

# Primjena radioaktivnosti - beta razinomjer

---

**Pejaković, Anja**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:160:268284>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-23**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Department of Physics in Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**ODJEL ZA FIZIKU**



**ANJA PEJAKOVIĆ**

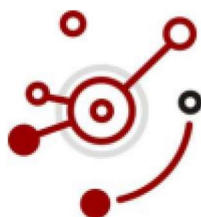
**PRIMJENA RADIOAKTIVNOSTI - BETA RAZINOMJER**

**Diplomski rad**

**Osijek, 2023.**

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**ODJEL ZA FIZIKU**



**ANJA PEJAKOVIĆ**

**PRIMJENA RADIOAKTIVNOSTI - BETA RAZINOMJER**

**Diplomski rad**

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku  
radi stjecanja akademskog naziva magistra edukacije fizike i informatike

**Osijek, 2023.**

**Ovaj diplomski rad izrađen je u Osijeku pod vodstvom mentorice doc. dr. sc. Maje Varga Pajtler te komentora Igora Miklavčića, pred. u sklopu Sveučilišnog diplomskog studija fizike i informatike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.**

## Sadržaj

1. Uvod .....	1
2. Radioaktivnost i povijesni pregled.....	2
2.1. Atomi i radioaktivnost .....	2
2.2. Otkriće radioaktivnosti .....	3
3. Ionizirajuće zračenje i interakcija s materijom .....	7
4. Radioaktivni raspad.....	10
4.1. Vrste radioaktivnog raspada .....	10
4.2. Raspadi radioaktivnih elemenata: $^{90}\text{Sr}$ , $^{60}\text{Co}$ , $^{226}\text{Ra}$ te $^{22}\text{Na}$ .....	14
4.3. Zakon radioaktivnog raspada .....	16
5. Detekcija ionizirajućeg zračenja .....	18
5.1. Ionizacijska komora .....	18
5.2. Geiger-Müllerov brojač .....	19
5.3. Proporcionalni brojač .....	21
6. Primjena zračenja u industriji .....	22
6.1. Upotreba radioizotopa u industriji.....	22
6.1. Praćenje debljine - prigušenje zračenja .....	24
7. Povratno raspršenje i $\beta$ debljinomjer.....	26
8. Eksperimentalni dio.....	27
8.1. Poissonova raspodjela i stohastički proces .....	29
8.2. Pokus 1. Model radioaktivnog razinomjera - kontrola punjenja neprozirnog spremnika .....	30
8.3. Pokus 2. Model radioaktivnog refleksijskog debljinomjera - mjerenje debljine papira pomoću refleksije ionizirajućeg zračenja.....	44
8.4. Pokus 3. Ovisnost broja detektiranih ioniziranih čestica Geiger-Müllerovim brojačem o prolasku kroz različite materijale - transmisija i apsorpcija.....	53
8.5. Pokus 4. Ovisnost broja detektiranih ioniziranih čestica Geiger-Müllerovim brojačem o broju traka fotokopirnog papira - transmisija i apsorpcija .....	58
8.6. Pokus 5. Odbroj u ovisnosti o promjeni kuta.....	63
9. Zaključak .....	68
10. Literatura.....	70
11. Životopis.....	75

## **Zahvale**

Ovim putem se zahvaljujem komentoru Igoru Miklavčiću, pred. na smjernicama prilikom provođenja eksperimenata i za izradu ovog rada te mentorici doc. dr. sc. Maji Varga Pajtler na uputama i pomoći za izradu ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se roditeljima i ostalim bližnjima koji su bili konstantna potpora i oslonac tijekom studija.

Hvala sestri Andrei što je ostavila duboki utisak, koji je bio unutarnja potpora i vjera u uspjeh.

*„Korijeni učenja su gorki, ali plodovi su slatki.“*

*Aristotel*

## **PRIMJENA RADIOAKTIVNOSTI - BETA RAZINOMJER**

**ANJA PEJAKOVIĆ**

### **Sažetak**

U diplomskom radu ukratko je opisan povijesni pregled radioaktivnosti, vrste zračenja, interakcija zračenja i materije te zakon radioaktivnog raspada. Prikazane su sheme radioaktivnog raspada zatvorenih ionizirajućih izvora korištenih prilikom izvođenja pokusa u okviru ovog diplomskog rada i opisani su načini detekcije ionizirajućeg zračenja, posebno Geiger-Müllerovim brojačem. Opisana je primjena radioaktivnosti u industriji jer se navedeni modeli tamo najčešće koriste. U eksperimentalnom dijelu rada izvedeni su pokusi s potpuno funkcionalnim modelima razinomjera sa zatvorenim radioaktivnim izvorom (gdje je određena razina ispunje neprozirnog spremnika olovnom sačmom) i debljinomjera (gdje je određena debljina papira), na temelju kojih je zaključeno kako su ove metode pogodne za primjenu te imaju prednost kod nekih proizvodnih procesa.

(75 stranica, 43 slike, 17 tablica, 64 literaturnih navoda)

**Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku**

**Ključne riječi:** radioaktivnost, industrija, debljinomjer, razinomjer, Geiger-Müllerov brojač

**Mentor:** doc. dr. sc. Maja Varga Pajtler

**Komentor:** Igor Miklavčić, pred.

**Ocjenjivači:** doc. dr. sc. Maja Varga Pajtler; Igor Miklavčić, pred.; doc. dr. sc. Domagoj Belić; mr. sc. Slavko Petrinšak

**Rad prihvaćen:** 17. srpnja 2023.

# **APPLICATION OF RADIOACTIVITY - LEVEL BETA GAUGE**

**ANJA PEJAKOVIĆ**

## **Abstract**

In this master thesis briefly described are the historical overview of radioactivity, types of radiation, interactions between radiation and matter and the law of radioactive decay. The decay schemes of closed radioactive sources which were used in experimental part of the thesis are presented and methods of detecting ionizing radiation are described, especially with the Geiger-Müller counter. The application of radioactivity in industry are described because the mentioned models are most often used there. In the experimental part of the work, experiments were performed with fully functional models of a level gauge with a closed radioactive source (where the filling level of an opaque tank with lead shot was determined) and a thickness gauge (where the thickness of the paper was determined), based on which it was concluded that these methods are suitable for application and have an advantage in some production processes.

(75 pages, 43 figures, 17 tables, 64 references)

**Thesis deposited in Department of Physics library**

**Keywords:** radioactivity, industry, thickness gauge, level gauge, Geiger-Müller counter

**Supervisor:** Maja Varga Pajtler, PhD

**Co-Supervisor:** Igor Miklavčić, Lecturer

**Reviewers:** Maja Varga Pajtler, PhD; Igor Miklavčić, Lecturer; Domagoj Belić, PhD; Slavko Petrinšak, MSc

**MSc Thesis accepted:** 17th July 2023.



## 1. Uvod

Radioaktivnost, iako je sama pomisao na nju "nešto štetno", ima vrlo široku primjenu, posebice u medicini, a zatim u industriji. Svatko od nas je svakodnevno izložen zračenju (npr. kozmičkim zrakama, radioaktivnim elementima u tlu i radioaktivnim elementima ugrađenim u tijelo), a navodi se [1] da oko 80% pozadinskog zračenja potječe iz prirodnih izvora, a preostalih 20% proizlazi iz izvora koje je stvorio čovjek.

U okviru ovog diplomskog rada provedeni su pokusi kojima je cilj predstaviti modele primjene radioaktivnosti u industriji te su opisani neki od njih. Rađena su mjerenja s  $\beta$  izvorima koji se uglavnom koriste u industriji u svrhu radioaktivnog debljinomjera ili razinomjera. U jednom od pokusa rađena su mjerenja odbroja u ovisnosti o kutu između cijevi Geiger-Müllerovog (u tekstu i G-M) brojača i pravca u kojem je usmjeren radioaktivni izvor.

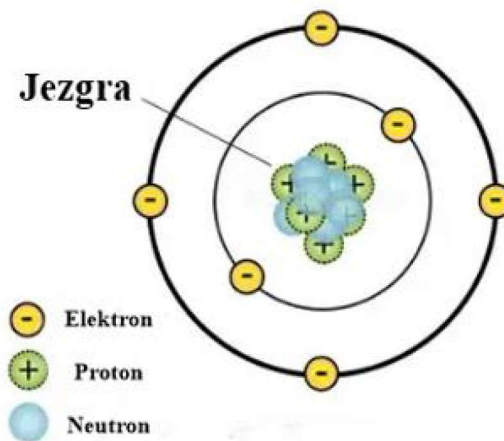
U diplomskom radu korištena su četiri radioaktivna izvora:  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  te  $^{22}\text{Na}$ . Pokusima je utvrđeno da je metoda mjerenja pomoću radioaktivnih izvora i G-M brojača prikladna za određivanje visine ispune spremnika i debljine materijala.

Mjerenja su pokazala da vrijeme poluraspada i godina proizvodnje radioaktivnog izvora utječu na aktivnost radioaktivnog uzorka te na sam rezultat eksperimenta (detektiran odbroj), a kvalitetna mjerenja nisu moguća pomoću radioaktivnih izvora kojima je aktivnost značajno smanjena od dana proizvodnje. Sve navedeno je u skladu sa statističkim zakonom radioaktivnog raspada.

## 2. Radioaktivnost i povijesni pregled

### 2.1. Atomi i radioaktivnost

Kako bi pojam radioaktivnosti bio razumljiv, najprije je potrebno opisati atome i atomske jezgre. Atomi su najmanji sastavni dio kemijske tvari, sitne čestice čiji je promjer oko  $10^{-10}$  m s jezgrom promjera oko  $10^{-14}$  m, koja sadrži gotovo svu masu atoma. Atom čini jezgra sastavljena od nukleona -protona i neutrona (Slika 1) te omotač sastavljen od elektrona. Protoni, neutroni (koji su građeni od kvarkova) i elektroni su elementarne čestice. Atomi izgrađuju kemijske elemente kojima se pridružuje atomski broj  $Z$  (broj protona u jezgri) i maseni broj  $A$  (broj nukleona u jezgri), dok je broj neutrona u jezgri  $A-Z$ . Kemijski element je tvar sastavljena od atoma s jednakim atomskim brojem  $Z$ . Vrste atoma određene sastavom jezgre koju čine atomski broj  $Z$  i maseni broj  $A$ , nazivaju se nuklidi. Izotopi, izobari i izotoni su kemijski elementi jednakog atomskog, masenog, odnosno broja neutrona, redom. Nuklidi mogu biti stabilni i nestabilni, a nestabilni nuklidi nazivaju se radionuklidi. [2]



Slika 1. Pojednostavljen slikoviti prikaz atomske građe. [3]

Radioaktivnost je izraz koji se koristi za prirodan proces kojim se neki atomi spontano raspadaju, emitirajući čestice i energiju dok se pretvaraju u različite, stabilnije atome, a koji je još davno skovala znanstvenica Marie Salomea Skłodowska-Curie. Ovaj proces, koji se naziva i radioaktivni raspad, događa se jer nestabilni izotopi imaju tendenciju transformacije u stabilnije stanje, čime se

jezgra spontano transformira u jezgru koja se naziva „potomak“ ili „kćer“. Ako je jezgra potomak radioaktivna, proces se nastavlja sve dok se ne formira stabilna atomska jezgra. [4, 5]

Radioaktivnost se prema porijeklu dijeli na prirodnu i na umjetnu radioaktivnost. Prirodna radioaktivnost odnosi se na emitiranje zračenja iz radionuklida koji prirodno nastaju, dok se umjetna radioaktivnost odnosi na emitiranje iz umjetno stvorenih radionuklida i njihovih nestabilnih potomaka od strane ljudske djelatnosti. [2]

Radioaktivnost je stohastički odnosno slučajan proces i ne može se točno znati kada će se pojedina jezgra radioaktivno raspasti. Ono o čemu se može govoriti je vjerojatnost radioaktivnog raspada jezgre. [6, 7]

U procesima radioaktivnog raspada broj nestabilnih atomskih jezgri koji se raspadne u jednoj sekundi, odnosno broj atoma koji se raspadnu u jedinici vremena naziva se aktivnost, čija je mjerna jedinica u Međunarodnom sustavu jedinica bekerel, međunarodni naziv becquerel, (Bq). 1 Bq vrlo je mala količina radioaktivnosti jednaka jednom raspadu u sekundi stoga se najčešće aktivnost radioaktivnog izvora opisuje u kilobekerelima (kBq). Ranije korištena mjerna jedinica za aktivnost je Curie (1 Ci =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq). Aktivnost se određuje detekcijom čestica i fotona emitiranih iz radioaktivnog materijala tijekom određenog vremenskog intervala, uz pomoć detektora zračenja i elektroničkih sklopova. [4, 8]

## 2.2. Otkriće radioaktivnosti

Prvi otkriveni radioaktivni element bio je torij (Th), što je pokazao njemački kemičar Gerhard Schmidt (1898.), a što je potvrdila poljska fizičarka Marie Curie. Svi poznati izotopi torija su nestabilni. Najstabilniji izotop,  $^{232}\text{Th}$ , ima vrijeme poluraspada od 14,05 milijardi godina ili približno starosti svemira, a raspada se vrlo sporo putem  $\alpha$  raspada, započinjući tzv. torijev radioaktivni raspadni niz, koji završava sa stabilnim izotopom  $^{208}\text{Pb}$ . U svemiru su torij i uranij jedina dva radioaktivna elementa koja se još uvijek prirodno pojavljuju u velikim količinama kao primordijalni elementi. [9]

Nastavak otkrića radioaktivnosti trajao je nekoliko godina, počevši s otkrićem X-zraka od strane Wilhelma Conrada Röntgena (1895.), zatim nastavljajući s Henrijem Becquerelom te obitelji Curie. W. C. Röntgen radio je u laboratoriju kada je primijetio fluorescenciju koja je dolazila od papira premazanog barijevim platinocijanidom s obližnjeg stola, koji je pripremio za neki drugi

pokus. Nakon daljnjeg promatranja opazio je da uzrok fluorescencije papira potječe iz djelomično ispražnjene Hittof-Crookesove cijevi (vakumske cijevi kojom su otkrivene katodne zrake u kojoj struja elektrona teče od katode prema anodi), prekrivene neprozirnim crnim papirom koji je koristio za proučavanje katodnih zraka. Zaključio je da je fluorescencija koja je prodirala kroz neprozirni crni papir morala biti uzrokovana nekim nevidljivim zrakama. U procesu provođenja raznih eksperimenata primjenom struje na različite vakuumske cijevi otkrio je da, unatoč tome što je jednu prekrio kako bi blokirao svjetlost, zrake prodiru kroz njih i reagiraju s otopinom barija na papiru koji je postavio u blizini. Nakon nekoliko eksperimenata, uključujući i snimanje prve fotografije ruke i strukture kostura svoje žene (Slika 2) s novim zrakama, nazvao ih je „X-zrake” kao oznaku nečega nepoznatog. Taj je fenomen ostao poznat kao X-zrake ili rendgensko zračenje, a iako se razlikuje od radioaktivnosti, W. C. Röntgen otvorio je vrata radioaktivnom otkriću. [10, 11]



Slika 2. Prva medicinska rendgenska slika, ruka supruge W. C. Röntgena. [12]

Francuski fizičar Henri Becquerel je (1896. godine), potaknut otkrićem X-zraka te koristeći metodu sličnu Röntgenovoj, obložio nekoliko fotografskih ploča crnim papirom i na njih stavio uranijeve soli (dvosol kalijeva i uranijeva sulfata). S ciljem daljnjeg unaprjeđenja proučavanja X-zraka, Becquerel je namjeravao staviti prekrivenu fotografsku ploču s tim solima na Sunčevu svjetlost te promatrati što se događa. Nažalost, morao je odgoditi svoj eksperiment jer je nebo nad Parizom, gdje je provodio eksperiment, bilo oblačno. Nakon nekoliko dana vratio se svom eksperimentu odmotavajući fotografsku ploču zamotanu crnim papirom (zbog čega nije bila izložena svjetlu),

očekujući samo lagani otisak od soli. Umjesto toga soli su ostavile vrlo jasne obrise na fotografskoj ploči (Slika 3), što govori da su uranijeve soli bez obzira na nedostatak izvora energije neprestano „fluorescirale“. Ono što je Becquerel otkrio bilo je da uranijeve soli emitiraju zračenje, što je Marie Curie kasnije nazvala radioaktivnost. [10, 11, 13]

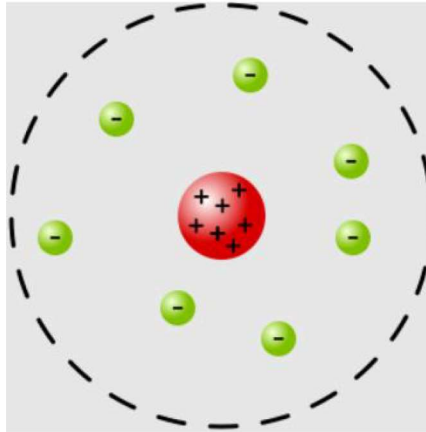


Slika 3. Becquerelova fotografska ploča, djelovanje nevidljivog zračenja uranijeve soli. [14]

Francuski fizičari Pierre Curie i Paul-Jacques Curie izumili su uređaj, precizni elektroskop, koji je mjerio ekstremno niske električne struje, a koji je kasnije poslužio za mjerenje ionizacije oko radioaktivnih ruda i izdvojenih elemenata. Francusko-poljska fizičarka i kemičarka Marie Salomea Skłodowska-Curie uspjela je primijetiti da uranij ionizira zrak oko sebe. Daljnja istraživanja pokazala su da aktivnost uranijevih spojeva ovisi o količini prisutnog uranija i da radioaktivnost nije rezultat međudjelovanja između molekula, već dolazi od samog atoma. Koristeći uranitit i kalkolit otkrili su da je torij također radioaktivan. Pierre i Marie Curie kasnije su otkrili i dva nova radioaktivna elementa: radij (Ra) i polonij (Po). [10, 11]

Britanski i novozelandski kemičar i fizičar Ernest Rutherford smatra se ocem nuklearne fizike. Uočio je (1899. godine) da se zračenje radija sastoji od dviju vrsta zraka koje je nazvao  $\alpha$  i  $\beta$  zrake, a koje su se različito apsorbirale u materijalima. U suradnji s Frederickom Soddyjem uveo je pojam vremena poluraspada i izveo zakone radioaktivnoga raspada. E. Rutherford poznatiji je po drugom pokusu, gdje je bombardirao komad zlatne folije  $\alpha$  česticama, čiji je rezultat poznat kao Rutherfordov model atoma (Slika 4). E. Rutherford također je uočio da su radioaktivni elementi tijekom vremena prošli kroz proces raspadanja, koji se razlikovao od elementa do elementa, a (1919. godine) upotrijebio je  $\alpha$  čestice za transmutaciju jednog elementa, kisika, u drugi element, dušik, što su časopisi nazvali „cijepanjem atoma“. Godine 1898. Curiejevi su otkrili radioaktivnu

moć radija, a Ernest Rutherford je (1899. godine) otkrio da postoje dvije vrste zračenja koje emitira radij; jedna je teška čestica s pozitivnim nabojem, što je nazvao „ $\alpha$  zraka”, a druga je puno lakša, s negativnim nabojem i nazvao ju je „ $\beta$  zraka”. Francuski kemičar Paul Villard otkrio je (1900. godine) treću vrstu zračenja koje je bilo vrlo prodorno, koju je kasnije E. Rutherford nazvao „ $\gamma$  zrakama.“ [10, 15, 16, 17]

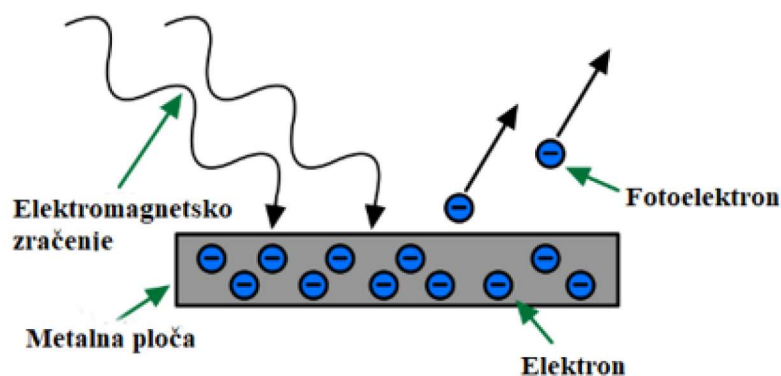


Slika 4. Rutherfordov model atoma: masa atoma koncentrirana je u vrlo malom pozitivno nabijenom području - jezgri, dok elektroni kruže van jezgre. [15]

### 3. Ionizirajuće zračenje i interakcija s materijom

Zračenje se opisuje kao energija u obliku čestica (korpuskularno zračenje) ili valova, odnosno kao pojava prijenosa energije u obliku fotona (elektromagnetsko zračenje). Zračenje može biti ionizirajuće i neionizirajuće. Ionizirajuće zračenje je ono koje ima dovoljnu energiju za ionizaciju tvari s kojom djeluje, odnosno za nastanak električki nabijenih čestica (iona). Ionizirajuće zračenje oduvijek je prisutno u prirodnom okolišu, a budući da posjeduje veliku ionizirajuću moć i snagu prodiranja, predstavlja rizik za ljudsko zdravlje kada se nađe izvan prihvatljivih granica. S druge strane, neionizirajuće zračenje nema dovoljnu energiju za ionizaciju tvari s kojom djeluje, ali također prenosi energiju na tvar. Prolaskom zračenja kroz tvari dolazi do međudjelovanja, pri kojem se mijenjaju svojstva tvari i svojstva zračenja. Primarnu ionizaciju uzrokuje čestica izravno, dok je sekundarna ionizacija proces nastajanja iona djelovanjem čestica nastalih primarnom ionizacijom, ako su prilikom nastanka dobili dovoljno veliku energiju za sekundarno ioniziranje tvari. [1, 2, 18, 19]

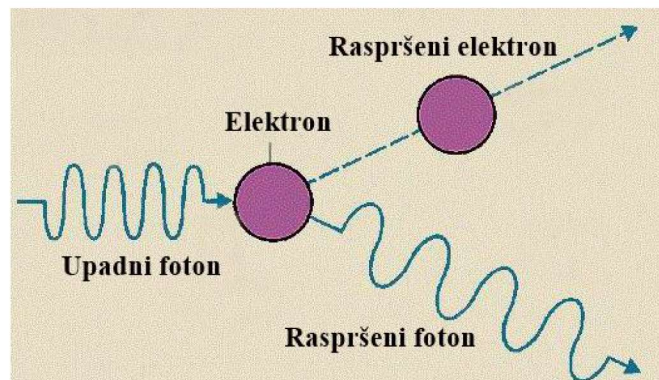
Međudjelovanje tvari s elektromagnetskim zračenjem događa se na tri načina: fotoelektrični efekt, Comptonov efekt te stvaranje parova elektron-pozitron. Fotoelektrični efekt (Slika 5) pojava je kada foton, koji ima energiju veću od energije vezanja elektrona u atomu, preda svu svoju energiju elektronu te time elektronu omogućava napuštanje atoma. [2]



Slika 5. Fotoelektrični efekt. Fotoni upadaju na metalnu ploču te elektron iz metala upija energiju fotona, čime ima veću energiju od izlaznog rada (energije vezanja za atom ili molekulu), zbog čega se elektron (fotoelektron) emitira iz metala. [2, 20, 21]

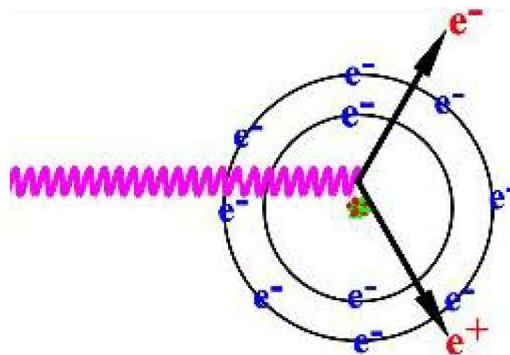
Comptonov efekt (Slika 6) pojava je pri kojoj foton predaje dio svoje energije vezanom ili slobodnom elektronu, čime gubi energiju te mu se smanjuje frekvencija. Energija sekundarnog fotona ovisi o kutu raspršenja. Zračenje se Comptonovim efektom djelomično apsorbira, a

djelomično raspršuje, dok u tvari nastaju ioni (ako je elektron bio vezan) i elektroni, koji, kao i kod fotoelektričnog efekta, ako imaju dovoljno energiju, mogu ionizirati tvar. [2, 21, 22, 23]



Slika 6. Comptonov efekt. Upadni foton međudjeluje s elektronom te se dio energije fotona prenosi na elektron, čime dolazi do raspršenja elektrona te fotona veće valne duljine. [23]

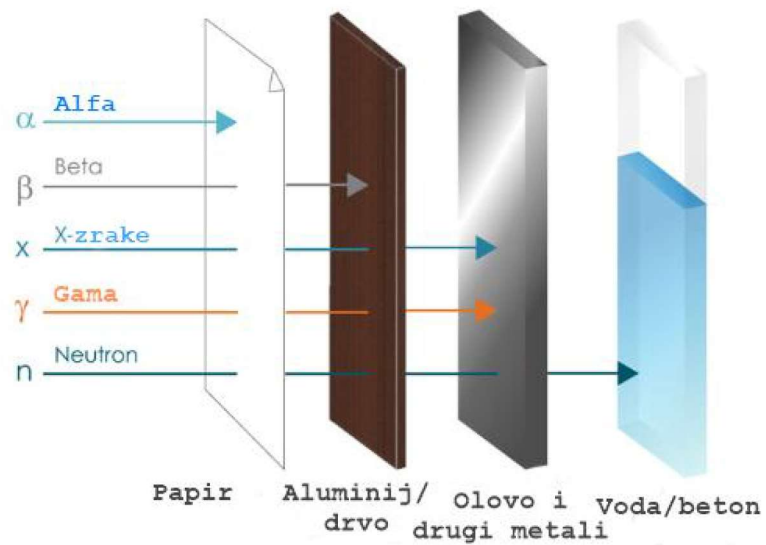
Stvaranje parova elektron-pozitron (Slika 7) pojava je koja nastaje ako je energija fotona veća ili jednaka od dvostrukog energijskog ekvivalenta mase elektrona, odnosno  $2 \cdot m_e \cdot c^2 = 1,022 \text{ MeV}$ . Ako takav foton proдре do atomske jezgre, u njenoj blizini nastaju dvije čestice - elektron i pozitron. Višak energije (iznad 1,022 MeV) raspoređuje se na kinetičke energije nastalih čestica.



Slika 7. Tvorba parova. U blizini atomske jezgre, foton energije  $\geq 1,022 \text{ MeV}$  transformira se u par čestica: elektron-pozitron, pri čemu jezgra preuzima dio količine gibanja fotona [24]

Nabijene čestice pri korpuskularnom zračenju uz pomoć električnog polja međudjeluju sa slobodnim i vezanim elektronima te ionima. One također ekscitiraju ili konačno ioniziraju atome. Elektroni i protoni nakon višestrukih sudara s elektronima i ionima tvari gube svoju energiju i pri tome mijenjaju smjer gibanja te je njihov put u tvari višestruko manji od njihova doseg u zraku. Za korpuskularno zračenje određene energije moguće je odrediti debljinu sloja neke tvari koja ga potpuno zaustavlja, uz uvjet da je poznat doseg zračenja. Različite vrste zračenja imaju različite sposobnosti prodiranja (Slika 8), ovisno o njihovoj masi i energiji. [1, 2, 21, 25, 26]





Slika 8. Vrste ionizirajućeg zračenja i prodornost;  $\alpha$  zrake zaustavlja papir,  $\beta$  aluminiij i drvo, X-zrake i  $\gamma$  zrake olovo i drugi metali, a neutrone voda i beton. [25]

## 4. Radioaktivni raspad

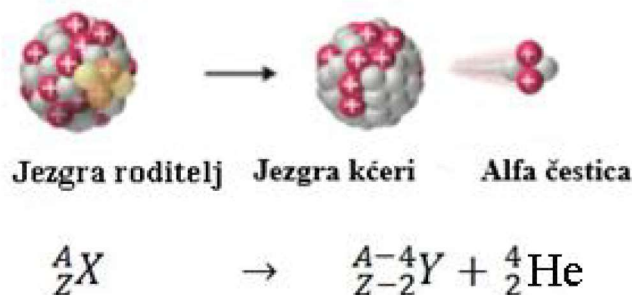
### 4.1. Vrste radioaktivnog raspada

Kada postoji neravnoteža protona i neutrona u jezgri, ona se raspada i emitira zračenje procesom koji se naziva radioaktivni raspad. Ovisno o emitiranoj čestici razlikuje se  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  raspad. [27, 28]

Primjerice,  $\alpha$  raspadom  $^{238}\text{U}$  nastaje  $^{234}\text{Th}$  uz emisiju  $\alpha$  čestice-jezgre atoma helija:



Na Slici 9 prikazan je  $\alpha$  raspad, gdje X predstavlja jezgru roditelj, odnosno početni element (u ovom slučaju oznaka X ne odnosi se na X-zrake). Y predstavlja jezgru nastalu nakon radioaktivnog raspada - jezgru kćeri.



Slika 9. Slikoviti prikaz  $\alpha$  raspada. Jezgra roditelj ( $\frac{A}{Z}X$ ) raspada se na jezgru kćer ( $\frac{A-4}{Z-2}Y$ ) emitirajući  $\alpha$  česticu ( $\frac{4}{2}\text{He}$ ). [28]

Postoje dvije vrste  $\beta$  raspada:  $\beta^-$  i  $\beta^+$ . Emisija elektrona je  $\beta^-$  raspad, a događa se kada je omjer broja neutrona i protona jezgre visok. Čestice odgovorne za proces  $\beta$  raspada su W bozoni, koji postoje u dva električki nabijena stanja:  $W^\pm$ . Jezgra se sastoji od neutrona i protona; neutron je sačinjen od tri kvarka ( $udd$ ), dok je proton sačinjen od ( $udu$ ). Kvarak je elementarna čestica podložna jakom međudjelovanju, a okus kvarka je kvantni broj kojim je kvark obilježen u standardnom modelu elementarnih čestica. Prilikom  $\beta^-$  ( $\beta^+$ ) raspada, jedan od kvarkova okusa  $d$  ( $u$ ) u neutronu (protonu), s negativnim (pozitivnim) električnim nabojem ( $-\frac{1}{3} \cdot e$ ), odnosno ( $+\frac{2}{3} \cdot e$ ), transformira se u kvark okusa  $u$  ( $d$ ) s pozitivnim (negativnim) električnim nabojem ( $+\frac{2}{3} \cdot e$ ), odnosno ( $-\frac{1}{3} \cdot e$ ) i dolazi do emitiranja čestice  $W^-$  ( $W^+$ ) bozona. Prilikom emitiranja  $W^-$  ( $W^+$ ) bozona, u cijelom je procesu očuvan električni naboj. Emitirani  $W^-$  ( $W^+$ ) bozon se tako odvoji od  $d$  ( $u$ ) kvarka, čime se neutron (proton) pretvara u proton (neutron). Pretvorba

neutrons u proton i obratno emisijom  $W^-$  ( $W^+$ ) bozona, a koji se brzo nakon toga raspada na elektron (pozitron) i antineutrino (neutrino), proces je  $\beta^-$  ( $\beta^+$ ) raspada, shematski prikazan na Slikama 10 i 11. Dakle, nema promjene u masenom broju, ali se atomski broj jezgre poveća (smanji) za 1. Neutrino ( $\nu_e$ ) je subatomska čestica bez električnog naboja, vrlo je male mase ( $1,67 \cdot 10^{-27}$  kg) i giba se brzinom svjetlosti, a antineutrino ( $\bar{\nu}_e$ ) je pripadna antičestica. Neutrino se emitira iz protona u  $\beta^+$  raspadu, dok se antineutrino emitira iz neutrona u  $\beta^-$  raspadu. Radi jednostavnosti se bozoni  $W^-$  i  $W^+$  ne zapisuju u procesu  $\beta$  raspada.

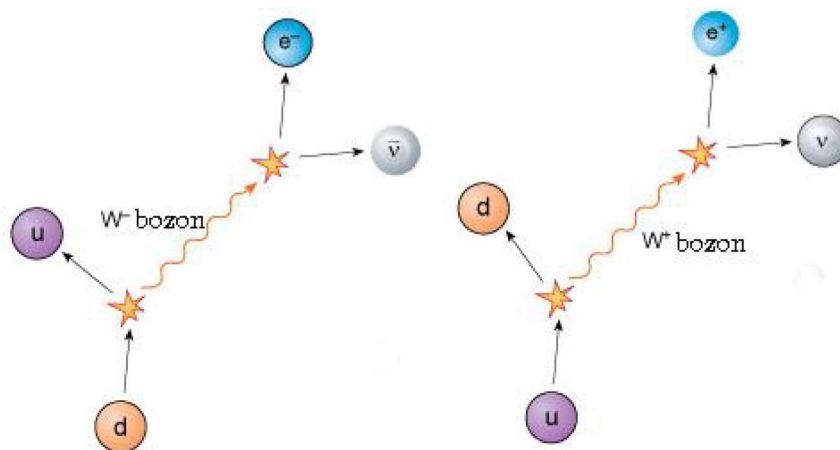
Proces  $\beta^-$  raspada zapisuje se kao:



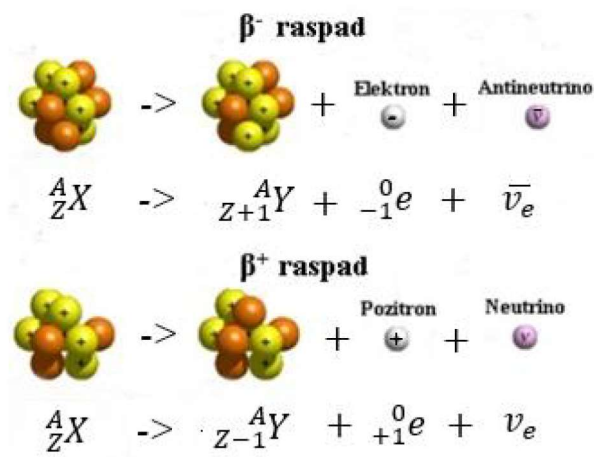
Proces  $\beta^+$  raspada zapisuje se kao:



gdje  ${}^0_{-1} e$  ( ${}^0_{+1} e$ ) predstavlja elektron (pozitron). [26, 27, 28, 29, 30, 31, 32]



Slika 10.  $\beta^-$  (lijevo) i  $\beta^+$  (desno) proces raspada: stvaranje i nestanak  $W^\pm$  bozona. Proces  $\beta^-$  raspada uključuje stvaranje i nestanak  $W^-$  bozona. Kvarak okusa  $d$  raspada se na  $W^-$  bozon i kvark okusa  $u$ , a  $W^-$  bozon se zatim raspada na elektron i antineutrino. Slično je i s  $\beta^+$  raspadom gdje se kvark okusa  $u$  raspada na  $W^+$  bozon i kvark okusa  $d$ . Zatim se  $W^+$  bozon raspada u pozitron i neutrino. [32]



Slika 11.  $\beta^-$  raspad i  $\beta^+$  raspad. Kod  $\beta^-$  ( $\beta^+$ ) raspada neutron (proton) se pretvara u proton (neutron) uz emisiju elektrona (pozitrona) i antineutrina (neutrina). [33]

Procesi sa Slike 11. mogu se zapisati kao:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (4)$$

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e \quad (5)$$

Elektronski uhvat (Slika 12) događa se ako je razlika u energijama između radioaktivne tvari i novog kemijskog elementa u koji se ta radioaktivna tvar raspada manja od 1,022 MeV. U procesu elektronskog uhvata, jezgra s manjkom neutrona (većim brojem protona od neutrona) privuče atomski elektron iz unutarnjih ljuski atomskih orbita. Budući da jezgra privuče jedan elektron, atomski broj se smanjuje za 1, ali se maseni broj ne mijenja. Energija raspada od 1,022 MeV nije dovoljna za stvaranje pozitrona. Jezgra ne može direktno apsorbirati elektron, već asorbira bozon. Elektron u jezgri ( $e_k$ ), preko W bozona u interakciji s kvarkom okusa  $u$  stvara kvark okusa  $d$  i elektronski neutrino. Radi jednostavnosti taj se rezultat zapisuje kao i kod  $\beta$  raspada, gdje se proton pretvara u neutron uz emisiju neutrina (bez zapisivanja W bozona):

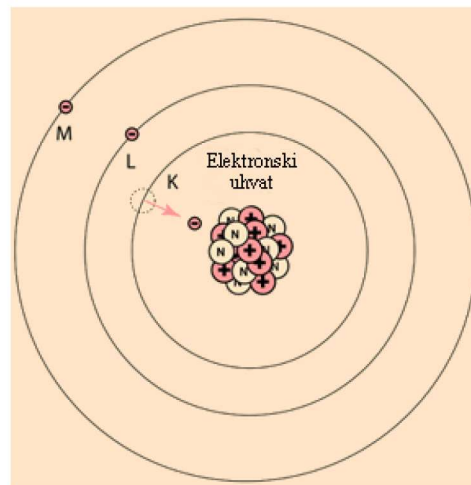
$$p + e_k = n + \nu \quad (6)$$

Elektronski uhvat može se zapisati kao:

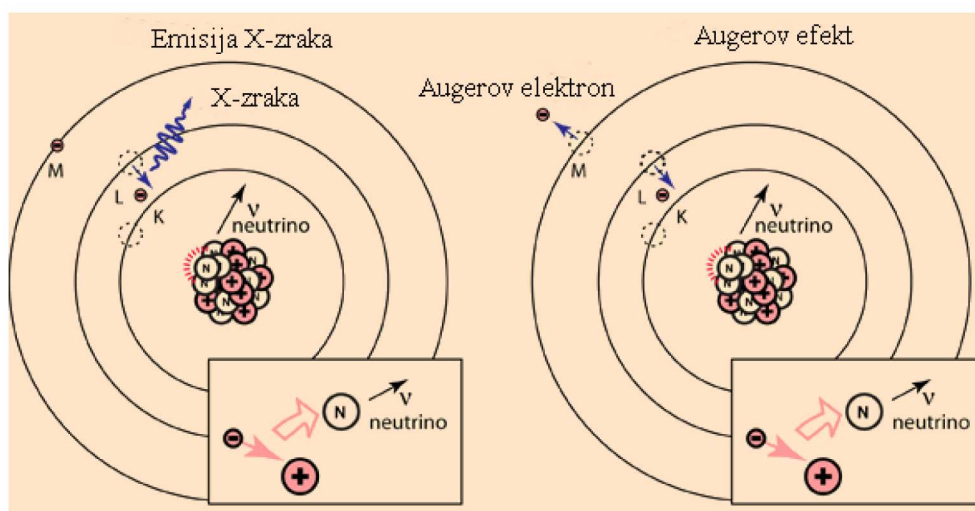
$${}^0_{-1} e + {}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y \quad (7)$$

Proces elektronskog uhvata ostavlja ispražnjeno mjesto na energijskoj razini elektrona s kojeg je elektron došao. Prazno mjesto u K-ljusci popuni se spuštanjem orbitalnog elektrona s više razine, a energija prijelaza emitira se u obliku X-zrake (fotona) ili emitiranjem vanjskog elektrona - Augerovih elektrona (Slika 13) u procesu koji se naziva Augerov efekt. Augerov efekt može se

opisati kao prijelaz kod kojeg se praznina (šupljina) u unutarnjoj elektronskoj ljusci atoma popuni elektronom iz vanjske ljuske, čime prenosi energiju na drugi elektron koji je zatim emitiran iz atomske orbitale. [27, 34, 35, 36]



Slika 12. Elektronski uhvat. Jezgra s manjkom neutrona hvata elektron iz K ljuske. [36]



Slika 13. (a) Emisija X-zraka. (b) Augerov efekt (emitiranje vanjskog elektrona). Uхват elektrona popraćen je emisijom neutrina. Proces elektronskog uhvata ostavlja prazno mjesto na razini s koje elektron dolazi te se ono popunjava spuštanjem elektrona s više razine. [36]

Najčešće, nakon što je jezgra doživjela  $\alpha$  ili  $\beta$  raspad, dolazi do  $\gamma$  raspada (Slika 14.). Emisija  $\gamma$  zraka nije popraćena promjenom masenog ili atomskog broja, već se samo mijenja energija jezgre. Pobuđena jezgra, nakon emitiranja  $\alpha$  ili  $\beta$  čestica, pri povratku u stanje niže energije emitira  $\gamma$  zračenje. [16, 28]

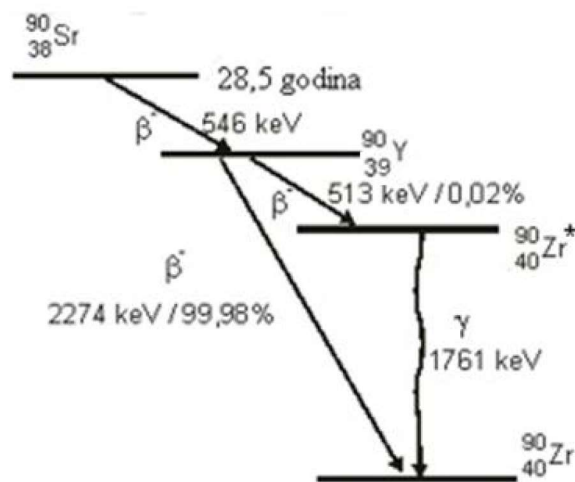


Slika 14. Slikoviti prikaz  $\gamma$  raspada. Jezgra roditelj ( ${}^A_Z X^*$ ) raspada se na jezgru kćer ( ${}^A_Z X$ ) emitirajući foton ( ${}^0_0 \gamma$ ). [28]

#### 4.2. Raspadi radioaktivnih elemenata: ${}^{90}\text{Sr}$ , ${}^{60}\text{Co}$ , ${}^{226}\text{Ra}$ te ${}^{22}\text{Na}$

U eksperimentalnom dijelu diplomskog rada korišteni su radioaktivni elementi:  ${}^{90}\text{Sr}$ ,  ${}^{60}\text{Co}$ ,  ${}^{22}\text{Na}$  i  ${}^{226}\text{Ra}$  te su u ovom potpoglavlju prikazane sheme radioaktivnog raspada navedenih radionuklida.

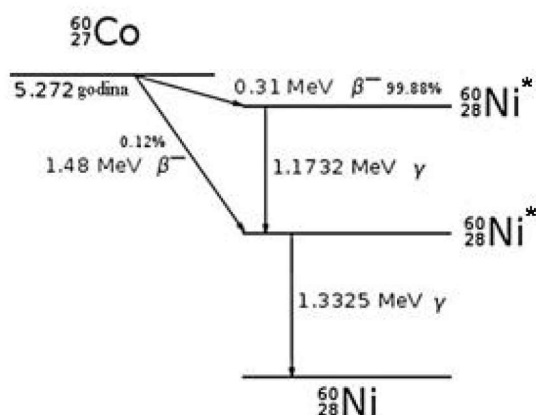
Na Slici 15 vidljiv je radioaktivni raspad izotopa  ${}^{90}\text{Sr}$  s vremenom poluraspada od 28,5 godina.



Slika 15. Shema radioaktivnog raspada izotopa  ${}^{90}\text{Sr}$ . [37]

Radioaktivni izotop  ${}^{90}\text{Sr}$  je  $\beta^-$  i  $\gamma$  emiter, a raspada se emisijom  $\beta^-$  čestica s maksimalnom energijom od 546 keV, čime nastaje  ${}^{90}\text{Y}$ . On se može raspasti emisijom  $\beta^-$  čestica energije 513 keV (čime nastaje pobuđeno stanje  ${}^{90}\text{Zr}^*$ , koje nakon  $\gamma$  emisije od 1761 keV prelazi u osnovno stanje) ili 2774 keV, nakon čega nastaje  ${}^{90}\text{Zr}$  (u osnovnom stanju).

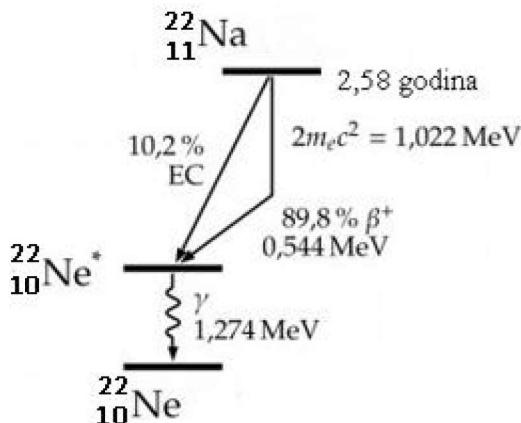
Na Slici 16 vidljiv je radioaktivni raspad izotopa  $^{60}\text{Co}$  s vremenom poluraspada od 5,272 godina.



Slika 16. Shema radioaktivnog raspada izotopa  $^{60}\text{Co}$ . [37]

Radioaktivni izotop  $^{60}\text{Co}$  je  $\beta^-$  i  $\gamma$  emiter, a raspada se emisijom  $\beta^-$  čestica s maksimalnom energijom od 0,31 MeV, odnosno 1,48 MeV, čime prelazi u pobuđeno stanje  $^{60}\text{Ni}^*$  (koje nakon kaskade  $\gamma$  zraka prelazi u osnovno stanje).

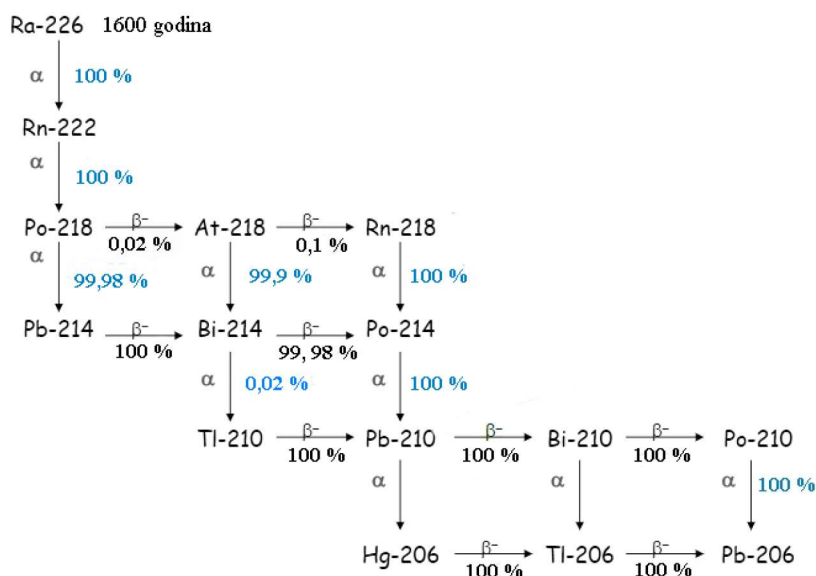
Na Slici 17 vidljiv je radioaktivni raspad izotopa  $^{22}\text{Na}$  s vremenom poluraspada od 2,58 godina.



Slika 17. Shema radioaktivnog raspada izotopa  $^{22}\text{Na}$ . [37, 38, 39]

Radioaktivni izotop  $^{22}\text{Na}$  je  $\beta^+$  i  $\gamma$  emiter, a raspada se 89,9%  $\beta^+$  raspadom s maksimalnom energijom od 0,544 MeV te 10,2% elektronskim uhvatom. Oba procesa vode do istog pobuđenog stanja  $^{22}\text{Ne}^*$ , koji se relaksira emisijom  $\gamma$  fotona energije 1,274 MeV, čime postaje stabilan izotop.

Na Slici 18 vidljiv je radioaktivni raspad izotopa  $^{226}\text{Ra}$  s vremenom poluraspada od 1600 godina.



Slika 18. Lanac radioaktivnog raspada  $^{226}\text{Ra}$  na stabilni izotop  $^{206}\text{Pb}$ . [40]

Radioaktivni izotop  $^{226}\text{Ra}$  je uglavnom  $\alpha$  emiter, a raspada se dugačkim lancem počevši od  $^{222}\text{Rn}$  sve do  $^{206}\text{Pb}$  (a kod njegovih potomaka javljaju se  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  zračenje). Na Slici 18 vrlo je uočljivo da se neki od radioaktivnih elemenata raspadaju na dva načina,  $\alpha$  i  $\beta^-$  raspadom, dok stabilni izotop  $^{206}\text{Pb}$  u lancu radioaktivnog raspada nastaje  $\alpha$  raspadom  $^{210}\text{Po}$  ili  $\beta^-$  raspadom  $^{206}\text{Tl}$ .

### 4.3. Zakon radioaktivnog raspada

Radioaktivni raspad neovisan je o vanjskim utjecajima poput temperature, tlaka, kemijskog ili agregatnog stanja. Brzina promjene broja radioaktivnih jezgara proporcionalna je broju prisutnih aktivnih jezgara, a konstanta proporcionalnosti naziva se konstanta radioaktivnog raspada  $\lambda$ , što je opisano izrazom:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N \quad / \int \quad (8)$$

gdje je  $N$  broj aktivnih jezgri u konačnom trenutku, a znak minus (-) pokazuje da se broj nestabilnih jezgri smanjuje.

Integrirajući izraz (8), slijedi:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (9)$$



gdje je  $N_0$  izvorni broj aktivnih jezgri. [16]

Broj nuklida  $\Delta N$  koji se raspadne u vremenskom intervalu  $\Delta t$  ovisi o vrsti tvari, početnom broju nuklida  $N_0$  i vremenu  $\Delta t$ ;

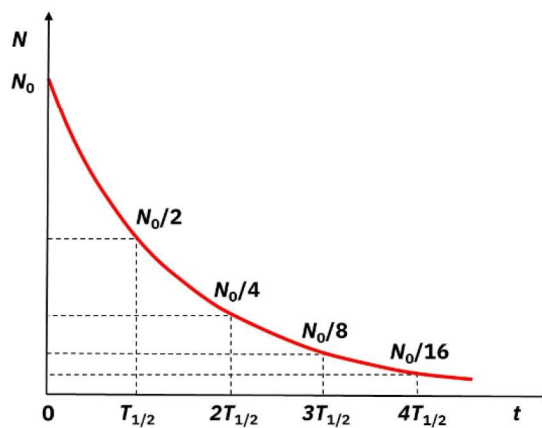
$$\Delta N = -\lambda \cdot N_0 \cdot \Delta t \quad (10)$$

Mjerna jedinica za konstantu radioaktivnog raspada je  $s^{-1}$ . Nakon vremena  $t = T_{1/2}$  (vrijeme poluraspada) broj neraspadnutih jezgara iznosi točno polovicu početnog broja jezgara tj.  $N = \frac{N_0}{2}$  te

slijedi da je  $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$  i :

$$N = N_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot t} \quad (11)$$

Na Slici 19 prikazan je eksponencijalni pad broja neraspadnutih jezgara  $N$  tijekom vremena  $t$ .



Slika 19. Grafički prikaz broja nestabilnih jezgri  $N$  kao funkcija vremena  $t$ . [3]

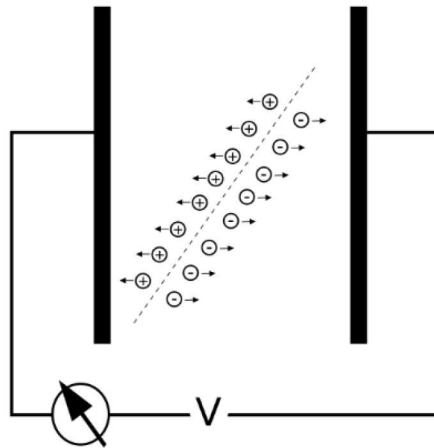
## 5. Detekcija ionizirajućeg zračenja

Čovjek ionizirajuće zračenje može zapaziti samo neizravno putem pojava koje zračenje uzrokuje u tvarima jer nema osjetilo kojim bi izravno zapazio ionizirajuće zračenje. Većina uređaja koji mogu zapaziti i mjeriti zračenje razvrstavaju se u tri skupine, a to su: vizualizatori tragova, dozimetri i brojači. Vizualizatori tragova privremeno ili trajno prikazuju tragove čestica ili fotona u tvari. Dozimetri su uređaji pomoću kojih se mjeri doza zračenja, odnosno energija koju je zračenje predalo tvari. Brojači su uređaji koji registriraju i broje naelektrizirane čestice i fotone  $\gamma$  zračenja. U takvu vrstu uređaja spadaju Geiger-Müllerov (G-M) brojač (korišten za mjerenje svih eksperimenata unutar ovog diplomskog rada), scintilacijski brojač, poluvodički brojač te ostali suvremeni brojači koji omogućuju ne samo brojanje već i lokaliziranje čestica zračenja.

Sposobnost identificiranja izvora zračenja i mjerenja količine zračenja ključno je za praćenje okoliša, zaštitu od zračenja i razvoj sigurnosnih programa. Detekcija se vrši posredno korištenjem materijala osjetljivog na ionizirajuće zračenje. Kada ionizirajuće zračenje stupi u interakciju s osjetljivim materijalom (plinovi, kristali, poluvodiči...) u detektorskom uređaju, ono generira signal. Generirani signal iz upadnog zračenja stvara se brojanjem impulsa koji se javljaju na osjetljivom volumenu detektora. [2, 41, 42, 43, 44]

### 5.1. Ionizacijska komora

Ionizacijska komora (Slika 20) posuda je koja se sastoji od dviju elektroda, anode i katode, spojenih na napon i smještenih u cijevi koja je ispunjena plinom (uobičajeno zrakom), koji služi kao mjerna tvar te je prikladna za detekciju fotona i elektrona niskih energija. Kada zračenje prolazi kroz plin, ono ga ionizira. Pod utjecajem električnog polja pozitivni ioni putuju prema negativnoj elektrodi odnosno katodi, a elektroni prema pozitivnoj elektrodi odnosno anodi. Kretanje naboja uzrokuje strujni impuls koji se zatim registrira. Ionizacijska komora ima mali napon među elektrodama (kako ne bi ubrzavala elektrone tako da na putu do anode mogu ponovno ionizirati atome plina), ali ujedno dovoljno velik da razdvaja elektrone i pozitivne ione. Električni puls u ionizacijskoj komori proporcionalan je energiji upadne čestice odnosno broju nastalih parova elektron-ion. [2, 41, 42, 43]



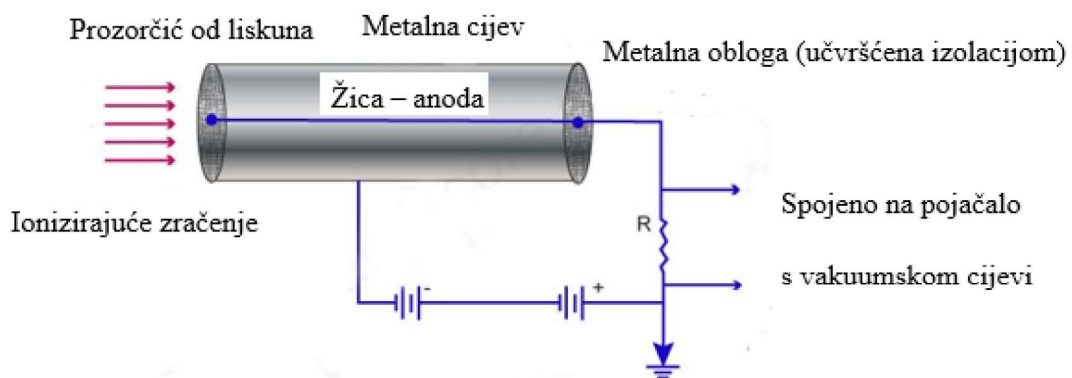
Slika 20. Shema ionizacijske komore: elektrode stvaraju električno polje - anoda (desno) i katoda (lijevo), spojenih na izvor napona i ampermetar koji služi za mjerenje ionizacijske struje. [44]

## 5.2. Geiger-Müllerov brojač

Geiger-Müllerov brojač (Slika 21 i Slika 22) uređaj je u kojem čestice uzrokuju lančanu ionizaciju plina. Geiger-Müllerova cijev sastoji se od metalne cijevi ispunjene argonom, helijem ili neonom (primarnim detekcijskim plinovima) pomiješanim s malom količinom alkoholne pare ili s plinom broma (plinovima za gašenje). Primarnom plinu za punjenje dodaje se plin za gašenje, odnosno u plinsko punjenje unosi se mješavina pare broma ili alkohola kako bi se lančana reakcija zaustavila. Osnovni dio G-M brojača je G-M cijev, u kojoj su elektrode spojene na izvor mnogo višeg napona nego što je to slučaj s ionizacijskom komorom te komora, koja je, umjesto zrakom ispunjena inertnim plinom, najčešće helijem koji se nalazi na niskom tlaku (atmosferskom). Radni napon za optimalan rad uređaja proizvođača PYWHE (korišten u ovom radu) uobičajeno iznosi oko 500 V, dok je G-M područje za većinu uređaja prikazano na slici 23. Cijev je obložena slojem metala te predstavlja katodu, a anoda je žica koja prolazi središtem komore. Kada ionizirajuće zračenje dođe u cijev, neke od molekula plina ioniziraju se izravno, a neke neizravno pomoću sekundarnih elektrona proizvedenih u stjenkama cijevi. Rezultat toga je stvaranje ionskih parova, pozitivno nabijenih iona i elektrona u plinu. U neposrednoj blizini anode elektroni imaju dovoljno energije za sekundarnu ionizaciju. Elektroni su vrlo pokretljivi i brzo stižu na anodu. Pozitivni ioni su spori i dugo se zadržavaju u blizini anode te tako u tom području smanjuju jakost električnog polja, čime nastaje elektronska lavina. Lančanom ionizacijom dolazi do brze ionizacije svog plina u cijevi. Zbog naglog povećanja vodljivosti plina, napon između elektroda naglo se smanji te se ionizacija

zaustavlja. Za vrijeme dok je plin u cijevi ioniziran, G-M cijev ne može registrirati nove čestice i fotone zračenja. To vrijeme naziva se mrtvo vrijeme detektora i ono iznosi oko  $10^{-4}$  s. Zatvara se strujni krug, a u vanjskom dijelu kruga na otporniku nastaje naponski impuls koji dolazi na kondenzator. Nakon kondenzatora, impuls dolazi do električnog brojila, koji ga registrira te ispisuje podatke vidljive na ekranu. Takva brojila imaju i zvučnik koji predstavlja zvučni indikator zračenja. [2, 45, 46]

Za eksperimentalni dio ovog diplomskog rada korišten je G-M brojač proizvođača PHYWE (Slika 22), koji omogućava odabir perioda mjerenja, pokretanje, zaustavljanje i resetiranje mjerenja te mogućnost izbora bešumnog odbroja ili zvučne indikacije odbroja.



Slika 21. Shema Geiger-Müllerova brojača. [46]

Struja kroz otpornik ovog brojača proizvodi naponski impuls reda veličine  $10 \mu\text{V}$ , koji se pomoću pojačala pojačava na oko 5 do 50 V. Pojačani impuls se zatim šalje na brojač. Kako svaka nadolazeća čestica proizvodi puls, broj detektiranih čestica može se prikazati na ekranu G-M brojača. [46]

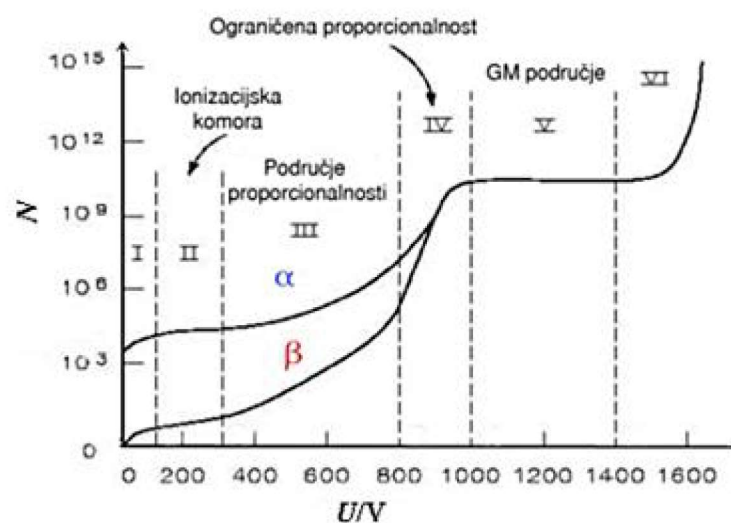


Slika 22. Geiger-Müllerov brojač proizvođača PHYWE.

### 5.3. Proporcionalni brojač

Proporcionalni brojač prikladan je za detekciju  $\alpha$  zračenja. Vrlo je sličan G-M brojaču, ali kod njega ne dolazi do nastanka lavine elektrona, već do multiplikacije broja parova pozitivni ion-elektron. Primjerice, ako ionizaciju izazove  $\alpha$  zračenje određene energije, ono proizvede određen broj parova, a ako u brojač uđe  $\alpha$  zračenje dvostruko veće energije tada nastaje dvostruko veći broj takvih parova. Kod G-M brojača gubi se proporcionalnost zbog previsokog napona na elektrodama. [47]

Na Slici 23 vidljiva su područja pri kojima rade pojedini brojači (prikupljeni naboj/radni napon).



Slika 23. Grafički prikaz područja (regije) rada plinskih brojača. [45]

Na Slici 23, različito su označene detekcije  $\alpha$  i  $\beta$  čestica kako bi se pokazao učinak različitih energija zračenja, ali isti principi vrijedi za sve oblike ionizirajućeg zračenja. Može se uočiti da kod G-M brojača nema razlike u detekciji  $\alpha$  i  $\beta$  signala. Os apscisa predstavlja vrijednosti primijenjenog (radnog) napona, a os ordinata vrijednost/broj ionskih parova. Ionizacijsko područje je područje određenog napona pri kojem radi ionizacijska komora, a prema slici 24. ono iznosi između 120 V i 320 V. Područje proporcionalnosti je naponsko područje pri kojem radi proporcionalni brojač, a ono iznosi između 320 V i 800 V. G-M brojač radi u području napona između 1000 V i 1400 V. U području rekombinacije (do 120 V) električno polje nije dovoljno veliko da ubrza elektrone i ione. Oni se mogu rekombinirati ubrzo nakon što su proizvedeni, a samo mali dio proizvedenih elektrona i iona dopijeva do svojih elektroda te u tom području brojači ne rade. Ako bi se napon povećavao iznad G-M područja, tada zbog naglog porasta struje dolazi do proboja brojača, što ne ovisi o ionizaciji radioaktivnim zračenjem. [45, 46]

## **6. Primjena zračenja u industriji**

### **6.1. Upotreba radioizotopa u industriji**

Postoje brojne i raznolike upotrebe zračenja u industriji. Primjer je korištenje  $\gamma$  zračenja u automobilskoj industriji (za ispitivanje kvalitete čelika i dobivanje debljine kositra i aluminijske folije) te u konstrukciji cestovnih površina (za mjerenje gustoće cestovnih površina i podzemlja) i dr. Radioizotopi unutar proizvodnje djeluju i kao industrijski tragači za praćenje filtracije i protoka tekućina, lociranje curenja u cjevovodima, mjerenje istrošenosti i praćenje korozije opreme. U usporedbi s proizvodnjom u kojoj se koristi mikrometerski vijak (gdje je proces mjerenja spor i nesiguran), brža proizvodnja većih količina tankih materijala (poput papira, aluminijske folije i prozirne folije), omogućena je razvojem beskontaktnih metoda kontrole kvalitete od kojih je jedna korištenje radioaktivnosti. Tanki materijali kao što je papir imaju samo jedno važno mjerenje za praćenje - debljinu. Debljina papira, plastike ili tankih metalnih ploča može se kontrolirati mjerenjem količine  $\beta$  zračenja koje prodire kroz materijal G-M brojačem. [48, 49, 50]

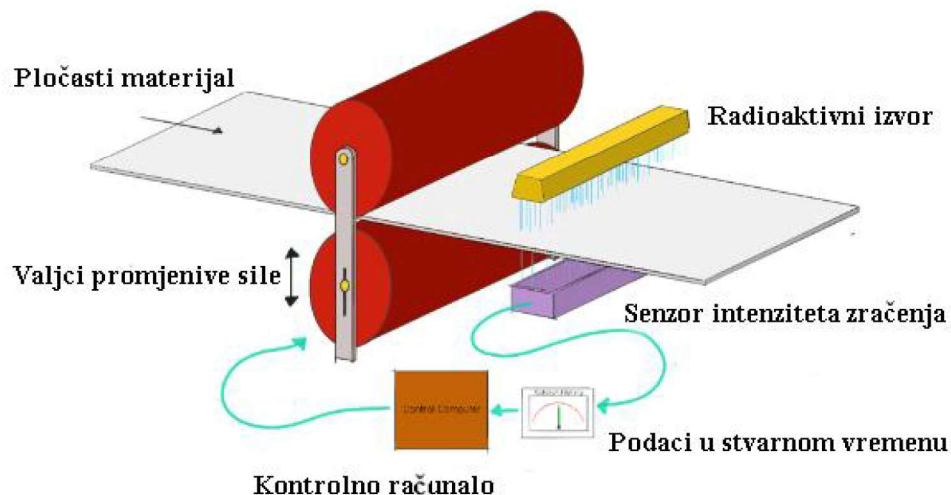
U Tablici 1 prikazana je primjena određenih radioaktivnih izotopa u industriji.

Tablica 1. Upotreba radioaktivnih izotopa u industriji. [50]

Radioaktivni izotop	Primjena u industriji
$^{241}\text{Am}$	Detektori dima, mjerenje razina olova u boji, u procesima valjanja kao što su proizvodnja čelika i papira te za pomoć u određivanju mjesta gdje treba bušiti naftne bušotine.
$^{24}\text{Na}$	Proučavanje naftnih bušotina i lociranje curenja u cjevovodima.
$^{235}\text{U}$	Gorivo za nuklearne elektrane i pomorske pogonske sustave, proizvodnja fluorescentnog stakla i zidnih pločica u boji.
$^{252}\text{Cf}$	Za pregled zrakoplovne prtljage na skrivene eksplozive, mjerenje sadržaja vlage u tlu u cestogradnji i građevinskoj industriji te za mjerenje vlage materijala pohranjenih u tlu.
$^{109}\text{Cd}$	Prilikom analize metalnih legura za provjeru sortiranja zaliha i otpada.
$^{14}\text{C}$	U farmaceutskim istraživanjima kako bi se osiguralo metaboliziranje potencijalnih lijekova bez stvaranja štetnih nusproizvoda, za mjerenje starosti drveta te materijala koji sadrže ugljik i podzemne vode.
$^{137}\text{Cs}$	Za mjerenje ispravnih doza radioaktivnih lijekova za pacijente, mjerenje i kontrolu protoka tekućine u naftovodima, obavještanje istraživača jesu li naftne bušotine začepjene pijeskom te za osiguranje odgovarajuće razine punjenja za pakete hrane, lijekova i drugih proizvoda (prilikom čega proizvodi ne postaju radioaktivni).
$^{85}\text{Kr}$	Za mjerenje debljine tanke plastike i limova, gume, tekstila i papira te za mjerenje razine prašine i onečišćenja.
$^{147}\text{Pm}$	Za mjerenje debljine tanke plastike, tankog lima, gume, tekstila i papira.
$^{204}\text{Tl}$	Za mjerenje razine prašine i zagađivača na filter papiru te mjerenje debljine plastike, lima, gume, tekstila i papira.

## 6.1. Praćenje debljine - prigušenje zračenja

Materijal može raspršiti ili apsorbirati čestice zračenja, dok neke čestice mogu proći kroz materijal. Kada je nuklearno zračenje blokirano materijalom, ono je oslabljeno do razine na kojoj se više ne detektira. Za određeni materijal i vrstu zračenja, količina prigušenja uzrokovana materijalom eksponencijalno je ovisna o njegovoj debljini. Radioaktivni izvor s dugim vremenom poluraspada idealan je za primjenu u industriji jer dugo vrijeme poluraspada znači da se radioaktivni izvor neće morati često mijenjati, a razina aktivnosti će biti gotovo konstantna svaki dan. Instrument potreban za praćenje radioaktivne debljine ponekad se naziva radioaktivni mjerač. Tanki materijali kod kojih je potrebno mjerenje debljine obično se proizvode pomoću valjaka koji oblikuju materijal u list kompresijom i izvlačenjem. (Slika 24) [49, 50, 51]



Slika. 24. Mjerenje debljine materijala pomoću radioaktivnog izvora. Pločasti materijal postavljen je između valjaka, a zračenje prolazi kroz materijal i detektira se, nakon čega su vidljivi podaci o debljini materijala, koju je moguće korigirati promjenom sile na valjcima. [49]

Nakon što je pločasti materijal prošao kroz set valjaka, prolazi ispod radioaktivnog izvora poznatog intenziteta. Intenzitet zračenja je snaga prenesena po jedinici površine okomite na smjer širenja energije. Detektor s druge strane materijala mjeri intenzitet zračenja koje prolazi kroz materijal i te podatke šalje u računalni procesor. Procesor izračuna debljinu materijala na temelju poznatog početnog intenziteta zračenja, izmjenjenog intenziteta zračenja koje je prošlo kroz materijal i svojstava prigušenja materijala, a ta se izračunata debljina uspoređuje s ciljnom debljinom. Ako je materijal predebeo ili tanak, računalo prilagođava silu na valjcima kako bi ispravilo grešku. [49, 51]



Količina zračenja koju će određena debljina materijala prigušiti ovisi o koeficijentu prigušenja  $\mu$ . To je svojstvo materijala koje opisuje udio zračenja koje se raspršuje ili apsorbira po jedinici debljine dok prolazi kroz materijal:

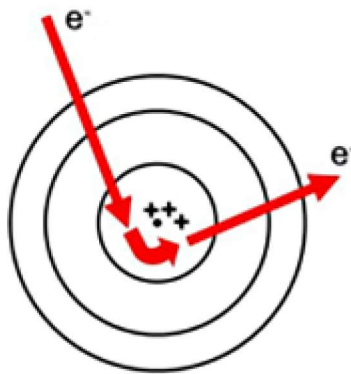
$$I = I_0 e^{-\mu \cdot d} \quad (12)$$

gdje je  $I$  je intenzitet zračenja koji je prošao kroz materijal,  $I_0$  je početni intenzitet zračenja, a  $d$  je debljina materijala. Budući da se intenzitet zračenja može kontinuirano mjeriti, ova tehnika može omogućiti pregled tankih materijala u stvarnom vremenu dok se proizvode na neprekidnoj proizvodnoj liniji. [51]

## 7. Povratno raspršenje i $\beta$ debljinomjer

Povratno raspršenje je naziv za raspršenje zračenja ili čestica u smjeru suprotnom od upadnog zračenja zbog refleksije na česticama medija kroz koji prolaze, a događa se kada se elektroni ili fotoni raspršuju na površini uzorka pri kutovima većim od  $60^\circ$ . U ovom radu izveden je eksperiment u kojem dolazi do povratnog raspršenja pri kutu od  $60^\circ$  između cijevi brojača i pravca u kojem je usmjeren radioaktivni izvor jer cijev brojača detektira čestice i pri nešto većim kutovima s obzirom na mjesto na kojem je postavljen. Zbog provođenja zaštitnih mjera tijekom pokusa s radioaktivnim izvorom, izvor i cijev brojača postavljeni pod kutom od  $30^\circ$  s obzirom na okomicu na pločicu.

Precizni kutovi raspršenja ovise o vrsti zračenja i svojstvima materijala. Kada  $\beta$  čestica uđe u materijal, njezin se put može skrenuti pri interakciji s jezgrom materijala. Primjerice,  $\beta^-$  čestice su nabijene suprotno od pozitivno nabijene jezgre i između njih postoji privlačna sila. U povratnom raspršenju, elektron iz ulaznog snopa otklonjen je elektrostatskim poljem pozitivne jezgre (Slika 25). Skretanja koja nastaju učinak su raspršenja čestica, a ovise o početnoj energiji  $\beta$  čestica. Posljedica raspršenja čestica je promjena smjera  $\beta$  čestice za nekoliko stupnjeva, ali ako je  $\beta$  čestica prikladno orijentirana u odnosu na jezgru, skrenut će za vrijednost od oko  $180^\circ$ , što rezultira izlaz iz materijala s iste strane s koje je i ušla. [52, 53, 54]



Slika 25. Osnovna shema otklona elektrona. [53]

Princip povratnog raspršenja koristi se u industriji kako bi se odredila debljina premaza na površini materijala, a primjer kod kojeg dolazi do povratnog raspršenja unutar ovog diplomskog rada nalazi se u pokusu Model radioaktivnog refleksijskog debljinomjera. [53, 55, 56]

## 8. Eksperimentalni dio

U eksperimentalnom dijelu diplomskog rada opisano je pet različitih eksperimenata u kojima dolazi do transmisije, apsorpcije i/ili refleksije ionizirajućih čestica. U eksperimentima su korišteni radioaktivni izvori:  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  te  $^{22}\text{Na}$ , gdje su:  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{60}\text{Co}$  i  $^{22}\text{Na}$   $\beta$  i  $\gamma$  emiteri. Radioaktivni izotop  $^{226}\text{Ra}$  je uglavnom  $\alpha$  emiter, a kako je već spomenuto u poglavlju 4.2, tijekom njegova raspada javljaju se sve tri vrste zračenja. U većini eksperimenata cijev brojača i izvor udaljeni su 5,0 cm, a vrijeme mjerenja je u svakom pokusu postavljeno na 100 s (izbornik na G-M brojaču ima postavke za mjerenje od 1, 10, 60, 100,  $\infty$  i auto/10 s koji bilježi odbroj na svakih 10 sekundi bez potrebe za resetiranjem). U eksperimentima kod kojih dolazi do refleksije čestica, vrijeme mjerenja također je postavljeno na 100 s, a cijev brojača i izvor postavljeni su pod kutom od  $30^\circ$  u odnosu na okomicu na nosač olovne pločice i udaljeni su za 2,0 cm, dok je izvor od nosača pločice udaljen i za 9,0 cm. Cijev brojača korištena u eksperimentima je tipa B (Slika 26). Razlikuje se od tipa A u tome što je kabel vezan direktno za cijev brojača, dok je kod tipa A cijev brojača odvojena od kabela.



Slika 26. G-M cijev; ionizacijska komora - tip B. [57]

U prvom setu pokusa (Pokusi 1) mjerena je visina ispune epruvete olovnom sačmom (Slika 27) pomoću svih korištenih izvora:  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  te  $^{22}\text{Na}$ . Cilj vježbe je pomoću radioaktivnog izvora i G-M brojača odrediti visinu ispune epruvete olovnom sačmom te pokazati koji od izvora s kojim se izvode mjerenja je najpogodniji za ovaj pokus, a koji predstavlja model industrijskog razinomjera.



Slika 27. a) Olovna sačma i b) Olovna sačma u epruveti korištena u pokusima 1.

U drugom setu mjerenja (Pokusi 2) predstavljen je model industrijskog debljinomjera u tvornicama papira, na način da je baždarena navedena aparatura (izrađen je grafikon za poznate veličine - debljine fotokopirnog papira te detektiranih odbroja) i određena je debljina papira pomoću povratnog raspršenja tako da su G-M cijev i izvor ( $^{90}\text{Sr}$  te  $^{60}\text{Co}$ ) postavljeni pod kutom od  $30^\circ$  u odnosu na okomicu na nosač aluminijske pločice.

U trećem i četvrtom setu mjerenja (Pokusi 3 i 4) izmjeren je odbroj u ovisnosti o vrsti materijala/štita od zračenja kod procesa transmisije i apsorpcije, gdje su se koristili izvori  $^{90}\text{Sr}$  te  $^{60}\text{Co}$ , a cilj vježbi je odrediti smanjenje odbroja u ovisnosti o broju traka fotokopirnog papira, odnosno o vrsti materijala (Slika 28).



Slika 28. Materijali korišteni u pokusima 3 (pločice od: aluminijske, olova i papira).

Proveden je i Pokus 5, gdje se pokazala kutna raspodjela ionizirajućih čestica u jednoj ravnini oko radioaktivnog izvora. To je učinjeno jer se prilikom mjerenja uočio konstantan odbroj pri refleksiji čestica, što znači da se na G-M brojaču detektiraju  $\gamma$  čestice i sa strane osim od izravnog puta nakon refleksije, za što je posljedica bila udaljavanje cijevi detektora s 2,0 cm na 9,0 cm.

Svi eksperimenti unutar diplomskog rada proizašli su iz ideja i naputaka kataloga eksperimenata autora Fiebich, R. pod naslovom STUDENT EXPERIMENTS PHYSICS: Radioactivity. 1st Edition. Göttingen: PHYWE - Series of publications.

### 8.1. Poissonova raspodjela i stohastički proces

Radioaktivni raspad stohastički je, odnosno statistički slučajan proces. Takvi procesi opisuju se Poissonovom raspodjelom, koja se primjenjuje za procese koji se događaju nasumično i koji su međusobno nezavisni, odnosno vjerojatnost jednog događaja ne utječe na vjerojatnost drugog događaja. [58]

Također, Poissonova raspodjela primjenjuje se za „pojave koje samim svojim događanjem smanjuju ukupnu početnu populaciju“ te u kojoj vrijedi „čestica koja se jednom raspala više se ne raspada“, što je slučaj kod radioaktivnog raspada. [59]

U literaturi [60] se navodi da, ako se radi o broju emitiranih čestica koji je unutar vremenskog intervala od 0,1 s manji od 20, primjenjuje se Poissonova raspodjela, dok se za veći broj emitiranih čestica koristi Gaussova raspodjela. U skladu s tim, mjerene veličine ovog diplomskog rada pripadaju Poissonovoj raspodjeli. Maksimalan izmjeren odbroj (potpoglavlje 8.6) u vremenskom intervalu od 100 s iznosi 8431, što odgovara brzini od  $\approx 8$  čestica u 0,1 s, stoga je prikladno koristiti Poissonovu raspodjelu.

Poissonova distribucija je diskretna distribucija vjerojatnosti i daje vjerojatnost da će se događaj dogoditi određen broj puta ( $n$ ) unutar zadanog intervala vremena ili prostora. Nju opisuje jedan parametar,  $\lambda$  (lambda), koji označava srednji broj događaja. [61]

Poissonova statistika koristi se unutar ovog diplomskog rada kako bi se dobile informacije o mjernim pogreškama dobivenih srednjih vrijednosti. U statistici se za opisivanje karakteristika distribucije koriste momenti. Primjerice, ako je slučajna varijabla koja nas zanima  $X$ , tada su momenti definirani kao očekivane vrijednosti:  $\langle X \rangle$  (prvi moment),  $\langle X^2 \rangle$  (drugi moment),

$\langle X^3 \rangle, \langle X^4 \rangle, \dots, \langle X^n \rangle$ . Varijanca predstavlja srednje kvadratno odstupanje niza podataka od njihove srednje vrijednosti, a jednaka je drugom momentu. Standardna devijacija računa se kao drugi korijen varijance. Opći izraz za varijancu tada glasi:

$$\sigma^2 = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2 \quad (13)$$

a za standardnu devijaciju:

$$\sigma = \sqrt{\langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2} \quad (14)$$

Za Poissonovu raspodjelu:

$$P(n, \lambda) = \frac{\lambda^n}{n!} \cdot e^{-\lambda}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (15)$$

$\langle X \rangle$  je jednak broju očekivanih događaja odnosno srednjoj vrijednosti  $\lambda$ , dok je  $\langle X^2 \rangle$  jednak  $\lambda^2 + \lambda$ .

U skladu s tim, očekivanje i varijanca Poissonove raspodjele jednaki su  $\lambda$ , a standardna devijacija jednaka je  $\sqrt{\lambda}$ . Postotna pogreška  $p$  računa se kao:

$$p = \frac{\sigma}{\lambda} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{\lambda}}{\lambda} \cdot 100\% = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \cdot 100\% \quad (16)$$

[58, 59, 61, 62, 63]

## 8.2. Pokus 1. Model radioaktivnog razinomjera - kontrola punjenja neprozirnog spremnika

### Zadatak:

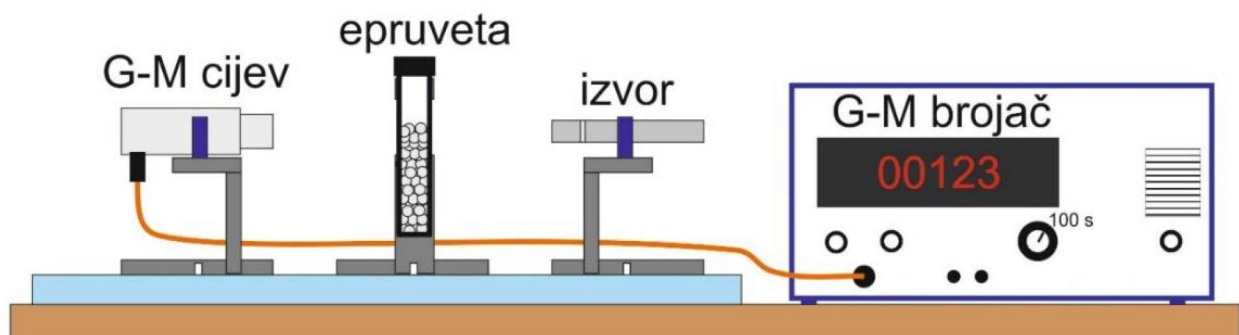
Odrediti visinu ispunjene spremnika s olovom koristeći model radioaktivnog razinomjera (ionizirajući izvor i G-M brojač) u transmisiji i apsorpciji ionizirajućih čestica.

### Popis korištenog pribora:

G-M brojač, G-M cijev (tip B), metalna ploča za postav eksperimenta, nosač G-M cijevi s magnetnim postoljem (nožicom), nosač izvora s magnetnim postoljem, nosač epruvete s magnetnim postoljem, epruveta za uzorke s nosačem, olovna sačma ( $d=3$  mm), izvori ionizirajućeg zračenja ( $^{226}\text{Ra}$  početne aktivnosti 3 kBq te  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$  i  $^{90}\text{Sr}$  početne aktivnosti 74 kBq), pomična mjerka, mikrometarski vijak, ravnalo.

### Postavljanje i postupak izvođenja:

Najprije je potrebno postaviti odgovarajuće nosače na metalnu ploču za postav eksperimenta te učvrstiti G-M cijev na nosač i spojiti ju s G-M brojačem prema Slici 29. Nosači na dnu imaju magnet te ih je jednostavno postaviti na metalnu ploču kako se ne bi pomicali tijekom izvođenja pokusa. Prije postavljanja epruvete na odgovarajući držač potrebno je izmjeriti i zabilježiti debljinu epruvete pomičnom mjerkom te debljinu tamnog papira (na kojem je centimetarska skala) mikrometarskim vijkom. Nakon toga, unutar epruvete treba postaviti tamni papir kako bi se stvorila stvarna problemska situacija. Dok se unutar epruvete nalazi tamni papir, moguća je samo procjena visine ispune jer on onemogućava točno i direktno očitavanje. U eksperimentu se mjeri visina ispune epruvete olovom pomoću radioaktivnog izvora. Epruvetu je potrebno napuniti olovnom sačmom do visine između 1,0 cm i 5,0 cm. Epruvetu s olovnom sačmom treba namjestiti tako da izvor i G-M cijev budu usmjereni na najniži dio epruvete (na oznaku tamnog papira gdje je upisan 1 cm). Nakon postavljanja epruvete u držač, kada je spreman eksperimentalni postav (Slika 29.), potrebno je ukloniti zaštitnu kapicu s G-M cijevi jer materijal kapice od kojeg je napravljena može zaustaviti  $\alpha$  čestice i apsorbirati dio  $\beta$  čestica. Zbog mjera zaštite, na kraju se postavlja radioaktivni izvor. Kada je radioaktivni izvor postavljen, potrebno je uključiti G-M brojač i postaviti vrijeme mjerenja na 100 s. Mjerenje se provodi tako da se mijenja visina na koju je postavljena epruveta u koracima po  $h=1,0$  cm na epruveti. Mjerenja se unose u Tablice 2 i 3, koje su razdvojene zbog bolje preglednosti. Nakon mjerenih odbroja na različitim visinama, potrebno je uočiti između kojih visina epruvete se odbroj značajno mijenja te izvršiti dodatno mjerenje između tih visina epruvete. Treba izvršiti i mjerenja pozadinskog zračenja tj. mjerenja bez radioaktivnog izvora. Također je potrebno izvršiti i dodatna mjerenja s praznom epruvetom i bez nje kako bi se utvrdio odbroj s praznim spremnikom i bez njega, uz izvor zračenja.



Slika 29. Eksperimentalni postav modela radioaktivnog razinomjera.

### Napomena:

Kako i mali pomaci nosača mogu utjecati na točnost mjerenja potrebno je održavati geometriju pokusa istom kroz cijeli eksperiment. Izvor i cijev brojača udaljeni su za 5,0 cm. Ova napomena vrijedi za sve pokuse u potpoglavljima 8.1-8.5.

### Pokus 1.1.

U Tablicama 2 i 3 prikazani su rezultati mjerenja pozadinskog zračenja ( $N_p$ ), izvora ( $N_I$ ) te mjerenja s napunjenom epruvetom ( $N_{IE}$ ), pri čemu je korišten izvor  $^{226}\text{Ra}$ .

Tablica 2. Rezultati mjerenja pozadinskog zračenja, dobiveni koristeći izvor  $^{226}\text{Ra}$  te izvor i praznu epruvetu.  $N_p$ ,  $N_I$ ,  $N_{IE}$  predstavljaju redom, odbroj pozadinskog zračenja, izvora te odbroj kada je između cijevi brojača i izvora postavljena plastična epruveta.  $t$  predstavlja vrijeme mjerenja u sekundama,  $\sigma$  standardnu devijaciju, a  $p$  postotnu pogrešku mjerenja.

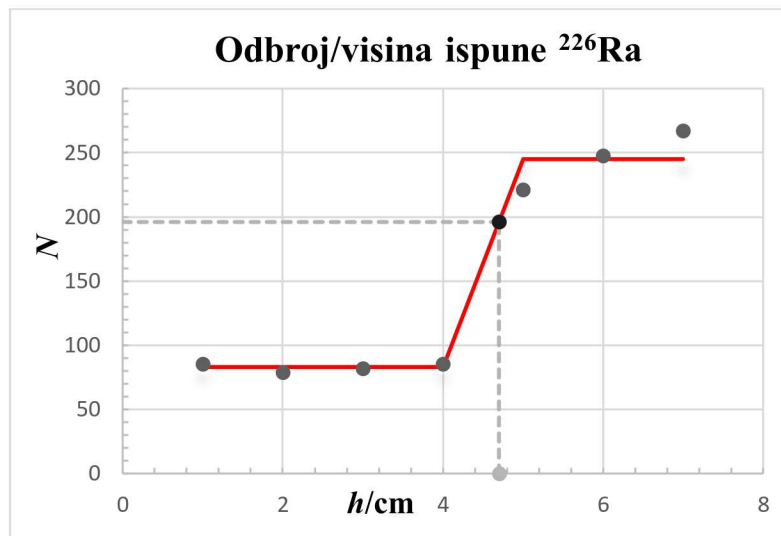
Redni broj mjerenja	$t$ (s)	$N_p$	$N_I$	$N_{IE}$
1.	100	36	4033	229
2.	100	39	3991	252
3.	100	34	3856	248
4.	100	35	4088	260
5.	100	37	4072	239
6.	100	30	4059	246
7.	100	32	3967	222
8.	100	40	4217	237
9.	100	31	4084	265
10.	100	31	4037	237
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>100</b>	<b>35</b>	<b>4040</b>	<b>244</b>
$\sigma$	-	<b>6</b>	<b>64</b>	<b>16</b>
$p$	-	<b>17%</b>	<b>2%</b>	<b>6%</b>



Tablica 3. Rezultati mjerenja dobiveni koristeći izvor  $^{226}\text{Ra}$  i epruvetu ispunjenu sačmom.  $t$  (s) predstavlja vrijeme mjerenja u sekundama,  $N_i$  predstavlja odbroj detektiran na visini epruvete od  $i$  cm ( $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ ).  $N_{4-5}$  predstavlja visinu epruvete između 4,0 cm i 5,0 cm,  $\sigma$  standardnu devijaciju, a  $p$  postotnu pogrešku mjerenja.

Redni broj mjerenja	$t$ (s)	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_5$	$N_6$	$N_7$	$N_{4-5}$
1.	100	71	73	70	83	223	206	279	193
2.	100	90	76	87	81	254	265	277	191
3.	100	97	96	84	86	205	256	260	216
4.	100	91	72	87	89	213	262	252	202
5.	100	70	93	83	72	234	249	269	195
6.	100	97	82	71	90	202	253	249	207
7.	100	82	71	94	87	229	268	277	186
8.	100	82	80	61	95	237	242	262	184
9.	100	91	83	107	80	213	240	270	201
10.	100	86	68	77	96	205	238	279	186
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>100</b>	<b>85</b>	<b>79</b>	<b>82</b>	<b>85</b>	<b>221</b>	<b>247</b>	<b>267</b>	<b>196</b>
$\sigma$	-	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>16</b>	<b>14</b>
$p$	-	<b>11%</b>	<b>11%</b>	<b>11%</b>	<b>11%</b>	<b>7%</b>	<b>6%</b>	<b>6%</b>	<b>7%</b>

Slika 30 predstavlja grafički prikaz rezultata pokusa 1.1 prikazanih u Tablici 3.



Slika 30. Grafički prikaz rezultata mjerenja pokusa 1.1 (za  $h = 4,0-5,0$  cm). Os apscisa predstavlja visinu ispune  $h$ , a ordinata odbroj  $N$  mjeren u vremenskom intervalu od 100 s, a crvena linija služi kako bi se lakše pratio trend podataka.

### Rezultati i rasprava:

Nakon mjerenja i upisivanja podataka u tablice napravljen je grafički prikaz (Slika 30) iz kojeg je vidljivo kako je odbroj otprilike konstantan do visine epruvete od 4,0 cm (srednja vrijednost prva četiri odbroja iznosi 83), kao i iznad visine 5,0 cm (srednja vrijednost 5, 6 i 7 odbroja iznosi 245). Detektiran odbroj kada je između cijevi brojača i izvora postavljena plastična epruveta ( $N_{IE}$ ) iz Tablice 2 iznosi 244, što je u skladu s odbrojima na visini iznad 5,0 cm. Mjerenja na grafu označena su točkama, a očekivana krivulja crvenom bojom. Dodatno mjerenje između 4,0 i 5,0 cm je između vrijednosti 83 i 245, što je očekivano i iznosi 196.

Pomoću jednadžbe pravca kroz dvije točke i navedenih srednjih vrijednosti (između 4,0 i 5,0 cm skale), određena je jednadžba pravca  $N = 162 \cdot h/cm - 565$  iz koje se izračuna vrijednost apscise za 196 odbroja, što iznosi 4,7 cm i u skladu je s mjerenjem ravnalom od  $h = (4,6 \pm 0,1)$  cm. Kako je visina ispune ravnalom mjerena samo jednom, procjena mjerenja je 0,1 cm. Visinu ispune olovnom sačmom u korištenom spremniku (epruveti) teško je jednoznačno odrediti ravnalom ili metodom radioaktivnog razinomjera jer je olovna sačma (Slika 27) kuglica promjera 3 mm te je moguće da u nekim dijelovima, unutar svih pokusa (1.1, 1.2, 1.3, 1.4) epruveta bude više ili manje napunjena, što znači kako na vrhu ispune nije ravna površina.

Kako je  $^{226}\text{Ra}$  (u raspadu na  $^{222}\text{Rn}$ )  $\alpha$  i  $\gamma$  emiter,  $\alpha$  čestice zaustavljene su već na plastičnoj ovojnici spremnika i u zraku, dok  $\gamma$  čestice većinom prolaze i detektiraju se na G-M brojaču. Ovo se zaključuje iz dobivenih odbroja iz izvora bez epruvete koji je veći u odnosu na odbroj kada je stavljena epruveta između cijevi brojača i izvora jer plastika i papir tj. epruveta asporbira  $\alpha$  čestice, dok su bez epruvete i one detektirane, što je vidljivo u Tablici 2.

Debljina stijenke epruvete izmjerena je pomičnom mjerkom i iznosi  $d_e = (0,95 \pm 0,03)$  mm, dok je debljina papira unutar epruvete izmjeren mikrometarskim vijkom i iznosi  $d_p = (0,109 \pm 0,003)$  mm. Kako je vrijeme poluraspada  $^{226}\text{Ra}$   $T_{1/2} = 1600$  godina, a aktivnost uzorka bila je 3 kBq na datum proizvodnje 1. veljače 1999., trenutna aktivnost  $^{226}\text{Ra}$  može se izračunati pomoću izraza  $A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$  i ona iznosi  $2,97 \approx 3$  kBq, što znači da se aktivnost ovog uzorka gotovo nije smanjila.

Rezultat eksperimentalnog mjerenja visine ispune iskazan relativnom pogreškom:

$$r = \frac{\Delta h}{\bar{h}} \cdot 100\% = 0,2\% \quad (17)$$

Usporedba eksperimentalno dobivenog mjerenja visine ispune s izravnim mjerenjem iskazan postotnom pogreškom:

$$p = \left| \frac{h_e - h_i}{h_i} \right| \cdot 100\% = 2,17\% \approx 2\% \quad (18)$$

gdje  $h_e$  predstavlja visinu ispune epruvete dobivenu eksperimentom, dok  $h_i$  predstavlja visinu ispune epruvete dobivenu izravnim mjerenjem (ravnalom).

### **Zaključak pokusa 1.1:**

U pokusu 1.1 pomoću zatvorenog radioaktivnog izvora  $^{226}\text{Ra}$  i G-M brojača napravljen je model radioaktivnog razinomjera kojim je mjerena visina ispune epruvete olovnom sačmom. Grafička metoda daje visinu ispune spremnika od 4,7 cm, što je u skladu s naknadnim mjerenjem ravnalom od  $h_i = (4,6 \pm 0,1)$  cm. Na temelju postotne pogreške koja iznosi oko 2%, može se zaključiti kako je radioaktivni izvor  $^{226}\text{Ra}$  pogodan za metodu mjerenja visine ispune spremnika.

## Pokus 1.2.

U Tablicama 4 i 5 prikazani su rezultati mjerenja pozadinskog zračenja, s izvorom  $^{60}\text{Co}$  te s izvorom  $^{60}\text{Co}$  i epruветom ispunjenom sačmom.

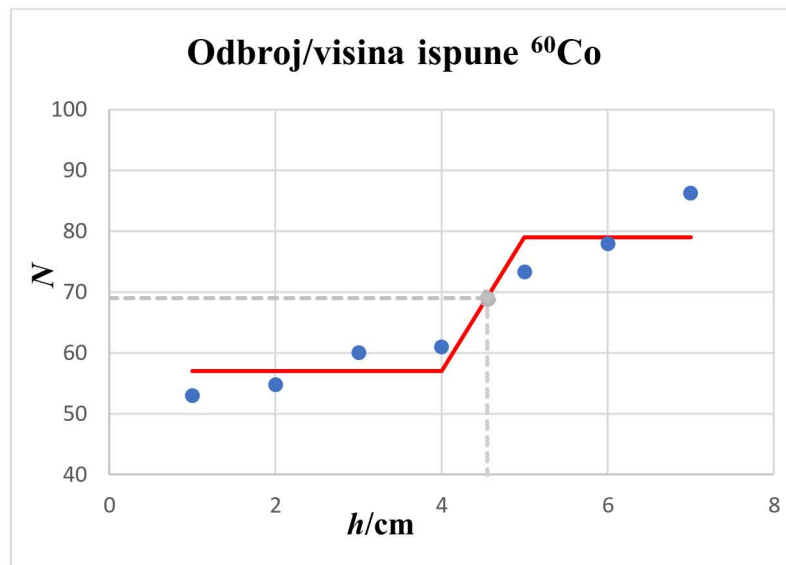
Tablica 4. Rezultati mjerenja pozadinskog zračenja, dobiveni koristeći izvor  $^{60}\text{Co}$  te izvor i praznu epruветu.  $N_p$ ,  $N_I$ ,  $N_{IE}$  predstavlja redom, odbroj pozadinskog zračenja, izvora, odbroj kada je između cijevi brojača i izvora postavljena plastična epruвета.  $t$  (s) predstavlja vrijeme mjerenja u sekundama,  $\sigma$  standardnu devijaciju, a  $p$  postotnu pogrešku mjerenja.

Redni broj mjerenja	$t$ (s)	$N_p$	$N_I$	$N_{IE}$
1.	100	24	140	87
2.	100	32	125	110
3.	100	34	114	115
4.	100	29	133	113
5.	100	23	127	116
6.	100	35	104	105
7.	100	28	111	105
8.	100	23	133	104
9.	100	35	123	99
10.	100	35	125	123
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>100</b>	<b>30</b>	<b>124</b>	<b>108</b>
$\sigma$	-	<b>5</b>	<b>11</b>	<b>10</b>
$p$	-	<b>14%</b>	<b>10%</b>	<b>13%</b>

Tablica 5. Rezultati mjerenja dobiveni koristeći izvor  $^{60}\text{Co}$  i epruvetu ispunjenu sačmom.  $t$  (s) predstavlja vrijeme mjerenja u sekundama,  $N_i$  predstavlja odbroj detektiran na visini epruvete od  $i$  cm ( $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ ).  $N_{4-5}$  predstavlja visinu epruvete između 4,0 cm i 5,0 cm.  $\sigma$  predstavlja standardnu devijaciju, a  $p$  postotnu pogrešku mjerenja.

Redni broj mjerenja	$t$ (s)	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_5$	$N_6$	$N_7$	$N_{4-5}$
1.	100	64	57	50	52	85	99	80	65
2.	100	51	53	74	58	53	69	109	70
3.	100	57	51	53	80	80	77	98	67
4.	100	50	52	64	49	64	72	99	76
5.	100	57	57	71	68	81	76	84	68
6.	100	51	42	46	57	86	80	77	76
7.	100	53	68	63	50	78	91	59	90
8.	100	42	63	52	73	80	75	85	48
9.	100	59	54	65	69	63	61	84	73
10.	100	51	55	67	59	68	84	93	66
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>100</b>	<b>53</b>	<b>55</b>	<b>60</b>	<b>61</b>	<b>73</b>	<b>78</b>	<b>86</b>	<b>69</b>
<b><math>\sigma</math></b>	<b>-</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>8</b>
<b><math>p</math></b>	<b>-</b>	<b>13%</b>	<b>12%</b>	<b>11%</b>	<b>11%</b>	<b>12%</b>	<b>11%</b>	<b>11%</b>	<b>12%</b>

Slika 31 predstavlja grafički prikaz rezultata pokusa 1.2 prikazanih u Tablici 5.



Slika 31. Grafički prikaz rezultata mjerenja pokusa 1.2 (za  $h = 4-5$  cm). Točke predstavljaju rezultate mjerenja. Os apscisa predstavlja visinu ispune  $h$ , a ordinata odbroj  $N$  mjeren u vremenskom intervalu od 100 s, a crvena linija služi kako bi se lakše pratio trend podataka.

### Rezultati i rasprava:

Izotop  $^{60}\text{Co}$  emitira  $\beta$  i  $\gamma$  zrake te je došlo do gotovo potpune apsorpcije  $\beta$  čestica, dok veći dio  $\gamma$  čestica prolazi kroz olovnu sačmu, što je vidljivo usporedbom odbroja samog izvora ( $N_I$ ) i odbroja s postavljenom plastičnom epruvetom s papirom ( $N_{IE}$ ). Vrijeme poluraspada  $^{60}\text{Co}$  je  $T_{1/2} = 5,272$  godina i aktivnost uzorka na datum proizvodnje 1. veljače 1999. bila je 74 kBq. Izračunata trenutna aktivnost  $^{60}\text{Co}$  je 3 kBq, što znači da se aktivnost ovog izvora značajno smanjila.

Eksperimentalnom metodom dobiven je odbroj od 69 na granici ispune spremnika olovom (Slika 31). Visina ispune dobivena eksperimentom i pomoću aproksimiranog pravca (na isti način kao i u pokusu 1.1) je 4,5 cm, a jednadžba pravca kojom se može izračunati tražena vrijednost apscise iznosi  $N = 22 \cdot h/cm - 31$ . Visina ispune za odbroj  $N_{4-5} = (69 \pm 8)$  iznosi 4,6 cm, što je u skladu s mjerenjem ravnalom od  $h = (4,5 \pm 0,1)$  cm.

Rezultat eksperimentalnog mjerenja visine ispune iskazan relativnom pogreškom, prema (17) iznosi  $r = 0,2\%$ . Usporedba eksperimentalno dobivenog mjerenja s izravnim mjerenjem, iskazan postotnom pogreškom prema (18) iznosi  $p = 2,22\% \approx 2\%$ .

### Zaključak pokusa 1.2:

U pokusu 1.2 mjerenjem pomoću zatvorenog radioaktivnog izvora  $^{60}\text{Co}$  i G-M brojača, grafička metoda daje visinu ispune spremnika od 4,6 cm, a jednostavnim pregledom grafikona vidljivo je kako je epruveta napunjena sačmom između 4,0 i 5,0 cm oznake na skali tamnog papira, što je u skladu s neposrednim mjerenjem ravnalom od  $h = (4,5 \pm 0,1)$  cm. Na temelju rezultata mjerenja s postotnom pogreškom od 2%, vidljivo je da je ova metoda pomoću radioaktivnog izvora  $^{60}\text{Co}$  pogodna za mjerenje visine ispune neprozirnog spremnika unatoč smanjenoj aktivnosti izvora.

### Pokus 1.3.

U Tablicama 6 i 7 prikazani su rezultati mjerenja pozadinskog zračenja, dobiveni koristeći izvor  $^{90}\text{Sr}$  te izvor  $^{90}\text{Sr}$  i epruvetu ispunjenu sačmom.

Tablica 6. Rezultati mjerenja pozadinskog zračenja, dobiveni koristeći izvor  $^{90}\text{Sr}$  te izvor i praznu epruvetu.  $N_p$ ,  $N_I$ ,  $N_{IE}$  predstavljaju redom, odbroj pozadinskog zračenja, izvora, detektiran odbroj kada je između cijevi brojača i izvora postavljena plastična epruveta.  $t$  (s) predstavlja vrijeme mjerenja u sekundama,  $\sigma$  standardnu devijaciju, a  $p$  postotnu pogrešku mjerenja.

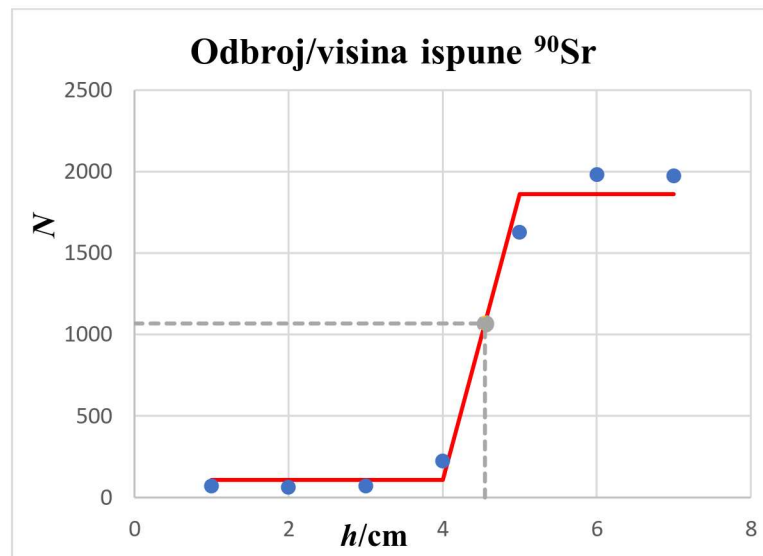
Redni broj mjerenja	$t$ (s)	$N_p$	$N_I$	$N_{IE}$
1.	100	36	7686	1883
2.	100	39	7555	1936
3.	100	34	7547	1868
4.	100	35	7654	1858
5.	100	37	7556	1865
6.	100	30	7641	1897
7.	100	32	7508	1840
8.	100	40	7626	1862
9.	100	31	7473	1821
10.	100	31	7513	1824
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>100</b>	<b>35</b>	<b>7576</b>	<b>1865</b>
$\sigma$	-	<b>6</b>	<b>87</b>	<b>43</b>
$p$	-	<b>17%</b>	<b>1%</b>	<b>2%</b>

Tablica 7. Rezultati dobiveni koristeći izvor  $^{90}\text{Sr}$  i epruvetu ispunjenu sačmom.  $t$  (s) predstavlja vrijeme mjerenja u sekundama,  $N_i$  predstavlja odbroj detektiran na visini epruvete od  $i$  cm ( $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ ).  $N_{4-5}$  predstavlja odbroj na visini epruvete između 4,0 cm i 5,0 cm.  $\sigma$  predstavlja standardnu devijaciju, a  $p$  postotnu pogrešku mjerenja.

Redni broj mjerenja	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_5$	$N_6$	$N_7$	$N_{4-5}$
1.	87	78	84	221	1618	2004	1935	1064
2.	79	65	65	228	1617	1983	1879	1057
3.	87	51	79	218	1659	1952	2042	1035
4.	66	50	58	219	1610	1998	1993	1093
5.	67	52	59	221	1665	1969	2006	1085
6.	55	71	91	224	1590	1962	1970	1088
7.	81	63	72	219	1644	1952	1901	1057
8.	62	74	85	220	1657	1984	2032	1079
9.	75	70	68	246	1665	1993	2003	1041
10.	53	79	60	212	1561	2016	2001	1082
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>71</b>	<b>65</b>	<b>72</b>	<b>222</b>	<b>1628</b>	<b>1981</b>	<b>1976</b>	<b>1068</b>
<b><math>\sigma</math></b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>15</b>	<b>40</b>	<b>45</b>	<b>44</b>	<b>33</b>
<b><math>p</math></b>	<b>11%</b>	<b>12%</b>	<b>11%</b>	<b>7%</b>	<b>2%</b>	<b>2%</b>	<b>2%</b>	<b>3%</b>



Slika 32 predstavlja grafički prikaz rezultata pokusa 1.3 prikazanih u Tablici 7.



Slika 32. Grafički prikaz rezultata mjerenja pokusa 1.3 (za  $h = 4,0-5,0$  cm). Točke predstavljaju rezultate mjerenja. Os apscisa predstavlja visinu ispune  $h$ , ordinata odbroj  $N$  mjeren u vremenskom intervalu od 100 s, a crvena linija služi kako bi se lakše pratio trend podataka.

### Rezultati i rasprava:

Vrijeme poluraspada  $^{90}\text{Sr}$  iznosi  $T_{1/2} = 28,5$  godina, aktivnost uzorka na datum proizvodnje 1. veljače 1999. 74 kBq, a izračunata trenutna aktivnost  $^{90}\text{Sr}$  41 kBq, što znači da se aktivnost ovog uzorka nije značajno smanjila.

Uspoređujući odbroj samog izvora ( $N_I$ ) te izvora s postavljenom plastičnom epruvetom u kojoj je papir ( $N_{IE}$ ), vidljiva je velika apsorpcija  $\beta$  čestica u odnosu na mjerenje izvorom  $^{60}\text{Co}$ , koji je  $\beta$  i  $\gamma$  emiter kao i  $^{90}\text{Sr}$ .  $^{60}\text{Co}$  emitira  $\gamma$  zrake čije su energije manje nego  $\gamma$  zrake  $^{90}\text{Sr}$  te neke  $\gamma$  zrake iz  $^{60}\text{Co}$  ne stignu do brojača i ne budu detektirane, što nije slučaj sa  $^{90}\text{Sr}$ .

Eksperimentalnom metodom dobiven je odbroj od 1068 na granici ispune spremnika (Slika 32.). Jednadžba pravca kojom se može izračunati tražena vrijednost apscise iznosi  $N = 1754 \cdot h/cm - 6908$ , a visina ispune za odbroj  $N_{4-5} - N_p = (1068 \pm 33)$  iznosi 4,6 cm, što je u skladu s mjerenjem ravnalom od  $h = (4,5 \pm 0,1)$  cm.

Rezultat eksperimentalnog mjerenja visine ispune iskazan relativnom pogreškom, prema (17) iznosi  $r = 0,2\%$ . Usporedba eksperimentalno dobivenog mjerenja s izravnim mjerenjem iskazana postotnom pogreškom, prema (18) iznosi  $p = 2,17\% \approx 2\%$ .

### Zaključak pokusa 1.3:

U pokusu 1.3 mjerenjem pomoću zatvorenog radioaktivnog izvora  $^{90}\text{Sr}$  i G-M brojača, grafička metoda daje visinu ispune spremnika od 4,6 cm, što je u skladu s neposrednim mjerenjem ravnalom od  $h = (4,5 \pm 0,1)$  cm. Na temelju rezultata mjerenja s postotnom pogreškom od 2%, vidljivo je da je ova metoda pomoću radioaktivnog izvora  $^{90}\text{Sr}$  pogodna za mjerenje visine ispune neprozirnog spremnika.

### Pokus 1.4.

U Tablicama 8 i 9 prikazani su rezultati mjerenja pozadinskog zračenja, dobiveni koristeći izvor  $^{22}\text{Na}$  te izvor  $^{22}\text{Na}$  i epruvetu ispunjenu sačmom.

Tablica 8. Rezultati mjerenja pozadinskog zračenja, dobiveni koristeći izvor  $^{22}\text{Na}$  te izvor i praznu epruvetu.  $N_p$ ,  $N_I$ ,  $N_{IE}$  predstavljaju redom, odbroj pozadinskog zračenja, odbroj izvora te odbroj kada je između cijevi brojača i izvora postavljena plastična epruveta.  $t$  (s) predstavlja vrijeme mjerenja u sekundama,  $\sigma$  standardnu devijaciju, a  $p$  postotnu pogrešku mjerenja.

Redni broj mjerenja	$t$ (s)	$N_p$	$N_I$	$N_{IE}$
1.	100	24	147	55
2.	100	32	128	43
3.	100	34	140	49
4.	100	29	146	41
5.	100	23	133	36
6.	100	35	121	43
7.	100	28	141	36
8.	100	23	148	45
9.	100	35	146	35
10.	100	35	166	41
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>100</b>	<b>30</b>	<b>142</b>	<b>42</b>
<b><math>\sigma</math></b>	<b>-</b>	<b>5</b>	<b>12</b>	<b>6</b>
<b><math>p</math></b>	<b>-</b>	<b>17%</b>	<b>8%</b>	<b>14%</b>

Tablica 9. Rezultati mjerenja dobiveni koristeći izvor  $^{22}\text{Na}$  i epruvetu ispunjenu sačmom.  $t$  (s) predstavlja vrijeme mjerenja u sekundama,  $N_i$  predstavlja odbroj detektiran na visini epruvete od  $i$  cm ( $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ ).  $N_{4-5}$  predstavlja odbroj na visini epruvete između 4,0 cm i 5,0 cm.  $\sigma$  predstavlja standardnu devijaciju, a  $p$  postotnu pogrešku mjerenja.

Redni broj mjerenja	$t$ (s)	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_5$	$N_6$	$N_7$
1.	100	23	15	17	6	20	21	20
2.	100	13	12	2	14	25	24	22
3.	100	19	14	16	18	9	11	20
4.	100	11	16	22	13	12	10	12
5.	100	6	13	12	17	5	6	10
6.	100	15	19	18	12	8	7	9
7.	100	6	7	12	9	9	7	10
8.	100	15	11	3	7	6	13	7
9.	100	5	9	8	7	12	9	7
10.	100	11	5	13	12	10	9	6
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>100</b>	<b>13</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>12</b>
<b><math>\sigma</math></b>	<b>-</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>
<b><math>p</math></b>	<b>-</b>	<b>31%</b>	<b>25%</b>	<b>31%</b>	<b>25%</b>	<b>25%</b>	<b>25%</b>	<b>25%</b>

### Rezultati i rasprava:

Vrijeme poluraspada  $^{22}\text{Na}$  iznosi  $T_{1/2} = 2,58$  godina, aktivnost uzorka na datum proizvodnje 1. veljače 1999. bila je 74 kBq, a trenutna aktivnost  $^{22}\text{Na}$  iznosi 0,12 kBq, što znači da se aktivnost ovog uzorka značajno smanjila u odnosu na datum proizvodnje. Visina ispune epruvete sačmom bila je između 4,0 i 5,0 cm. Za ovaj eksperiment nije bilo moguće primijeniti izvor  $^{22}\text{Na}$  jer je odbroj za svaku visinu ispune bio jednak 12. Vidljive su vrlo male razlike između pojedinih  $N_i$  (gdje je  $i$  vrijednost u cm od 1,0 do 7,0 i između 4,0 cm i 5,0 cm) zbog 10 različitih odbroja pozadinskog zračenja. U Tablici 9 vidljivi su vrlo mali odbroji za sve visine ispune epruvete olovnom sačmom.

### **Zaključak pokusa 1.4:**

U pokusu 1.4 pomoću zatvorenog radioaktivnog izvora  $^{22}\text{Na}$  i G-M brojača napravljen je model radioaktivnog razinomjera kojim je bio cilj izmjeriti visinu ispune epruvete olovnom sačmom. Izvor  $^{22}\text{Na}$  nije prikladan za ovo mjerenje jer mu se aktivnost značajno smanjila od datuma proizvodnje. Kako je u rezultatima vidljivo da je odbroj približno konstantan neovisno o promjeni visine epruvete na kojoj se izvodi mjerenje, mjerenje visine ispune epruvete u tom slučaju nije moguće, a iz istog razloga nisu računane ni pogreške ovog mjerenja.

### **8.3. Pokus 2. Model radioaktivnog refleksijskog debljinomjera - mjerenje debljine papira pomoću refleksije ionizirajućeg zračenja**

#### **Zadatak:**

Odrediti debljinu lista papira postavljenog na nosač pomoću olovne pločice prema metodi refleksije  $\beta$  čestica.

#### **Popis korištenog pribora:**

G-M brojač, G-M cijev (tip B), metalna ploča za postav eksperimenata, nosač G-M cijevi s magnetnim postoljem (nožicom), nosač izvora s magnetnim postoljem, nosač apsorpcijskih materijala s magnetnim postoljem, apsorpcijski materijal (sjajni papir, prešani papir, fotokopirni papir), olovna pločica, izvori ionizirajućeg zračenja ( $^{60}\text{Co}$  i  $^{90}\text{Sr}$  početne aktivnosti 74 kBq), mikrometarski vijak, dvije plastične štipaljke.

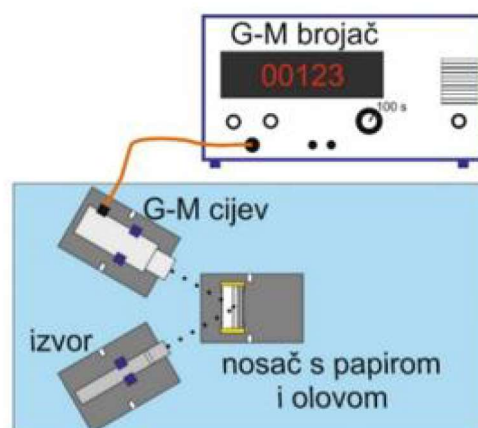
#### **Postavljanje i postupak izvođenja:**

Za eksperimentalni postav (Slike 33 i 34) potrebno je postaviti odgovarajuće nosače na metalnu ploču za postav eksperimenta te postaviti G-M cijev na nosač i spojiti cijev s G-M brojačem. Nosač olovne pločice potrebno je postaviti na nultu točku metalne ploče (točka od koje kreće mjerenje kutova na metalnoj ploči), a izvor zračenja i cijev brojača postaviti se na udaljenost 2,0 cm od nosača pločice i pod kutom od  $30^\circ$  s obzirom na okomicu na pločicu, čime su pravac u kojem je usmjeren izvor i cijev brojača pod kutom od  $60^\circ$ . Kada se olovna pločica debljine 1 mm umetne u nosač pločice, pomoću štipaljki se čvrsto pritisne na nosač pločice. Zaštitni poklopac s cijevi brojača može se skinuti prije nego se izvor zračenja umetne u nosač izvora i cijev brojača u odgovarajući nosač. Cijev G-M brojača treba biti spojena na brojač te se za vremenski interval

odabere 100 s. Kada se brojač pokrene, mjerenje povratnog raspršenja (u refleksiji) izvodi se 10 puta. Odbroj zabilježen u vremenskom intervalu od 100 s potrebno je unijeti u odgovarajuću tablicu. Nakon toga slijedi mjerenje s papirom postavljenim pomoću olovne pločice. Olovna pločica postavljena je jer nosač u sredini ima prazninu te se s olovom omogućava asporpcija čestica. Za mjerenje debljine traka fotokopirnog papira potrebno je odrezati više traka površine otprilike 5,0 cm x 10,0 cm. Debljina fotokopirnog, sjajnog i prešanog papira mjeri se mikrometarskim vijkom. Kada su poznate sve debljine, olovna pločica treba biti prekrivena najprije jednim slojem papira i pričvršćena pomoću hvataljki. Mjeri se odbroj nakon povratnog raspršenja. Mjerenje se ponavlja s postupnim povećanjem broja traka papira. Nakon mjerenja s 10 traka papira određuje se nepoznata debljina jednog debljeg papira.



Slika 33. Eksperimentalni postav modela radioaktivnog refleksijskog debljinomjera.



Slika 34. Eksperimentalni postav modela refleksijskog radioaktivnog debljinomjera (tlocrt).

**Napomena:** Kako bi se ograničio utjecaj zračenja koje dolazi izravno od izvora do G-M cijevi bez poduzimanja zaštitnih mjera, upadni i reflektirani kut snopa zračenja ne smiju biti veći od  $30^\circ$  u odnosu na nosač pločice, a udaljenost izvora i cijevi brojača od ozračenog materijala treba biti oko 2,0 cm.

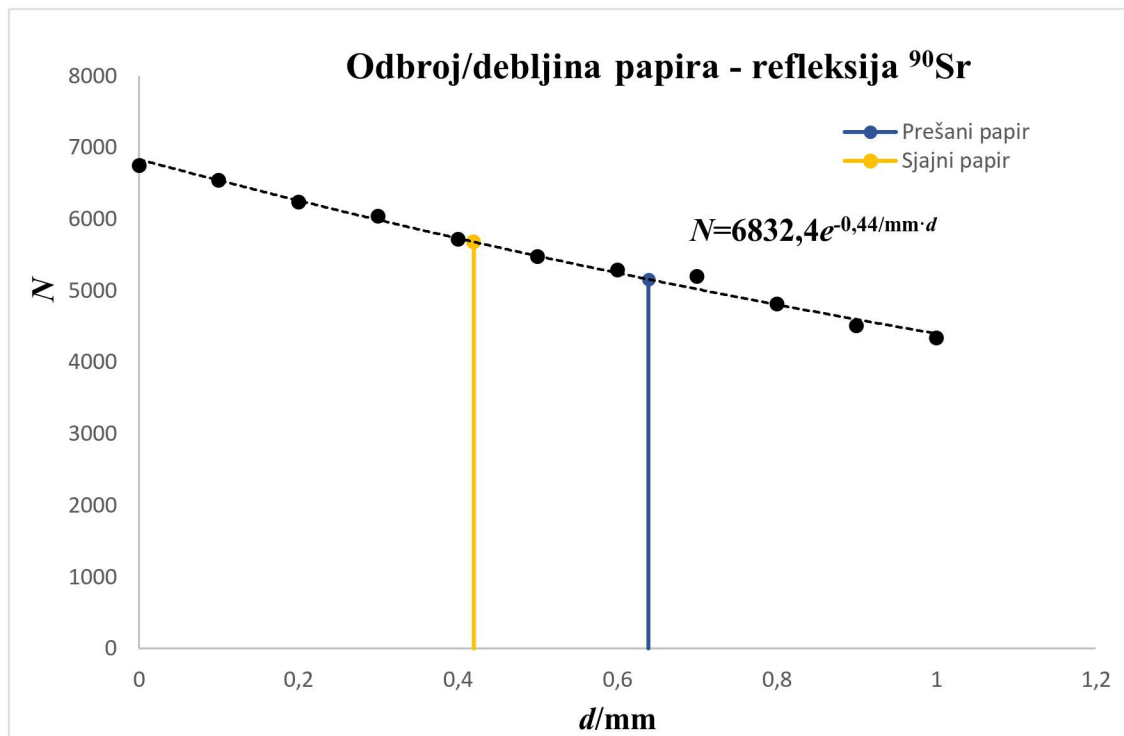
**Pokus 2.1.**

U Tablici 10 prikazani su rezultati mjerenja dobiveni koristeći izvor  $^{90}\text{Sr}$  na udaljenosti 2,0 cm između nosača pločice i cijevi brojača, odnosno izvora.

Tablica 10. Rezultati dobiveni koristeći izvor  $^{90}\text{Sr}$  za udaljenost od 2,0 cm između nosača pločice i cijevi brojača, odnosno izvora.  $t$  (s) predstavlja vrijeme mjerenja u sekundama,  $N_i$  ( $i = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$ ),  $N_{PP}$ ,  $N_{SP}$  odbroj kada je na nosaču pločice postavljeno  $i$  traka papira, prešani papir te sjajni papir, redom.  $\sigma$  predstavlja standardnu devijaciju, a  $p$  postotnu pogrešku mjerenja.

Redni broj mjerenja	$t$ (s)	$N_0$	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_5$	$N_6$	$N_7$	$N_8$	$N_9$	$N_{10}$	$N_{PP}$	$N_{SP}$
1.	100	6528	6556	6156	6039	5667	5346	5095	5610	4778	4560	4391	5146	5611
2.	100	6665	6569	6133	6035	5853	5492	5472	5196	4852	4433	4285	5196	5665
3.	100	6918	6510	6297	5971	5880	5442	5299	5207	4929	4450	4363	5205	5850
4.	100	6806	6553	6439	6228	5685	5512	5352	5088	4799	4576	4271	5230	5693
5.	100	6703	6532	6212	5992	5643	5641	5333	5120	4828	4615	4376	5114	5672
6.	100	6772	6494	6182	5979	5735	5477	5227	4982	4753	4614	4291	5181	5738
7.	100	6774	6430	6271	6076	5614	5564	5259	5181	4839	4460	4172	5132	5642
8.	100	6861	6543	6117	6080	5740	5450	5244	5171	4649	4581	4370	5287	5550
9.	100	6745	6491	6291	5969	5583	5398	5403	5192	4764	4423	4432	5029	5631
10.	100	6681	6685	6250	5993	5804	5435	5201	5188	4930	4406	4442	5057	5742
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>100</b>	<b>6745</b>	<b>6536</b>	<b>6234</b>	<b>6036</b>	<b>5720</b>	<b>5475</b>	<b>5288</b>	<b>5193</b>	<b>4812</b>	<b>4511</b>	<b>4339</b>	<b>5157</b>	<b>5679</b>
$\sigma$	-	82	81	79	78	76	74	73	72	69	67	66	72	75
$p$	-	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	2%	1%	1%

Slika 35 predstavlja grafički prikaz rezultata pokusa 2.1 prikazanih u Tablici 10.



Slika 35. Grafički prikaz rezultata mjerenja pokusa 2.1 (udaljenosti 2, 0 cm između nosača pločice i cijevi brojača, odnosno izvora). Iscrtana eksponencijalna krivulja je krivulja koja najbliže opisuje eksperimentalne podatke. Os apscisa predstavlja debljinu papira  $d$ , a ordinata odbroj  $N$  mjeren u vremenskom intervalu od 100 s.

### Rezultati i rasprava:

Srednja vrijednost odbroja pozadinskog zračenja u vremenskom intervalu od 100 s mjerenja iznosi  $N_p = (35 \pm 6)$ , kao i u Tablici 2. U pokusima su korišteni sjajni, prešani i fotokopirni papir. Debljine jednog fotokopirnog, sjajnog i prešanog papira mjerene mikrometarskim vijkom iznose  $d = (0,100 \pm 0,003)$  mm,  $d = (0,399 \pm 0,003)$  mm i  $d = (0,638 \pm 0,003)$  mm, redom. Navedene debljine izračunate su pod pretpostavkom da sve korištene vrste papira imaju jednak koeficijent apsorpcije  $\beta$  čestica. Prema [64] koeficijent apsorpcije ovisi o atomskom i masenom broju apsorbera, za koje je pretpostavka da su jednaki za sve tri vrste papira te o energiji  $\beta$  čestica, koja je tijekom cijelog pokusa jednaka (dolazi iz izvora <sup>90</sup>Sr). Prilagođavanjem krivulje odnosno koristeći opcije linije trenda u programu Microsoft Excel kako bi se odredila krivulja koja najbolje odgovara eksperimentalnim točkama, zaključuje se da dobivene eksperimentalne točke najbliže opisuje eksponencijalna krivulja. Prolazeći kroz materiju,  $\beta$  čestice gube energiju zbog elastičnih i neelastičnih sudara s atomskim jezgrama i orbitalnim elektronima, skreću s pravocrtno putanje i

raspršuju se. Pad broja  $\beta$  čestica pri refleksiji na materiji približno je eksponencijalan i može se predočiti eksponencijalnom funkcijom  $N = N_{0\beta} \cdot e^{-\mu \cdot d}$ , gdje je (zbog jedinstvenosti oznaka) s  $N_{0\beta}$  označen broj čestica koje su ušle u materijal,  $N$  broj  $\beta$  čestica koji izlazi iz materijala,  $d$  debljina materijala, a  $\mu$  apsorpcijski koeficijent. Eksperimentalnim mjerenjem odbroja i prilagođenom eksponencijalnom krivuljom u pokusu 2.1 opisanim izrazom  $N = 6832,4 \cdot e^{-0,440 \cdot \text{mm}^{-1} \cdot d}$  grafički su određene vrijednosti debljine sjajnog papira  $d = 0,420$  mm te prešanog papira  $d = 0,639$  mm.

### **Pogreške mjerenja:**

Usporedba eksperimentalno dobivene pogreške mjerenja s izravnim mjerenjem za sjajni papir daje postotnu pogrešku od  $p = \left| \frac{d_e - d_i}{d_i} \right| \cdot 100\% = 5,26\% \approx 5\%$ , odnosno za prešani papir od  $p = 0,2\%$ , gdje je s  $d_e$  označena debljina papira dobivena eksperimentom, a s  $d_i$  debljina papira dobivena izravnim mjerenjem.

### **Zaključak pokusa 2.1:**

U pokusu 2.1 pomoću zatvorenog radioaktivnog izvora  $^{90}\text{Sr}$  i G-M brojača napravljen je model radioaktivnog debljinomjera kojim je mjerena debljina prešanog i sjajnog papira na udaljenosti 2,0 cm između nosača pločice s papirom i cijevi brojača, odnosno izvora. Kako  $^{90}\text{Sr}$  emitira  $\beta$  čestice veće energije nego  $^{60}\text{Co}$  te kako aktivnost  $^{90}\text{Sr}$  nije značajno opala od datuma proizvodnje (kao kod  $^{60}\text{Co}$ ), ovaj izvor primjenjiv je u ovom eksperimentu. Na temelju rezultata mjerenja i postotnom pogreškom od približno 5% za sjajni papir i 0,16% za prešani papir, vidljivo je kako je ova metoda pogodna za mjerenje debljine papira.



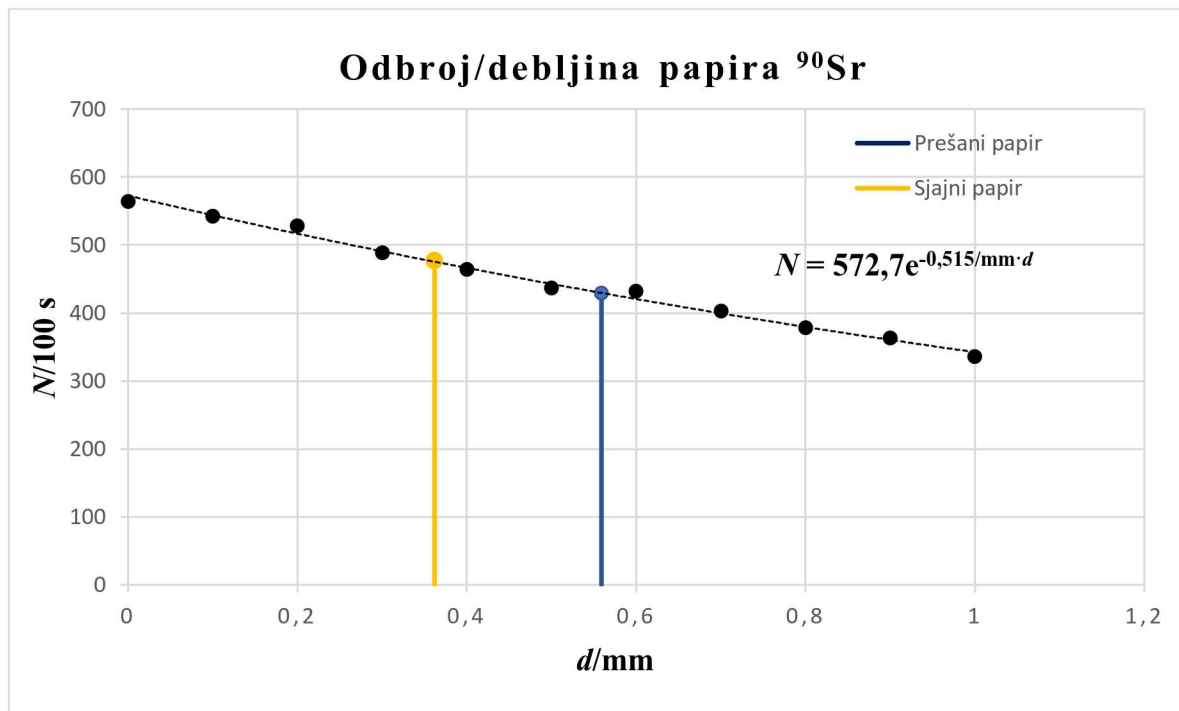
## Pokus 2.2.

U Tablici 11 prikazani su rezultati mjerenja dobiveni koristeći izvor  $^{90}\text{Sr}$  na udaljenosti od 2,0 cm između nosača pločice i cijevi brojača te 9,0 cm između nosača pločice i izvora.

Tablica 11. Rezultati dobiveni koristeći izvor  $^{90}\text{Sr}$  kada je nosač pločice udaljen 2,0 cm od izvora te 9,0 cm od cijevi brojača u vremenskom intervalu od 100 s.  $t$  (s) predstavlja vrijeme mjerenja u sekundama,  $N_i$  ( $i = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$ ),  $N_{PP}$ ,  $N_{SP}$  od broj kada je na nosaču pločice postavljeno  $i$  traka papira, prešani papir te sjajni papir, redom.  $\sigma$  predstavlja standardnu devijaciju, a  $p$  postotnu pogrešku mjerenja.

Redni broj mjerenja	$N_0$	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_5$	$N_6$	$N_7$	$N_8$	$N_9$	$N_{10}$	$N_{PP}$	$N_{SP}$
1.	583	580	499	462	422	454	451	406	376	364	347	417	466
2.	578	525	537	488	506	464	449	413	417	325	352	426	474
3.	566	550	512	511	433	386	414	395	360	343	339	408	487
4.	575	522	562	507	461	434	444	394	376	348	321	426	509
5.	509	539	522	512	478	418	448	423	371	407	318	436	482
6.	547	528	522	447	466	435	429	414	415	382	342	413	443
7.	598	573	542	507	463	465	425	407	371	389	356	456	420
8.	571	525	510	477	419	437	424	422	396	352	317	477	476
9.	549	556	541	479	482	450	450	376	322	381	334	431	501
10.	569	528	541	499	512	426	391	387	380	342	335	404	507
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>564</b>	<b>542</b>	<b>528</b>	<b>489</b>	<b>464</b>	<b>437</b>	<b>432</b>	<b>403</b>	<b>378</b>	<b>363</b>	<b>336</b>	<b>429</b>	<b>476</b>
$\sigma$	24	23	23	22	22	21	21	20	19	19	18	21	22
$p$	4%	4%	4%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%

Slika 36 predstavlja grafički prikaz rezultata pokusa 2.2 prikazanih u Tablici 11.



Slika 36. Grafički prikaz rezultata mjerenja pokusa 2.2 (udaljenost 9,0 cm od cijevi brojača).

Iscrtana eksponencijalna krivulja je krivulja koja najbliže opisuje eksperimentalne točke. Os apscisa predstavlja debljinu papira  $d$ , a os ordinata odbroj  $N$  mjeren u vremenskom intervalu od 100 s.

### Rezultati i rasprava:

Srednja vrijednost odbroja pozadinskog zračenja u vremenskom intervalu od 100 s iznosi  $N_p = (35 \pm 5)$ , kao i u prethodnom mjerenju. Eksperimentalnim mjerenjem odbroja i aproksimiranom eksponencijalnom krivuljom opisanom izrazom  $N = 572,7e^{-0,515 \cdot mm^{-1} \cdot d}$  dobivene su vrijednosti debljine sjajnog papira  $d = 0,362$  mm te prešanog papira  $d = 0,561$  mm (slika 36). Navedene debljine izračunate su pod pretpostavkom da sve korištene vrste papira imaju jednak koeficijent apsorpcije, kao i u pokusu 2.1, a razlog razlike u koeficijentu apsorpcije između pokusa 2.1 i 2.2 mogu biti pogreške u mjerenju. Razlog udaljavanja G-M cijevi s 2,0 cm na 9,0 cm od olovne pločice je detekcija dodatnih  $\gamma$  zraka na prvoj udaljenosti, a one ne potječu samo od refleksije već direktno iz izvora. To je vidljivo kod izvora <sup>60</sup>Co zbog (konstantnog) odbroja u pokusu 2.3, koji je neovisan o broju traka papira postavljenih na olovnu pločicu, a što je detaljnije prikazano u potpoglavlju 8.6.

### **Pogreške mjerenja:**

Usporedba eksperimentalno dobivene pogreške mjerenja s izravnim mjerenjem za sjajni papir iskazana postotnom pogreškom iznosi  $p = 9,27\% \approx 9\%$  za sjajni papir te za prešani papir  $p = 12,07\% \approx 12\%$ .

### **Zaključak pokusa 2.2:**

U pokusu 2.2 pomoću zatvorenog radioaktivnog izvora  $^{90}\text{Sr}$  i G-M brojača napravljen je model radioaktivnog debljinomjera te je iz usporedbe mjerenja za udaljenosti cijevi brojača i nosača pločice 2,0 cm i 9,0 cm vidljivo da se odbroj smanjuje s udaljenošću, ali i dalje dolazi do povratnog raspršenja čestica. Uspoređujući rezultate odbroja prešanog ( $N_{PP}$ ) i sjajnog papira ( $N_{SP}$ ), može se zaključiti da se u debljem materijalu povratno raspršeni elektroni, koji su već pretrpjeli gubitak energije u procesu raspršenja, više apsorbiraju u površinskom sloju papira, što vrijedi i za prethodno mjerenje. Može se uočiti i manja detekcija broja čestica kada je udaljenost između cijevi brojača i nosača pločice veća.

### Pokus 2.3.

U Tablici 12 prikazani su rezultati mjerenja dobiveni koristeći izvor  $^{60}\text{Co}$ , gdje je nosač pločice postavljen na udaljenost 2,0 cm od izvora i 2,0 cm od brojača.

Tablica 12. Rezultati dobiveni koristeći izvor  $^{60}\text{Co}$ , gdje su izvor i cijev brojača udaljeni 2,0 cm od nosača pločice.  $N_0$  je odbroj kada nije postavljena niti jedna traka papira na nosač pločice (između cijevi brojača i izvora),  $N_{PP}$  odbroj kada je postavljen prešani papir.  $t$  (s) predstavlja vremenski interval od 100 s,  $\sigma$  standardnu devijaciju, a  $p$  postotnu pogrešku mjerenja.

Redni broj mjerenja	$t$ (s)	$N_0$	$N_{PP}$
1.	100	504	469
2.	100	496	527
3.	100	494	528
4.	100	506	483
5.	100	517	459
6.	100	495	491
7.	100	497	494
8.	100	512	518
9.	100	487	521
10.	100	508	507
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>100</b>	<b>502</b>	<b>500</b>
<b><math>\sigma</math></b>	-	<b>22</b>	<b>22</b>
<b><math>p</math></b>	-	<b>4%</b>	<b>4%</b>

### **Rezultati i rasprava:**

$N_0 = (502 \pm 22)$  predstavlja odbroj u vremenskom intervalu od 100 s kada na olovnoj pločici nije postavljena niti jedna traka papira, dok  $N_{PP} = (500 \pm 22)$  predstavlja odbroj u istom vremenskom intervalu, s tom razlikom da je na olovnoj pločici postavljena traka prešanog papira nepoznate debljine. Izvor i cijev brojača postavljeni su na udaljenosti od 2,0 cm od nosača aluminijske pločice. Kako je u pokusu 1.2 pomoću početne aktivnosti i starosti uzorka dobiveno da se aktivnost  $^{60}\text{Co}$  značajno smanjila i kako postoji značajna razlika između prešanog papira debljine 0,638 mm s olovnom pločicom te debljine same olovne pločice bez papira, najprije je izvršena provjera mogućnosti izvođenja ovog pokusa s navedenim izvorom.

### **Zaključak pokusa 2.3:**

Na temelju rezultata mjerenja iz Tablice 12 lako se utvrđuje da se pomoću ovog izvora ne može izvršiti željeni eksperiment. Bez traka papira na olovnoj pločici, odnosno kada je postavljena samo olovna pločica između cijevi brojača i izvora ( $N_0$ ), te s prešanim papirom ( $N_{PP}$ ) dobiven je identičan odbroj. Razlog tome su  $\gamma$  čestice koje od izvora dolaze do detektora. S obzirom na to, potrebno je udaljiti cijev brojača od nosača pločice. Kako bi se u skladu s tim pridržavali mjera zaštite, izvor je uvijek potrebno okrenuti tako da zračenje nije usmjereno prema osobi koja provodi eksperiment.

## **8.4. Pokus 3. Ovisnost broja detektiranih ioniziranih čestica Geiger-Müllerovim brojačem o prolasku kroz različite materijale - transmisija i apsorpcija**

### **Zadatak:**

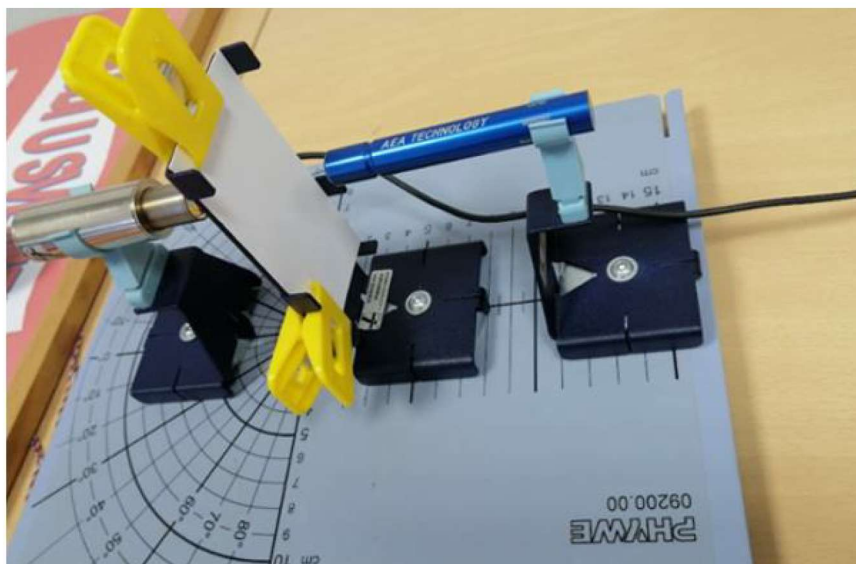
Odrediti udio različitih vrsta zračenja koje detektira G-M brojač nakon prolaska kroz različite vrste materijala kao zaštite od zračenja.

### **Popis korištenog pribora:**

G-M brojač, G-M cijev (tip B), metalna ploča za postav eksperimenta, nosač G-M cijevi s magnetnim postoljem (nožicom), nosač izvora s magnetnim postoljem, nosač epruvete s magnetnim postoljem, izvori ionizirajućeg zračenja ( $^{60}\text{Co}$  i  $^{90}\text{Sr}$  početne aktivnosti 74 kBq), sjajni papir, olovna pločica, aluminijska pločica, mikrometarski vijak, ravnalo.

### Postavljanje i postupak izvođenja pokusa:

Za eksperimentalni postav (Slika 37) potrebna je metalna ploča za postav eksperimenta, G-M brojač, G-M cijev tipa B, olovna pločica, aluminijska pločica, sjajni papir, hvataljke, radioaktivni izvor te odgovarajući nosači s magnetnim postoljem koji se namjeste prije početka eksperimenta. Potrebno je izmjeriti i debljine pločica mikrometarskim vijkom prije nego se svi materijali postave za eksperiment. Debljine aluminijske i olovne pločice te sjajnog papira iznose  $d_{Al} = (1,006 \pm 0,003)$  mm,  $d_{Pb} = (1,100 \pm 0,003)$  mm i  $d_{SP} = (0,399 \pm 0,003)$  mm, redom. Izvor i cijev brojača treba postaviti na udaljenost 5,0 cm, a između njih je potrebno namjestiti nosač na koji se, uz pomoć hvataljke stavljaju, (za svako mjerenje zasebno) sjajni papir, olovna pločica te aluminijska pločica. Cijev brojača treba spojiti na brojač i odabrati vremenski interval od 100 s. Kada je postav za mjerenje spreman, može se skinuti zaštitna kapica s cijevi brojača i uključiti G-M brojač. Izvor se nakon toga postavi na odgovarajući nosač. Mjerenje je potrebno provesti 10 puta za svaku vrstu materijala. Cilj pokusa je izračunati omjer odbroja zračenja koje dolazi od izvora i kada su postavljeni papir ili pločica na nosaču te usporediti odbroj ovisno o vrsti zaštite od zračenja te ukupan doprinos  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  zračenja. Značaj ovog eksperimenta primjena je znanja o različitim tipovima zračenja i metoda njihove eksperimentalne identifikacije. Udjeli različitih vrsta zračenja mogu se odrediti iz smanjenja detektiranog odbroja.



Slika 37. Eksperimentalni postav - ovisnost broja detektiranih ioniziranih čestica G-M brojačem o prolasku kroz različite materijale.

### Pokus 3.1.

U Tablici 13 prikazani su rezultati pozadinskog zračenja, dobiveni koristeći izvor  $^{60}\text{Co}$  te kada su između cijevi brojača i izvora postavljeni sjajni papir, olovo i aluminij (svaki zasebno).

Tablica 13. Rezultati dobiveni koristeći izvor  $^{60}\text{Co}$  - prolaz ionizirajućih čestica kroz različite materijale (sjajni papir, olovo, aluminij).  $t$  (s) predstavlja vremenski interval od 100 s,  $N_P$  predstavlja odbroj pozadinskog zračenja, a  $N_I$  izvora.  $N_{SP}$ ,  $N_{Al}$  te  $N_{Pb}$  predstavljaju redom, odbroj kada je između cijevi brojača i izvora postavljena traka sjajnog papira, aluminijska pločica, olovna pločica.  $\sigma$  predstavlja standardnu devijaciju, a  $p$  postotnu pogrešku mjerenja.

Redni broj mjerenja	$t$ (s)	$N_P$	$N_I$	$N_{SP}$	$N_{Al}$	$N_{Pb}$
1.	100	36	107	106	68	64
2.	100	39	87	91	88	65
3.	100	34	117	80	89	62
4.	100	35	93	99	92	62
5.	100	37	88	93	67	67
6.	100	30	85	70	81	75
7.	100	32	95	77	81	64
8.	100	40	95	99	93	67
9.	100	31	93	89	76	80
10.	100	31	82	91	106	90
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>100</b>	<b>35</b>	<b>94</b>	<b>89</b>	<b>84</b>	<b>69</b>
$\sigma$	-	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>8</b>
$p$	-	<b>17%</b>	<b>11%</b>	<b>10%</b>	<b>11%</b>	<b>12%</b>

### Rezultati i rasprava:

Traka sjajnog papira smanjuje odbroj čestica detektiranih u vremenskom intervalu od 100 sekundi s  $N_I = (94 \pm 10)$  na  $N_{SP} = (89 \pm 9)$ . To odgovara smanjenju od:

$$p_{SP} = \frac{N_I - N_{SP}}{N_I} \cdot 100\% = 5\% \quad (19)$$

gdje oznake  $p_S$  i  $p_{AL}$  predstavljaju smanjenje odbroja u postotku. Aluminijska pločica smanjuje odbroj čestica detektiranih u vremenskom intervalu od 100 sekundi s  $N_I = (94 \pm 10)$  na  $N_{Al} = (84 \pm 9)$ . To odgovara smanjenju od:

$$p_{Al} = \frac{N_I - N_{Al}}{N_I} \cdot 100\% = 11\% \quad (20)$$

gdje je  $N_{Al}$  odbroj kada je na nosač postavljena aluminijska pločica.

Olovna pločica smanjuje odbroj čestica detektiranih u vremenskom intervalu od 100 sekundi s  $N_I = (94 \pm 10)$  na  $N_{Pb} = (69 \pm 8)$ . To odgovara smanjenju od:

$$p_{Pb} = \frac{N_I - N_{Pb}}{N_I} \cdot 100\% = 27\% \quad (21)$$

Gornja granica (udjela  $\beta$  zračenja) do koje sjajni papir i aluminij mogu zaustaviti  $\beta$  čestice iz izvora  $^{60}\text{Co}$  iznosi

$$p_{\beta} = (p_{AL} + p_{SP}) \cdot 100\% = 16\% \quad (22)$$

Donja granica (udjela  $\gamma$  zračenja) za zaustavljanje  $\gamma$  čestica iz izvora  $^{60}\text{Co}$  iznosi

$$p_{\gamma} = p_U - p_{\beta} = 84\% \quad (23)$$

Gdje se  $p_U$  odnosi na svo (ukupno) zračenje koje emitira izvor.

### **Zaključak pokusa 3.1:**

U pokusu 3.1 pomoću zatvorenog radioaktivnog izvora  $^{60}\text{Co}$  i G-M brojača mjereno je smanjenje odbroja u ovisnosti o prolazu ionizirajućih čestica kroz različite materijale (papir, olovo, aluminij). Gornja granica za zaustavljanje  $\beta$  čestica iz izvora  $^{60}\text{Co}$  pomoću sjajnog papira i aluminija iznosi 16%, a donja granica za zaustavljanje  $\gamma$  čestica pomoću olova iznosi 84%. Odbroj je smanjen s 94 na 69 i između te dvije vrijednosti, ovisno o vrsti materijala postavljenog između cijevi brojača i izvora.



### Pokus 3.2.

U Tablici 14 prikazani su rezultati mjerenja pozadinskog zračenja, dobiveni koristeći izvor  $^{90}\text{Sr}$  te kada su postavljen sjajni papir, olovo i aluminij (svaki zasebno) između cijevi brojača i izvora.

Tablica 14. Rezultati mjerenja dobiveni koristeći izvor  $^{90}\text{Sr}$  - prolaz ionizirajućih čestica kroz različite materijale (sjajni papir, olovo, aluminij).  $t$  (s) predstavlja vremenski interval od 100 s,  $N_p$  predstavlja odbroj pozadinskog zračenja, a  $N_I$  izvora.  $N_{SP}$ ,  $N_{Al}$  te  $N_{Pb}$  predstavljaju redom, odbroj kada je između cijevi brojača i izvora postavljena traka sjajnog papira, aluminijska pločica, olovna pločica.  $\sigma$  predstavlja standardnu devijaciju, a  $p$  postotnu pogrešku mjerenja.

Redni broj mjerenja	$t$ (s)	$N_p$	$N_I$	$N_{SP}$	$N_{Al}$	$N_{Pb}$
1.	100	36	7652	7076	2373	6
2.	100	39	7521	7314	2577	3
3.	100	34	7513	7266	2472	9
4.	100	35	7620	7374	2461	2
5.	100	37	7522	7327	2363	8
6.	100	30	7607	7311	2456	2
7.	100	32	7474	7253	2377	16
8.	100	40	7592	7287	2492	5
9.	100	31	7439	7267	2498	2
10.	100	31	7479	7287	2338	4
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>100</b>	<b>35</b>	<b>7541</b>	<b>7276</b>	<b>2440</b>	<b>6</b>
$\sigma$	-	<b>6</b>	<b>87</b>	<b>85</b>	<b>49</b>	<b>2</b>
$p$	-	<b>17%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>2%</b>	<b>33%</b>

### **Rezultati i rasprava:**

Prema podacima iz Tablice 14 može se iz (19), (20) i (21) izračunati da traka sjajnog papira, aluminijska pločica i olovna pločica smanjuju odbroj iz izvora  $^{90}\text{Sr}$  u vremenskom intervalu od 100 sekundi za 4%, 68% i 99,9%  $\approx$  100%, redom.

Gornja granica zaustavljanja  $\beta$  čestica iz izvora  $^{90}\text{Sr}$  pomoću sjajnog papira i aluminijske pločice te donja granica zaustavljanja  $\gamma$  čestica pomoću olova prema (22), odnosno (23) iznose 71%, odnosno 29%.

### **Zaključak pokusa 3.2:**

U pokusu 3.2 (slično kao i u pokusu 3.1) pomoću zatvorenog radioaktivnog izvora  $^{90}\text{Sr}$  i G-M brojača mjereno je smanjenje odbroja ovisno o prolazu ionizirajućih čestica. Odbroj je smanjen ovisno o vrsti materijala postavljenog između cijevi brojača i izvora. Ukupan odbroj  $\beta$  i  $\gamma$  čestica u vremenskom intervalu od 100 s koje su prošle kroz sjajni papir iznosi  $N = (7276 \pm 85)$ , aluminij  $N_{Al} = (2440 \pm 49)$  te kroz olovo  $N_{Pb} = (6 \pm 2)$ . Iz pokusa 3 vidljivo je veće smanjenje odbroja kada je korišten izvor  $^{90}\text{Sr}$  u usporedbi s izvorom  $^{60}\text{Co}$ . Energije  $\gamma$  čestica emitirane iz izvora  $^{90}\text{Sr}$  veće su od onih iz izvora  $^{60}\text{Co}$ . Također,  $^{60}\text{Co}$  ima kraće vrijeme poluraspada i njegova se aktivnost značajno smanjila u odnosu na  $^{90}\text{Sr}$ , što rezultira s više detektiranih odbroja u usporedbi s  $^{60}\text{Co}$ .

## **8.5. Pokus 4. Ovisnost broja detektiranih ioniziranih čestica Geiger-Müllerovim brojačem o broju traka fotokopirnog papira - transmisija i apsorpcija**

### **Zadatak:**

Odrediti debljinu papira, odnosno broj slojeva papira, potrebnih da se odbroj smanji na polovicu vrijednosti.

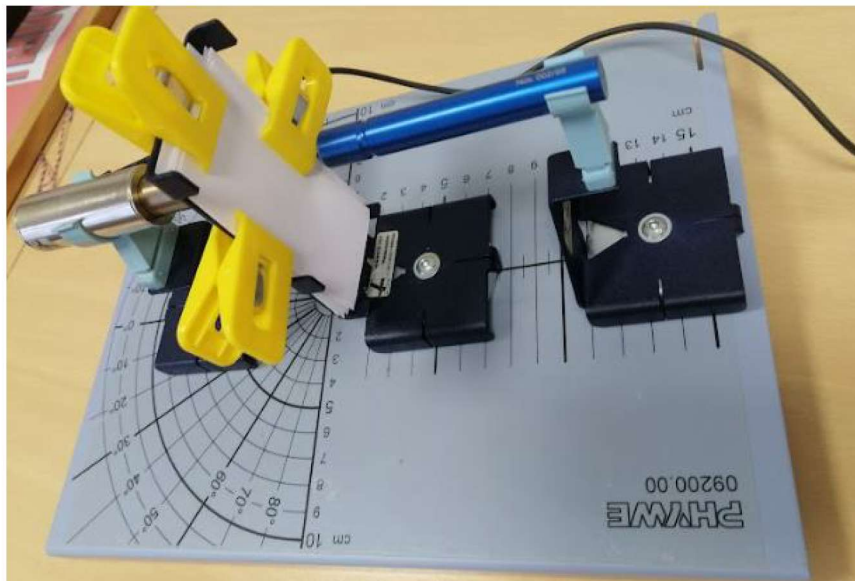
### **Popis korištenog pribora:**

G-M brojač, G-M cijev (tip B), metalna ploča za postav eksperimenta, nosač G-M cijevi s magnetnim postoljem (nožicom), nosač izvora s magnetnim postoljem, nosač materijala (papira) s magnetnim postoljem, izvori ionizirajućeg zračenja ( $^{60}\text{Co}$  i  $^{90}\text{Sr}$  početne aktivnosti 74 kBq), 48 traka fotokopirnog papira debljine 0,100 mm, mikrometarski vijak, ravnalo.

### Postavljanje i postupak izvođenja pokusa:

Za eksperimentalni postav (Slika 38) potrebna je metalna ploča za postav eksperimenta, G-M brojač, G-M cijev tipa B, trake fotokopirnog papira (ukupno 48 za cijeli pokus), hvataljke, radioaktivni izvor te odgovarajući nosači s magnetnim postoljem koji se namjeste na početku eksperimentalnog postava. Debljina jedne trake fotokopirnog papira mjerena mikrometarskim vijkom iznosi  $d_{fp} = (0,100 \pm 0,003)$  mm, a olovne pločice  $d_{pb} = (1,100 \pm 0,003)$  mm.

Izvor i cijev brojača treba postaviti na međusobnu udaljenost 5,0 cm, a između njih je potrebno namjestiti nosač na koji se, uz pomoć hvataljke postavi fotokopirni papir. Cijev brojača treba spojiti na brojač, a zatim se odabere vremenski interval od 100 s. Kada je postav za mjerenje spreman, može se skinuti zaštitna kapica s cijevi brojača i uključiti G-M brojač. Nakon toga se, kao i u prethodnim mjerenjima postavlja izvor na odgovarajući nosač. Mjerenje je potrebno provesti 10 puta, prvo samo s izvorom (bez traka papira), a zatim dodavajući trake papira, tako da se u svakom sljedećem koraku doda po 6 traka. Cilj eksperimenta je odrediti debljinu papira, odnosno broj slojeva papira potreban da se odbroj smanji na polovicu početne vrijednosti.



Slika 38. Eksperimentalni postav - smanjenje odbroja u ovisnosti o broju traka papira.

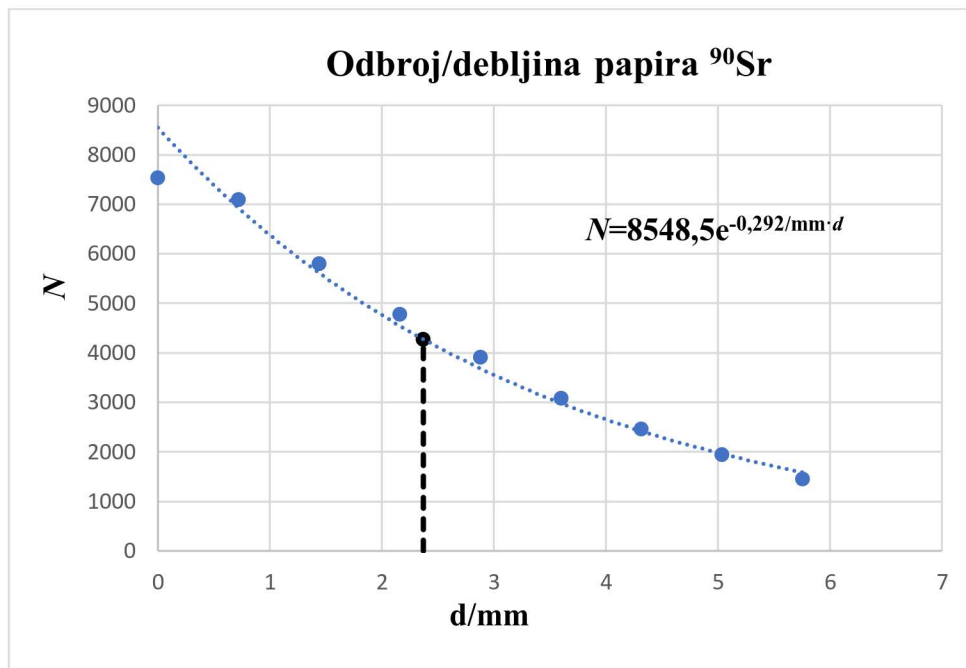
U Tablicama 15 i 16 prikazani su rezultati mjerenja dobiveni koristeći izvore  $^{90}\text{Sr}$  te  $^{60}\text{Co}$ , gdje je G-M brojačem mjerena ovisnost broja detektiranih ioniziranih čestica o broju traka fotokopirnog papira u vremenskom intervalu od 100 s.

**Pokus 4.1.**

Tablica 15. Rezultati mjerenja dobiveni koristeći izvor  $^{90}\text{Sr}$  u vremenskom intervalu od 100 s.  $N_p$  predstavlja odbroj pozadinskog zračenja,  $N$  odbroj izvora te  $N_6$  sve do  $N_{48}$  odbroj kada je između cijevi brojača i izvora postavljeno 6 traka fotokopirnog papira, sve do 48 traka.  $\sigma$  predstavlja standardnu devijaciju, a  $p$  postotnu pogrešku mjerenja.

Redni broj mjerenja	$N_p$	$N_1$	$N_6$	$N_{12}$	$N_{18}$	$N_{24}$	$N_{30}$	$N_{36}$	$N_{42}$	$N_{48}$
1.	36	7652	7026	5880	4654	3957	3207	2460	1962	1478
2.	39	7521	7057	5867	4717	3887	3090	2403	1935	1467
3.	34	7513	7142	5760	4832	4002	3137	2465	1920	1501
4.	35	7620	7174	5680	4881	3894	3021	2455	1920	1500
5.	37	7522	7087	5807	4769	3920	3065	2460	1980	1423
6.	30	7607	7043	5742	4876	3886	3138	2474	1917	1451
7.	32	7474	7072	5894	4808	3874	3062	2397	2040	1431
8.	40	7592	7142	5918	4739	3907	3038	2511	1869	1459
9.	31	7439	7163	5731	4782	3827	3096	2550	1910	1408
10.	31	7479	7092	5750	4743	3933	3053	2491	1988	1374
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>35</b>	<b>7541</b>	<b>7099</b>	<b>5802</b>	<b>4780</b>	<b>3908</b>	<b>3090</b>	<b>2466</b>	<b>1944</b>	<b>1449</b>
<b><math>\sigma</math></b>	<b>6</b>	<b>87</b>	<b>84</b>	<b>76</b>	<b>69</b>	<b>63</b>	<b>56</b>	<b>50</b>	<b>44</b>	<b>38</b>
<b><math>p</math></b>	<b>17%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>2%</b>	<b>2%</b>	<b>2%</b>	<b>2%</b>	<b>3%</b>

Slika 39 predstavlja grafički prikaz rezultata pokusa 4.1 prikazanih u Tablici 15.



Slika 39. Grafički prikaz rezultata pokusa 4.1. Os apscisa predstavlja debljinu papira  $d$ , a ordinata odbroj  $N$  mjeren u vremenskom intervalu od 100 s.

### Rezultati i rasprava:

Maskimalni odbroj ( $N_{o\check{c}}$ ) kada je korišten izvor  $^{90}\text{Sr}$  iznosi  $N_{o\check{c}} = (8548 \pm 92)$  u vremenskom intervalu od 100 s, a njegova polovična vrijednost jednaka je 4274 (Slika 39). Uvrštavanjem te vrijednosti u izraz  $N = 8548,5e^{-0,292/mm \cdot d}$  dobiven usklađivanjem krivulje i eksperimentalnih podataka, dobiva se debljina papira potrebna za smanjenje odbroja na polovinu početne vrijednosti jednaka  $d = 2,370$  mm. Koeficijent apsorpcije u ovom pokusu razlikuje se od koeficijenta apsorpcije u pokusu 2.1 i 2.2 jer se dodavanjem traka papira gustoća fotokopirnog papira - apsorbera smanjuje (između slojeva papira nalazi se zrak), a gustoća apsorbera je omjer ukupne mase uzorka i površine cjelokupnog uzorka te s obzirom na navedeni omjer, gustoća se smanjuje, a time i apsorpcijski koeficijent, koji je proporcionalan gustoći apsorbera. Kako je debljina jednog fotokopirnog papira jednaka 0,100 mm to znači da je potrebno  $\frac{2,370 \text{ mm}}{0,100 \text{ mm}} = 23,7 \approx 24$  traka papira.

### Zaključak pokusa 4.1:

U pokusu 4.1 pomoću zatvorenog radioaktivnog izvora  $^{90}\text{Sr}$  i G-M brojača napravljen je model radioaktivnog debljinomjera kojim je mjereno odbroj u ovisnosti o debljini fotokopirnog papira (broju traka fotokopirnog papira) te je određena potrebna debljina fotokopirnog papira kako bi se broj detektiranih čestica smanjio na polovicu vrijednosti. Pomoću izvora  $^{90}\text{Sr}$  tražena vrijednost iznosi 23,7 što je približno 24 traka papira. Može se zaključiti da je pomoću ovog pokusa i izvora  $^{90}\text{Sr}$  moguće odrediti nepoznatu debljinu papira, što je pogodno i za deblje papire.

### Pokus 4.2.

Tablica 16. Rezultati mjerenja dobiveni koristeći izvor  $^{60}\text{Co}$ .  $t$  (s) predstavlja vremenski interval od 100 s,  $N_p$  odbroj pozadinskog zračenja,  $N_I$  odbroj izvora te  $N_6$  sve do  $N_{18}$  odbroj kada je između cijevi brojača i izvora postavljeno 6 traka fotokopirnog papira, sve do 18 traka.  $\sigma$  predstavlja standardnu devijaciju, a  $p$  postotnu pogrešku mjerenja.

Redni broj mjerenja	$t$ (s)	$N_p$	$N_I$	$N_6$	$N_{12}$	$N_{18}$
1.	100	36	91	106	75	82
2.	100	39	96	91	85	84
3.	100	34	98	80	83	110
4.	100	35	93	99	95	80
5.	100	37	94	93	101	106
6.	100	30	71	70	103	84
7.	100	32	86	77	89	76
8.	100	40	94	99	71	86
9.	100	31	89	89	100	79
10.	100	31	93	91	80	90
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>100</b>	<b>35</b>	<b>90</b>	<b>89</b>	<b>88</b>	<b>87</b>
$\sigma$	-	<b>6</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>9</b>
$p$	-	<b>17%</b>	<b>10%</b>	<b>10%</b>	<b>10%</b>	<b>10%</b>

## **Rezultati i rasprava:**

Pomoću odbroja mjerenog koristeći dostupan izvor  $^{60}\text{Co}$ , odnosno pomoću izmjerenih vrijednosti iz Tablice 17 nije moguće izvršiti eksperiment jer se povećavanjem broja slojeva papira (tj. povećavanjem debljine papira) odbroj gotovo nije smanjivao (približno je konstantan).  $\gamma$  čestice iz izvora  $^{60}\text{Co}$  prolaze kroz papir neovisno o broju traka papira i vremenu poluraspada izvora, dok  $\beta$  čestice budu zaustavljene.

## **Zaključak pokusa 4.2:**

Pomoću dostupnog radioaktivnog izvora  $^{60}\text{Co}$  proizvedenog 1999. godine, u pokusu 4.2 nije moguće odrediti debljinu papira/ broj traka potreban za smanjenje odbroja na polovicu vrijednosti. Ovaj pokus je vjerojatno moguće provesti s izvorom  $^{60}\text{Co}$  veće aktivnosti jer kada je aktivnost izvora  $^{60}\text{Co}$  niska (kao u provedenom pokusu) te bez obzira na to koliko se papira stavi između izvora i cijevi brojača, brojač detektira samo  $\gamma$  zrake te je nemoguće dobiti traženu usporedbu.

## **8.6. Pokus 5. Odbroj u ovisnosti o promjeni kuta**

**Zadatak:** Izmjeriti odbroj (koji detektira G-M brojač) u ovisnosti o promjeni kuta između cijevi brojača i pravca u kojem je usmjeren izvor (od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ ).

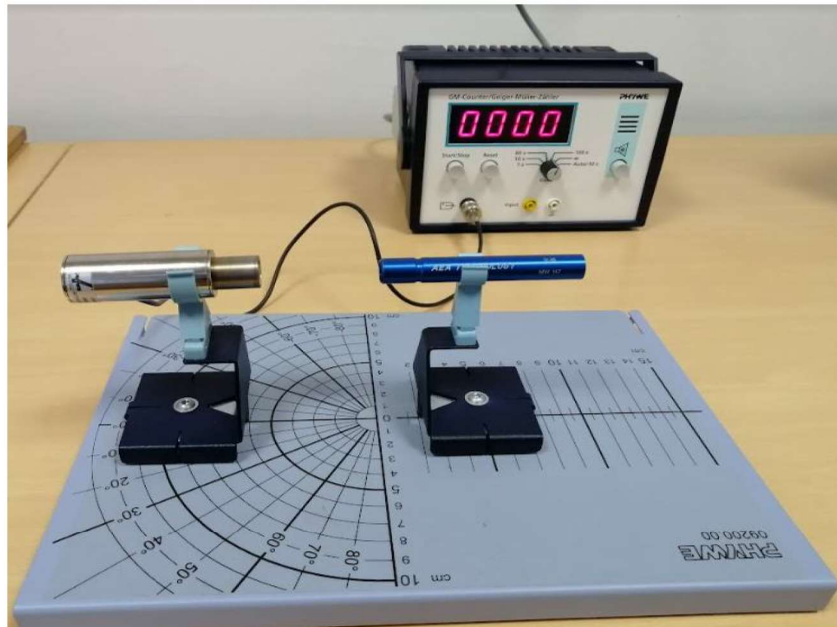
### **Popis korištenog pribora:**

G-M brojač, G-M cijev (tip B), metalna ploča za postav eksperimenta, nosač G-M cijevi s magnetnim postoljem (nožicom), nosač izvora s magnetnim postoljem, izvor ionizirajućeg zračenja ( $^{90}\text{Sr}$  početne aktivnosti 74 kBq).

### **Postavljanje i postupak izvođenja pokusa:**

Za eksperimentalni postav (Slika 40) potrebna je metalna ploča za postav eksperimenta, G-M brojač, G-M cijev tipa B te odgovarajući nosači s magnetnim postoljem. Najprije je potrebno postaviti odgovarajuće nosače na metalnu ploču za postav eksperimenta te postaviti G-M cijev na nosač i spojiti cijev s G-M brojačem. Nosač izvora potrebno je postaviti na oznaku „0“ na centimetarskoj skali, kao i nosač cijevi brojača na oznaku „0“ na kutnoj skali. Nosač izvora i cijev brojača udaljeni su 5,0 cm. Zaštitni poklopac s cijevi brojača potrebno je skinuti prije nego se izvor zračenja umetne u nosač izvora i cijev brojača u odgovarajući nosač, kao i u svim prethodnim eksperimentima. Cijev brojača treba biti spojen na brojač te se odabere 100 s za vrijeme mjerenja.

Mjerenje se provodi tako da se cijev brojača pomiče u koracima po  $20^\circ$  u odnosu na početni položaj, s tim da u svakom mjerenju udaljenost između cijevi brojača i izvora ostane jednaka. Odbroj u vremenskom intervalu od 100 s potrebno je unijeti za svaku promjenu kuta 10 puta u odgovarajuću tablicu. Nakon mjerenja potrebno je nacrtati graf ovisnosti odbroja o kutu između cijevi brojača i pravca u kojem je usmjeren izvor.

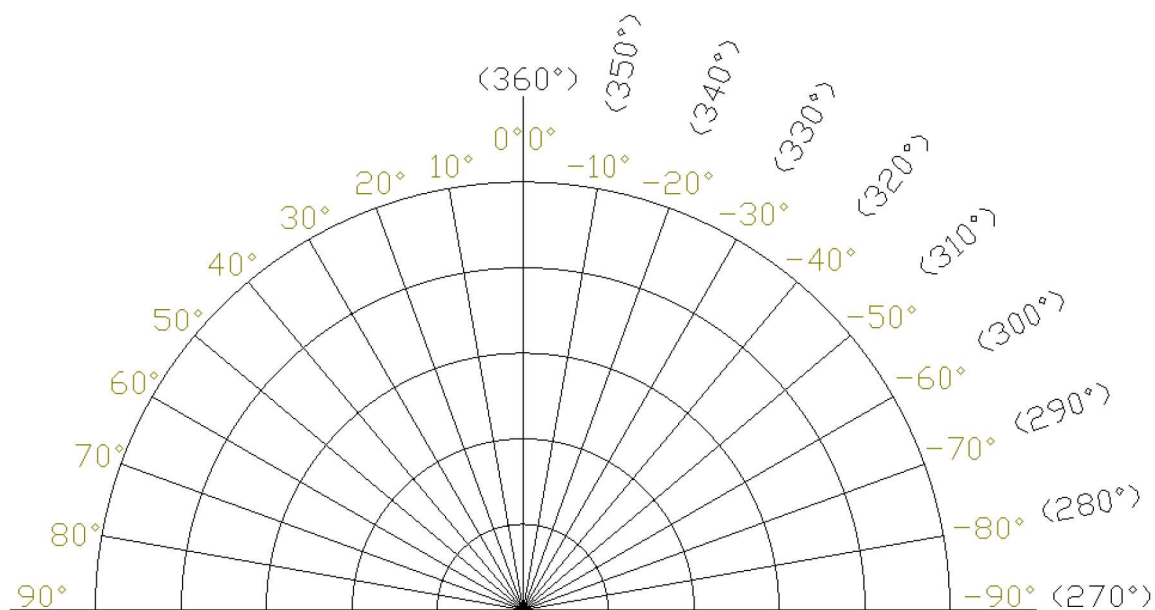


Slika 40. Eksperimentalni postav - mjerenje odbroja u ovisnosti o promjeni kuta.

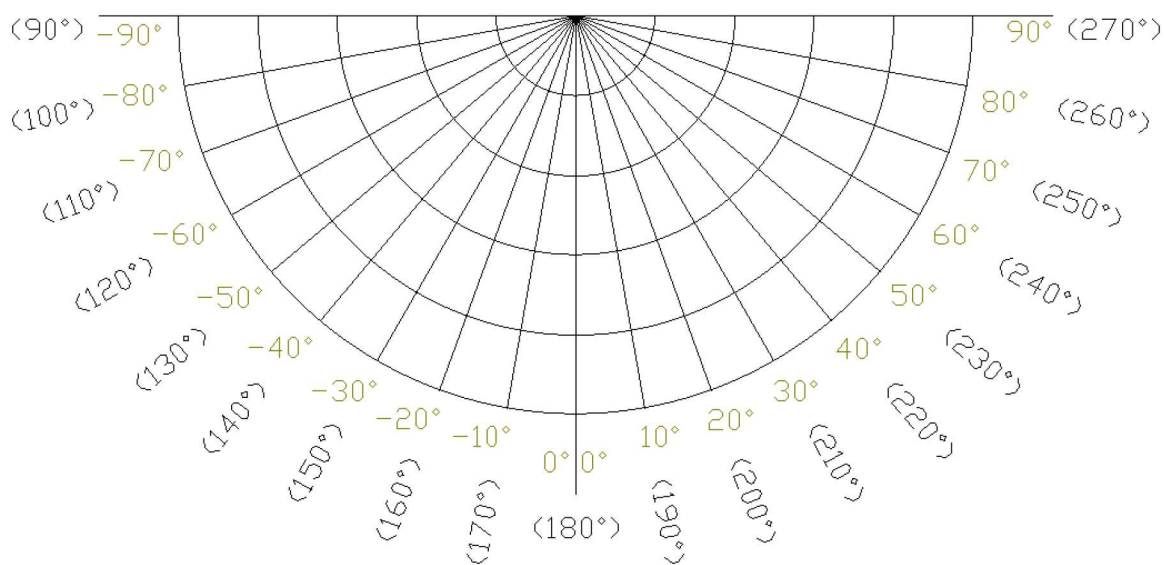
#### **Napomena:**

Kako kutna skala u eksperimentu pokriva samo polovinu punog kuta ( $180^\circ$ ) i ima negativne vrijednosti, za uspješnu izvedbu pokusa 5 potrebno je provoditi mjerenje s kutovima od  $0^\circ$  do  $360^\circ$  u smjeru suprotnom od smjera kazaljke na satu (pozitivnom smjeru), u koracima po  $20^\circ$ . Skala se gleda od strane izvora, odnosno kamo je on usmjeren. Na Slici 40 negativni dio skale nalazi se desno od izvora i izvor je usmjeren prema kutovima sa Slike 41, gdje je cijev brojača nasuprot izvoru. Koristeći istu kutnu skalu i slijedeći pozitivan smjer, kutovi (od  $90^\circ$  do  $270^\circ$ ) sa Slike 42 dobiju se na način da se izvor okrene na drugu stranu, u kojem slučaju su negativne vrijednosti na skali s lijeve strane izvora, a cijev brojača je iza izvora.





Slika 41. Skala kutomjera i ekvivalentni kutovi u slučaju kada je cijev brojača ispred izvora.



Slika 42. Skala kutomjera i ekvivalentni kutovi u slučaju kada je cijev brojača iza izvora.

U Tablici 17 prikazani su rezultati mjerenja dobiveni koristeći izvor  $^{90}\text{Sr}$ , gdje je mjereno odbroj u ovisnosti o kutu između cijevi brojača i pravca u kojem je usmjeren izvor u vremenskom intervalu od 100 s.

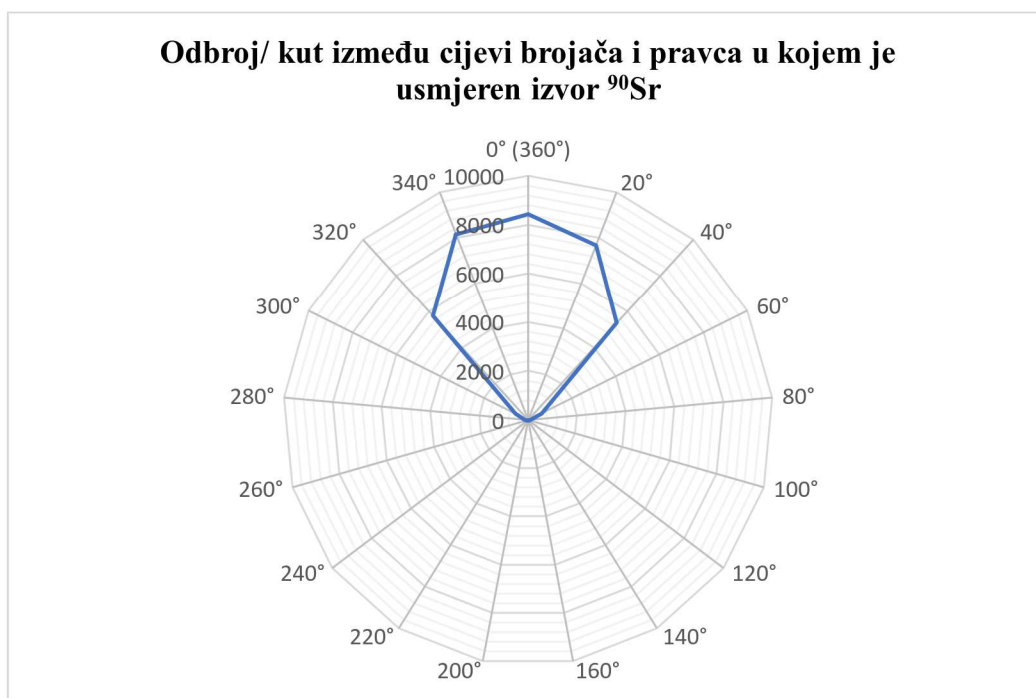
**Rezultati mjerenja <sup>90</sup>Sr:**

Tablica 17. Rezultati mjerenja dobiveni koristeći izvor <sup>90</sup>Sr.  $N_p$  predstavlja pozadinsko zračenje. Prikazani kutovi odnose se na kut za koji se zakreće cijev brojača u odnosu na početni položaj.  $\sigma$  predstavlja standardnu devijaciju, a  $p$  postotnu pogrešku mjerenja.

Redni br. mj.	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°	200°	220°	240°	260°	280°	300°	320°	340°	360°
1.	8411	7651	5476	571	159	76	13	10	12	10	5	11	55	119	562	5711	8215	8411
2.	8480	7686	5507	608	127	67	30	8	11	6	16	24	48	108	616	5720	8085	8480
3.	8359	7786	5471	624	141	64	18	11	5	26	12	43	61	124	622	5889	8277	8359
4.	8467	7565	5344	616	162	65	34	2	1	5	11	30	58	121	591	5839	8156	8467
5.	8548	7781	5364	588	133	52	18	21	6	7	24	19	70	104	526	5722	8220	8548
6.	8402	7654	5433	607	142	77	21	4	4	1	13	33	61	113	576	5761	7952	8402
7.	8209	7817	5321	653	138	71	25	9	-4	14	7	16	53	121	560	5756	8194	8209
8.	8439	7590	5161	609	144	59	23	1	12	6	11	23	72	107	572	5756	8207	8439
9.	8450	7539	5369	571	159	67	33	14	3	-5	12	19	62	129	569	5701	8167	8450
10.	8547	7671	5252	612	154	47	27	22	6	8	3	12	55	141	540	5773	8059	8547
<b>Sr.vr.</b>	<b>8431</b>	<b>7674</b>	<b>5369</b>	<b>605</b>	<b>145</b>	<b>64</b>	<b>24</b>	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>11</b>	<b>23</b>	<b>59</b>	<b>118</b>	<b>573</b>	<b>5762</b>	<b>8153</b>	<b>8431</b>
<b><math>\sigma</math></b>	<b>92</b>	<b>88</b>	<b>73</b>	<b>25</b>	<b>12</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>11</b>	<b>24</b>	<b>76</b>	<b>90</b>	<b>92</b>
<b><math>p</math></b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>4%</b>	<b>8%</b>	<b>13%</b>	<b>20%</b>	<b>30%</b>	<b>45%</b>	<b>38%</b>	<b>28%</b>	<b>21%</b>	<b>14%</b>	<b>9%</b>	<b>4%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>

## Rezultati i rasprava:

U pokusu 5 pomoću zatvorenog radioaktivnog izvora  $^{90}\text{Sr}$  i G-M brojača mjereno je odbroj u ovisnosti o promjeni kuta za koji se zakreće cijev brojača u odnosu na početni položaj, u koracima od  $20^\circ$  (odbroj pozadinskog zračenja jednak je kao u Tablici 16). Odbroj dobiven za kut  $180^\circ$  nije moguće izmjeriti za odabranu udaljenost između cijevi brojača i izvora jer je za pokus izabrana geometrija koja to ne dozvoljava (sam izvor je dulji od 5,0 cm). U Tablici 17 vidljivo je smanjenje odbroja za kutove između  $0^\circ$  do  $160^\circ$  te nakon toga povećanje odbroja za kutove između  $160^\circ$  do  $360^\circ$ . Na Slici 43 nisu jasno vidljivi odbroji za donji dio grafa jer su manji od 400 (označena petina skale na grafu), a skala je postavljena u koracima po 2000 odbroja.



Slika 43. Polarni dijagram pokusa 5 - promjena odbroja u ovisnosti o promjeni kuta.

## Zaključak pokusa 5:

Kako zračenje iz izvora ne izlazi samo pravocrtno nego u više smjerova i pod različitim kutovima, s izvorom  $^{60}\text{Co}$  u pokusima 2 uočava se da brojač G-M cijevi detektira  $\gamma$  čestice i pod kutom (sa strane izvora). Pokus 5 proveden je kako bi se proučila detekcija zračenja oko izvora te kako bi se potvrdila pretpostavka ovisnosti detekcije o kutu za koji je zakrenuta cijev brojača u odnosu na pravac u kojem je usmjeren izvor.

## 9. Zaključak

Provođenjem eksperimenata unutar ovog diplomskog rada vidljivo je kako se pojedini korišteni radioaktivni izvori mogu primijeniti u svrhu određivanja debljine materijala te razine ispunje spremnika. Pomoću zatvorenih radioaktivnih izvora i G-M brojača te koristeći transmisiju, apsorpciju i refleksiju čestica opisan je model industrijskog razinomjera i debljinomjera, čiji su rezultati pokazali kako su  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  zračenje pogodni za ovakvu vrstu mjerenja, svako za određenu namjenu. Može se zaključiti da radioaktivnost ima svojih prednosti u industriji na način da se odabirom radioaktivnog izvora s dugim vremenom poluraspada te određenog emitera za određenu namjenu, ubrzava sam proces kontrole kvalitete proizvodnje.

Na temelju rezultata pokusa Model radioaktivnog razinomjera - kontrola punjenja neprozirnog spremnika, gdje je prikazan model radioaktivnog razinomjera na način da je epruveta ispunjena olovnom sačmom i pomoću izvora  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{22}\text{Na}$ , utvrđeno je da se navedeni radioaktivni izvori mogu primijeniti za mjerenje ispunje, odnosno mjerenje razine spremnika. Mjerenjem s izvorima  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{22}\text{Na}$ , koji su  $\beta$  i  $\gamma$  emiteri, vidljivo je kako su neke  $\beta$  čestice zaustavljene samom plastikom od koje je napravljena epruveta te papirom unutar nje. Iz tog razloga su  $\beta$  razinomjeri pogodni za mjerenje razine spremnika koji je sačinjen od materijala koji može djelomično asporbirati  $\beta$  čestice, kao što su plastika i aluminij. Pokusima Model radioaktivnog razinomjera utvrđeno je da je vrijeme proizvodnje i vrijeme poluraspada izvora važno jer se izvorom smanjene aktivnosti teško može odrediti razina ispunje spremnika. Kako  $^{22}\text{Na}$  ima vrijeme poluraspada od 2,58 godina, a vrijeme proizvodnje i vrijeme mjerenja je puno veće, ono ima malu aktivnost te (nakon raspada na stabilan izotop  $^{22}\text{Ne}$ ) kroz sačmu prolaze samo  $\gamma$  zrake.

Pokusima Model radioaktivnog refleksijskog debljinomjera - mjerenje debljine papira pomoću refleksije ionizirajućeg zračenja, prikazana je mogućnost izrade modela radioaktivnog debljinomjera i u reflektiranom snopu zračenja. Mjerenjem odbroja na udaljenosti 2,0 cm i 9,0 cm između cijevi brojača i izvora od nosača pločice (papira), uočen je manji odbroj za veću udaljenost. Odbroj se na putu od izvora do cijevi brojača smanjuje s udaljenošću, zbog gubitka energije čestica.

Pokusima Ovisnost broja detektiranih ioniziranih čestica Geiger-Müllerovim brojačem o prolasku kroz različite materijale - transmisija i apsorpcija, prikazan je odbroj detektiran iz izvora  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{60}\text{Co}$  te je uočeno da najveći odbroj odgovara korištenju sjajnog papira, zatim aluminija te olova, a rezultat toga je mogućnost transmisije  $\beta$  i  $\gamma$  čestica. Korištenjem izvora  $^{90}\text{Sr}$  uočen je veći odbroj,

čemu doprinosi veća energija  $\gamma$  čestica emitiranih iz  $^{90}\text{Sr}$ . Jednak rezultat dobiven je i unutar pokusa Ovisnost broja detektiranih ioniziranih čestica Geiger-Müllerovim brojačem o broju traka fotokopirnog papira - transmisija i apsorpcija, gdje se s povećanjem traka fotokopirnog papira povećava debljina papira, odnosno smanjuje detektiran odbroj.

Pokusom Odbroj u ovisnosti o promjeni kuta prikazano je kako odbroj ovisi i o kutu između cijevi brojača i pravca u kojem je usmjeren izvor. Kada je cijev brojača postavljena nasuprot izvoru (pod kutom od  $0^\circ$ ), tada je dobiven najveći odbroj, a on se povećanjem kuta do  $160^\circ$  smanjuje, nakon čega se ponovo povećava, odnosno može se zaključiti kako je optimalno usmjerenje izvora u rasponu kutova od  $40^\circ$  stupnjeva lijevo i desno u odnosu na pravac između cijevi brojača i izvora, dok je za ostale kutove zračenje zanemarivo. Za mjerenje debljine papira najbolje je koristiti  $\beta$  emitere zbog njihove velike mogućnosti prodiranja, dok se  $\gamma$  emiteri mogu koristiti i kod debljih i gušćih materijala. Od svih korištenih izvora, kao  $\beta$  i  $\gamma$  emiter, najpogodniji je  $^{90}\text{Sr}$  zbog visoke energije emitiranog zračenja i dugog vremena poluraspada.  $^{226}\text{Ra}$  (većim dijelom) kao  $\alpha$  i  $\gamma$  emiter, pogodan je za mjerenje debljine ili ispune spremnika različitih materijala (osim papira) jer ima veliko vrijeme poluraspada, zbog čega se izvor ne bi morao često mijenjati, čime ne dolazi do prekida procesa proizvodnje. Kada bi se  $^{226}\text{Ra}$  koristio za mjerenje debljine papira, sve  $\gamma$  čestice bi prolazile kroz papir, a  $\alpha$  bi bile zaustavljene, stoga mjerenja ne bi davala korisne podatke.

Pogreške mjerenja unutar pokusa su ponegdje i iznad 10% zbog stohastičke prirode radioaktivnog raspada, a ono na što se može utjecati je održavanje geometrije pokusa jednakom od početka mjerenja do kraja eksperimenta.

Sva navedena aparatura koja je korištena u izradi ovog diplomskog rada nalazi se na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku te se svi ovi pokusi mogu provesti na Odjelu za fiziku. Ovo je mali doprinos kako bi se ovi pokusi u budućnosti mogli koristiti u nastavi iz praktikuma ili kao demonstracijski pokusi u radu sa studentima.

## 10. Literatura

- [1.] Ćukušić, A. RADIOAKTIVNO ZRAČENJE I IZVORI RADIOAKTIVNOG ZRAČENJA. 2022. URL:  
<https://repozitorij.vuka.hr/islandora/object/vuka%3A2346/datastream/PDF/view>  
(29.1.2023.)
- [2.] Jakobović, Z. Ionizirajuće zračenje i čovjek. Zagreb: Školska knjiga, 1991.
- [3.] Electrical4U. What is an Atom?. 2020. URL:  
<https://www.electrical4u.com/concept-of-atom/> (2.3.2023.)
- [4.] What is radioactivity and radiation?. URL:  
<https://web.evs.anl.gov/uranium/faq/uproperties/faq4.cfm> (29.1.2023.)
- [5.] E. P. Steinberg.; J. O. Rasmussen. Radioactivity. 2023. URL:  
<https://www.britannica.com/science/radioactivity> (29.1.2023.)
- [6.] Zakon radioaktivnog raspada. URL: <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/eb63acab-6d0c-4a0a-84b8-345fddcdcec2/zakon-radioaktivnog-raspada.html> (29.1.2023.)
- [7.] Radionuklidi. URL: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=51501> (29.1.2023.)
- [8.] Activity. URL: <https://www.britannica.com/science/activity-radioactivity> (29.1.2023.)
- [9.] International Thorium Energy Committee. Thorium. 2015. URL: <http://ithec.org/en/thorium/>  
(18.2.2023.)
- [10.] Sarah E.; N. Spector. Discovery of Radioactivity. 2010. URL:  
[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\\_Textbook\\_Maps/Supplemental\\_Modules\\_\(Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\)/Nuclear\\_Chemistry/Radioactivity/Discovery\\_of\\_Radioactivity](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Nuclear_Chemistry/Radioactivity/Discovery_of_Radioactivity) (29.1.2023.)
- [11.] Mirion Technologies. THE HISTORY OF RADIATION. 2015. URL:  
<https://www.mirion.com/learning-center/radiation-safety-basics/the-history-of-radiation>  
(29.1.2023.)
- [12.] Wilhelm Röntgen. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm\\_Röntgen](https://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Röntgen) (18.2.2023.)
- [13.] Povijest.hr 2023. Otkriće radioaktivnosti - 1896. 2023. URL:  
<https://povijest.hr/nadanasnjidan/otkrice-radioaktivnosti-1896/> (30.1.2023.)
- [14.] Antoine Henri Becquerel. URL: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Antoine\\_Henri\\_Becquerel](https://hr.wikipedia.org/wiki/Antoine_Henri_Becquerel)  
(18.2.2023.)
- [15.] Ernest Rutherford. URL: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Ernest\\_Rutherford](https://hr.wikipedia.org/wiki/Ernest_Rutherford) (30.1.2023.)

- [16.] Lambaša I. Otkriće tri vrste radioaktivnog raspada; radioaktivne pretvorbe i zakon radioaktivnog raspada. 2006. URL: <https://www.phy.uniri.hr/~jurdana/radioaktivnep.pdf> (18.2.2023.)
- [17.] Linda Hall Library. SCIENTIST OF THE DAY PAUL VILLARD. 2017. URL: <https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/paul-villard> (18.2.2023.)
- [18.] International Agency for Research of Cancer. Što je „zračenje”? Kakve vrste zračenja postoje?. 2005. URL: <https://cancer-code-europe.iarc.fr/index.php/hr/12-nacina/zracenje/2713-sto-je-bdquo-zracenje-rdquo-kakve-vrste-zracenja-postoje> (14.3.2023.)
- [19.] Ionizacija. URL: <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=27752> (14.3.2023.)
- [20.] The Photoelectric Effect, Photons and Planck’s Equation. 2021. URL: <https://thescienceandmathszone.com/the-photoelectric-effect-photons-and-plancks-equation/> (15.3.2023.)
- [21.] M. Mitrić. Ašković. Ionizirajuće zračenje i interakcija sa materijom. 2018. URL: <https://iceps.edu.rs/wp-content/uploads/2018/05/Jonizujuće-zračenje-i-interakcija-sa-materijom.pdf> (1.2.2023.)
- [22.] Comptonov efekt: zaglavni kamen kvantne mehanike. 2019. URL: [https://hr.puntomarinero.com/the-compton-effect-the-keystone/\(15.3.2023.\)](https://hr.puntomarinero.com/the-compton-effect-the-keystone/(15.3.2023.))
- [23.] Štimac. M. COMPTONOV EFEKT, DE BROGLIEVA VALNA MEHANIKA I OGIB ELEKTRONA. PAULIJEV PRINCIP I ELEKTRONSKI SPIN. KVANTNA STATISTIKA. 2006. URL: <https://www.phy.uniri.hr/~jurdana/comptonov.pdf> (15.3.2023.)
- [24.] Tvorba parova. URL: <http://physics.mef.hr/Predavanja/IVG/html/spektro%20pred/img18.html> (15.3.2023.)
- [25.] Mirion Technologies. Types of Ionizing Radiation. 2015. URL: <https://www.mirion.com/learning-center/radiation-safety-basics/types-of-ionizing-radiation> (14.3.2023.)
- [26.] Difference between alpha and beta. URL: <https://hr.weblogographic.com/difference-between-alpha-beta> (31.1.2023.)
- [27.] Types of Radioactive Decay Study Guide. URL: <https://www.inspiritvr.com/general-chemistry/nuclear-chemistry/types-of-radioactive-decay-study-guide> (1.2.2023.)
- [28.] H.Agnew; M-Alviar-Agnew. Types of Radioactivity: Alpha, Beta, and Gamma Decay. URL: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Introductory\\_Chemistry/Introductory\\_Chemistry/1](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Introductory_Chemistry/Introductory_Chemistry/1)

[7%3A\\_Radioactivity\\_and\\_Nuclear\\_Chemistry/17.03%3A\\_Types\\_of\\_Radioactivity-  
\\_Alpha\\_Beta\\_and\\_Gamma\\_Decay](#) (18.3.2023.)

- [29.] Okus. URL: <http://struna.ihjj.hr/naziv/okus/10295/> (11.5.2023.)
- [30.] Kvarak. URL: <http://struna.ihjj.hr/search-do/?q=kvarak&naziv=1&polje=0#container> (11.5.2023.)
- [31.] Kvantni broj. URL: <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=34875> (11.5.2023.)
- [32.] W and Z bosons. URL: <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/particle-physics/content-section-8.1> (2.5.2023.)
- [33.] Beta Decay. URL: <https://education.jlab.org/glossary/betadecay.html> (18.3.2023.)
- [34.] D. Adliené. BASIC RADIATION PHYSICS AND SOURCES OF RADIATION. URL: <http://www.ichtj.waw.pl/ichtj/publ/monogr/sun2017/sun-chapter1.pdf> (23.3.2023.)
- [35.] Elektronski uhvat. URL: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektronski\\_uhvat](https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektronski_uhvat) (27.3.2023.)
- [36.] Electron Capture. URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Nuclear/radact2.html> (11.6.2023.)
- [37.] Miklavčić I. Opis namjene i načina uporabe radioaktivnih izvora na Odjelu za fiziku Osijek. 2013.
- [38.] C. Okon.; D. E. Oku. Measurements of Gamma Ray Source Spectra with Germanium (Ge) Detector, Sodium Iodide (NaI(Tl)) Scintillation Detector using MultiChannel Analyser (MCA). 2015. URL: [https://www.researchgate.net/publication/336135456\\_Measurements\\_of\\_Gamma\\_Ray\\_Source\\_Spectra\\_with\\_Germanium\\_Ge\\_Detector\\_Sodium\\_Iodide\\_NaITl\\_Scintillation\\_Detector\\_using\\_MultiChannel\\_Analyser\\_MCA](https://www.researchgate.net/publication/336135456_Measurements_of_Gamma_Ray_Source_Spectra_with_Germanium_Ge_Detector_Sodium_Iodide_NaITl_Scintillation_Detector_using_MultiChannel_Analyser_MCA) (20.3.2023.)
- [39.] PhysicsOpenLab, Modern DIY Physics Laboratory for Science Enthusiast. Antimatter. 2016. URL: <https://physicsopenlab.org/2016/12/25/antimatter/> (3.5.2023.)
- [40.] V. Chisté.; M. Bé, C. Dulieu. Evaluation of decay data of radium-226 and its daughters. 2007. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluation-of-decay-data-of-radium-226-and-its-Chisté-Bé/a9e88fc62f8a3eef08bae1fe0e23b6e6bacfbf94/figure/0> (23.3.2023.)
- [41.] L. A. J. Venverloo. Practical Measuring Techniques for Beta Radiation. Macmillan Education
- [42.] M. D. R. Silva. Ionizing Radiation Detectors. 2015. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/48796> (2.2.2023.)
- [43.] M. Dumančić. Detekcija ioniziraju Detekcija ionizirajućeg zračenja. URL: <https://hpd.hr/eskola-fizika/bertie/Detekcija%20ionizirajućeg%20zracenja.pdf> (2.2.2023.)
- [44.] Ionizacijska komora. URL: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Ionizacijska\\_komora](https://hr.wikipedia.org/wiki/Ionizacijska_komora) (20.3.2023.)



- [45.] M. Sudar. Detektor ionizirajućeg zračenja - Geiger - Mullerov brojač. 2016.  
<https://repozitorij.fizika.unios.hr/islandora/object/fizos%3A29/datastream/PDF/view>  
 (1.3.2023.)
- [46.] Geiger Muller Counter: Construction, Principle, Working, Plateau graph and Applications. 2019. URL: <https://www.studyandscore.com/studymaterial-detail/geiger-muller-counter-construction-principle-working-plateau-graph-and-applications> (19.3.2023.)
- [47.] Proporcionalni brojač. URL: [https://sh.wikipedia.org/wiki/Proporcionalni\\_brojač](https://sh.wikipedia.org/wiki/Proporcionalni_brojač)  
 (20.3.2023.)
- [48.] Industrial Applications. 2000. URL:  
<https://www2.lbl.gov/abc/wallchart/chapters/13/6.html> (27.3.2023.)
- [49.] Thickness Monitoring. URL: <https://www.studysmarter.co.uk/explanations/physics/atoms-and-radioactivity/thickness-monitoring/> (27.3.2023.)
- [50.] Radioisotopes Commonly Used in Devices by Industry. URL:  
<https://archive.epa.gov/radiation/source-reduction-management/web/html/radionuclides.html> (27.3.2023.)
- [51.] Radioactivity Thickness Control. 2015. URL: <https://www.gcscience.com/prad25-radioactivity-thickness-control.htm> (27.3.2023.)
- [52.] Backscatter. URL: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/backscatter> (1.2.2023.)
- [53.] Backscattering of Beta Particles. 2017. URL:  
<https://physicsopenlab.org/2017/02/27/backscattering-of-beta-particles/> (18.3.2023.)
- [54.] Povratno raspršenje. URL: <http://struna.ihj.hr/naziv/povratno-rasprsenje/18834/>  
 (15.6.2023.)
- [55.] What Is Backscattering?. URL: <https://www.wise-geek.com/what-is-backscattering.htm>  
 (1.2.2023.)
- [56.] A. Arjhangmehr.; M. Mohammadzadeh.; S. A. h. Fegghi.; S.Beheshti. University Beta-backscattering Thickness-meter Design and Evaluation with Fuzzy TOPSIS Method. 2014. URL: [https://www.researchgate.net/publication/269478868\\_Beta-backscattering\\_Thickness-meter\\_Design\\_and\\_Evaluation\\_with\\_Fuzzy\\_TOPSIS\\_Method](https://www.researchgate.net/publication/269478868_Beta-backscattering_Thickness-meter_Design_and_Evaluation_with_Fuzzy_TOPSIS_Method) (18.3.2023.)
- [57.] Geiger-Mueller counter tube, type B, BNC cable 50 cm  
[https://www.phywe.com/physics/modern-physics/quantum-physics/geiger-mueller-counter-tube-type-b-bnc-cable-50-cm\\_1561\\_2492/](https://www.phywe.com/physics/modern-physics/quantum-physics/geiger-mueller-counter-tube-type-b-bnc-cable-50-cm_1561_2492/) (3. 6.2023.)
- [58.] Turney, S. Poisson Distributions | Definition, Formula & Examples. 2022. URL:  
<https://www.scribbr.com/statistics/poisson-distribution/> (27.01.2023.)

- [59.] Glumac, Z. Vjerojatnost i statistika. 2015 URL: <http://.fizika.unios.hr/~zglumac/uvs.pdf>. (27.01.2023.)
- [60.] T. Bošnjak. Poissonova i Gaussova raspodjela radioaktivnog raspada. 2011. URL: <http://www.mathos.unios.hr/~mdjumic/uploads/diplomski/BOš12.pdf> (27.01.2023.)
- [61.] Taylor, J.R. AN INTRODUCTION TO Error Analysis: THE STUDY OF UNCERTAINTIES IN PHYSICAL MEASUREMENTS. Second Edition. University Science Books Sausalito, California, 1982.
- [62.] Što je postotna pogreška i kako se ona izračunava? URL: <https://hr.thpanorama.com/articles/ciencia/qu-es-el-error-porcentual-y-cmo-se-calcula-10-ejemplos.html> (12.01.2023.)
- [63.] Opisivanje podataka. URL: <https://stedy.hr/opisivanje-podataka/varijanca-i-standardna-devijacija> (27.01.2023.)
- [64.] BUREK. R.; CHOCYK. D. BASIC ASPECTS OF THE MASS ABSORPTION COEFFICIENT OF BETA-PARTICLES. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles, Vol. 209, No. 1 (1996); 181-191.

## **11. Životopis**

Anja Pejaković rođena je 15. 12. 1996. godine u Vinkovcima, Republika Hrvatska. Pohađala je Tehničku školu Ruđera Boškovića u Vinkovcima. Srednju školu završila je 2015. godine te 2016. godine upisuje preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Zvanje prvostupnika fizike postigla je 2020. godine te iste godine upisuje diplomski studij fizike i informatike, nastavnički smjer na fakultetu gdje je stekla i prvu diplomu. Od 2019. godine ima licencu za fitnes instruktora te se bavi i poslom trenera, a fitnes joj je i hobi.