = \beta^+$ , a  ${}^0_0\nu$  neutrino.

Primjer beta plus raspada prikazat ćemo dušikom N-13 koji se raspada na ugljik C-13 (Slika 2.6. [16]).



Slika 2.6. Beta plus raspad N-13

Prethodno navedenim izrazom (2-5) ekvivalentno ćemo prikazati ovaj raspad:



Beta čestice prodornije su od alfa čestica, ali ipak manje oštećuju osjetljive žive stanice i DNK. Putuju većim udaljenostima u zraku te ih može smanjiti ili zaustaviti sloj odjeće ili tanki sloj tvari poput aluminijske folije. Neke beta čestice mogu prodrijeti kroz kožu i uzrokovati oštećenja kao što je opekлина kože. Međutim, kao i alfa emiteri, beta emiteri predstavljaju najveću opasnost kada se progutaju ili udahnu [15]. Beta emiteri mogu nastati iz prirodnih i umjetnih izvora radioaktivnosti. Prirodno se javljaju u radioizotopima nastalim raspadom urana, torija i aktinija, dok se umjetni često nalaze u radioaktivnim produktima nuklearne fisije poput stroncija-90 i tricija. Energija emitirane beta čestice obično je puno manja od energije alfa čestice te varira u ovisnosti o vrsti raspada. Beta zračenje može imati korisnu medicinsku primjenu u liječenju raka, ali i pozitronsku emisijsku tomografiju (PET) [19]. Između ostalog, beta čestice koriste se i u industriji pri detekciji debljine tankih materijala poput papira.

### 2.1.3. Gama-zračenje

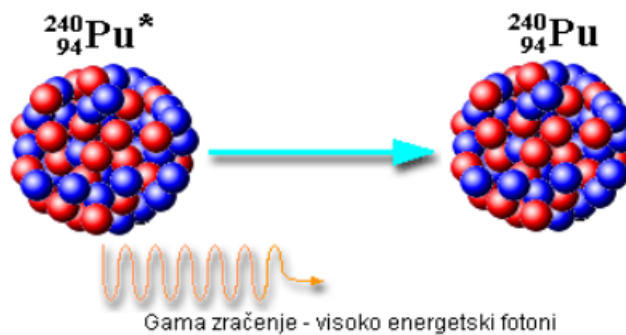
Treća vrsta zračenja, odnosno gama raspad ili emisija gama zračenja, obično prati alfa ili beta zračenje. Za razliku od alfa i beta zračenja, gama zračenje ne sastoji se od brzih nabijenih čestica već je ono elektromagnetske prirode [20]. Često se gama zračenje emitira kao posljedica alfa ili beta raspada koje ostavljaju jezgru u pobuđenom stanju. Prilikom gama

zračenja emitiraju se gama zrake koje nazivamo fotoni. Fotoni nemaju masu niti električni naboj te putuju brzinom svjetlosti. Dok alfa i beta čestice imaju i energiju i masu, gama zrake čista su energija [21]. Upravo zbog toga emisija gama zračenja nema utjecaja na maseni i atomski broj. Izraz kojim se opisuje gama zračenje glasi:



gdje je  ${}^0_0\gamma$  simbol za foton.

Gama zračenje prikazat ćemo na primjeru plutonija-240 (Slika 2.7. [22]) koji se iz pobuđenog stanja vraća u osnovno stanje emitirajući gama zrake, odnosno fotone.

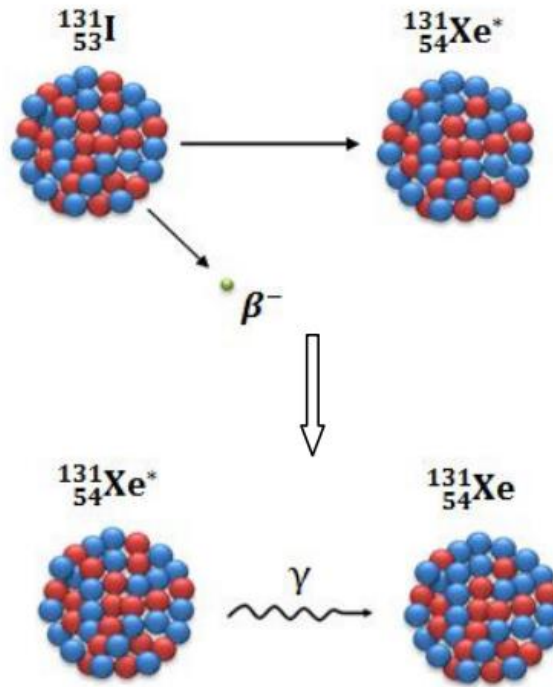


**Slika 2.7.** Gama zračenje Pu-240

Primjer ćemo poduprijeti i odgovarajućom formulom koristeći prethodni izraz (2-7):

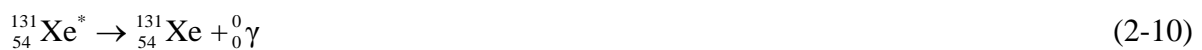


Budući da gama zračenje najčešće prati beta zračenje, za bolje razumijevanje uzet ćemo primjer joda-131 koji je beta-gama emiter. Jod-131 prilikom beta zračenja raspada se na beta česticu i ksenon-131 [23]. No, ksenon-131 je u metastabilnom stanju što znači da još uvijek ima veću energiju nego u stabilnom stanju. Stoga, pobuđeni atomi koji su nastali beta zračenjem, emitiraju gama zrake pri čemu ksenon-131 prelazi u stabilno stanje. Opisani primjer prikazan je na slici 2.8. [16].



Slika 2.8. Raspad joda-131

Izrazi koji potkrepljuju ovaj primjer glase:



gdje izraz (2-9) opisuje beta zračenje, a izraz (2-10) gama zračenje.

U većini slučajeva gama zračenja nastupa odmah nakon alfa ili beta zračenja te se čini kao da se odvija istovremeno, što nije u potpunosti točno. Tipično vrijeme poluraspada u takvim situacijama je nemjerljivo. U drugim slučajevima, uočeno je kašnjenje koje se može pojaviti u vremenskim intervalima od nekoliko sati pa sve do nekoliko dana te je ono mjerljivo. Dva oblika jezgre (osnovno i pobuđeno stanje) koja se tada javljaju nazivaju se nuklearni izomeri [24]. Uzrok tome nije u razlici s obzirom na sastav, već po sadržaju energije.

Izloženost gama zračenju predstavlja opasnost za cijeli organizam. Za razliku od alfa i beta čestica koje može zaustaviti sloj odjeće ili materijala, za zaustavljanje gama zraka potrebne su veće količine betona ili olova [16]. Gama zračenje emitira se iz mnogih



radioizotopa koji se nalaze u prirodnom okruženju kao što su kalij-40 i ugljik-14. Umjetno proizvedeni izvor gama zračenja najčešće nastaju fisijom u nuklearnim reaktorima te nuklearnim nesrećama, primjerice kobalt-60 i cezij 137 [15]. Najčešća upotreba kobalta-60 zbiva se pri sterilizaciji medicinske opreme, pasterizaciji prehrambenih proizvoda i industrijskoj radiografiji. Gama zrake nalaze široku primjenu u tehnikama medicinskog snimanja kao što su gama kamere, ali i u području liječenja raka u terapiji zračenjem [25]. Gama zrake slične su X-zrakama. Međutim, glavna razlika je u načinu na koji nastaju. Zračenje koje emitiraju jezgre nakon radioaktivnog raspada nazivamo gama zračenje dok X-zrake nastaju prilikom sudara elektrona s anodom.

### 3. IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE

#### 3.1. Mjerne jedinice

Kada govorimo o mjerenju ionizirajućeg zračenja razlikujemo mjerenje aktivnosti i mjerenje izloženosti zračenju. Aktivnost zračenja u osnovi označava koliko zračenja emitiraju pojedine radioaktivne tvari, bilo da se radi o česticama ili valovima dok izloženost mjeri učinak zračenja na različite tvari ili ljudsko tkivo koje ga apsorbira. Radioaktivne tvari ne predstavljaju opasnost sve dok su izolirane od okoline. Međutim, prilikom izloženosti ljudskog organizma zračenju isporučuje se doza zračenja, odnosno količina energije koja se razgrađuje u ljudskom organizmu [1]. Izloženost zračenju iskazuje se na nekoliko načina, a to su: apsorbirana doza, ekvivalentna doza i efektivna doza. Godine 1928. usvojena je prva međunarodna mjerna jedinica za ionizirajuće zračenje nazvana roentgen (skraćeno R) po već spomenutom fizičaru W. Roentgen [26]. Jedinica roentgen označavala je količinu zračenja potrebnu za proizvodnju 1 elektrostatske jedinice naboja po 1 centimetru kubnom zraka pod standardnim uvjetima tlaka, temperature i vlažnosti. Korištenje roentgena bilo je moguće samo u slučaju rendgenskog i gama zračenja čija je energija manja od 3 MeV. Prije uvođenja Međunarodnih (SI) jedinica roentgen se koristio za ekspoziciju (skraćeno X) koja se definira kao zbroj svih električnih naboja istog predznaka generiranih u određenoj masi tvari (C/kg) [27]. Tada vrijedi:

$$1 \text{ C/kg} = 3867 \text{ R}$$

##### 3.1.1. Aktivnost radioaktivnog izvora

Prilikom raspada radioaktivnih tvari emitira se zračenje. Upravo ta brzina raspadanja u jedinici vremena naziva se aktivnost radioaktivnog izvora te se označava slovom A i njezin izraz glasi:

$$A = - \frac{\Delta N}{\Delta t} \tag{3-1}$$

gdje N označava broj raspada, a t vrijeme raspada [16]. Predznak minus označava smanjenje broja atomskih jezgara koje se događa pri raspadu. Aktivnost radioaktivnog izvora mjeri se u Međunarodnoj (SI) jedinici i naziva se bekeler (Bq) [2]. Bekeler je izvedena jedinica SI sustava koja je dobila ime po H. Becquerelu i definira se kao:

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ raspad u sekundi}$$

Također, bekeler predstavlja izraz za recipročnu sekundu ( $\text{Bq} = \text{s}^{-1}$ ). U nekoliko zemalja još uvijek se koristi stara mjerna jedinica, curie (skraćeno Ci), nazvana po Marie i Pierre Curie. Jedinica curie definirana je kao aktivnost u jednom gramu radija čiji je broj raspada u sekundi jednak  $3.7 \times 10^{10}$  [6]. Stoga, odnos između bekelara i curia možemo izraziti na sljedeći način:

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

Budući da su brojevi u jedinici bekelera vrlo maleni, u praksi je aktivnost izražena u kilo ( $10^3$ ), mega ( $10^6$ ), giga ( $10^9$ ) i tera ( $10^{12}$ ) bekelera.

Specifična aktivnost radioaktivnog izvora definira se kao aktivnost po jedinici mase ili volumena. Obično je izražena u mjernoj jedinici  $\text{Bq/kg}$ , ali može biti izražena i u  $\text{Bq/l}$  za tekućine,  $\text{Bq/m}^3$  za plinove i zrak ili  $\text{Bq/m}^2$  uslijed nuklearnog eksperimenta [2]. S obzirom na korištenje i mjerne jedinice Ci, specifična aktivnost može se iskazati i jedinicom  $\text{Ci/g}$ .

### 3.1.2. Apsorbirana doza

Količina energije koju ionizirajuće zračenje prenosi jednom kilogramu tvari naziva se apsorbirana doza. Izražava se u mjernoj jedinici koja se naziva gray (skraćeno Gy) nazvanom prema engleskom fizičaru Haroldu Grayu [1]. Stoga, gray možemo objasniti izrazom:

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

koji predstavlja 1 džul (J) energije apsorbirane po 1 kilogramu (kg) tvari. Apsorbirana doza označava se slovom D i izračunava se dijeljenjem energije apsorbirane zračenjem s masom ozračene tvari te se može prikazati formulom:

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} \quad (3-2)$$

Prije uvođenja Međunarodnih (SI) jedinica, ali i danas u nekim zemljama, najčešće u SAD-u, koristi se mjerna jedinica rad [2]. Odnos graya i rada iskazujemo kao:

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}, \text{ odnosno } 1 \text{ rad} = 0.01 \text{ Gy}$$

Ukoliko apsorbiranu dozu podijelimo s jedinicom vremena tijekom kojeg ju je tvar primila dobit ćemo brzinu apsorbirane doze čija je mjerna jedinica izražena u  $\text{Gy/s}$ .

Na temelju mjerenja, apsorbirana energija može se klasificirati na dvije vrste [6]. Prvi tip odnosi se na vanjsku apsorbiranu dozu kojom se mjeri energija zračenja koju apsorbira

bilo koja materija iz vanjskog izvora zračenja, odnosno izvora izvan tijela kao što su X-zrake i gama zrake. To se najčešće odnosi kada se pojedinac podvrgne medicinskom snimanju ili primi vanjsku terapiju zračenjem te se mjeri apsorbirana doza u određenim organima ili tkivima koja su ozračena. Također, vanjska apsorbirana doza ovisi o različitim čimbenicima poput vrste i energije zračenja, udaljenosti od izvora zračenja, trajanje izloženosti, ali i organi i tkiva unutar tijela mogu imati različitu razinu osjetljivosti na zračenje. Druga vrsta mjerenje svodi se na unutarnju apsorbiranu dozu koju apsorbira pojedinac iz izvora zračenja koji se nalazi unutar njegova tijelo. Obično predstavlja dozu zračenja koju su primila organi i tkiva od radioaktivnih materijala koji se udahnu, proguraju ili na drugi način unesu u tijelo [6]. Unutarnja apsorbirana doza može biti posljedica izlaganja radioaktivnim izotopima koji se koriste u medicinskoj dijagnostici i nuklearnim postrojenjima. Procjena unutarnje apsorbirane doze kompleksnija je od vanjske apsorbirane doze jer se u obzir uzimaju i fizikalna i kemijska svojstva radioaktivnog materijala, ali i fiziološke karakteristike pojedinca. Stoga, regulatorne agencije i organizacije izdaju naputke i ograničenja kako bi zaštitili radnike i pacijente od prekomjerne izloženosti zračenju.

### 3.1.3. Ekvivalentna doza

Budući da apsorbirana doza u mjerenjima bioloških učinaka različitih vrsta ionizirajućeg zračenja na ljudska tkiva nije pružala dovoljnu preciznost uveden je pojam ekvivalentne doze. Prvenstveno se za ekvivalentnu dozu upotrebljavao naziv relativna biološka učinkovitost [2]. Koncept ekvivalentne doze temelji se na ideji da različite vrste zračenja imaju različite biološke učinke. Ekvivalentna doza (oznaka H) izračunava se prema sljedećoj relaciji:

$$H = D \times Q \times N \quad (3-3)$$

gdje D označava apsorbiranu dozu, Q težinski faktor ili faktor kvalitete, a N umnožak svih ostalih težinskih faktora koji bi mogli korigirati potencijalno štetne biološke učinke apsorbirane doze D [28].

Međunarodna (SI) jedinica kojom se mjeri ekvivalentna doza naziva se sievert (skraćeno Sv) u čast švedskog fizičara Rolf Sieverta [1]. Sievert predstavlja umnožak apsorbirane doze (Gy) i bezdimenzionalnog faktora kvalitete Q. Stoga, vrijedi sljedeće:

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$$

Tablica 3.1. [29] prikazuje količinu primljene ekvivalentne doze u jednoj godini izražena u sievertima za određene primjere.

**Tablica 3.1.** Godišnja ekvivalentna doza

	<b>Godišnja ekvivalentna doza</b>
Stanovanje u blizini nuklearnih elektrana	0,0001-0,01 mSv
Stanovanje u blizini termoelektrana na ugljen	0,0003 mSv
Kozmičko zračenje (iz atmosfere) na razini mora	0,24 mSv
Kozmičko zračenje (s površine zemlje)	0,28 mSv
Prirodna radioaktivnost	0,40 mSv
Pozadinsko zračenje u Zagrebu	1,14 mSv
Atmosferski utjecaj	2 mSv
Radnici u nuklearnim elektranama	20 mSv
Pušenje 30 cigareta na dan	60-160 mSv

Mjerna jedinica koja se upotrebljavala prije sieverta bila je rem (*engl.* Rentgen Equivalent for Men) te je sto puta manja jedinica nego Sv:

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

Budući da su sievert i rem poprilično velike jedinice za određene upotrebe, često se zamjenjuju manjima, odnosno milisievertima (mSv) [2].

Ionizirajuće zračenje može biti u obliku elektromagnetskog zračenja (X-zrake i gama zrake) ili u obliku subatomske čestice (alfa i beta čestice, protoni, neutroni). X-zrake i gama zrake obično su rijetko ionizirajuće jer proizvode brze elektrone koji uzrokuju tek nekoliko ionizacija pri prolasku kroz stanicu. Budući da se brzina prijenosa energije zove linearni prijenos energije (LPE), X i gama zrake nazivamo niskim LPE zračenjem [30]. Analogno tome, teže čestice koje prenose više energije po jedinici duljine nazivaju se visokim LPE zračenjem. Težinski faktor (Q) ovisi o LPE određenih vrsta zraka te su neke specifične vrijednosti prikazane u tablici 3.2. [31].

**Tablica 3.2.** Specifične vrijednosti težinskog faktora

Vrsta zračenja	Težinski faktor (Q)
X-zrake, gama zrake	1
Beta čestice > 0.03 MeV	1
Beta čestice < 0.03 MeV	1,7
Alfa čestice	20

### 3.1.4. Efektivna doza

Za razliku od apsorbirane i ekvivalentne doze koje su usredotočene na biološke učinke zračenja na pojedine organe ili tkiva, efektivna doza pruža sveobuhvatniju procjenu ukupnog rizika od zračenja [28]. Pri tome uzima se u obzir različite osjetljivosti različitih organa na oštećenja izazvana zračenjem. Kako bi se izračunala efektivna doza (oznaka E) potrebno je ekvivalentnu dozu pomnožiti faktorom težine za određeni organ ili tkivo i time dobijemo relaciju koja glasi:

$$E = \sum_T w_T H_T \quad (3-4)$$

gdje  $w_T$  predstavlja faktor težine, a  $H_T$  ekvivalent doze u tkivu. No, ukoliko efektivnu dozu želimo izraziti preko apsorbirane doze, tada će relacija uključivati dva različita faktora, faktor kvalitete zračenje ( $w_R$ ) i težinski faktor tkiva ( $w_T$ ) [6]:

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad (3-5)$$

Mjerna jedinica efektivne doze jednaka je kao i jedinica ekvivalentne doze, odnosno sievert. Koncept učinkovite doze razvio je profesor Wolfgang Jacobi 1975. godine, a od njegovog usvajanja od strane Međunarodne komisije za radiološku zaštitu (*engl.* ICRP - International Commission on Radiological Protection) igra bitnu ulogu u radiološkoj zaštiti [32]. Naziv efektivna doza zamijenio je naziv ekvivalent efektivne doze 1991. godine. ICRP vrijednosti faktora težine iz 2007. godine prikazane su u tablici 3.3. [33]. Tijelo je podijeljeno na 15 različitih organa svaki s faktorom težine  $w_T$ . Ukoliko se zbroje svi faktori težine, ukupan iznos iznosi 1 ili 100%. Jedan organ ili tkivo spada pod ostalo koji se koristi za prostatu ili maternicu.

**Tablica 3.3.** Faktori težine tkiva

Organ ili tkivo	Težinski faktor tkiva $w_T$
Koštana srž	0,12
Debelo crijevo	0,12
Pluća	0,12
Želudac	0,12
Dojke	0,12
Ostalo	0,12
Gonade	0,08
Mjehur	0,04
Ždrijelo	0,04
Jetra	0,04
Štitnjača	0,04
Površina kosti	0,01
Mozak	0,01
Koža	0,01
Žlijezde slinovnice	0,01
<b>Ukupno</b>	<b>1</b>

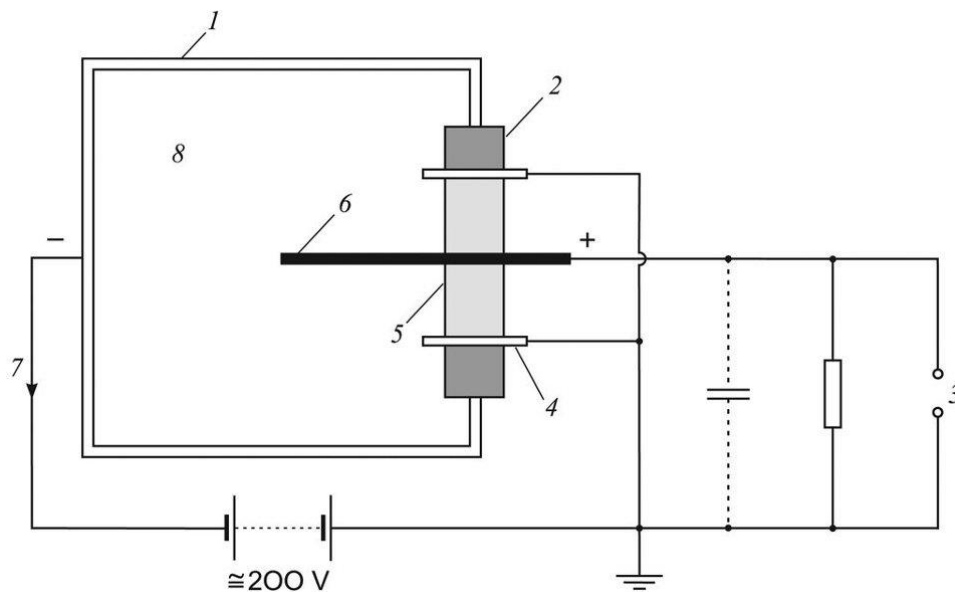
Uz već definirane dozne jedinice, postoje i drugi modeli pri zaštiti od zračenja. Jedan od takvih je kolektivna efektivna doza koja je zbroj svih pojedinačnih efektivnih doza populacije ili skupine ljudi. Mjerna jedinica koja se koristi za kolektivnu dozu je osoba-sievert (skraćeno osoba-Sv) ili ponekad čovjek-sievert. Druga vrsta, predana (predviđena) doza označava apsorbiranu dozu tijekom određenog vremenskog razdoblja, obično 50 godina [2]. Kada radioaktivni materijal uđe u tijelo, njegova radioaktivnost se s vremenom smanjuje, što je posljedica fizičkog raspadanja, ali i bioloških učinaka.

## 3.2. Mjerni instrumenti

### 3.2.1. Ionizacijska komora

Ionizacijska komora vrsta je detektora zračenja namijenjena za mjerenje ionizacije i kvantificiranje količine ionizirajućih čestica u danom okruženju. Predstavlja najjednostavniji model plinovito ionizacijskog detektora čiji se rad temelji na principu ionizacije, odnosno nastajanju iona i elektrona u određenom volumenu plina [20]. Kako bi se ostvario proces ionizacije čestica mora prenijeti količinu energije koja je jednaka energiji ionizacije molekule plina. U većini plinova, energija ionizacije iznosi između 10 i 20 eV [34]. Osnovni

ionizacijski detektor sastoji se od zatvorene cilindrične komore koja je ispunjena odgovarajućim plinom koji se može lako ionizirati. Plin treba biti kemijski stabilan i inertan kako se ne bi stvorio kemijski spoj te se kao takav najčešće upotrebljava argon [35]. Kada foton ili nabijena čestica uđu u komoru, pretvaraju neke od molekula plina u pozitivne ione i elektrone te tako proizvode parove elektron-ion. Zatim, elektroni se pomiču prema pozitivnom polu (anodi), a ioni prema negativnom polu (katodi). Pomicanje naboja uzrokuje signale na elektrodama koji stvaraju male struje. Tako proizvedena struja može se izravno mjeriti galvanometrom [20]. Osim proizvodnje ionskih parova, u komori se događa i rekombinacija suprotno nabijenih elektrona u neutralne atome ili molekule. Ovo daje izlazni signal koji odgovara manjem broju parova elektron-ion nego što se proizvodi u plinu. Prosječna energija potrebna za stvaranje para elektron-ion je  $30 \pm 10$  V, uz slabu ovisnost o korištenom plinu i energiji upadne čestice [36]. Slika 3.1. [37] prikazuje grafičku shemu ionizacijske komore pri čemu broj 1 označava cilindričnu komoru (katoda), 2 vanjski izolator, 3 izlaz u pojačalo, 4 zaštitni prsten, 5 unutrašnji izolator, 6 anoda, 7 električna struja, i 8 plin.

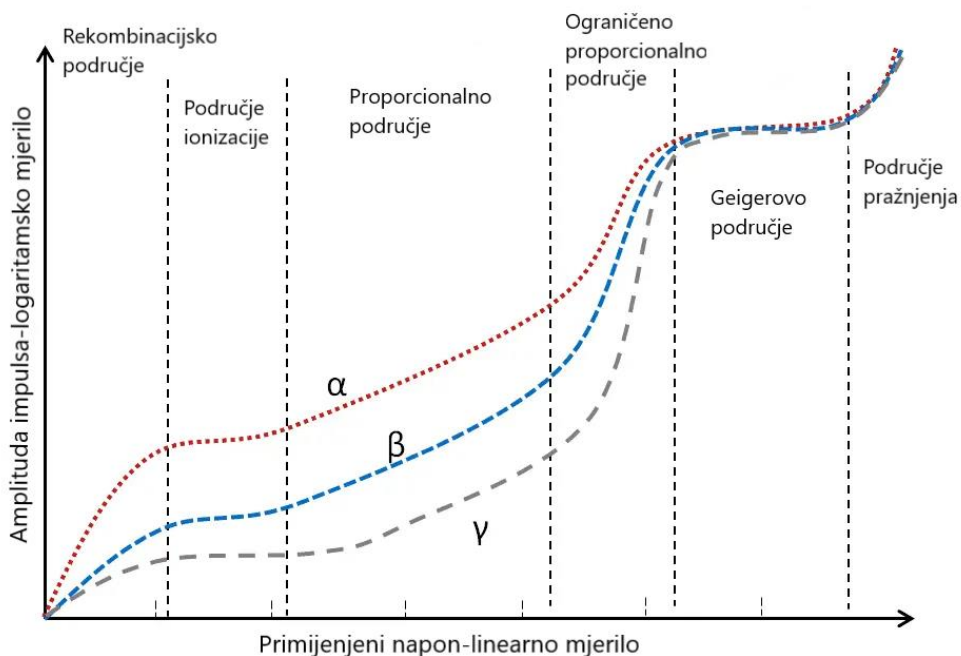


**Slika 3.1.** Grafički prikaz ionizacijske komore

Odziv ionizacijske krivulje uvelike ovisi o naponu koji se primjenjuje između vanjske elektrode (katode) i središnje elektrode (anode). Kada je razlika napona između elektroda mala, elektroni i ioni mogu se rekombinirati ubrzo nakon što su proizvedeni. Raspon napona u kojem se to događa naziva se rekombinacijsko područje. Kako se razlika napona povećava,



jače električno polje brže razdvaja naboje te se ioni kreću brže i rekombinacija na kraju postane zanemariva [38]. Dobiva se signal koji prikazuje ukupnu količinu proizvedene ionizacije te se takvo područje zove područje ionizacije i u njemu normalno radi ionizacijska komora. Daljnjim povećanjem napona (proporcionalno područje), broj iona na elektrodi proporcionalan je energiji zračenja položenoj u volumen plina, odnosno početno proizvedenoj ionizaciji [2]. Ako se koristi vrlo visok napon tada se prelazi u Geigerovo područje u kojem energija ionizacijskih elektrona raste tako da može ionizirati više atoma i time osigurava više oslobođenih elektrona. To rezultira proizvodnjom više parova elektron-ion i na kraju dovodi do pražnjenja. Opisana područja i odziv signala na gubitak ionizacije kao funkcija nametnutog napona prikazana su na slici 3.2. [39].



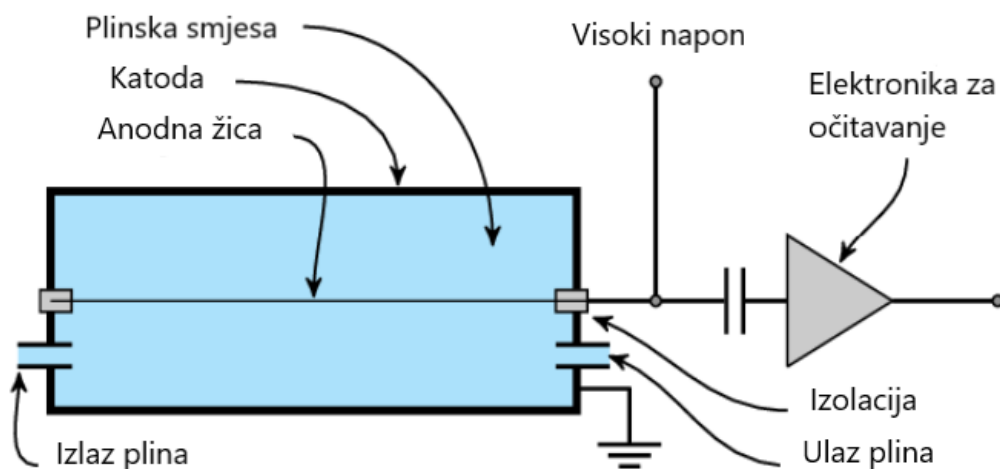
**Slika 3.2.** Područja plinskih ionizacijskih detektora

Jedna od najvažnijih primjena ionizacijskih komora je mjerenje emanacije, inertnog plina, čiji su svi izotopi alfa-emiteri. Emanacija se kao takva uvodi u plinski prostor ionizacijske komore. Ionizacijske komore često se koriste za mjerenje intenziteta gama zraka zbog izvora izvan instrumenta [20]. Važno je da se ionizacijske komore redovito kalibriraju kako bi se održala njihova točnost i pouzdanost. Male koncentracije nečistoća u detektorskom mediju mogu uzrokovati gubitak elektronskog signala [35]. Detektori plina u potpunosti su

zamijenili ranije detektore koji su koristili vizualne tehnike poput maglene komore i komore s mjehurićima. No, danas se najčešće upotrebljavaju elektronički detektori.

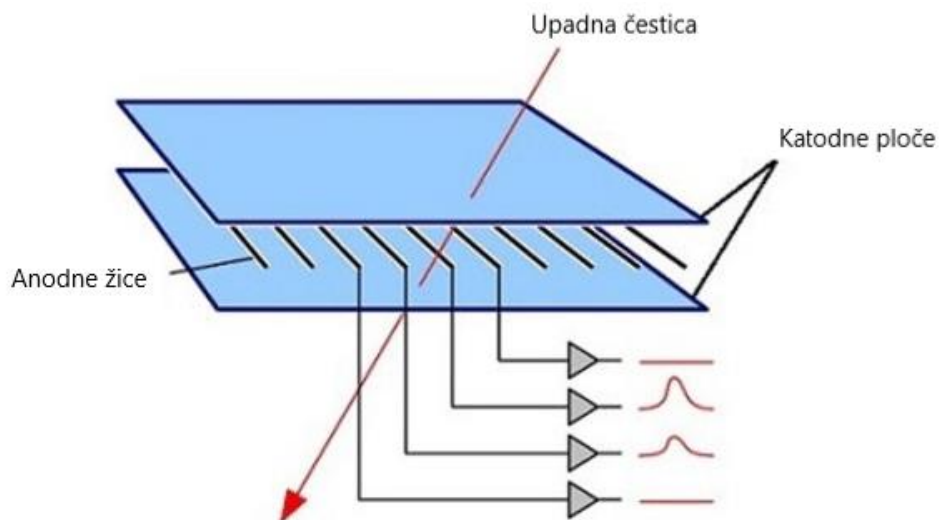
### 3.2.2. Proporcionalni brojač

Proporcionalni brojač unaprijeđena je vrsta ionizacijske komore koja služi za brojanje ionizirajućih čestica i mjerenje njihove energije. Specifična karakteristika proporcionalnih brojača temelji se na umnažanju (multiplikaciji) plina koja omogućava mnogo jače izlazne impulse nego u ionizacijskim komorama. Povećanjem napona, plinoviti proporcionalni brojači, izlaze iz područja rada ionizacijske komore i prelaze u proporcionalna područja čija je jakost električnog polja reda veličine 10<sup>4</sup>-10<sup>5</sup> V/cm [35]. Rad na višim električnim poljima uzrokuje znatno ubrzanje elektrona oslobođenih tijekom sudara. Oslobođeni parovi elektron-ion u primarnoj ionizaciji u takvom polju dobivaju dovoljno veliku energiju što izaziva sekundarnu ionizaciju. Povećanje pojačanja uzrokovano sekundarnom ionizacijom naziva se Townsendova lavina [20, 36]. U proporcionalnom brojaču lavinski proces završava sudarom elektrona s anodom. Ukupan broj proizvedenih ionskih parova rast će s jakošću polja. Osnovna struktura proporcionalnog brojača sastoji se od komore ispunjene plinom cilindričnog oblika sa središnjom žičanom anodom okruženom cilindričnom katodom. Komora je obično ispunjena mješavinom plinova, najčešće plemenitim plinom poput argona ili helija, zajedno s malom količinom plina za gašenje poput metana ili etana [36]. Na slici 3.3. [40] prikazan je shematski prikaz proporcionalnog brojača.



**Slika 3.3.** Shematski prikaz proporcionalnog brojača

Otkriće Georgesa Charpaka i njegovih suradnika da anodne žice raspoređene u ravnini između para paralelnih katodnih ploča djeluju kao neovisni detektori omogućio je razvoj višeanodnog proporcionalnog brojača. Pravilo je imati ravninu anodnih žica precizno postavljenih s razmacima žica obično oko 2 mm [36]. Takve se ravnine smještaju između dvije slične katodne ravnine pri čemu razmak između ravnine anode i katode treba biti manje od 1 cm. Izvana su ravnine obložene prozorima od tankog lima te je područje između elektroda ispunjeno plinom. Kada ionizirajuće zračenje uđe u komoru, ono ionizira plin i stvara parove elektron-ion. Elektroni lebde prema pozitivno nabijenim anodnim žicama, dok pozitivni ioni lebde prema negativno nabijenim katodnim žicama. Kako se elektroni približavaju anodnim žicama, podvrgavaju se plinskom pojačanju sličnom proporcionalnom brojaču, stvarajući lavinu elektrona na svom putu. Mjerenjem naboja na susjednim anodnim žicama može se odrediti položaj međudjelovanja zračenja duž ravnina žica i stoga se anodne žice mogu koristiti za lokaliziranje položaja bilo koje nabijene čestice [35]. Nakon ovoga otkrića razlučivost proporcionalnih brojača znatno je poboljšana. Slika 3.4. [41] predstavlja višeanodni proporcionalni brojač.



**Slika 3.4.** Višeanodni proporcionalni brojač

Bolju prostornu razlučivost postiže se drift komorom pri čemu se nastoji osigurati konstantno električno polje u svakoj ćeliji u smjeru poprečnom na normalan upad [36]. U praksi se to postiže ugradnjom dodatnih žica između anodnih žica. Proporcionalni brojači koriste se pri mjerenju alfa čestica. Prednost pri mjerenju alfa čestica gdje je prisutno beta i

gama zračenje je u tome što proporcionalni brojači ne detektiraju prisutnost istih te instrumenti mogu primati veće impulse. U slučaju mjerenja beta čestica to nije moguće te se kao spektrometar ne upotrebljava, odnosno upotrebljava se samo pri brojanju [6]. Proporcionalni brojači kao i ionizacijska komora razlikuju zrake različitih energija. Stoga, svoju primjenu pronalaze u industriji prilikom razlikovanja zračenja koji nastaju od različitih nuklida i imaju različitu energiju [20].

### 3.2.3. Geiger-Müllerov brojač

Geiger-Müllerov brojač najčešća je korištena vrsta plinovitog detektora. Ime je dobio po njemačkom fizičaru Hansu Geigeru koji ga je izumio i zajedno sa svojim studentom Waltherom Müllerom unaprijedio početkom 20. stoljeća [2, 6]. Povećanjem napona, izlazi se iz područja rada proporcionalnih brojača i prelazi se u područje ograničene proporcionalnosti, odnosno izlazni signal više nije proporcionalan broju proizvedenih ionskih parova. Daljnje povećanje napona uzrokuje prelazak u Geiger-Müllerovo područje u kojem rade i sami Geigerovi brojači [36]. Primjer jednog Geigerovog brojača prikazan je slikom 3.5. [42].



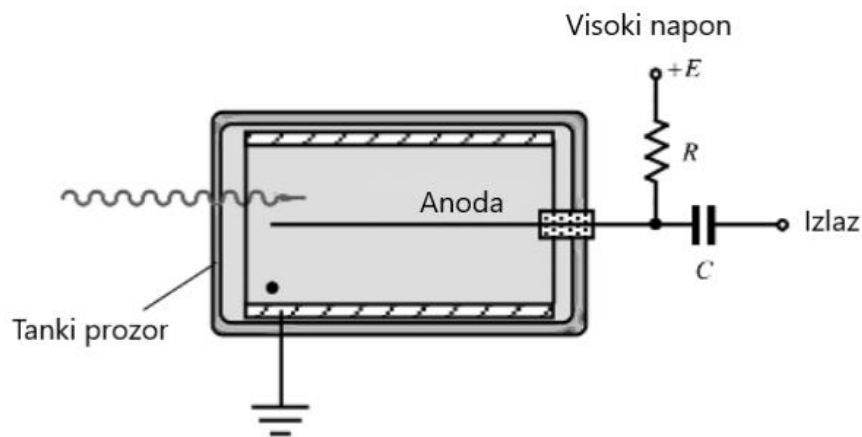
Slika 3.5. Geiger-Müllerov brojač

Kao i kod ionizacijske komore i proporcionalnih brojača, osnovna struktura Geiger-Müllerovog brojača sastoji se od plinom ispunjene cijevi sa središnjom žičanom anodom i

cilindričnom katodom koja okružuje anodu [2]. Cijev je obično napunjena plemenitim plinom kao što su helij ili argon. U svrhu gašenja, plinu se dodaje komponenta koja sprječava ponovno uključivanje brojača nakon detekcije koje može uzrokovati više impulsa umjesto željenog [34]. Gašenje se može postići na nekoliko načina, a to su [34]:

- kratkotrajno smanjenje visokog napona primijenjenog na cijev,
- korištenje otpornika visoke impedancije u seriji s anodom i
- dodavanje plina za gašenje u koncentracijama od 5-10% [34].

Također, mnoge organske molekule poput etil alkohola i etil formata mogu poslužiti kao plin na gašenje. Dijelovi Geiger-Müllerovog brojača prikazani su na slici 3.6. [34].



**Slika 3.6.** Krug Geiger-Müllerovog brojača pri čemu • označava plin

Bitna značajka Geiger-Müllerovog brojača je njegova sposobnost da postigne fenomen koji se naziva multiplikacija plina ili Geiger-Müllerovo pražnjenje gdje se u kratkom vremenskom razdoblju proizvodi veliki broj elektrona. Jedan izvorni elektron stvara lavinu u kojoj nastaju sekundarni ioni, ali i pobuđene molekule plina koje se vraćaju u svoje izvorno stanje putem emisije energije u obliku ultraljubičastih (UV) fotona. Takav UV foton igra bitnu ulogu u lančanoj reakciji jer kada stupi u interakciju, oslobađa se novi elektron koji može migrirati prema anodi i pokrenuti novu lavinu. Sekundarni ioni se stvaraju u cijelom cilindričnom području umnožavanja koje okružuje žicu anode [34]. Pražnjenje raste i obavlja cijelu žicu anode sve dok Geigerovo pražnjenje jednom ne dosegne određenu razinu i konačno ne prekine lančanu reakciju. Strujni impuls Geigerovog brojača uvijek je iste

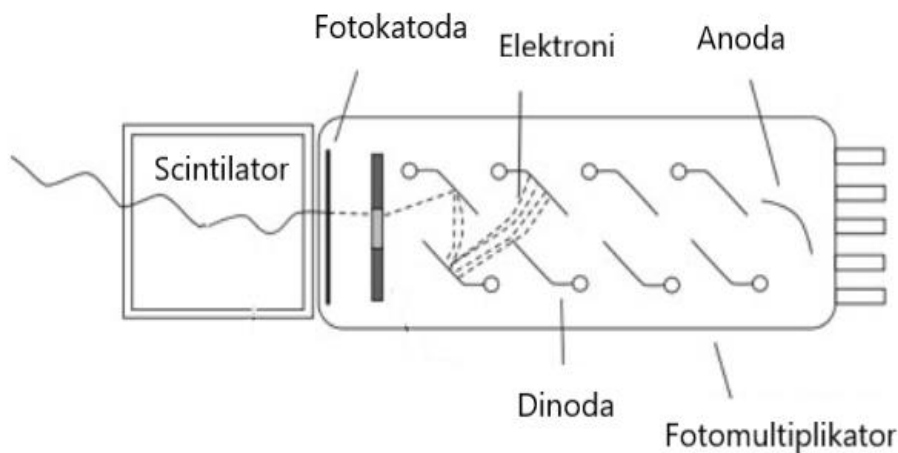
amplitude. Zbog toga Geigerov brojač predstavlja samo indikator zračenja jer se gubi sva informacija o ionizirajućoj energiji [34].

Iako je Geigerov brojač koristan za mjerenje ionizirajućeg zračenja te može detektirati alfa, beta i gama zračenje, ipak ima nekoliko nedostataka. Naime, nema nikakvih informacija o vrsti zračenja ili njegovoj energiji koja je uzrokovala impuls. Stoga, nemoguće je razlikovati impulse koji proizlaze iz zračenja koje je emitirao određen uzorak i impulse koji su nastali zbog nečistoća u građevinskim materijala ili okolini [20]. Zatim, zbog velike lavine izazvane ionizacijom, Geigerovom brojaču treba dugo vremena za oporavak između uzastopnih impulsa, pa ima znatno mrtvo vrijeme, što znači da se ne može koristiti za visoko brojanje stope [35]. Učinkovitost Geigerovog brojača za gama zrake veći je za one cijevi čije su stjenke katode od materijala s visokim atomskim brojem poput katode od bizmuta ( $Z = 83$ ). Takve katode korištene su za gama detekciju u kombinaciji s plinovima visokog atomskog broja (ksenon i kripton) koji daju učinkovitost brojanja do 100% ukoliko je energije fotona ispod 10 keV [34].

### **3.2.4. Scintilacijski detektori**

Scintilacijski brojači uređaji su koji emitiraju svjetlost kada je scintilator ozračen ionizirajućim zračenjem. Takvu pojavu emitiranja dio energije u obliku vidljive svjetlosti nazivamo luminiscencija. Bitna karakteristika scintilatora očituju se u velikoj izlaznoj svjetlosti i brzom emisiji svjetlosti [34]. S obzirom na sastav, scintilatori se mogu podijeliti u dvije glavne vrste, a to su organski scintilatori i anorganski scintilatori. Organski scintilatori sastoje od organskih molekula ili spojeva poput antracena, benzena ili naftalena. Imaju brzo vrijeme raspada te su zbog toga prikladniji za korištenje pri višim energijama. Budući da anorganski spojevi proizvode više svjetlosti od organskih spojeva, bolji su za primjene u okruženjima s niskom energijom. Anorganski su također osjetljiviji, ali znatno sporiji, dok su organski brži, ali daju manje svjetla. Anorganski spojevi sastoje se od kristalnih ili amorfni anorganskih materijala kao što su natrijev i cezijev jodid [35]. Iako scintilatori emitiraju vidljivu svjetlost, ona je ipak jako slaba te se ne može detektirati golim okom. Upravo zbog takvog niskog intenziteta svjetlosti, scintilator se koristi s fotomultiplikatorskom cijevi koja pretvara fotonski signal u električni impuls do razine koju je moguće detektirati [28]. Iako fotomultiplikator svojim nazivom predstavlja multiplikator fotona, u stvarnosti je on multiplikator elektrona jer se unutar fotomultiplikatorske cijevi nalaze samo elektroni te

nema fotona. Fotomultiplikator je uređaj koji se sastoji od nekoliko komponenti, fotokatode, anoda i nekoliko dinoda. Prednji kraj sadrži fotokatodu koja služi za pretvaranje fotona u elektrone putem fotoelektričnog efekta te se održava na potencijalu uzemljenja [34]. Zatim, nakon fotokatode slijedi niz dinoda svaka na većem potencijalu kako bi privukla elektrone od prethodne dinode. Dinode ubrzavaju početne elektrone do sljedećeg stupnja i umnožavaju ih na svakoj dinodi dok se ne dođe do konačne dinode. Posljednja komponenta u cijevi je anoda koja ima najveći pozitivni potencijal, reda veličine i do nekoliko tisuća volti. Sve komponente omotane su u staklenu vakuumsku cijev koja može sadržavati i neke dodatne elemente kao što je elektroda za fokusiranje ili štitovi [34]. Izlazni impuls najčešće se uzima s anode ili zadnje dinode te je linearno proporcionalan količini svjetlosti koja padne na fotokatodu. Obično mu treba nekoliko nanosekundi kako bi došao zbog različitih puteva i brzina prolaska elektrona. Ukupno pojačanje može doći čak do milijun s 9 uobičajenih dioda [34, 43]. Opisani dijelovi scintilacijskog detektora vide se na slici 3.6. [44].



**Slika 3.6.** Shematski prikaz scintilatora s fotomultiplikatorom

Idealan scintilacijski materijal trebao bi imati nekoliko svojstva [34]:

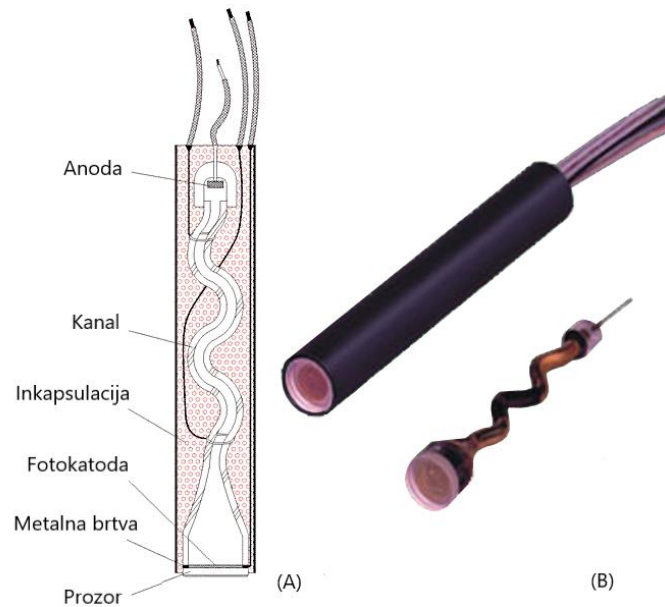
- Kinetičku energiju nabijenih čestica trebao bi pretvoriti u detektabilnu svjetlost s visokom učinkovitošću [34].
- Pretvorba treba biti linearna, odnosno proizvedena svjetlost trebala bi biti proporcionalna ulaznoj energiji u širokom dinamičkom rasponu [34].

- Postluminiscencija (vrijeme raspada svjetlosti) treba biti kratka kako bi se omogućila brza detekcija [34].
- Indeks loma materijala trebao bi biti blizu indeksa stakla kako bi se omogućilo učinkovito optičko spajanje svjetla na fotomultiplikatorsku cijev [34].

Glavna primjena scintilacijskih uređaja je u mjerenju gama zračenja gdje pružaju bolje mogućnosti nego mjerenje s Geigerovim brojačem. Za mjerenje gama zraka visoke energije potrebno je koristiti najdeblji sloj scintilatora kako bi se postigla zadovoljavajuća apsorpcija gama zraka. Za mjerenje alfa i beta zračenja, kao i X-zraka i gama zrake niske energije mogu se koristiti tanji slojevi. Također, scintilacijski uređaji korisni su pri spektrometriji gama zraka za identifikaciju radionuklida [2, 20].

Evolucija klasične fotomultiplikatorske cijevi dovela je do razvoja novog dizajna koji se naziva kanalni fotomultiplikator (*engl.* CPM – Channel Photomultiplier). Kao i u slučaju fotomultiplikatorske cijevi, svjetlost osvjetljava poluvodljivu fotokatodu koja se nalazi na ulaznom prozoru. Svjetlost se u CPM-u unutar fotokode pretvara u fotoelektrone pomoću fotoelektričnog efekta. Fotoelektroni ubrzavaju u vakuumu u smjeru prema anodi preko jakog električnog polja. Na putu do anode elektroni moraju proći kroz tanki, savijeni, poluvodljivi kanal umjesto strukture dinoda [34]. Svaki put kad elektroni udare u stijenku kanala, nekoliko sekundarnih elektrona se emitira s površine. Sekundarni elektroni nastavljaju ubrzavati niz kanal te udaraju o površinu kanala i stvaraju još više sekundarnih elektrona. Time dolazi do umnažanja sekundarnih elektrona većim od 100 milijuna što rezultira efektom lavine. Rezultirajuća struja očitava se na anodi. CPM detektor obložen je materijalom za kapsuliranje te je kompaktniji za razliku od klasičnog PM-a. Slika 3.7. [34] prikazuje vanjski i unutrašnji dio kanalnog fotomultiplikatora.

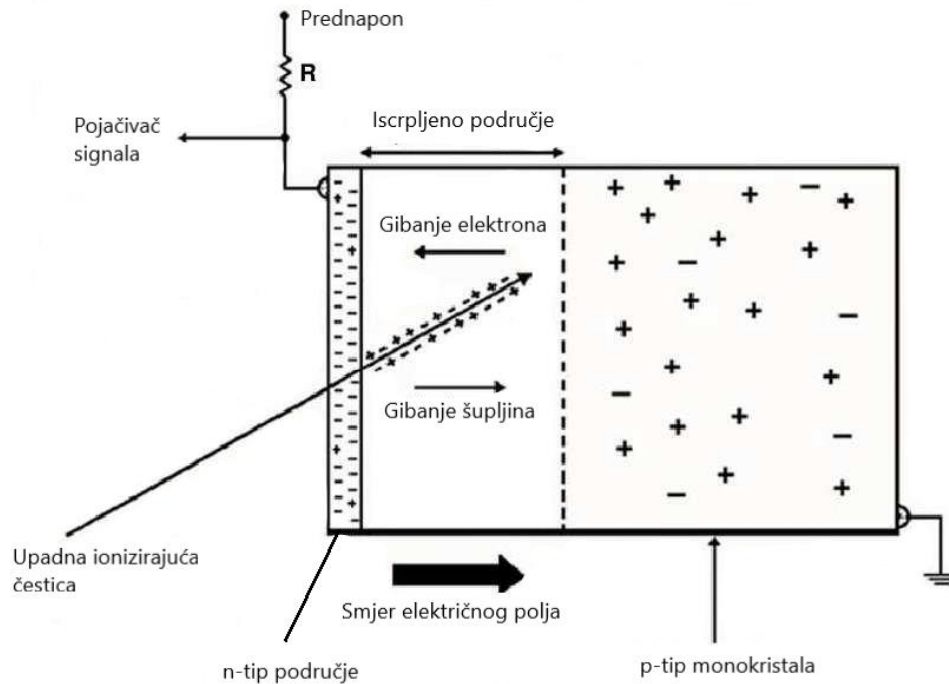




**Slika 3.7.** Kanalni fotomultiplikator: unutrašnji presjek (A) i vanjski dio obložen inkapsulacijom lijevo i bez inkapsulacije desno (B)

### 3.2.5. Poluvodički detektori

Poluvodički detektori su detektori zračenja u čvrstom stanju koji koriste poluvodičke materijale za otkrivanje i mjerenje ionizirajućeg zračenja. Rade na sličnom principu kao i ionizacijske komore, samo umjesto parova elektron-ion u igri su parovi elektron-šupljina. Prilikom ulaska ionizirajućeg zračenja u poluvodič, stvaraju se parovi elektron-šupljina i pri tome se ioniziraju atomi ili molekule u materijalu. Elektroni i šupljine se skupljaju na elektrodama stvarajući električni signal koji je proporcionalan gubitku energije upadne nabijene čestice [36]. Shematski prikaz poluvodičkog detektora prikazan je na slici 3.8. [45].



**Slika 3.8.** Shematski prikaz poluvodičkog detektora

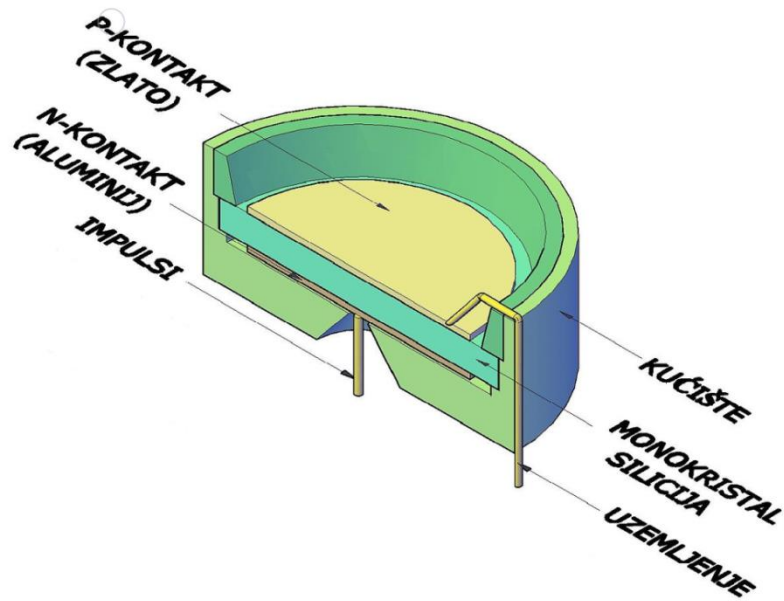
Uobičajeni materijali koji se koriste u poluvodičkim detektorima visoke rezolucije uključuju kristale silicija (Si) i germanija (Ge). Silicijski detektori male su veličine i relativno niske gustoće te ih je neprikladno upotrebljavati za spektrometriju gama zraka. Zbog toga samo se kristali germanija na temperaturama tekućeg dušika ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) koriste kao detektori za spektrometriju gama zraka visoke razlučivosti [6]. Jedan od osnovnih razloga koji omogućava poluvodičkim kristalima da funkcioniraju kao detektori ionizirajućeg zračenja visoke razlučivosti je njihova visoka otpornost na niske temperature. Široka energija zabranjenog pojasa također igra važnu ulogu jer smanjuje utjecaj nečistoća zbog kojih struje curenja mogu postati dovoljno velike da detektor učine beskorisnim [6]. Prilikom izrade detektora u čvrstom stanju potrebno je formirati najmanje dva kontakta preko poluvodičkog materijala koji se spajaju na izvor napon. Upotreba germanija i silicija tada nije praktična zbog previsoke struje curenja uzrokovane relativno niskim otporom spomenutih materijala. Stoga, detektori su proizvedeni s blokirajućim spojevima koji imaju obrnuti prednapon kako bi se smanjila struja curenja [34]. Poluvodička dioda dobro provodi, odnosno ima mali otpor ukoliko je njezina anoda (p strana spoja) spojena na pozitivni izvora napona, a katoda (n strana spoja) na negativan. Analogno tome, dioda vrlo malo provodi, to jest ima vrlo visok

otpor kada je spoj obrnut što se naziva obrnuti prednapon. No, ako je reverzni prednapon vrlo velik tada reverzna struja curenja naglo raste što dovodi do pogoršanja svojstava detekcije ili do uništenja uređaja [34]. Dobar detektor zračenja u čvrstom stanju trebao bi imati sljedeća svojstva [34]:

- Izvrstan prijenos punjenja
- Linearnost između energije upadnog zračenja i broja elektrona–parovi rupa
- Izostanak besplatnih punjenja (niska struja curenja)
- Proizvodnja maksimalnog broja parova elektron-šupljina po jedinici zračenja
- Visoka učinkovitost detekcije
- Brza brzina odziva
- Veliko područje sakupljanja
- Niska cijena [34]

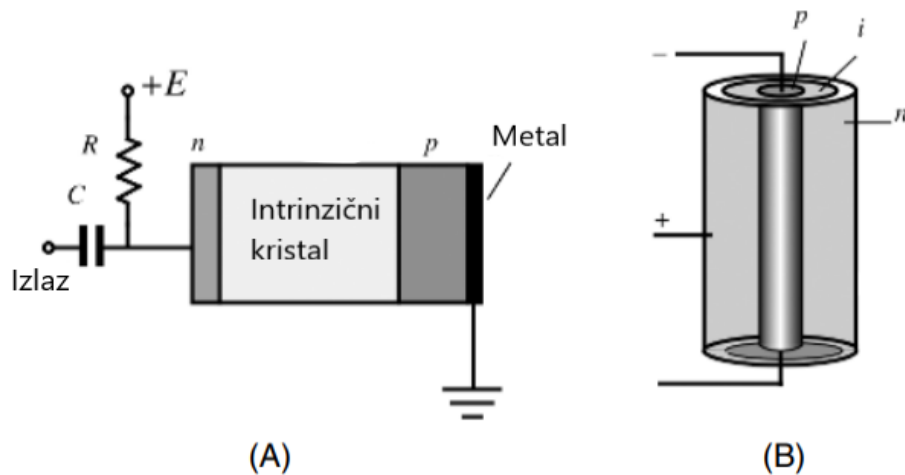
Glavna prednost poluvodičkih detektora je u maloj energiji ionizacije. Prosječna energija potrebna za stvaranje parova elektron-šupljina u siliciju ili germaniju je oko 3 eV dok je za stvaranje ionskih parova u plinskom detektoru potrebno prosječno 30 eV. Stoga, apsorpcija određene količine energije fotona u poluvodičkom detektoru rezultira čak deset puta većim brojem nositelja naboja nego apsorpcija iste energije u plinovitom detektoru, što dovodi do znatno poboljšane energetske rezolucije [6, 34].

Najčešće korišteni poluvodički detektor je silicijski detektor s površinskom barijerom koji se sastoji od visoko čistog silicija s tankim slojem metala, obično zlata, na sloju p i aluminijska na sloju n [46]. Kada zračenje stupi u interakciju sa spojem, generiraju se parovi elektron-šupljina, a nositelji naboja skupljaju se pomoću električnog polja preko spoja. Takvi poluvodički detektori široku primjenu nalaze pri detekciji alfa čestica i zračenja kratkog dometa te nisu prikladni za detekciju prodornog zračenja. Primjer ovakvog silicijskog detektora prikazan je na slici 3.9. [47].



**Slika 3.9.** Presjek silicijskog detektora s površinskom barijerom

Postupak za izradu detektora za prodornije zračenje naziva se ion-drifting proces. Proces se sastoji od stvaranja debele regije s uravnoteženim brojem donorskih nečistoća, koje materijalu dodaju p ili n svojstva [34]. U siliciju ili germaniju, materijal s najvećom mogućom čistoćom nastoji biti p tipa. Kako bi se postiglo željeno stanje, moraju se dodati donorski atomi, a kao takav najpraktičniji donator je litij koji neutralizira atome nečistoća te ih sprječava da prihvate ili doniraju elektrone [6]. Proces uključuje širenje litija kroz p kristal tako da donori litija znatno nadmašuju izvorne akceptore i pri tome stvaraju područje n tipa. To rezultira pomicanjem donora litija u p tip za savršenu kompenzaciju izvorne nečistoće. Kako bi se očuvala ravnoteža, detektor se mora održavati na niskoj temperaturi, što je za germanijeve detektore 77 K, dok se silicijevi detektori mogu čuvati i na sobnoj temperaturi. Proces pomicanja donora litija predstavlja problem jer ostavlja mrtvi sloj na površini i time blokira sve fotone s energijama ispod 30 ili 40 keV i značajno prigušuje fotone više energije (oko 100 keV) [6]. Detektori germanija s litijem označavaju se Ge(Li). Pojednostavljena shema detektora s litijem prikazana je na slici 3.10. (A) [34]. Detektor se sastoji od 3 dijela, p, n i intrinzičnog kristala u sredini. Oblik može biti i cilindričan što prikazuje također slika 3.10. (B) [34].



**Slika 3.10.** Litijev detektor: shema (A) i cilindričan prikaz (B)

Iako se detektori sa silicijem i germanijem često upotrebljavaju ipak imaju neke nedostatke. Naime, germanij se mora čuvati i skladištiti na niskim temperaturama, dok silicij ne mora, ali tada se ne može koristiti pri detekciji gama zraka. Postoje neki drugi poluvodiči koji su vrlo korisni za detekciju zračenja na sobnim temperaturama. Među njima su kadmijev telurid (CdTe), živin jod ( $\text{HgI}_2$ ), galijev arsenid (GaAs), bizmutov trisulfid ( $\text{Bi}_2\text{S}_3$ ) i galijev selenid (GaSe) [34]. Najpopularniji je kadmijev telurid koji ima visoku  $Z$  vrijednost i dovoljno veliku energiju zabranjenog pojasa koja omogućava rad na sobnoj temperaturi. Postoje dvije vrste detektora CdTe, a to su čisti intrinzični tip i dopirani tip. Dopirani tip ima značajno bolju energetska rezoluciju, no manji otpor koji dovodi do veće struje curenja [34].

### 3.3. Utjecaj ionizirajućeg zračenja

Biološki učinci uzrokovani ionizirajućim zračenjem odnosi se na učinke koji se javljaju u ljudskom tijelu nastali kao posljedica izlaganja zračenju. Kada ionizirajuće zračenje stupi u kontakt sa stanicom, ono može uzrokovati oštećenje stanica i DNA. Učinak zračenja ovisi o mnogim čimbenicima među kojim su [48, 49]:

- Vrsta zračenja
- Kvaliteta zračenja
- Količina zračenja
- Primljena doza zračenja

- Životna dob ozračene osobe
- Izloženost određenog dijela tijela
- Genetski faktori

Biološki učinci obično se klasificiraju u dvije kategorije:

- stohastički učinci
- deterministički učinci.

Prva kategorija predstavlja izloženost niskim dozama zračenja tijekom duljeg vremenskog razdoblja stvarajući kronične ili dugoročne učinke (stohastički) dok se druga kategorija sastoji od izloženosti visokim dozama zračenja tijekom kratkih vremenskih razdoblja koja proizvode akutne ili kratkoročne učinke (deterministički) [49].

### 3.3.1. Stohastički učinci

Stohastički utjecaji ionizacije odnose se na slučajne biološke učinke izazvane ionizirajućim zračenjem. Vjerojatnost pojave učinka u izloženoj populaciji raste s primljenom dozom, a težina učinka ne ovisi o dozi [50]. Stohastički učinci nemaju prag što znači da se šansa za razvoj štetnog učinka povećava s povećanjem doze zračenja. To označava da čak i niska razina izloženosti ionizirajućem zračenju povećava rizik od razvoja karcinoma, iako je taj rizik obično vrlo mali. Pretpostavlja se da je vjerojatnost pojave stohastičkih učinaka proporcionalna primljenoj dozi zračenja [51]. Stohastički učinci ne moraju odmah uzrokovati primjetne simptome i mogu se pojaviti mnogo godina nakon izlaganja zračenju. Također, oni se mogu javiti kod svih ljudi bez obzira na vrstu posla, budući da su svi izloženi prirodnom zračenju [52]. Stoga, uvedeno je načelo ALARA (*engl.* As Low As Reasonably Achievable) kojim se nastoji zaštititi od stohastičkih učinaka ionizirajućeg zračenja te ograničiti izloženosti zračenju uz pridržavanje sigurnosnih smjernica i propisa. Stohastički učinci mogu se grupirati u somatske i nasljedne (genetske) učinke. Somatski učinci odnose se na biološke učinke koji se javljaju kod pojedinca izloženog zračenju te je kao takav najčešći rak. Za razliku od somatskih, nasljedni učinci događaju se u genetskom materijalu (DNK) te su prenosivi na potomstvo [48]. Nasljedni učinci izazvani zračenjem nisu identificirani u ljudskoj populaciji, ali su dokazani na životinjama. Tablica 3.4. [53] prikazuje godišnje granične doze za dvije skupine, profesionalno izložene radnike i stanovništvo. Profesionalna izloženost odnosi se na svu izloženost kojoj su radnici izloženi tijekom svoga rada. Granica efektivne doze za cijelo

tijelo od 20 mSv prosječna je vrijednost tijekom pet godina. Prava granica je 100 mSv u 5 godina, ali ne više od 50 mSv u bilo kojoj godini. U tablici 3.5. [54, 55] prikazani su uobičajeni radiološki postupci i njihove približne doze.

**Tablica 3.4.** Granične doze za profesionalno ozračene radnike i stanovništvo

	<b>Profesionalno izloženi radnici</b>	<b>Stanovništvo</b>
Prosječna efektivna doza za cijelo tijelo (mSv)	20 mSv/godina za razdoblje od 5 godina	1 mSv/godina
Ekvivalentna doza za:		
Ruke i noge	500 mSv	-
Koža	500 mSv	50 mSv
Leća oka	150 mSv	15 mSv

**Tablica 3.5.** Količina izloženosti zračenju tijekom nekih radioloških pregleda

<b>Postupak</b>	<b>Efektivna doza (mSv)</b>
Rendgenski snimak prsnog koša	0,02
Rendgen zuba	0,004
Rendgen udova i zglobova	0,06
Rendgen abdomena	0,7
Mamografija	0,13
CT glave	2
CT vrata	3
CT kralježnice	6
CT prsnog koša	8
CT abdomena i zdjelice	10

### 3.3.2. Deterministički učinci

Deterministički (nestohastički) učinci biološki su učinci koji se javljaju s povećanjem doze zračenja iznad određenog praga [50]. Povećanjem doze povećava se i ozbiljnost učinka i time su posljedice opasnije. Osim toga, veličina učinka izravno je proporcionalna veličini doze. Za razliku od stohastičkih učinaka, deterministički učinci imaju minimalnu dozu praga

ispod kojeg nema primjetnih učinaka, a taj prag se može razlikovati od osobe do osobe [48]. Deterministički učinci rezultat su različitih procesa koji su uzrokovani izlaganjem visokim razinama zračenja u kratkom vremenu. Takvi učinci često su vidljivi nakon nekoliko sati ili dana. Determinističkih učinci uključuju:

- Akutne radijacijske bolesti
- Kronične radijacijske bolesti

Visoka doza zračenja primijenjena u kratkom vremenskom razdoblju može izazvati akutne učinke. Ovi učinci se obično manifestiraju neposredno nakon izlaganja ili unutar 24 sata od izlaganja [48]. To uključuje oštećenje stanica i tkiva što može rezultirati mučninom, povraćanjem, glavoboljom, opeklinama, ozljedama kože i tkiva, oštećenjem sluznice. Primjer opekline kože uzrokovan radijacijom prikazan je na slici 3.11. [56].



**Slika 3.11.** Opekline kože uzrokovana radijacijom

Izloženost niskim ili umjerenim dozama ionizirajućeg zračenja tijekom duljeg vremenskog razdoblja može rezultirati kroničnim učincima. Oni se često razvijaju mjesecima ili godinama te nastaju opasne posljedice koje je teško liječiti i mogu dovesti do smrti. Rak, genetske mutacije, oštećenje organa i krvnih žila neki su primjeri kroničnih učinaka. Također, sterilitet i nemogućnost začeca djeteta posljedica su kroničnih radijacijskih bolesti [48]. Tablica 3.5. [52] prikazuje prag apsorbiranih doza prilikom akutne izloženosti. Pri nižim

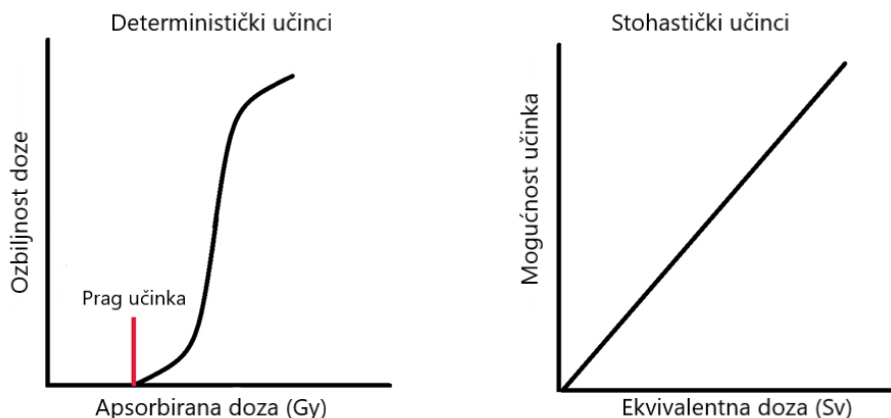


dozama, odnosno ispod 0.5 Gy, zračenje može uzrokovati kratkotrajne promjene u kemijskom sastavu krvi. Povećanjem doze dolazi do ozljeda koje za posljedicu mogu imati privremena ili trajna oštećenja kao što su katarakta očne leće, sterilnost, opadanje kose, opekline i eritem kože. Također, akutne doze od oko 3 do 5 Gy smrtonosne su u 50% svih slučajeva unutar nekoliko tjedana nakon izlaganja ukoliko osoba ne primi nikakav medicinski tretman [6].

**Tablica 3.5.** Procijenjeni prag apsorbiranih doza za determinističke učinke nakon akutne izloženosti

Zdravstveni učinak izloženosti	Apsorbirana doza (Gy)
Privremena sterilnost	0,15
Mučnina	0,35
Katarakta	0,5
Trajna sterilnost	3-6
Povraćanje	3
Privremeni gubitak kose	3,5
Eritem kože	5-6

Za bolje razumijevanje, stohastički i deterministički učinci mogu se prikazati grafom na slici 3.12. [57] u kojem je vidljivo da mogućnost stohastičkih učinaka raste proporcionalno s primljenom dozom. Deterministički učinci pak imaju prag ispod kojeg se ne pojavljuju primjetni simptomi, a ozbiljnost učinaka raste s povećanjem doze.



**Slika 3.12.** Graf stohastičkih i determinističkih učinaka

Izloženost ionizirajućem zračenju tijekom trudnoće može imati potencijalne štetne učinke na embrij ili fetus. Rizik ovisi o dozi zračenja kojoj je fetus izložen, vremenu izloženosti i stupnju razvoja fetusa u tom trenutku. Fetus je osjetljiviji na štetne učinke zračenja nego odrasli jer su stanice fetusa u brzom razvoju. Izloženost stohastičkim učincima može uzrokovati veću vjerojatnost leukemije, dok izloženost deterministički utjecajima tešku mentalnu i tjelesnu retardaciju te kongenitalne mane poput srčanih defekta, abnormalnosti u strukturi organa i ostalo [51].

## 4. PRIMJENE IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

### 4.1. Medicinske primjene

Medicinske primjene ionizirajućeg zračenja imaju ključnu ulogu u dijagnostici i liječenju različitih medicinskih stanja. Zahvaljujući svojim karakteristikama, ionizirajuće zračenje pruža korisne informacije o unutarnjim strukturama tijela i omogućuje precizno liječenje određenih bolesti te je sada glavni umjetni izvor izloženosti u svijetu. Korištenje zračenja u prosjeku čini 98% izloženosti zračenju iz svih umjetnih izvora te je nakon prirodnih izvora drugi najveći doprinositelj izloženosti stanovništva u cijelom svijetu predstavljajući približno 20% ukupne. Većina ove izloženosti događa se u industrijaliziranim zemljama gdje je dostupno više resursa za medicinsku skrb i stoga se radiološka oprema mnogo više koristi [1]. Značajne razlike između medicinskog izlaganja i većine drugih vrsta izlaganja je u tome što medicinska izloženost obično uključuje samo dio tijela, dok druge izloženosti često uključuju cijelo tijelo. Glavne grane u kojima se očituju medicinske primjene su:

- Radiologija
- Nuklearna medicina
- Radioterapija [1].

Jedna od najčešćih tehnika u dijagnostičkoj radiologiji je rendgenska dijagnostika. Rendgensko zračenje prolazi kroz tijelo pacijenta, a zatim se detektira i pretvara u sliku koja prikazuje kosti, organe i druge strukture. Rendgenska dijagnostika koristi se za otkrivanje prijeloma kostiju, plućnih bolesti, tumora, infekcija, upala i drugih ozljeda [1].

Kompjuterizirana tomografija (CT), također poznata kao računalna tomografija, dijagnostička je metoda koja kombinira rendgensko zračenje i računalnu obradu podataka kako bi se stvorile detaljne slike unutarnjih dijelova tijela [58]. Tijekom CT skeniranja, pacijent se postavlja na stol koji se polako kreće kroz otvor u CT skeneru. Skener je veliki prsten koji sadrži rendgensku cijev i detektor. Rendgenska cijev emitira tanki snop rendgenskog zračenja koji rotira oko pacijenta. Detektori na suprotnoj strani skenera mjere količinu rendgenskog zračenja koje prolazi kroz tijelo pacijenta. Podaci koji se prikupljaju tijekom rotacije koriste se za rekonstrukciju poprečnih presjeka tijela [59]. Računalna obrada podataka kombinira ove presjeke kako bi stvorila detaljne trodimenzionalne slike organa i tkiva. Liječnik može pregledati ove slike na monitoru i dobiti informacije o strukturi i patologiji područja koje se ispituje. CT skener prikazan je na slici 4.1. [60].



**Slika 4.1.** CT skener

Nuklearna medicina grana je medicinske dijagnostike i terapije koja koristi male količine radioaktivnih tvari, poznatih kao radiofarmaci, za vizualizaciju i procjenu funkcije unutarnjih organa i tkiva [1, 15]. Ova tehnika temelji se na detekciji zračenja koje emitira radiofarmak nakon što se unese u tijelo pacijenta najčešće intravenozno ili oralno. Nakon toga raspršuje se u tijelu prema fizičkim ili kemijskim karakteristikama i time se omogućuje skeniranje. Specijalizirana detekcijska oprema poput gama kamera ili PET skenere bilježi zračenje i pretvara ga u slike koje prikazuju raspodjelu radiofarmaka i funkcionalnu aktivnost organa [2]. Ove slike pružaju važne informacije za dijagnosticiranje i praćenje raznih bolesti. Nuklearna medicina ima mnoge dijagnostičke primjene. Jedna od najčešćih tehnika je jednofotonska kompjuterizirana tomografija (SPECT) koja se koristi za procjenu funkcije srca, otkrivanje tumora, identifikaciju upalnih procesa i analizi neuroloških poremećaja. Pozitronska emisijska tomografija (PET) je još jedna važna tehnika koja pruža informacije o metaboličkoj aktivnosti tkiva, a koristi se za dijagnostiku tumora, analizi mozga i srca te istraživanja funkcionalne neurologije. Temelji se na nuklidima koji emitiraju pozitron koji se odmah spaja s obližnjim elektronom što rezultira međusobnim poništavanjem, odnosno istovremenom emisijom dvaju fotona u suprotnim smjerovima [61]. S izotopom fluora F-18 kao tragačem ispostavilo se da je to najtočnija metoda otkrivanja i analize većine vrsta raka.

Radioizotopi koji se koristi u nuklearnoj medicini obično imaju kratko vrijeme poluraspada te se u potpunosti raspadaju prije nego što njegova radioaktivnost može uzrokovati bilo kakvu štetu tijelu pacijenta [62].

Terapija zračenjem ili radioterapija ključna je terapijska metoda u borbi protiv raka. Ova tehnika koristi ionizirajuće zračenje visoke energije za uništavanje tumorskih stanica i suzbijanje rasta tumora [63]. Radioterapija djeluje na tumorske stanice uništavanjem njihovog genetskog materijala i ometanjem njihovog sposobnosti dijeljenja i rasta. Kada oštećene stanice umru, tijelo ih razgrađuje i uklanja [64]. Ovisno o vrsti i mjestu raka, korištenje radioterapije se može podijeliti na dvije vrste, a to su unutarnja i vanjska. U vanjskoj radioterapiji, također poznata kao teleterapija, zrake koje se usmjeravaju prema tumoru nalaze se izvan tijela pacijenta [1]. Najčešći oblik vanjske radioterapije je upotreba linearnog akceleratora koji generira visokoenergetske zrake (fotone ili elektrone) koje ciljaju tumor. Ova metoda omogućuje precizno usmjeravanje zračenja prema tumoru s minimalnim oštećenjem okolnih tkiva. Unutarnja radioterapija ili brahiterapija, uključuje postavljanje metalnih ili zatvorenih radioaktivnih izvora zračenja izravno u tumor ili tkivo koje nosi tumor [65]. Izvor zračenja može biti privremeno ili trajno. Za privremenu primjenu koriste se radioaktivne kapsule koje sadrže izvore cezija, iridija ili kobalta te se umetnu kroz iglu ili poseban aplikator. Za trajnu primjenu upotrebljava se implantat koji se umeće se u tijelo i cilja tumor zračenjem, prije nego što s vremenom izgubi svoju radioaktivnost [63]. Slika 4.2.[66] prikazuje uređaj koji se koristi u radioterapiji.



**Slika 4.2.** Uređaj za radioterapiju

## 4.2. Industrijske primjene

Industrijska primjena ionizirajućeg zračenja obuhvaća različite tehnike i procese koji se koriste u industriji za različite svrhe. Glavno područje primjene ionizirajućeg zračenja je sterilizacija. U ovom procesu, koristi se zračenje visoke energije, poput gama zračenja ili elektronskog zračenja, kako bi se oštetile ili uništile genetske strukture mikroorganizama, čime se onemogućuje njihov rast i reprodukcija bez uporabe visokih temperatura [67]. Ionizirajuća sterilizacija se koristi za sterilizaciju različitih predmeta i proizvoda, uključujući medicinske instrumente, farmaceutske proizvode, jednokratne medicinske potrepštine, prehrambene proizvode, začine, kozmetiku i druge osjetljive materijale. Prednosti ionizirajućeg zračenja u svrhu sterilizacije sadrži nekoliko prednosti. Ionizirajuće zračenje prodire duboko u materijal i time omogućuje sterilizaciju čak i unutar složenih i teško dostupnih dijelova predmeta te već zapakiranih proizvoda [68]. Za razliku od drugih metoda sterilizacije, ionizirajuća sterilizacija ne zahtijeva korištenje kemikalija što je posebno važno u medicinskim i prehrambenim primjenama [69]. Ionizirajuća sterilizacija može se provesti relativno brzo u usporedbi s drugim metodama sterilizacije što omogućuje veću produktivnost i učinkovitost u industrijskim postupcima.

Ionizirajuće zračenje svoju upotrebu pronalazi i u industrijskoj radiografiji. Industrijska radiografija koristi ionizirajuće zračenje za provjeru kvalitete materijala i otkrivanje unutarnjih nedostataka [1]. Ionizirajuće zračenje ima dovoljnu energiju da prođe kroz materijale i stvori sliku na detektoru. Pri industrijskoj radiografiji, izvor ionizirajućeg zračenja (rendgenski generator ili gama izvor) postavljen je na odgovarajuću udaljenost od materijala koji se ispituje. Zračenje prolazi kroz materijal i stvara sliku na detektoru omogućujući vizualizaciju unutarnje strukture materijala. Takve slike nazivaju se radiografi [70]. Kod materijala veće debljine, rendgensko ili gama zračenje ima manju sposobnost prolaska kroz njega. Na mjestima gdje materijal postaje tanji, poput pukotina ili nedostataka, više zračenja prolazi kroz ta područja. Područje zavara na rendgenskim snimkama metala bit će svijetlo bijelo jer je deblje od ostatka materijala cijevi. Zavarenje djeluje kao prepreka za prolazak zračenja što rezultira svjetlijim prikazom na snimku. Pukotine se prikazuju kao tamnija područja jer zračenje prolazi kroz njih [70]. Korištenje digitalnih slika u industrijskoj radiografiji omogućuje preciznije i brže analize nedostataka. Digitalne slike se mogu lako povećavati i prilagođavati za bolje vizualizacije. Prelazak na digitalnu industrijsku radiografiju donosi brojne prednosti, uključujući poboljšanu kvalitetu slika, smanjenje vremena obrade i veću pouzdanost u interpretaciji rezultata. To čini industrijsku radiografiju

još učinkovitijom i preciznijom metodom za otkrivanje nedostataka u materijalima. Slika 4.3. [71] prikazuje primjer industrijske radiografije na plinovodu.



**Slika 4.3.** Radiografija zavara na plinovodu

Ionizirajuće zračenje može se koristiti za promjenu svojstava materijala ili za poboljšanje njihovih karakteristika. Zračenje omogućuje pokretanje procesa polimerizacije, koji je inače povezan s visokim temperaturama i pritiscima, na znatno nižim uvjetima. Polimeri koji su ključni dijelovi plastike sastoje se od dugih lanaca molekula. Uobičajeno, formiranje tih lanaca, poznato kao polimerizacija, zahtijeva uvjete kao što su visoka temperatura i pritisak. Međutim, zračenje može djelovati kao poticaj za pokretanje polimerizacije čak i pri nižim temperaturama i pritiscima i time se polimerima može promijeniti njihova struktura i poboljšati mehaničke ili kemijske osobine [72].

Osim navedenih primjena, ionizirajuće zračenje ima i druge tehničke primjene u različitim područjima. Jedna od tih primjena je korištenje toplote dobivene iz raspadajućih radioizotopa za generiranje električne energije. Još jedna važna primjena ionizirajućeg zračenja je korištenje nuklearne energije kao alternativnog izvora električne energije u odnosu na fosilna goriva [73].



Primjena ionizirajućeg zračenja na aerodromima odnosi se na upotrebu uređaja za skeniranje putnika i prtljage radi otkrivanja potencijalno opasnih materijala. Postoje dva glavna tipa uređaja za skeniranje koji koriste ionizirajuće zračenje, a to su rendgenski uređaji za skeniranje putnika i uređaji za skeniranje prtljage [74]. Rendgenski uređaji za skeniranje putnika koriste rendgenske zrake za stvaranje slika tijela putnika. Ti uređaji omogućuju sigurnosnim službenicima da otkriju ilegalne ili opasne predmete koji bi putnici mogli skrivati na sebi ili u svojim tijelima. Putnici prolaze kroz okretna vrata s ugrađenim rendgenskim uređajima. Dok putnici prolaze kroz ta vrata, uređaj emitira tanku snop rendgenskih zraka koji prodiru kroz tijelo putnika i stvaraju sliku. Ta slika prikazuje unutarnje strukture tijela, a posebno se pažnja posvećuje bilo kakvim nepravilnostima ili sumnjivim objektima koji se mogu otkriti na slici. Uređaji za skeniranje prtljage također koriste rendgenske zrake kako bi snimili unutrašnjost prtljage koja prolazi kroz rendgenski uređaj. Ovi uređaji omogućuju sigurnosnim službenicima da pregledaju prtljagu i otkriju potencijalno opasne ili zabranjene predmete, poput oružja, eksploziva ili opasnih kemikalija [75]. Važno je napomenuti da rendgenski uređaji za skeniranje putnika koriste minimalnu količinu zračenja koja je potrebna za dobivanje jasnih slika. Uređaji su dizajnirani i kalibrirani u skladu s propisima i smjernicama za sigurnost zračnog prometa kako bi se minimizirala izloženost putnika i osoblja zračne luke ionizirajućem zračenju. Primjer jedne skenirane prtljage rendgenskim uređajem na aerodromu prikazan je na slici 4.4. [76].



**Slika 4.4.** Prtljaga skenirana rendgenskim uređajem



Uklanjanje statičkog elektriciteta uz pomoć ionizirajućeg zračenja koristi se kao tehnika za neutralizaciju električnih naboja na površinama i u zraku. Ovaj postupak koristi se u različitim industrijskim okruženjima gdje je kontrola statičkog elektriciteta važna, poput proizvodnje elektronike, tiskarske industrije, optičke industrije i drugih sličnih područja. Ionizirajući uređaji, poznati kao ionizatori, koriste razne metode za generiranje iona koji neutraliziraju električne naboje. Ti uređaji stvaraju pozitivne i negativne ione u zraku koje privlače ioni suprotnog polariteta na nabijenoj površini. Kao rezultat toga, statički elektricitet koji se nakupio na proizvodima, opremi i površinama neutralizira se [77]. U tiskarstvu se često javlja problem statičkog elektriciteta koji nastaje trenjem između valjaka i papira što rezultira prijanjanjem papira i ometanjem pravilnog prolaska kroz stroj. Kako bi se riješio taj problem, često se koristi "ionizacijska šipka" koja se postavlja iznad valjaka. Ova šipka emitira odgovarajuće polarizirane ione kako bi "raspršila" naboj na valjcima. Na taj način se neutralizira statički elektricitet omogućavajući glatko kretanje papira kroz stroj bez prijanjanja ili smetnji [77].

Početak 20. stoljeća pojavila se ideja o korištenju radioaktivnih izotopa za stvaranje sustava zaštite od munje. Inženjeri su pretpostavili da stvaranje zone ionizacije blizu gromobrana može potaknuti ranu emisiju iskre prema munji, odnosno radioaktivni gromobrani su trebali "pokazati put" munji privlačeći je prema sebi. Kao rezultat toga korištenje radioaktivnih gromobrana (Slika 4.5. [78]) postalo je prilično rasprostranjeno sredinom 1970-ih do početka 1980-ih. Kao ionizirajući izvor koristili su se kobalt-60, europij-152 i europij-154 [67]. Radioaktivni materijali nalazili su se na vrhu gromobrana, zatvoreni u posebnu kapsulu ili postavljeni na jezgru gromobrana. U svrhu zaštite od atmosferskih utjecaja, struktura je bila prekrivena tankim slojem metala, često zlatom. Istraživanja provedena u laboratorijima i statistički podaci iz stvarnog života nisu pružili dokaze o bilo kakvoj prednosti radioaktivnih gromobrana u odnosu na obične gromobrane. Utvrđeno je da su oba tipa gromobrana jednako privlačili munje s istom frekvencijom [79]. Uzimajući u obzir da radioaktivni gromobrani nisu imali nikakve prednosti, pojavilo se više nedostataka koji su rezultirali njihovim općim neuspjehom. Visoki troškovi, poteškoće s instalacijom, rizik od radioaktivne kontaminacije u slučaju oštećenja uređaja i potreba za posebno opremljenim prostorima za korištenje takvih gromobrana doprinijelo je brzom napuštanju radioaktivnih uređaja. U današnje vrijeme, upotreba takvih gromobrana zabranjena je u Europskoj uniji [67, 79].



**Slika 4.5.** Radioaktivni gromobran

## 5. MJERENJE IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

### 5.1. Osnovne informacije

U svrhu mjerenja ionizirajućeg zračenja koristit će se Geigerov mjerac zračenja Voltcraft RM-400. Proizvod je namijenjen za otkrivanje i mjerenje razine zračenja alfa, beta, X i gama zraka. Preko Bluetooth sučelja integriranog u mjerac zračenja, izmjerene vrijednosti mogu se poslati u stvarnom vremenu na računalo i analizirati pomoću softvera uključenog u isporuku [80]. Mjerac zračenja opremljen je internom memorijom za do 4000 izmjerenih vrijednosti, a pohranjivanje se može vršiti automatski i ručno [80]. Posjeduje veliki LCD zaslon visoke rezolucije s pozadinskim osvjetljenjem, Bargraph zaslon i mnoge indikatore [80]. Uređaj za mjerenje zračenja RM-400 koristi se u farmaceutskoj industriji, laboratorijima, elektranama, kamenolomima, službama spašavanja, u metaloprerađivačkim pogonima, u skladištima nafte, u zaštiti okoliša i još mnogo toga [80]. Proizvod je namijenjen samo za unutarnju upotrebu te se ne smije koristiti na otvorenom. Kontakt s vlagom mora se izbjegavati pod svim okolnostima. Slika 5.1. [80] prikazuje prednju i zadnju stranu Geigerovog mjeraca zračenja Voltcraft RM-400.



**Slika 5.1.** Prednja i zadnja strana Geigerovog mjeraca zračenja Voltcraft RM-400

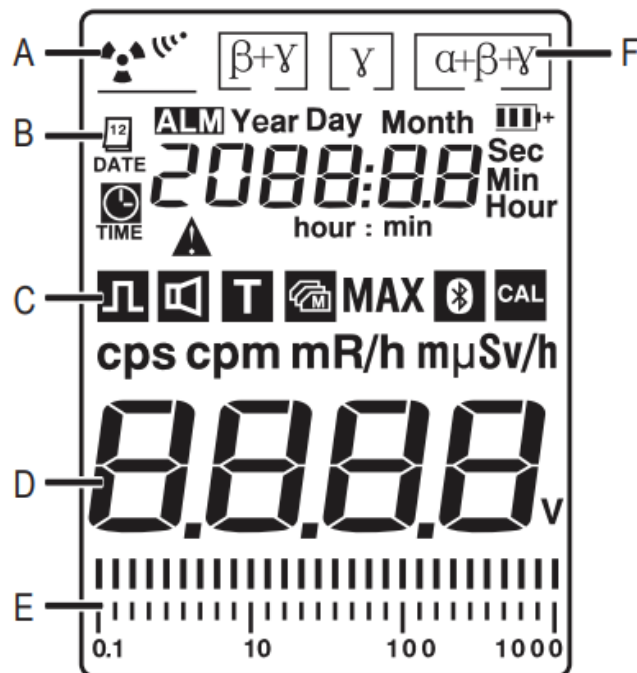
Na uređaju se nalazi simbol koji upozorava na opasnosti koje mogu dovesti do osobnih ozljeda kao i simbol upozorenja na radijaciju. Prilikom izvođenja mjerenja u blizini izvora štetnog zračenja potrebno je poduzeti mjere opreza. Opisani simboli prikazani su na slici 5.2. [80].



**Slika 5.2.** Simbol upozorenja na opasnosti ozljeđivanja (lijevo) i simbol upozorenja na radijaciju (desno)

## 5.2. Radni elementi

Na slici 5.2. [80] prikazan je zaslon Geigerovog mjerača zračenja pri čemu A označava mjerenje zračenja, B indikator datuma/vremena, C mjernu funkciju, D očitavanje/mjerne jedinice, E brzinu doze zračenja i F vrstu mjerene zrake. Dijelovi Geigerovog mjerača zračenja opisani su na slici 5.3. [80].



**Slika 5.3.** Zaslon Geigerovog mjerača zračenja




Slika 5.4. Dijelovi Geigerovog mjerača zračenja

Prilikom umetanja baterija potrebno je pridržavati se ispravnog polariteta. Baterija koja se koristi je 4x AA. Baterije treba izvaditi iz uređaja ako se ne koristi dulje vrijeme kako bi se izbjeglo oštećenje zbog curenja [80]. Baterije koje cure ili oštećene mogu uzrokovati opekline kiselinom u dodiru s kožom te je stoga poželjno koristiti odgovarajuće zaštitne rukavice za rukovanje oštećenim baterijama. Uslijed provjere napona baterije potrebno je pritisnuti tipku 10 (Slika 5.3.) za prikaz napon baterije. Normalni raspon je od 4,8 do 6,0 V [80]. Simbol za zamjenu baterije prikazat će se ako je napon manji od 4,8 V. Važno je napomenuti da se baterije trebaju zamijeniti prije nego što se potpuno istroše. Također, isključivanje napajanja zbog slabe baterije rezultirat će gubitkom podataka [80].

Prije korištenja uređaja potrebno je konfigurirati različite postavke putem izbornika za postavljanje. Postavke koje se namještaju i njihov opis prikazani su tablicom 5.1. [80].

**Tablica 5.1.** Postavke

Postavke	Opis
DATUM	Godina, mjesec, dan
VRIJEME	Sati, minute
ALM	Kada je izmjerena vrijednost veća od postavljene vrijednosti, oglasit će se kontinuirani zvučni signal. Raspon postavki: 1 - 999 $\mu\text{Sv/h}$ (zadano: 205 $\mu\text{Sv/h}$ ).
	Ako je postavljeno na ON, čut će se zvuk "kvakanja" kada se otkrije zračenje.
T	Raspon postavki: 8 - 120 sekundi (zadano: 30 sekundi).

### 5.3. Princip rada

U normalnim uvjetima senzor može detektirati odabranu vrijednost zračenja kada je senzor usmjeren prema izvoru zračenja. Kako bi odabrali vrstu zračenja, potrebno je prekidač za odabir zraka okretati u smjerovima koji su prikazani tablicom 5.2. [80].

**Tablica 5.2.** Odabir vrste zračenja

Promjena položaja	Otkrivena vrsta zraka
Sredina	Alfa
Lijevo	Beta
Desno	Gama
Lijevo, sredina, desno	X-zrake

Pritiskom tipke 6 na Geigerovom mjeraču zračenja (Slika 5.3.) uključuje se i isključuje napajanje uređaja. Ako je uređaj uključen, tada se tipkom 6 uključuje i isključuje pozadinsko osvjetljenje. Pozadinsko osvjetljenje ima vrijeme automatskog isključivanja od 1 minute. Podaci će biti spremljeni kada se napajanje isključi [80]. Sljedeće što je potrebno je izabrati jedinicu brzine doze zračenja ( $\mu\text{Sv/h}$  ili  $\text{mRem/h}$ ) tipkom 7 (Slika 5.3.). Ako je očitavanje prenisko, stupčasti grafikon će biti ravan. Pretvorba jedinica  $\text{Sv/h}$  i  $\text{Rem/h}$  temelji se na sljedećoj formuli:  $10 \mu\text{Sv/h} = 1 \text{ mRem/h}$ . Moguće je spremiti do 4000 mjerenja.

Spremljeni podaci uključuju datum, vrijeme, vrijednost i jedinicu. Odabirom tipke 5 (Slika 5.3.) započinje se ili zaustavlja spremanja podataka [80].


Također, može se mjeriti akumulirana doza zračenja tijekom vremena. Početna jedinica je  $\mu\text{Sv}$ . Ako se izmjerena brzina doze poveća, jedinica će se automatski promijeniti u  $\text{mSv}$  ili  $\text{Sv}$ . Odabirom tipke 11 (Slika 5.3.) kruži se između načina rada [80]:

- Način izračuna akumulacije beskonačne brzine doze, prikazat će se " $\mu\text{Sv}$ ".
- Način mjerenja vremena (zadano 60 "060" minuta), "TIME" će treptati.
- Zaustavljanje mjerenja vremena, "TIME" će prestati treptati.

Za postavljanje vremena mjerenja, u načinu mjerenja vremena pritisne se i drži za postavljanje vremena mjerenja (001 - 999 minuta).

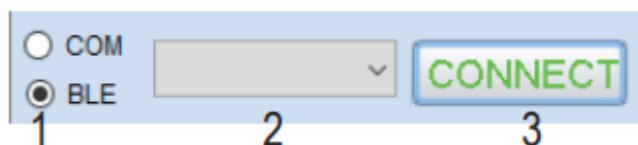
Brojanje pulsa vrši se pomoću načina rada koji su prikazani u tablici 5.3. [80]. Tipka 12 (Slika 5.3.) služi za kruženje kroz navedene načine rada.

**Tablica 5.3.** Brojanje pulsa

Način rada	Opis
cps	Puls u sekundi
cpm	Puls u minuti. Brojač će se automatski prebaciti na Sv (1 Sv = 100 Rem).
Brojanje pulsa 	Zračenje se stalno mjeri Geigerovom cijevi i zatim pretvara u brzinu pulsa. "TIME" treperi kada se broje impulsi, a prestaje treptati kada se zaustavi brojanje impulsa.

#### 5.4. Prijenos podataka na računalo

U svrhu prijenosa podataka na računalo koristi se isporučeni softver za obradu i pregled podataka koji je potrebno instalirati na računalo. CD-ROM umetne se u računalo i slijedeći upute na zaslonu instalira se softverska datoteka. Za prijenos izmjerenih podataka na računalo u stvarnom vremenu pomoću isporučenog softvera omogućen je Bluetooth prijenos podataka [80]. Pritiskom na tipku 4 odabire se Bluetooth ikona i uključuje. Ikona će treperiti što označava da Bluetooth prenosi podatke. Otvaranjem softvera na računalo prvo se odaberi opcija "BLE", nakon toga se odaberite mjerač zračenja s padajućeg izbornika i zatim klikne "POVEŽI" (Slika 5.5. [80]).



**Slika 5.5.** Opcije koje se odabiru otvaranjem softvera na računalu

## 5.5. Održavanje i odlaganje

Prilikom čišćenja nije poželjno koristiti agresivna sredstva, alkohol ili druge kemijske otopine jer oni oštećuju kućište i mogu uzrokovati kvar proizvoda [80]. Preporučeno je čišćenje proizvoda suhom krpom bez vlakana.



**Slika 5.6.** Simbol odvojenog sakupljanja otpada

Simbol na slici 5.6. [80] mora se nalaziti na svakoj električnoj i elektroničkoj opremi stavljenoj na tržište EU. Ovaj simbol označava da se ovaj uređaj ne smije odlagati kao nerazvrstani komunalni otpad na kraju njegovog životnog vijeka. Vlasnici WEEE (*engl.* Waste from Electrical and Electronic Equipment - otpad od električne i elektroničke opreme) dužni su isti odlagati odvojeno od nerazvrstanog komunalnog otpada [80]. Istrošene baterije i akumulatore, koji nisu obuhvaćeni WEEE, kao i lampe koje se mogu ukloniti iz WEEE na nerazoran način, krajnji korisnici moraju ukloniti iz WEEE na nerazoran način prije predaje do sabirnog mjesta. Distributeri električne i elektroničke opreme imaju zakonsku obvezu besplatnog preuzimanja otpada [80].

Baterije/punjive baterije odlažu se odvojeno od proizvoda. Zakonom se obvezuje krajnje korisnike da vrate sve istrošene punjive baterije i da ih ne odlažu u uobičajeni kućni otpad, prema Direktivi o baterijama [80]. Baterije ili punjive baterije koje sadrže opasne tvari moraju biti označene simbolom (Slika 5.6.) što znači da je zabranjeno njihovo odlaganje u kućni otpad. Kratice za teške metale prisutne u baterijama su: Cd (kadmij), Hg (živa), Pb



(olovo) [80]. Baterije ili punjive baterije koje se odlažu treba zaštititi od kratkog spoja, a njihove izložene kontakte treba u potpunosti prekriti izolacijskom trakom prije odlaganja. Čak i prazne baterije ili punjive baterije mogu sadržavati ostatke energije koji ih mogu napuhati, prsnuti, zapaliti ili čak eksplodirati u slučaju kratkog spoja [80].

## 5.6. Tehnički podaci

U tablici 5.4. [80] prikazani su tehnički podaci Geigerovog mjerača zračenja.

**Tablica 5.4.** Tehnički podaci

<b>Napajanje</b>	
Baterije	4x AA 1,5 V baterije
<b>Proizvod</b>	
Vrste zraka	Alfa, Beta, Gama, X-zrake
Mjerni rasponi	Brzina doze zračenja: 0,01 $\mu\text{Sv/h}$ – 1000 $\mu\text{Sv/h}$ Brzina doze impulsa: 0-4000 cpm, 0 – 4000 cpm Akumulacija doze zračenja: 0,001 $\mu\text{Sv}$ – 9999 Sv Akumulacija doze impulsa: 0 – 9999
Osjetljivost	Okruženje zraka kobalta-60 pri 1 $\mu\text{Sv/h}$ : 108x puls ili 1000 cpm/mR/hr Alfa zrake: od 4 MeV Beta zrake: od 0,2 MeV Gama zrake: od 0,02 MeV X-zrake: od 0,02 MeV
Tip detektora	Halogena kompenzacija (G.M Geigerova brojačka cijev)
Točnost	<10 % (<500 $\mu\text{Sv/h}$ ) <20 % (>500 $\mu\text{Sv/h}$ )
Unutarnja memorija	4000 skupova podataka (automatsko spremanje)
<b>Bluetooth modul</b>	
Verzija	4.0
Frekvencija	2,402 – 2,480 GHz
Snaga prijenosa	-6,99 dBm
Udaljenost prijenosa	max. 3 m
Okoliš	
Radna visina	max. 2000m
Radna temperatura	od 0 do +50 °C
Temperatura skladištenja	od -10 do +50 °C
Vlažnost pri radu/skladištenju	<75 % RH (bez kondenzacije) (od -10 do +30 °C) <50 % RH (bez kondenzacije) (od +30 do +50 °C)

<b>Ostalo</b>	
Dimenzije (V x Š x D)	205 x 71 x 49 mm
Težina	cca. 226 g (bez baterija)
<b>Softver</b>	
Podržani OS	Windows® 10 (32/64 bit), 11 (i noviji)

## 5.7. Mjerenje

Kalij se u prirodi pojavljuje u 3 stabilna izotopa, a to su kalij-39 ( $^{39}\text{K}$ ), kalij-40 ( $^{40}\text{K}$ ) i kalij-41 ( $^{41}\text{K}$ ) pri čemu je kalij-40 radioaktivan jer se prilikom njegova raspada oslobađa radioaktivno zračenje [81]. S obzirom da je nepraktično raditi s kalijem u metalnom obliku jer je vrlo reaktivan metal (reagira s vlagom te izaziva gorenje koje dovodi do eksplozije) za potrebe mjerenja korištena je kalijeva sol, odnosno kalijev bikarbonat. Kalijev bikarbonat anorganski je spoj kemijske formule  $\text{KHCO}_3$  koji se sastoji od kalija ( $\text{K}^+$ ), vodika ( $\text{H}^+$ ), ugljikova dioksida ( $\text{CO}_2$ ) i hidroksid-iona ( $\text{OH}^-$ ) [82]. U svrhu mjerenja korištene su 3 vrećice kalij bikarbonata ( $3 \times 100$  g) koji se koristi za brzo otkiseljavanje vina (Slika 5.7.) te je utvrđeno da je radioaktivnost  $0,47 \mu\text{Sv/h}$  (Slika 5.8.) što je približno 10 puta više u odnosu na prirodno pozadinsko zračenje (Slika 5.9.).



Slika 5.7. Kalijev bikarbonat



Slika 5.8. Izmjerena vrijednost zračenja kalijevo bikarbonata



Slika 5.9. Vrijednost prirodnog pozadinskog zračenja

Također, provedeno je mjerenje koliko pulseva je geigerov brojač napravio u sekundi (cps) i minuti (cpm). Raspadanje izotopa stohastički je proces te je očekivano da mjerenja imaju blagu varijaciju. Varijacija je izraženija što je manja vremenska jedinica (cps). Na varijaciju se može utjecati i trajanjem mjerenja. Veća je varijacija što je kraće trajanje mjerenja i obrnuto jer je mjerni proces zasnovan na integriranju mjernih podataka, odnosno računanju vremenskog prosjeka. Broj pulseva u sekundi za kalijev karbonat varirao je između vrijednosti 0,722 i 0,777, a broj pulseva u minuti između vrijednosti 43,3 i 46,6 (Slika 5.10.). Za razliku od toga, broj pulseva u sekundi za prirodno pozadinsko zračenje oscilirao je između vrijednosti 0,055 i 0,111, dok je broj pulseva u minuti između vrijednosti 3,3 i 6,6 (Slika 5.11.).

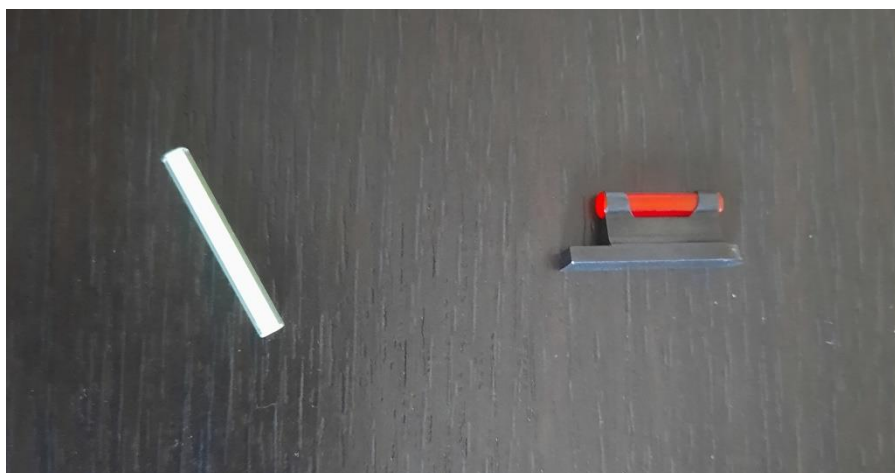


**Slika 5.10.** Izmjerene vrijednosti cps (prva i druga slika s lijeve strane) i cpm (prva i druga slika s desne strane) za kalijev bikarbonat



**Slika 5.11.** Cps (prva i druga slika s lijeve strane) i cpm (prva i druga slika s desne strane) za prirodno pozadinsko zračenje

Vodik u prirodi dolazi u 3 izotopa: procij (kemijski simbol P, odnosno H), deuterij (kemijski simbol D) i tricij (kemijski simbol T). Procij je najčešći izotop vodika i čini oko 99,98% prirodnog vodika [83]. Deuterij je stabilni izotop koji se naziva i teški vodik [83]. Kombinacijom tricija i kisika formira se tricijaska voda [84] koja ima jednu od komercijalnih primjena zbog fotoluminiscencije kao dugotrajni izvor svjetla. Koristi se za izvor svjetla na nišanima oružja (Slika 5.12.), izvor svjetla na dalekozorima koji se koriste noću (Slika 5.13. [85]), kazaljka satova skupljih marki (Slika 5.14. [86]), svjetleći privjesci (beta light) (Slika 5.12.).



**Slika 5.12.** Beta light (lijevo) i mušica na nišanima oružja (desno)





**Slika 5.13.** Tricijski optički dalekozor



**Slika 5.14.** Tricijski sat

Iz tog razloga provedeno je mjerenje kolika je radijacija tricija u takvim primjenama. Radioaktivnost beta light emitera iznosila je  $0,80 \mu\text{Sv/h}$  (Slika 5.15.) što je čak 20 puta više u odnosu na prirodno pozadinsko zračenje (Slika 5.9.). Broj pulseva u sekundi varirao je između vrijednosti 1,277 i 1,388, a broj pulseva u minuti između vrijednosti 76,6 i 80,0 (Slika 5.16.).



Slika 5.15. Izmjerena vrijednost zračenja beta light emitera



Slika 5.16. Izmjerene vrijednosti cps (prva i druga slika s lijeve strane) i cpm (prva i druga slika s desne strane) za beta light emiter

Posljednje mjerenje obavljeno je s mušicom koja se nalazi na nišanima oružja. Njena radioaktivnost iznosila je  $0,11 \mu\text{Sv/h}$  (Slika 5.17.) što je samo 3 puta veće u odnosu na prirodno pozadinsko zračenje (Slika 5.9.) te je prikazalo najmanje zračenje od prethodna dva mjerenja. Izbrojeni pulsevi u sekundi odvijali su se između vrijednosti 0,166 i 0,222, a broj pulseva u minuti iznosio je 10 (Slika 5.18.). Naspram prirodnog pozadinskog zračenja (Slika 5.11.), mjerenje s mušicom pokazalo je najmanja odstupanja.



Slika 5.17. Izmjerena vrijednost zračenja mušice nišana oružja



Slika 5.18. Izmjerena vrijednost cps (lijevo i sredina) i cpm (desno) za mušicu nišana oružja



## 6. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu obrađen je povijesni pregled otkrića radioaktivnosti, počevši od 19. stoljeća kada su znanstvenici poput Henrija Becquerela i Marie i Pierrea Curieja provodili eksperimente koji su doveli do otkrića ovog fenomena. Nakon toga navedeni su glavni oblici ionizirajućeg zračenja među kojima su alfa, beta i gama zračenje. Opisane su najznačajnije karakteristike navedenih zračenja te njihova sposobnost prodiranja kroz materiju gdje gama zračenje predstavlja najveću opasnost.

Nadalje, objašnjene su različite mjerne jedinice koje se koriste za izražavanje razine ionizirajućeg zračenja. To uključuje jedinice kao što su bekerel za mjerenje aktivnosti radioaktivnih izvora, gray za apsorbiranu dozu zračenja u materiji te sievert za ekvivalentnu dozu zračenja u tkivu. Obrađene su i vrste mjernih instrumenata koji se koriste za detekciju ionizirajućeg zračenja, a to su plinski, scintilacijski i poluvodički detektori. Svakom instrumentu opisan je princip rada i način korištenja. Obrazloženi su utjecaji ionizirajućeg zračenja na ljudsko zdravlje te kako ionizirajuće zračenje može reagirati s tijelom na staničnoj razini, uzrokujući oštećenja DNA i potencijalno dovesti do razvoja raka i drugih bolesti.

U zadnjem dijelu navedene su primjene ionizirajućeg zračenja u medicini kao radioterapija za liječenje raka i dijagnostički postupci kao što su rendgenski snimci i CT. Osim u medicini, pojašnjene su primjene i u industriji za sterilizaciju, radiografska testiranja, polimerizaciju, ali i mnoge druge primjene.

Na samom kraju obavljeno je mjerenje ionizirajućeg zračenja uz pomoć Geigerovog uređaja za mjerenje zračenja Voltcraft RM-400. Za provođenje ovog mjerenje korišteni su radioaktivni materijali kao izvori zračenja (kalijev bikarbonat, beta light emiter i mušica koja se nalazi na nišanima oružja). Geigerov uređaj bio je postavljen u blizini radioaktivnih materijala kako bi se izmjerila razina ionizirajućeg zračenja koju emitiraju prethodno navedeni radioaktivni izvori. Nakon toga, analizirani su rezultati te je zaključeno kako najveću razinu zračenja uzrokuje beta light emiter u odnosu na prirodno pozadinsko zračenje.

**7. LITERATURA**

- [1] United Nations Environment Programme (UNEP), Radiation Effects and Sources, 2016. (pristupljeno 6.3.2023.)
- [2] T. Henriksen, Biophysics group at UiO, Radiation and Health, 2009. (pristupljeno 6.3.2023.)
- [3] Slika 2.1. Rendgenski snimak ruke (pristupljeno 6.3.2023.), url: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm\\_R%C3%B6ntgen](https://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_R%C3%B6ntgen)
- [4] Web stranica The Nobel Prize, članak Wilhelm Conrad Röntgen (pristupljeno 6.3.2023.): <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1901/rontgen/facts/>
- [5] Web stranica NuclearNewswire, članak Henri Becquerel and the Discovery of Radioactivity (pristupljeno 6.3.2023.): <https://www.ans.org/news/article-879/henri-becquerels-discovery-of-radioactivity/>
- [6] G. C. Lowenthal, P. L. Airey, Practical Applications of Radioactivity and Nuclear Radiations, The Press Syndicate of the University of Cambridge 2004. (pristupljeno 6.3.2023.)
- [7] Slika 2.2. Prikaz Becquerelova pokusa (pristupljeno 6.3.2023.), url: [https://en.wikipedia.org/wiki/Henri\\_Becquerel](https://en.wikipedia.org/wiki/Henri_Becquerel)
- [8] Web stranica The Nobel Prize, članak Marie Curie (pristupljeno 14.3.2023.): <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1903/marie-curie/facts/>
- [9] Web stranica The Nobel Prize, članak Marie and Pierre Curie and the discovery of polonium and radium (pristupljeno 14.3.2023.): <https://www.nobelprize.org/prizes/themes/marie-and-pierre-curie-and-the-discovery-of-polonium-and-radium/>
- [10] N. Pasachoff, Marie Curie and the Science of Radioactivity, Oxford University Press, 1996. (pristupljeno 14.3.2023.)
- [11] Slika 2.3. Bračni par Curie (pristupljeno 14.3.2023.), url: <https://www.businessinsider.com/marie-curie-radioactive-papers-2015-8>
- [12] Web stranica Britannica, članak Half-life (pristupljeno 14.3.2023.): <https://www.britannica.com/science/half-life-radioactivity>

- [13] Michael F. L'Annunziata, Radioactivity, Second Edition, Elsevier B.V., 2016. (pristupljeno 14.3.2023.)
- [14] Web stranica ARPANSA, članak Alpha particles (pristupljeno 20.3.2023.): <https://www.arpansa.gov.au/understanding-radiation/what-is-radiation/ionising-radiation/alpha-particles>
- [15] United States Environmental Protection Agency (EPA), Radiation: Facts, Risks and Realities, 2012. (pristupljeno 20.3.2023.)
- [16] B. Dresto-Alač, Predavanja iz fizike, Radioaktivnost, Primjena u medicini (pristupljeno 20.3.2023.): [https://www.fzsri.uniri.hr/files/FAKULTET/KATEDRE/Katedra\\_temeljne/Microsoft%20Word%20-%20Radioaktivnost\\_Primjena%20u%20medicini\\_povjerenstvo\\_Z.pdf](https://www.fzsri.uniri.hr/files/FAKULTET/KATEDRE/Katedra_temeljne/Microsoft%20Word%20-%20Radioaktivnost_Primjena%20u%20medicini_povjerenstvo_Z.pdf)
- [17] Slika 2.4. Alfa raspad urana-235 (pristupljeno 20.3.2023.), url: <https://www.britannica.com/science/alpha-decay>
- [18] Web stranica Britannica, članak Types of radioactivity, Beta-minus decay i Beta-plus decay (pristupljeno 30.3.2023.): <https://www.britannica.com/science/radio-activity#ref48272>
- [19] Web stranica ARPANSA, članak Beta particles (pristupljeno 30.3.2023.): <https://www.arpansa.gov.au/understanding-radiation/what-is-radiation/ionising-radiation/beta-particles>
- [20] E. Broda, T. Schönfeld, The Technical Applications of Radioactivity, Pergamon Press Ltd, 1966. (pristupljeno 30.3.2023.)
- [21] Web stranica Mr. Panchbhaya's learning Websites, Radioactive decay, Chapter 7.2. (pristupljeno 30.3.2023.): <http://panchbhaya.weebly.com/chapter-7---nuclear-energy-and-society.html>
- [22] Slika 2.7. Gama zračenje Pu-240: Mirna Đurina, Ionizirajuće zračenje i učinci ionizirajućeg zračenja (pristupljeno 30.3.2023.)
- [23] V. Kašuba, Biološki učinci radionuklida joda-131, Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada Zagreb, 1996. (pristupljeno 30.3.2023.)

- [24] Web stranica Britannica, članak Gamma decay (pristupljeno 3.4.2023.):  
<https://www.britannica.com/science/gamma-decay>
- [25] Web stranica ARPANSA, članak Gamma radiation (pristupljeno 3.4.2023.):  
<https://www.arpansa.gov.au/understanding-radiation/what-is-radiation/ionising-radiation/gamma-radiation>
- [26] Web stranica Britannica, članak Units for measuring ionizing radiation (pristupljeno 9.4.2023.):  
<https://www.britannica.com/science/radiation/Historicalbackground#ref28855>
- [27] Web stranica Wikipedia, članak Rendgen (pristupljeno 9.4.2023.):  
<https://hr.wikipedia.org/wiki/Rendgen>
- [28] J. R. Greening, Fundamentals of Radiation Dosimetry (Second Edition), Taylor & Francis Group, New York 1985. (pristupljeno 9.4.2023.)
- [29] Tablica 3.1. Godišnja ekvivalentna doza (pristupljeno 9.4.2023.), url:  
[https://hr.wikipedia.org/wiki/Ekvivalentna\\_doza](https://hr.wikipedia.org/wiki/Ekvivalentna_doza)
- [30] M. E. McCarthy, B. Thomas, Ionizing Radiation (Section 3) (pristupljeno 9.4.2023.)
- [31] Tablica 3.2. Specifične vrijednosti težinskog faktora (pristupljeno 13.4.2023.), url:  
[https://hr.wikipedia.org/wiki/Ekvivalentna\\_doza](https://hr.wikipedia.org/wiki/Ekvivalentna_doza)
- [32] Web stranica Wikipedia, članak Effective dose (radiation) (pristupljeno 13.4.2023.):  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Effective\\_dose\\_\(radiation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Effective_dose_(radiation))
- [33] Tablica 3.3. Faktori težine tkiva (pristupljeno 13.4.2023.), url:  
[https://ec.europa.eu/health/scientific\\_committees/opinions\\_layman/security-scanners/en/figtableboxes/tissue-weighting-factors.htm](https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/security-scanners/en/figtableboxes/tissue-weighting-factors.htm)
- [34] J. Fraden, Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications (Third Edition), Springer-Verlag New York, 2004. (pristupljeno 13.4.2023.)
- [35] A. Das, T. Ferbel, Introduction to Nuclear and Particle Physics (Second Edition), World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2003. (pristupljeno 13.4.2023.)
- [36] B. R. Martin, Nuclear and Particle Physics – An Introduction, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2006. (pristupljeno 13.4.2023.)

- 
- [37] Slika 3.1. Grafički prikaz ionizacijske komore (pristupljeno 19.4.2023.), url: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Ionizacijska\\_komora](https://hr.wikipedia.org/wiki/Ionizacijska_komora)
- [38] Web stranica Britannica, članak Ion chambers (pristupljeno 19.4.2023.): <https://www.britannica.com/technology/radiation-measurement/Gas-filled-detectors#ref80703>
- [39] Slika 3.2. Područja plinskih ionizacijskih detektora (pristupljeno 19.4.2023.), url: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/radiation-detection/gaseous-ionization-detector/>
- [40] Slika 3.3. Shematski prikaz proporcionalnog brojača (pristupljeno 19.4.2023.), url: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-drawing-of-a-proportional-counter\\_fig16\\_281670897](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-drawing-of-a-proportional-counter_fig16_281670897)
- [41] Slika 3.4. Višeanodni proporcionalni brojač (pristupljeno 19.4.2023.), url: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wire\\_chamber](https://en.wikipedia.org/wiki/Wire_chamber)
- [42] Slika 3.5. Geiger-Müllerov brojač (pristupljeno 27.4.2023.), url: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Geigerov\\_broja%C4%8D](https://hr.wikipedia.org/wiki/Geigerov_broja%C4%8D)
- [43] Web stranica Britannica, članak Scintillators (pristupljeno 27.4.2023.): <https://www.britannica.com/technology/radiation-measurement/Silicon-detectors#ref80710>
- [44] Slika 3.6. Shematski prikaz scintilatora s fotomultiplikatorom (pristupljeno 27.4.2023.), url: <http://web.stanford.edu/group/scintillators/scintillators.html>
- [45] Slika 3.8. Shematski prikaz poluvodičkog detektora (pristupljeno 27.4.2023.), url: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-semiconductor-detector-silicon-based-detector-Radiation\\_fig9\\_269704941](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-semiconductor-detector-silicon-based-detector-Radiation_fig9_269704941)
- [46] Web stranica Britannica, članak Silicon detectors (pristupljeno 27.4.2023.): <https://www.britannica.com/technology/radiation-measurement/Silicon-detectors>
- [47] Slika 3.9. Presjek silicijskog detektora s površinskom barijerom (pristupljeno 27.4.2023.),url: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Poluvodi%C4%8Dki\\_detektor\\_\(radioaktivnost\)](https://hr.wikipedia.org/wiki/Poluvodi%C4%8Dki_detektor_(radioaktivnost))
-

- 
- [48] S. Choudhary, članak Deterministic and Stochastic Effects of Radiation, Radiotherapy Technologist, Jayothi Vidyapeeth Womens University, India (pristupljeno 4.5.2023.): <https://juniperpublishers.com/ctoj/pdf/CTOIJ.MS.ID.555834.pdf>
- [49] N. I. Zakariya, članak Benefits and Biological Effects of Ionizing Radiation, Cape Peninsula University of Technology, Bellville. South Africa (pristupljeno 4.5.2023.)
- [50] Web stranica Occupational Safety and Health Administration (OSHA), članak Health Effects (pristupljeno 4.5.2023.): <https://www.osha.gov/ionizing-radiation/health-effects>
- [51] E. B. Podgorsak, Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students, IAEA, 2005. (pristupljeno 4.5.2023.)
- [52] D. Dalcı, G. Dörter, İ. Güçlü, članak Health Consequences of Ionizing Radiation Exposure, Çekmece Nuclear Research and Training Center, Istanbul, Turkey (pristupljeno 4.5.2023.): <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/38/111/38111358.pdf>
- [53] Tablica 3.4. Granične doze za profesionalno ozračene radnike i stanovništvo (pristupljeno 4.5.2023.), url: [https://remm.hhs.gov/ICRP\\_guidelines.htm](https://remm.hhs.gov/ICRP_guidelines.htm)
- [54] Tablica 3.5. Količina izloženosti zračenju tijekom nekih radioloških pregleda (pristupljeno 10.5.2023.), url: <https://www.epa.gov/radiation/how-much-radiation-am-i-exposed-when-i-get-medical-x-ray-procedure>
- [55] Tablica 3.5. Količina izloženosti zračenju tijekom nekih radioloških pregleda (pristupljeno 10.5.2023.), url: <https://civilnazastita.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/Radioloska%20i%20nuklearna%20sigurnost/Uputstva/Izlaganje%20rendgenskom%20zra%C4%8Denju.pdf>
- [56] Slika 3.11. Opekline kože uzrokovana radijacijom (pristupljeno 10.5.2023.), url: <https://rejuvaskin.com/blogs/science-and-health/tagged/radiation-burn-treatment>
- [57] M. Sperrin, J. Winder, Scientific Basis of the Royal College of Radiologists Fellowship (2nd Edition), IOP Publishing Ltd 2020 (pristupljeno 20.5.2023.)
- [58] Web stranica Britannica, članak Computed Tomography (pristupljeno 20.5.2023.): <https://www.britannica.com/topic/computed-tomography>
-

- 
- [59] Web stranica National Institutes of Health (NIH), članak Computed Tomography (CT) (pristupljeno 20.5.2023.): <https://www.nibib.nih.gov/science-education/science-topics/computed-tomography-ct>
- [60] Slika 4.1. CT skener (pristupljeno 20.5.2023.), url: [https://en.wikipedia.org/wiki/CT\\_scan](https://en.wikipedia.org/wiki/CT_scan)
- [61] Web stranica National Institutes of Health (NIH), članak Nuclear Medicine (pristupljeno 20.5.2023.): <https://www.nibib.nih.gov/science-education/science-topics/nuclear-medicine>
- [62] Web stranica Britannica, članak Nuclear Medicine (pristupljeno 25.5.2023.): <https://www.britannica.com/science/nuclear-medicine>
- [63] Web stranica International Atomic Energy Agency (IAEA), članak What is Radiation Therapy? (pristupljeno 25.5.2023.): <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-radiation-therapy>
- [64] Web stranica National Institutes of Health (NIH), članak Radiation Therapy to Treat Cancer (pristupljeno 25.5.2023.): <https://www.cancer.gov/about-cancer/treatment/types/radiation-therapy>
- [65] Web stranica Britannica, članak Brachytherapy (pristupljeno 25.5.2023.): <https://www.britannica.com/science/radiation-therapy#ref300781>
- [66] Slika 4.2. Uređaj za radioterapiju (pristupljeno 25.5.2023.), url: <https://slkmed.com/new-equipment-for-radiation-therapy/?lang=en>
- [67] Web stranica Zbrinjavanje radioaktivnog otpada, članak Primjena radioaktivnosti (pristupljeno 1.6.2023.): [https://www.radioaktivniotpad.org/hrvatski/primjena-radioaktivnosti\\_10/](https://www.radioaktivniotpad.org/hrvatski/primjena-radioaktivnosti_10/)
- [68] Web stranica International Atomic Energy Agency (IAEA), članak Medical sterilization (pristupljeno 1.6.2023.): <https://www.iaea.org/topics/medical-sterilization>
- [69] Web stranica Centers for Disease Control and Prevention, članak Other Sterilization Methods (pristupljeno 1.6.2023.): <https://www.cdc.gov/infectioncontrol/guidelines/disinfection/sterilization/other-methods.html>
-

- 
- [70] Web stranica United States Environmental Protection Agency (EPA), članak Industrial Radiography (pristupljeno 1.6.2023.): <https://www.epa.gov/radtown/industrial-radiography>
- [71] Slika 4.3. Radiografija zavara na plinovodu (pristupljeno 1.6.2023.), url: <https://www.flyability.com/radiography>
- [72] Web stranica International Atomic Energy Agency (IAEA), članak Radiation in industrial process (pristupljeno 7.6.2023.): <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull1-3/01305000708.pdf>
- [73] M. Eisenbud, članak Industrial Uses of Ionizing Radiation (pristupljeno 7.6.2023.): <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1256305/pdf/amjphn>
- [74] Web stranica Radiation Safety, članak Radiation and Airport Security – Are You at Risk? (pristupljeno 7.6.2023.): <https://radiationsafety.ca/resources/factsheets/radiation-and-airport-security-are-you-at-risk/>
- [75] Web stranica United States Environmental Protection Agency (EPA), članak Radiation and Airport Security Scanning (pristupljeno 13.6.2023.): <https://www.epa.gov/radtown/radiation-and-airport-security-scanning>
- [76] Slika 4.4. Prtljaga skenirana rendgenskim uređajem (pristupljeno 13.6.2023.), url: <https://www.securityprousa.com/blogs/news/x-ray-security-systems-all-you-need-to-know>
- [77] Web stranica electropages, članak Removing static electricity with air ionisers (pristupljeno 13.6.2023.): <https://www.electropages.com/blog/2019/05/removing-static-electricity-air-ionisers>
- [78] Slika 4.5. Radioaktivni gromobran (pristupljeno 19.6.2023.), url: <https://yellshops.com/proizvod/demontaza-radioaktivnih-gromobrana/>
- [79] Web stranica ZANDZ, članak Why radioactive interception rods are no longer used in the world (pristupljeno 19.6.2023.): [https://zandz.com/en/news/why\\_radioactive\\_interception\\_rods\\_are\\_no\\_longer\\_used\\_in\\_the\\_world/](https://zandz.com/en/news/why_radioactive_interception_rods_are_no_longer_used_in_the_world/)
-



- [80] Tehnički podaci o Geigerovom mjeracu zračenja Voltcraft RM-400 s web stranica Conrad (pristupljeno 2.7.2023.): <https://www.conrad.com/p/voltcraft-rm-400-geiger-counter-radiation-alpha-beta-gamma-x-ray-acoustic-signal-incl-data-analysis-software-dat-2564434>
- [81] Web stranica Wikipedia, članak Kalij (pristupljeno 12.7.2023.): <https://bs.wikipedia.org/wiki/Kalij>
- [82] Web stranica Wikipedia, članak Potassium bicarbonate (pristupljeno 12.7.2023.): [https://en.wikipedia.org/wiki/Potassium\\_bicarbonate](https://en.wikipedia.org/wiki/Potassium_bicarbonate)
- [83] Web stranica Wikipedia, članak Vodik (pristupljeno 12.7.2023.): <https://hr.wikipedia.org/wiki/Vodik>
- [84] Web stranica Wikipedia, članak Tritiated water (pristupljeno 12.7.2023.): [https://en.wikipedia.org/wiki/Tritiated\\_water](https://en.wikipedia.org/wiki/Tritiated_water)
- [85] Slika 5.13. Tricijski optički dalekozor (pristupljeno 12.7.2023.), url: <https://www.amazon.com/TRUGLO-TFO-Handgun-Sight-Set/dp/B0033XZT0M?th=1>
- [86] Slika 5.14. Tricijski sat (pristupljeno 12.7.2023.), url: <https://www.pinterest.com/handlewz/tritium-watch/>

## PREGLED SADRŽAJA KORIŠTENE LITERATURE

Knjiga T. Henriksen, Biophysics group at UiO, Radiation and Health, 2009. opisuje osnovna svojstva ionizirajućeg zračenja uključujući povijest otkrića radioaktivnosti, oslobađanje radioaktivnosti iz reaktorskih nesreća u atmosferu, mjerne jedinice ionizirajućeg zračenja, ali i poneke primjene zračenja u medicini. Iz ove knjige korišteni su materijali najviše za potpoglavlje 2.1. Povijest otkrića radioaktivnosti, 3.1. Mjerne jedinice te 4.1. Medicinske primjene.

Knjiga G. C. Lowenthal, P. L. Airey, Practical Applications of Radioactivity and Nuclear Radiations, The Press Syndicate of the University of Cambridge 2004. opisuje svojstva radioaktivnosti i glavne značajke alfa, beta, gama i rendgenskog zračenja. Također, opisuje mjerne jedinice i mjerne instrumente te njihov način korištenja što je upotrijebljeno u potpoglavljima 3.1. Mjerne jedinice i 3.2. Mjerni instrumenti. Navode se i primjene u industriji poput primjena u rudarstvu, prerani minerala, proizvodnji nafte i ostalo.

Knjiga Michael F. L'Annunziata, Radioactivity, Second Edition, Elsevier B.V., 2016. opisuje pojam radioaktivnosti iz prirodnih i umjetnih izvora na zemlji. Daje uvid u atome, njegovu jezgru, nuklearne raspade i subatomske čestice što je korišteno u potpoglavlju 2.1. Vrste zračenja.

Knjiga E. Broda, T. Schönfeld, The Technical Applications of Radioactivity, Pergamon Press Ltd, 1966. opisuje osnove atomske teorije. Nakon toga slijede glavne činjenice o radioaktivnosti i metodama mjerenja što je korišteno u potpoglavljima 2.1. Vrste zračenja i 3.2. Mjerni instrumenti. Zatim se opisuju primjene radioaktivnosti u industriji što predstavlja i glavni dio knjige.

Knjiga J. R. Greening, Fundamentals of Radiation Dosimetry (Second Edition), Taylor & Francis Group, New York 1985. opisuje količinu ionizirajućeg zračenja i međusobnih odnosa. Definiira mjerne jedinice s naglaskom na određivanje apsorbirane doze što je korišteno u potpoglavlju 3.1. Mjerne jedinice. Opisuje i mjerne instrumente ionizirajućeg zračenja što je upotrijebljeno pri opisivanju scintilacijskih detektora (potpoglavlje 3.2.4.).

Poglavlje M. E. McCarthy, B. Thomas, Ionizing Radiation (Section 3), 2003. iz knjige opisuje fiziku interakcije zračenja s materijom, mjerne jedinice i mjerne instrumente ionizirajućeg zračenja što je korišteno u potpoglavlju 3.1. Mjerne jedinice. Bavi se

primjenom radijacije u industriji kao i biološkim posljedicama izlaganja ionizirajućem zračenju.

U knjizi J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications* (Third Edition), Springer-Verlag New York, 2004. koristilo se samo poglavlje detektora zračenja budući da ostala poglavlja ne uključuju temu završnog rada (Ionizirajuće zračenje i tehničke primjene). Navedeno poglavlje korišteno je pri opisu mjernih instrumenata u potpoglavlju završnog rada 3.2. Mjerni instrumenti.

Knjiga A. Das, T. Ferbel, *Introduction to Nuclear and Particle Physics* (Second Edition), World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2003 temelji se na nuklearnoj fizici i fizici čestica. Započinje razvojem Rutherfordovog raspršenja, a nastavlja s općim primjenama radioaktivnosti i nuklearne sile. Nakon toga slijedi poglavlje koje se bavi interakcijom čestica u materiji te način na koji se takve čestice detektiraju što je korišteno u potpoglavlju 3.2. Mjerni instrumenti. Preostala poglavlja opisuju fenomen elementarnih čestica.

Knjiga B. R. Martin, *Nuclear and Particle Physics – An Introduction*, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2006. uvodi u nuklearnu fiziku i fiziku čestica. Opisuje eksperimentalne metode, odnosno detektore zračenja što je korišteno u potpoglavlju 3.2. Mjerni instrumenti. Knjiga sadrži i primjene nuklearne fizike uključujući fuziju, fisiju i biomedicinske primjene.

Knjiga E. B. Podgorsak, *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students*, IAEA, 2005 opisuje činjenice o fizici namijenjenoj za radijacijsku onkologiju. Definiiraju se osnovna svojstva o radijaciji, mjernim jedinicama i mjernim instrumentima. Opisuje se ionizirajuće zračenje ne samo za liječenje bolesti, već i za dijagnostiku bolesti što je korišteno u potpoglavlju 3.3. Utjecaj ionizirajućeg zračenja. Također, bavi se proučavanjem opasnosti od zračenja i zaštite od zračenja.

## SAŽETAK

U ovom završnom radu cilj je bio opisati povijest otkriće same radioaktivnosti te se usmjeriti na ionizirajuće zračenje i njegovu podjelu na alfa, beta i gama zračenje. Objašnjene su mjerne jedinice kao i mjerni instrumenti ionizirajućeg zračenja. Poseban naglasak je na štetnim učincima ionizirajućeg zračenja koji mogu dovesti do ozbiljnih zdravstvenih posljedica. Unatoč potencijalnoj štetnosti, ionizirajuće zračenje ima mnoge korisne primjene u medicini, industriji i istraživanjima, poput radioterapije u liječenju raka, dijagnostike bolesti i sterilizacije materijala. Provedenim mjerenjem utvrđeni su iznosi zračenja nekih dostupnih radioaktivnih materijala te je zaključeno kako beta light emitter uzrokuje najveće zračenja u odnosu na prirodno pozadinsko zračenje.

**Ključne riječi:** radioaktivnost, ionizirajuće zračenje, beta zračenje, štetni učinci, radioterapija, prirodno pozadinsko zračenje

## ABSTRACT

The aim of this thesis was to describe the history of the discovery of radioactivity, with a focus on ionizing radiation and its division into alpha, beta, and gamma radiation. The units of measurement and measuring instruments for ionizing radiation were explained. Special emphasis was placed on the harmful effects of ionizing radiation, which can lead to serious health consequences. Despite its potential hazards, ionizing radiation has numerous beneficial applications in medicine, industry, and research, such as in cancer treatment through radiotherapy, disease diagnosis, and material sterilization. By conducting measurements, the levels of radiation from certain available radioactive materials were measured, and it was concluded that beta light emitters cause the highest radiation compared to natural background radiation.

**Keywords:** radioactivity, ionizing radiation, beta radiation, harmful effects, radiation therapy, natural background radiation

**ŽIVOTOPIS**

Monika Ivanek rođena je u Našicama 3. veljače 2002. godine. Živi i odrasta u Markovcu Našičkom te 2016. godine završava osnovnu školu kralja Tomislava u Našicama. Iste godine upisuje srednju školu Isidora Kršnjavoga u Našicama smjer opća gimnazija. Srednju školu završava 2020. godine s odličnim uspjehom i upisuje preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika, na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Nakon završetka preddiplomskog studija namjera joj je upisati diplomski studij također na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku.

U Osijeku, rujan 2023.,

Monika Ivanek

Potpis: \_\_\_\_\_

## PRILOZI

## Popis korištenih oznaka i simbola

Oznaka ili simbol	Naziv	Mjerna jedinica
${}^0_0\gamma$	Foton	-
${}^0_0\nu$	Neutrino	-
${}^0_0\bar{\nu}$	Antineutrino	-
${}^0_{+1}e$	Beta plus čestica	-
${}^0_{-1}e$	Beta minus čestica	-
<b>A</b>	Maseni broj	-
<b>A</b>	Aktivnost radioaktivnog izvora	Bq
<b>D</b>	Apsorbirana doza	Gy
<b>D<sub>T</sub></b>	Apsorbirana doza u tkivu	Sv
<b>E</b>	Efektivna doza	Sv
<b>H</b>	Ekvivalentna doza	Sv
<b>H<sub>T</sub></b>	Ekvivalent doze u tkivu	Sv
<b>N</b>	Umnožak preostalih težinskih faktora	-
<b>Q</b>	Faktor kvalitete	-
<b>w<sub>R</sub></b>	Faktor kvalitete zračenja	-
<b>w<sub>T</sub></b>	Težinski faktor tkiva	-
<b>X*</b>	Jezgra u pobuđenom stanju	-
<b>X</b>	Radioaktivna jezgra koja se raspada	-
<b>Y</b>	Novonastala radioaktivna jezgra	-
<b>Z</b>	Atomski broj (broj protona)	-
<b>ΔE</b>	Energija apsorbirana zračenjem	J
<b>Δm</b>	Masa ozračene tvari	kg
<b>ΔN</b>	Broj raspada	-
<b>Δt</b>	Vrijeme raspada	s