

# IONIZACIJSKA CIJEV

---

**Marić, Vedrana**

**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:160:055750>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-27**



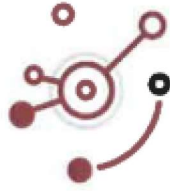
*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**ODJEL ZA FIZIKU**



**VEDRANA MARIĆ**

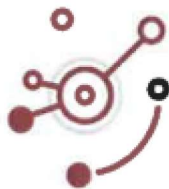
**IONIZACIJSKA CIJEV**

**Diplomski rad**

**Osijek, 2023.**

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**ODJEL ZA FIZIKU**



**VEDRANA MARIĆ**

**IONIZACIJSKA CIJEV**

**Diplomski rad**

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku radi stjecanja  
akadenskog naziva **MAGISTRA EDUKACIJE FIZIKE I INFORMATIKE**

**Osijek, 2023.**

**„Ovaj diplomski rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom komentora Igora Miklavčića, pred., i mentorice doc. dr. sc. Marine Poje Sovilj u sklopu Sveučilišnog diplomskog studija fizike i informatike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku“.**

*Zahvaljujem se roditeljima, braći i sestrama na podršci!*

# Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Teorijski dio .....	3
2. 1. Radioaktivnost.....	3
2. 2. Kratki osvrt na otkriće radioaktivnosti.....	4
2. 3. Ionizirajuće zračenje i vrste ionizirajućeg zračenja .....	6
2. 4. Povijest uređaja za zapažanje i detekciju ionizirajućeg zračenja.....	9
2. 5. Uređaji za zapažanje i detekciju ionizirajućeg zračenja.....	11
2. 6. Ionizacijska cijev.....	15
3. Praktični dio -Izrada ionizacijske cijevi.....	21
3.1. Izrada ionizacijske komore (mala ionizacijska cijev i elektronički elementi) .....	25
4. Eksperimentalni dio – Rezultati eksperimenta .....	26
5. Primjena ionizacijske cijevi u nastavi fizike.....	40
5.1. Obrada nastavne jedinice „Detekcija ionizirajućeg zračenja“ .....	40
6. Zaključak.....	54
7. Literatura.....	55
8. Životopis .....	58

## IONIZACIJSKA CIJEV

VEDRANA MARIĆ

### Sažetak

Uvodni dio diplomskog rada obuhvaća povijesni razvoj radioaktivnosti, teoriju kojom se objašnjava ionizirajuće zračenje, a zatim su opisane različite vrste zračenja. Nakon toga su opisani različiti uređaji za zapažanje i detekciju ionizirajućeg zračenja te njihov povijesni razvoj. Detaljno je opisana ionizacijska cijev, njeno područje rada, princip rada te druge bitne karakteristike. Središnji dio rada posvećen je izradi ionizacijske cijevi. Opisan je postupak izrade ionizacijske cijevi te su u završnom dijelu rada predstavljeni jednostavni pokusi koji se mogu izvesti s ovim niskobudžetnim uređajem. Predloženi uređaj bi se mogao koristiti u nastavi fizike četvrtog razreda srednje škole kod obrade jedinice Detekcije ionizirajućeg zračenja zbog svoje jednostavnosti izrade i male cijene.

(58 stranica, 21 slika, 10 tablice, 36 literaturnih navoda)

### Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku

**Ključne riječi:** detekcija zračenja / detektor ionizirajućeg zračenja / ionizacija / ionizacijska cijev / ionizacijska komora

**Mentor:** doc. dr. sc. Marina Poje Sovilj

**Komentor:** Igor Miklavčić, pred.

**Ocjenjivači:** doc. dr. sc. Denis Stanić; doc. dr. sc. Marina Poje Sovilj; Igor Miklavčić, pred.; mr. sc. Slavko Petrinšak

**Rad prihvaćen:** 28. rujna 2023.

# IONIZATION TUBE

VEDRANA MARIĆ

## Abstract

The initial part of the master thesis includes historical development of radioactivity, theory that explains ionizing radiation and different types of radiation. After that, various devices for the observation and detection of ionizing radiation and their historical development are described. The ionization tube, its working area, working principle and other important characteristics are described in detail. The central part of the work is devoted to the creation of an ionization tube. The process of making the ionization tube is described and in the final part of the master thesis, simple experiments that can be performed with this low-budget device are presented. The proposed device could be used in fourth-grade high school physics classes, when unit Detection of ionizing radiation is taught, due to its simplicity of manufacture and low cost.

(58 pages, 21 figures, 10 tables, 36 references)

## Thesis deposited in Department of Physics library

**Keywords:** ionization / ionization chamber / ionization tube / ionizing radiation detector / radiation detection

**Supervisor:** Assistant Professor Marina Poje Sovilj, PhD

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

**Reviewers:** Denis Stanić, PhD; Marina Poje Sovilj, PhD; Igor Miklavčić, Lecturer; Slavko Petrinšak, MSc

**Thesis accepted:** September 28th, 2023



# 1. Uvod

U današnje vrijeme uporaba ionizirajućeg zračenja široko je rasprostranjena u poljima kao što su medicina, industrija i nuklearno područje. Nesreće u nuklearnim elektranama, izazvane kvarom i ljudskom pogreškom ili prouzročene nekim vanjskim utjecajem, uzrokuju neželjeno ionizirajuće zračenje koje je štetno kako za živa bića tako i za okoliš. Primjer toga su bile nuklearne katastrofe u Černobilu i Fukushima pri čemu su velike količine ionizirajućeg zračenja ispuštene u okoliš. Utjecaj ionizirajućeg zračenja na živa bića i okoliš je velik te se treba istaknuti da se posljedice ovih nesreća osjete i danas. Nuklearne elektrane, kao i medicinsko zračenje, spadaju u umjetne izvore ionizirajućeg zračenja. Veći utjecaj na čovjeka imaju prirodni izvori zračenja kojima je čovjek svakodnevno izložen, a to su zračenje od hrane, kozmičko zračenje, zračenje od radona i Zemljine kore. Ionizirajuće zračenje je široko rasprostranjeno te ne postoji mjesto na kojem zračenje nije prisutno. Danas se pri gradnji javnih zgrada koriste detektori zračenja za provjeru prisutnosti ionizirajućeg zračenja. Također, uspoređuje se količina zračenja na tom mjestu s граниčnim vrijednostima propisanim Zakonom o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti te Pravilnikom o praćenju stanja radioaktivnosti u okolišu. [1]

Ionizirajuće zračenje je pojava za koju ljudska osjetila nisu razvijena, što znači da ljudi mogu biti izloženi ionizirajućem zračenju, a da toga nisu svjesni. Posljedice izloženosti ionizirajućem zračenju nisu odmah vidljive, već se mogu osjetiti nakon nekog vremena. Zbog toga su stvoreni uređaji za detekciju zračenja koji pohranjuju energije čestica koje detektiraju i pretvaraju ih u signal. Obradom podataka dobivenih iz uređaja može se doći do zaključka o vrsti zračenja i njenim svojstvima. Detektori ionizirajućeg zračenja dijele se u tri skupine: vizualizatori tragova, dozimetri i brojači. Osim ovih uređaja, postoje još različite vrste detektora posebnih namjena.

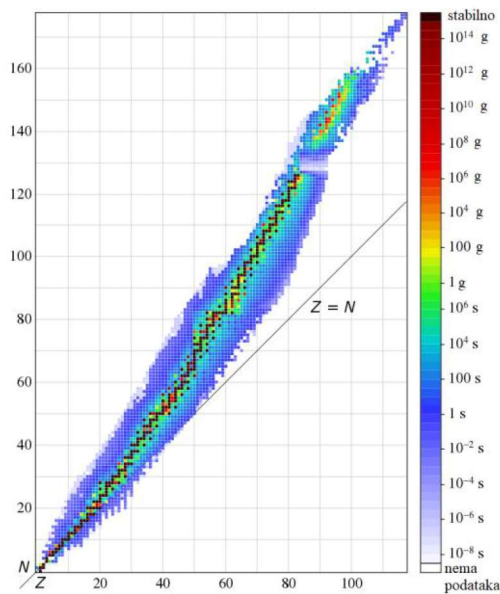
Ovaj rad posvećen je jednom od tih detektora zvan ionizacijska cijev koja se danas najčešće koristi za mjerenja u radioterapiji. Ionizacijska cijev dio je uređaja za detekciju zračenja koji se naziva ionizacijska komora.

Opasnosti koje pruža ionizirajuće zračenje ne mogu se potpuno ukloniti no mogu se ograničiti i smanjiti određenim mjerama. Republika Hrvatska ima uređen sustav zaštite od ionizirajućeg zračenja kojim se provodi niz postupaka kojima se procjenjuje vanjsko i unutarnje ozračenje. Stručnjaci za zaštitu od ionizirajućeg zračenja osiguravaju siguran rad u medicini gdje se koriste električni uređaji koji proizvode ionizirajuće zračenje i gdje se koriste radioaktivni izvori te siguran rad u industriji. Također, prate stanje okoliša, brinu o sigurnom zbrinjavanju radioaktivnog otpada i iskorištenih radioaktivnih izvora. [2]

## 2. Teorijski dio

### 2. 1. Radioaktivnost

Atomi pronađeni u prirodi mogu biti stabilni i nestabilni. Atom je stabilan ako su fundamentalne sile među česticama koje čine jezgru uravnotežene, a nestabilan ako su te fundamentalne sile neuravnotežene. Protoni u atomskoj jezgri su međusobno vrlo blizu te se odbijaju jakim električnom silom. Nukleone u jezgri na okupu drži jaka nuklearna sila. Da bi atom bio stabilan, električno odbijanje među protonima mora biti uravnoteženo privlačenjem između nukleona. Nuklearna karta prikazuje sve atomske jezgre čiji je položaj određen protonskim i neutronskim brojem. Stabilne jezgre označene su crnim točkama, a područje u kojem se nalaze naziva se pojas stabilnosti, kao što je grafički prikazano na slici 1.

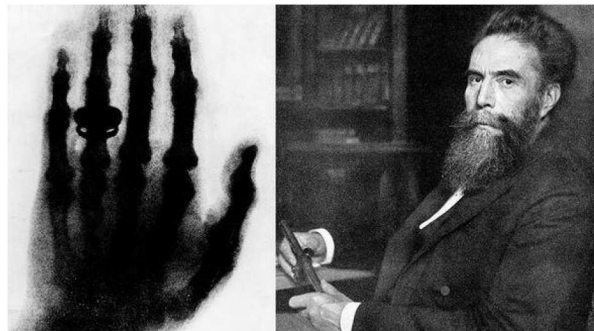


Slika 1. Nuklearna karta [3]

Radioaktivnost je svojstvo nestabilnih atoma, tzv. radionuklida, da spontano emitiraju nuklearne čestice i/ili elektromagnetsko zračenje, odnosno energiju u obliku zračenja, kako bi postigli stabilno stanje. Ova pojava naziva se radioaktivni raspad. Pri radioaktivnom raspadu jezgra radionuklida se pretvara u drukčiji izotop koji može, prema broju protona i neutrona, biti ili nestabilan ili stabilan te pri tome emitira radioaktivno zračenje. Radioaktivno zračenje pri međudjelovanju s nekom tvari mijenja strukturu i svojstva tvari. Najznačajniji efekt pri tome je ionizacija koja će se detaljnije opisati u zasebnom odlomku. [4]

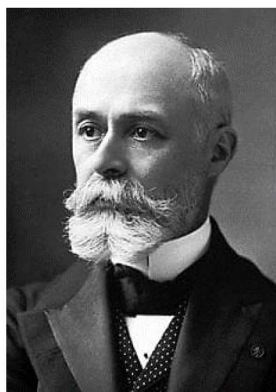
## 2. 2. Kratki osvrt na otkriće radioaktivnosti

1895. godine Wilhelm Conrad Röntgen otkrio je X-zrake (rendgenske zrake) slučajno tijekom pokusa u kojem je koristio katodnu cijev koju je modificirao Philipp Lenard. Iako su se i u Lenardovim istraživanjima katodnih zraka pojavljivale rendgenske zrake, nije ih zapazio. Tu se istaknuo Röntgen, uočivši razliku u ponašanju između katodnih i rendgenskih zraka, promatrajući kako papirni fluorescentni zastor svjetluca. Snimak kostiju šake njegove supruge načinjen rendgenskim zrakama, prikazan na slici 2, povijesni je trenutak u znanosti. [5]



Slika 2. Rendgenski snimak kostiju šake supruge Röntgen i Wilhelm Conrad Röntgen [6]

1896. godine Antoine Henri Becquerel, prikazan na slici 3, otkrio je prirodnu radioaktivnost. Potaknut otkrićem rendgenskih zraka i pretpostavkom Poincaréa da je fluorescencija povezana s pojavom rendgenskih zraka te kako za njihovu pojavu nisu nužne katodne zrake, odlučio je to istražiti. Za pokus je koristio fotografsku ploču koju je zamotao u crni papir i na nju stavio dvosol kalijeva i uranijeva sulfata. Pokus je izložio Sunčevoj svjetlosti te kao rezultat dobio sliku minerala. Prekretnica u njegovom istraživanju bilo je oblačno vrijeme koje je uslijedilo. Iako pokus nije bio izložen Sunčevoj svjetlosti na fotografskoj ploči bila je vidljiva slika minerala. Tim pokusom pobio je Poincaréovu pretpostavku i utvrdio da spojevi uranija sami emitiraju rendgenske zrake, koje su u to vrijeme bile poznate kao „Becquerelove zrake“. [5]



Slika 3. Antoine Henri Becquerel [7]

Maria Skłodowska Curie istraživala je postoje li još neke tvari svojstava sličnih uraniju. Otkrila je da uranij, torij i njegovi spojevi imaju ista svojstva te ih nazvala radioaktivnim. Uz pomoć supruga Pierra, 1898. godine Maria Skłodowska Curie preradom uranijeva smolinca otkrila je dva nova elementa, aktivnosti puno veće od uranija, te ih nazvala polonij i radij. Laboratorij u kojem su se izvodila istraživanja i portreti znanstvenika prikazani su na slici 4. [5]



Slika 4. Maria Skłodowska Curie i Pierre Curie [8]

1899. godine Ernest Rutherford promatrao je brzinu izbijanja naboja u elektroskopu nastalu ionizacijom zraka uzrokovanom zračenjem uranija. Otkrio je dvije vrste zračenja koje je ovisno o njihovoj prodornosti nazvao alfa-česticama i beta-česticama. [5]

1900. Paul Villard otkrio je prodorniju vrstu zračenja poznatu kao gama-zrake. [5]

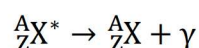
### 2. 3. Ionizirajuće zračenje i vrste ionizirajućeg zračenja

Osnovni pojam nužan za razumijevanje ionizacijske cijevi je proces zvan ionizacija. Ionizacija je proces nastajanja električki nabijenih čestica iz neutralnih atoma ili molekula. Prolazak elektromagnetskog zračenja ili električki nabijenih čestica dovoljno velike energije kroz tvar, bilo kojeg agregatnog stanja, uzrokuje oslobađanje elektrona iz neutralnih atoma ili molekula te tvari. Energija ionizacije je energija koja je dovoljna da neutralni atom ili molekula u plinovitom stanju izgubi elektron i nastane ionski par: pozitivno nabijeni ion i slobodni elektron. Izbačeni elektron može se vezati za drugi neutralni atom ili molekulu te stvoriti negativno nabijeni ion ili međudjelovati s pozitivno nabijenim ionom. Ionizaciju dijelimo na primarnu i sekundarnu. Primarnu ionizaciju izravno uzrokuje neka električki nabijena čestica, dok sekundarnu ionizaciju karakterizira stvaranje iona prilikom interakcije elektrona i iona dovoljno velike energije nastalih primarnom ionizacijom. Ionizaciju uzrokuje elektromagnetsko zračenje dovoljno velike energije, tako da elektron preuzme dio ili svu energiju zračenja. Proces ionizacije se uočava i pri termičkom gibanju atoma i molekula. U tom slučaju atomi i molekule posjeduju dovoljnu kinetičku energiju da pri međusobnim sudarima jedni druge ioniziraju. [9]

Elektromagnetsko zračenje dijeli se na ionizirajuće i neionizirajuće. U ovom radu samo su nabrojana neionizirajuća elektromagnetska zračenja budući da takva zračenja nemaju dovoljnu energiju za ionizaciju tvari s kojom međudjeluju. Tu spadaju infracrvene zrake, vidljiva svjetlost, ultraljubičaste zrake nižih energija, radiovalovi i mikrovalovi. Ionizirajuća elektromagnetska zračenja imaju dovoljno visoke energije da ioniziraju tvar s kojom međudjeluju. Elektromagnetsko ionizirajuće zračenje je zajednički naziv za ultraljubičasto zračenje viših energija, rendgensko zračenje, gama-zračenje i kozmičko zračenje. [4]

Rendgensko zračenje (X-zračenje) čine elektromagnetski valovi valnih duljina od  $10^{-10}$  do  $10^{-13}$  m. Nastaje u rendgenskim cijevima na koje je primijenjen napon koji uzrokuje da brzi elektroni izlete iz katode i sudare se s metalnom anodom ili prirodnim procesima u svemiru. [10]

Gama-zračenje ( $\gamma$ -zračenje) čine elektromagnetski valovi valnih duljina manjih od  $10^{-13}$  m. Pri gama-raspadu jezgra u pobuđenom stanju prelazi u stanje niže energije pri čemu dolazi do emisije fotona. Karakteristika gama-raspada je da nema promjene u atomskom ni masenom broju. Simbolično se gama-raspad može zapisati kao:

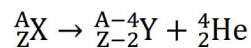


Gdje je  $X^*$  jezgra u pobuđenom stanju, a  $X$  novonastala jezgra. [4]

Primarno kozmičko zračenje podrazumijeva stvaranje fotona velikih energija pri nuklearnim procesima u zvijezdama. Kada ti fotoni međudjeluju s atomskim jezgrama koje se nalaze u Zemljinj atmosferi nastaje sekundarno kozmičko zračenje. [4]

Također, zračenje masenim česticama spada u grupu ionizirajućih zračenja jer ionizira tvar s kojom je u interakciji. Nastaje raspadom atomske jezgre. Zračenje masenim česticama podrazumijeva alfa-zračenje, beta-zračenje i neutronske zračenje. [11]

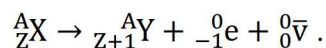
Alfa-zračenje je zračenje čestica koje se sastoje od dva protona i dva neutrona, odnosno jezgra helija ( ${}^4_2\text{He}$ ). Pri alfa-raspadu nestabilna jezgra se transformira u drugu jezgru koja ima dva protona i dva neutrona manje i pritom emitira alfa-česticu. Simbolički se alfa-raspad može zapisati kao:



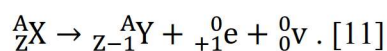
gdje je X radioaktivna jezgra koja se raspada, a Y novonastala stabilna ili nestabilna jezgra.

Beta-zračenje je zračenje pri kojem se iz nestabilne jezgre spontano emitiraju elektroni ili pozitroni. Ovisno koja je čestica emitirana beta-zračenje dijelimo na dvije vrste:  $\beta^-$ -zračenje i  $\beta^+$ -zračenje.

Pri  $\beta^-$ -raspadu, jedan neutron u jezgri se spontano pretvori u proton, uz emisiju elektrona ( $\beta^-$ -čestica) i antineutrina. Simbolički se  $\beta^-$ -raspad može zapisati kao:

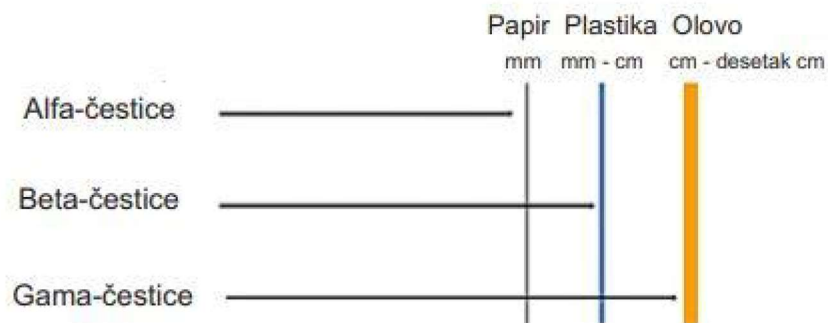


Pri  $\beta^+$ -raspadu, jedan proton u jezgri se spontano pretvori u neutron, uz emisiju pozitrona ( $\beta^+$ -čestica) i neutrina. Simbolički se  $\beta^+$ -raspad može zapisati kao:



Alfa-čestica posjeduje ogromnu energiju u rasponu od 4 MeV do 10 MeV. Zbog svoje velike mase ima mali doomet od nekoliko cm u zraku. Alfa-zračenje ne predstavlja opasnost ukoliko se nalazi izvan organizma jer ju može zaustaviti list papira, no zbog jako velike energije predstavlja opasnost ako uđe u organizam. Beta-čestice imaju energije od nekoliko keV do nekoliko MeV. Učinak ionizacije kod beta-čestica je manji od učinka kojeg uzrokuju alfa-čestice, ali su im dometi mnogo veći (nekoliko metara). Zaustavlja ih aluminijski lim debljine nekoliko milimetara. Predstavlja opasnost za kožu i oči u slučaju vanjskog zračenja. Gama-zračenje ima manju sposobnost ionizacije od beta-zračenja i alfa-zračenja, ali veću dubinu prodiranja. Gama-zračenje

je jako prodorno zračenje koje ne može u cijelosti zaustaviti ni olovna ploča debljine nekoliko milimetara, kao što se vidi na slici 5. [12]



Slika 5. Prodornost različitih vrsta zračenja [12]

Neutronska zračenje je čestično zračenje roja brzih neutrona čije se energije protežu od 10 MeV pa niže. Posljedica je nuklearnih procesa, dio je kozmičkog zračenja i nastaje u lančanim reakcijama cijepanja jezgara u nuklearnim reaktorima. [13]



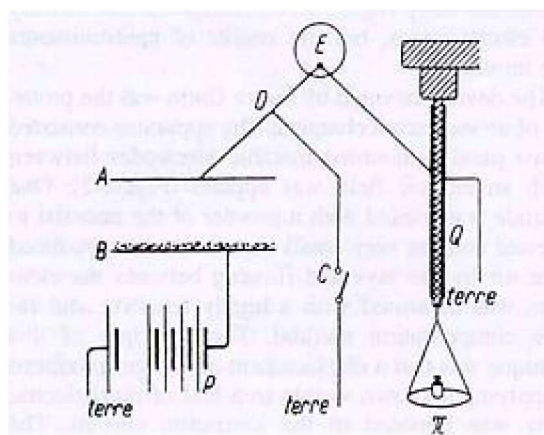
## 2. 4. Povijest uređaja za zapažanje i detekciju ionizirajućeg zračenja

Prvi uređaj korišten kao detektor ionizirajućeg zračenja je plinska ionizirajuća komora izumljena u 18. stoljeću te je poznata kao elektroskop sa zlatnim listićima koji je prikazan na slici 6. [14]



Slika 6. Elektroskop sa zlatnim listićima [14]

Pierre Curie je u razdoblju između 1895. i 1900. napravio piezoelektrični kvarcni elektrometar koji je Marie Curie koristila u svom istraživanju radioaktivnosti. Uređaj se sastojao od pločastog kondenzatora na čiju je donju elektrodu bio raspršen prah radioaktivne tvari zbog koje je zrak unutar ploča postao vodljiv. Piezoelektričnim uređajem dobio je električni napon mehaničkim naprezanjem na kvarcnom kristalu. Pomoću elektrometra mjerio je promjenu napona na pločama. Uređaj je neposredno mjerio malu struju proizvedenu u zraku pod utjecajem radioaktivnih tvari što se vidi na slici 7. [15] [16] [17]



Slika 7. Shema piezoelektričnog kvarcnog elektrometra [15]

Pri otkriću radioaktivnosti 1896. godine H. Becquerel je upotrijebio elektroskop za detekciju toka ionizirajućeg zračenja. 1897. godine Joseph John Thomson je predao izvješće o povećanju vodljivosti vazelinskog ulja izloženom zračenju rendgenskih zraka koje je istraživao pomoću uređaja koji se sastojao od ionizacijske cijevi. 1906. godine Joseph John Thomson je dobio Nobelovu nagradu iz fizike za istraživanje električne vodljivosti ioniziranog plina. Cilindričnu pulsnu ionizacijsku cijev razvili su 1908. godine E. Rutherford i H. Geiger za detekciju pojedinačnih čestica. Ubrzo nakon toga H. Geiger je razvio vlastiti detektor koji je doveo do otkrića alfa-čestice kao jezgre atoma helija i razvoja Rutherfordovog modela atoma. Između 1928. i 1929. godine Geiger i Mueller su konstruirali brojač nazvan Geiger – Muellerov brojač. Nakon toga su se razvili proporcionalni brojači. [18]

Prvi uređaj za vizualizaciju tragova čestica bila je maglena komora koju je izradio Charles Thomson Rees Wilson 1912. godine. Kasnije su konstruirani uređaji za vizualizaciju pojedinih tragova čestica plina pri atmosferskom tlaku. Plemeniti plinovi igrali su važnu ulogu u svim ranije navedenim otkrićima zbog svoje niske reaktivnosti i stabilnosti. Zbog karakteristike stalno rastućih energija interakcija čestica i razvoja osjetljivih elektroničkih pojačala, detektori s tekućim i čvrstim aktivnim medijem koristili su se u istraživanju elementarnih čestica. Razvoj uređaja za vizualizaciju tragova čestica došao je do vrhunca razvojem komore na mjehuriće za koju je Donald Arthur Glaser 1960. dobio Nobelovu nagradu iz fizike. [18]

Kasne 1940. godine uslijedio je razvoj plinskih detektora kada su Norman Davidson i Almon E. Larsh promatrali pojavu elektronske vodljivosti u tekućem argonu izazvanu apsorpcijom zračenja u tom mediju. 1949. godine Clyde Allen Hutchinson je istraživao visoko mobilne ionizirane elektrone koji su se gibali kroz tekući i čvrsti argon. Na početku 1950-ih tekućinske ionizacijske cijevi koristile su se za eksperimente nuklearne fizike. Tijekom 1970-ih i 1980-ih konstruirani su kalorimetri s tekućim plemenitim plinovima za detekciju visoko energetskog elektromagnetskog zračenja te su pri tome sudjelovali Institut za fiziku visokih energija, CERN i Institut za nuklearnu fiziku, Budker smješten u Novosibirskoj Oblasti u Rusiji. [18]

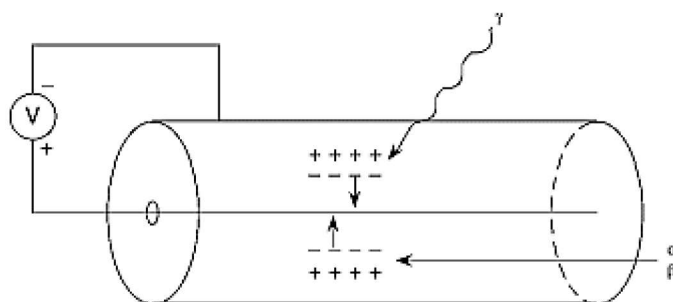
## 2. 5. Uređaji za zapažanje i detekciju ionizirajućeg zračenja

Ionizirajuće zračenje je pojava za koju ljudska osjetila nisu razvijena. Posljedice izloženosti ionizirajućem zračenju nisu odmah vidljive, već se mogu osjetiti nakon nekog vremena, točnije od nekoliko dana sve do nekoliko godina. Zbog toga su stvoreni uređaji za detekciju zračenja koji pohranjuju energije čestica koje detektiraju i pretvaraju ih u signal. Obradom podataka dobivenih iz uređaja može se doći do zaključka o vrsti zračenja i njenim svojstvima.

Uređaji za detekciju ionizirajućeg zračenja dijele se u tri skupine: vizualizatori tragova, dozimetri i brojači. Vizualizatori tragova kao rezultat međudjelovanja zračenja s tvari daju sliku tragova masenih čestica ili fotona u tvari. Dozimetri se koriste za detekciju energije koju je zračenje predalo tvari. Brojači registriraju i broje pojedine masene čestice i fotone. [19]

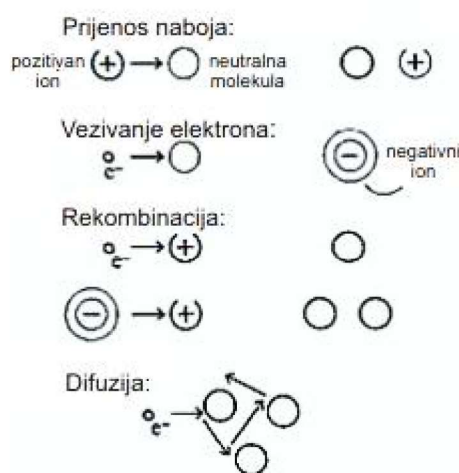
Postoji još i podjela detektora na dvije kategorije s obzirom na rezultate međudjelovanja zračenja s tvari. Prva kategorija predstavlja uređaje koji kao rezultat daju sliku traga nabijene čestice pomoću koje možemo odrediti naboj, brzinu i vrstu čestice, njezin raspad i raspršenje. U tu kategoriju spadaju komora na iskre, Wilsonova maglena komora, difuzijska komora, komora na mjehuriće te Čerenkovljev brojač. Druga kategorija predstavlja uređaje koji bilježe prisustvo zračenja, njegovu vrstu, a neki i energiju zračenja. U tu kategoriju spadaju plinski, scintilacijski i poluvodički detektori. [4]

Budući da je ionizacijska cijev tip plinskog detektora, ovaj rad kratko će se osvrnuti na njihov princip rada. Plinski detektori konstruirani su na principu uspostavljanja električnog polja između katode i anode. Općenito stijenke ionizacijske cijevi predstavljaju katodu, a žica koja prolazi središtem cijevi i koja je izolirana predstavlja anodu. Smjesa plinova unutar cijevi nalazi se pod tlakom od jedne atmosfere ili manje. Ulaskom zračenja u cijev dolazi do sudara električki nabijenih čestica i neutralnih molekula plina što rezultira razdvajanjem molekula na slobodne elektrone i pozitivne ione, odnosno ionske parove, koji se prikupljaju i pojačavaju radi snimanja signala. Shematski prikaz plinskog detektora prikazan je na slici 8. [20]



Slika 8. Shema plinskog detektora – ionizacijska cijev [20]

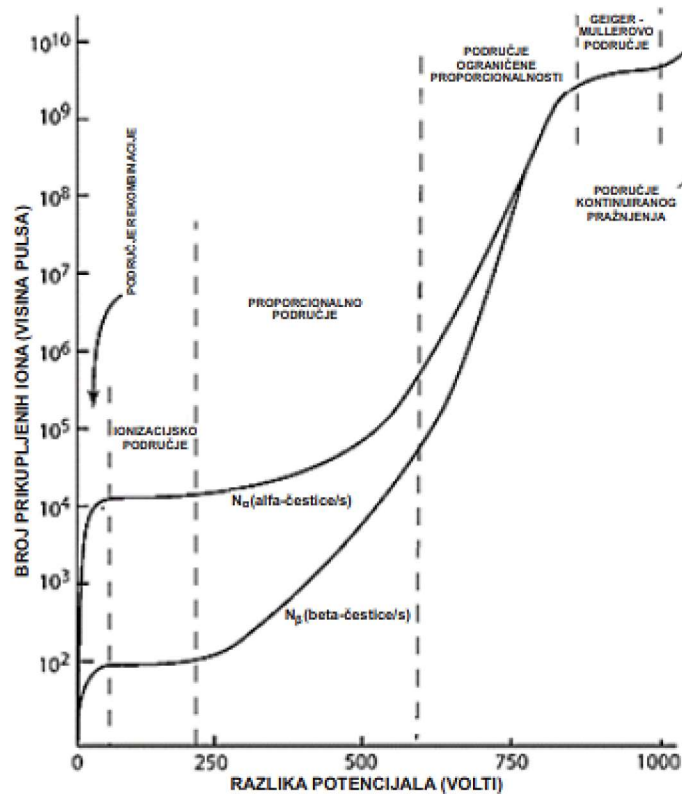
Unutar plinskih detektora dolazi do mnogih vrsta interakcija između slobodnih elektrona, iona i neutralnih molekula plina, a najvažniji su prikazani na slici 9.



Slika 9. Vrste interakcija između naboja u plinu koje mogu utjecati na ponašanje plinskih detektora [21]

Prijenos naboja se pojavljuje kada pozitivan ion naleti na drugu neutralnu molekulu plina. Pri takvom sudaru, elektron se prenosi iz neutralne molekule u ion. Slobodni elektron stvorenog ionskog para također podliježe mnogim sudarima unutar plina. U nekim plinovima postoji tendencija stvaranja negativnih iona vezanjem slobodnog elektrona na neutralnu molekulu plina. Pri izradi ionizacijske cijevi trebaju se koristiti plinovi kao što su dušik, vodik, ugljikovodični plinovi i plemeniti plinovi jer imaju vrlo niski koeficijent vezanja elektrona, što omogućuje da se slobodni elektroni nastave gibati u njima. Pri sudarima pozitivnih iona i slobodnih elektrona, pozitivni ioni hvataju elektrone te se tada vraćaju u neutralno stanje. Takav proces naziva se rekombinacija. Naboj izvornog para je neutraliziran i ne može doprinijeti signalu u detektoru temeljenom na sakupljanju ionizacijskog naboja. Pri izradi ionizacijske cijevi proces rekombinacije se sprječava podešavanjem primijenjene razlike potencijala koja treba biti takva da omogućuje prikupljanje nastalih iona, a sprječava rekombinaciju. [21]

Primijenjeni napon između anode i katode karakterizira rad detektora. Odsutnost napona dovodi do rekombinacije ionskih parova te u tom slučaju struja neće poteći vanjskim strujnim krugom. Povećanjem napona rekombinacija se reducira do granice kada postaje zanemariva i tada svi elektroni dopijevaju do središnje elektrode. Povećanjem napona za nekoliko desetina volta broj prikupljenih ionskih parova postaje neovisan o primijenjenom naponu. Krivulje su međusobno paralelne, odnosno prikupljena struja direktno je povezana s ionizacijom stvorenom upadnim zračenjem. Područje u kojem je mjerena struja direktno povezana s količinom ionizacije zove se ionizacijsko područje koje je prikazano na slici 10. Iznos ionizacije je vrlo različit za jednako jake izvore alfa, beta, gama ili x-zračenja zbog razlike u broju ionskih parova formiranih prilikom interakcije s tvari. Uređaj koji radi u tom području je ionizacijska cijev. Ovaj detektor detaljno će se obraditi u sljedećem odjeljku. [20]



Slika 10. Područja rada raznih vrsta detektora zračenja. [20]

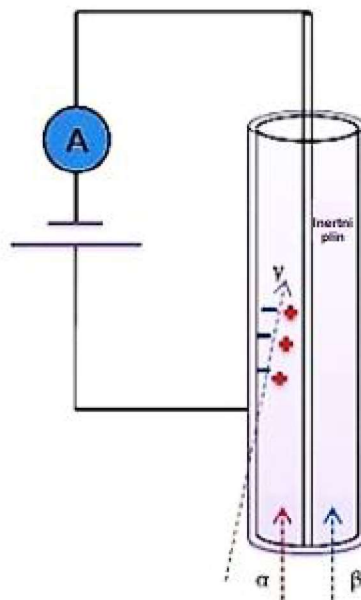
Povećanjem napona iznad ionizacijskog područja elektroni oslobođeni primarnom ionizacijom dobivaju dovoljno energije da izazovu sekundarnu ionizaciju pri sudaru sa molekulama plina te uzrokuju „lavinu“ elektrona. Tada je broj prikupljenih ionskih parova proporcionalan početnoj ionizaciji. Ovo područje zove se proporcionalno područje, a uređaj koji radi u tom području

proporcionalni brojač. Proporcionalni brojači broje čestice, ali ih također i razlikuju prema veličini pulsa. Manji puls pripada beta-česticama jer oni imaju manju sposobnost ionizacije od alfa-čestica. [20]

Povećanjem napona na nekoliko stotina volti sve više elektrona stvara "lavine" koje međusobno međudjeluju i stvaraju područje ograničene proporcionalnosti. Povećanjem napona iznad područja ograničene proporcionalnosti, prikupljeni naboj postaje neovisan o ionizaciji te krivulje postaju iste i tvore plato. To se područje naziva Geiger -Mullerovo područje, a uređaj koji radi u tom području Geiger-Muellerov brojač. Geiger-Muellerov brojač se koristi za detekciju beta i gama-zračenja. Zbog njegovog načina rada, ne može razlikovati energije niti vrstu čestice koja je detektirana. Ukoliko bi povećali napon iznad platoa, detektor bi stvarao područje kontinuiranog pražnjenja. [20]

## 2. 6. Ionizacijska cijev

Ionizacijska cijev najjednostavniji je tip plinskog detektora. Karakterizira ju potpuno prikupljanje oslobođenih elektrona uzrokovanih primarnom ionizacijom. Elektrode ionizacijske cijevi mogu biti cilindričnog oblika sa središnjom elektrodom ili u obliku paralelnih ploča. Općenito ionizacijske cijevi rade u integralnom modu, no mogu se pojaviti kao uređaji koji rade pulsnim načinom rada. Kada ionizacijska cijev radi u integralnom modu kao rezultat se dobiva struja ionizacije, a kada radi u pulsnom načinu rada svaki pojedini puls otkriva se prolaskom pojedine čestice zračenja. Primijenjeni napon treba biti takav da omogućuje prikupljanje nastalih iona i spriječi njihovu rekombinaciju. Inducirana struja proporcionalna je količini ionizacije, a pomoću prikupljenog naboja može se direktno mjeriti ionizirajuće zračenje. Shematski prikaz ionizacijske komore (ionizacijska cijev s elektroničkim elementima) prikazan je na slici 11. [20]

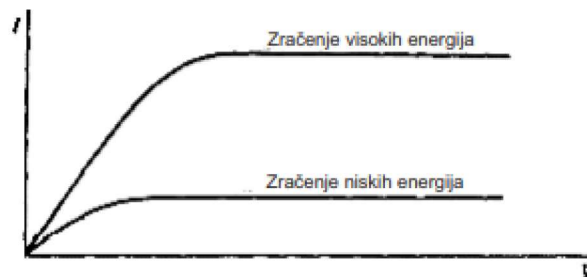


Slika 11. Shema ionizacijske komore [22]

Prolaskom ionizirajućeg zračenja kroz ionizacijsku cijev, nabijene čestice međudjeluju sa neutralnim molekulama plina što uzrokuje stvaranje ionskih parova. Ionski par sastoji se od slobodnog elektrona koji se oslobodi pri sudaru nabijene čestice i neutralne molekule plina te ostatka molekule koji je pozitivno nabijen (pozitivan ion). Primjenom vanjskog električnog polja između elektroda, elektrostatske sile teže tome da odmaknu naboje od njihovog mjesta nastanka tako da naboje privlače suprotno električki nabijene elektrode. Elektrone privlači pozitivna elektroda (anoda), a pozitivne ione privlači negativna elektroda (katoda). Ionski parovi stvoreni u plinu su u nasumičnom termalnom gibanju i raspršuju se dalje od područja ionizacije. Gibanje naboja sastoji se od superpozicije termalne brzine i driftne brzine u određenom smjeru. Driftna

brzina za pozitivne ione usmjerena je u smjeru električnog polja, dok su slobodni elektroni usmjereni u suprotnom smjeru. Budući da je pozitivni ion mnogo masivniji od elektrona, gibanje pozitivnih iona je ograničeno i može se zanemariti. Još jedan razlog zanemarivanja pozitivnih iona je da elektroni zbog svoje male mase postižu veće ubrzanje pri susretu s neutralnim molekulama plina te brže dolaze do sabirne elektrode. Električna struja se stvara gibanjem elektrona prema anodi. [21]

Za bilo koji mali volumen plina, brzina formiranja ionskih parova bit će uravnotežena s brzinom kojom ionski parovi izlaze iz plina rekombinacijom, difuzijom ili migracijom iz volumena. Pri dovoljno visokom primijenjenom naponu, električno polje je dovoljno veliko da učinkovito potisne rekombinaciju na zanemarivu razinu, i svi naboji nastali primarnom ionizacijom doprinose ionizacijskoj struji. Daljnji rast napona ne može povećati struju jer su svi naboji već prikupljeni i njihova brzina stvaranja je konstantna, kao što se vidi na slici 12. Ovo je područje ionske zasićenosti (saturacije) u kojem ionizacijske cijevi uobičajeno rade. Pod tim uvjetima, struja izmjerena u vanjskom krugu je pravi pokazatelj brzine stvaranja svih naboja uslijed ionizacije unutar aktivnog volumena cijevi. Mjerenje te ionizacijske struje osnovno je načelo rada ionizacijske cijevi. [21]



Slika 12. Strujno-naponska karakteristika ionizacijske cijevi [21]

Ionizacijska struja mjeri se brojem elektrona koji prolaze danom točkom električnim krugom u jedinici vremena. U većini slučajeva, iznosi ionizacijske struje su u rasponu od  $10^{-6}$  A do  $10^{-14}$  A. Ovako mala struja predstavlja ograničenje ionizacijske cijevi pri mjerenju niske razine zračenja, tj. blizu pozadinskog zračenja, zbog toga što pozadinsko zračenje može zasjeniti zračenje koje se promatra. [23]

Srednja energija ionskog para ( $W$ ) definirana je kao prosječna energija utrošena na stvaranje jednog ionskog para elektron – pozitivni ion. Prosječna energija potrebna za stvaranje ionskog para u suhom zraku je  $33,97 \text{ JC}^{-1}$ . [24]



Tablica 1. Vrijednosti disipacije energije po ionskom paru ( $W$  - vrijednost) za različite plinove. [21]

Plin	Prvi ionizacijski potencijal (eV)	$W$ – vrijednost (eV / ionski par)	
		Brzi elektroni	Alfa čestice
Ar	15,7	26,4	26,3
He	24,5	41,3	42,7
H <sub>2</sub>	15,6	36,5	36,4
N <sub>2</sub>	15,5	34,8	36,4
Zrak		33,8	35,1
O <sub>2</sub>	12,5	30,8	35,2
CH <sub>4</sub>	14,5	27,3	29,1

U tablici 1. prikazane su vrijednosti disipacije energije po ionskom paru iz izvješća broj 31, Međunarodnog povjerenstva za jedinice radijacije i mjerenja, pod nazivom „Prosječna energija potrebna za stvaranje ionskog para.“ izdanom u Washingtonu 1979. godine. Kako bi proces ionizacije bio moguć, čestica mora prenijeti najmanje količinu energije jednaku energiji ionizacije molekule plina. Budući da upadna čestica ne gubi energiju samo u ionizirajućim sudarima s molekulama plina,  $W$  vrijednost je uvijek veća od energije ionizacije plina. Primjeri takvih interakcija su pobuđenja elektrona na viša vezana stanja u molekuli bez njihovog potpunog uklanjanja.  $W$  vrijednost ovisi o vrsti i energiji upadne čestice i tvari u kojoj se odvija proces ionizacije. Pod pretpostavkom da je  $W$  vrijednost konstantna za određenu vrstu zračenja, može se odrediti energija zračenja ako se provede odgovarajuće mjerenje broja ionskih parova. [21]

Ionizacijska cijev je konstruirana od električki vodljive cijevi, koja se koristi kao katoda, i žice koja prolazi kroz središte cijevi koja se koristi kao anoda. Materijal koji se koristi za konstrukciju cijevi mora biti krut, izdržljiv, električki vodljiv, nepropustan i slobodan od kemijskih reakcija plina. Budući da cijev služi kao elektroda, mora biti električki vodljiva barem na unutarnjoj površini. Središnja elektroda je površinom mnogo manja od cijevi te njen utjecaj nije toliko značajan. [25][26]

Unutar metalne cijevi nalazi se plin pod tlakom od 1 atmosfere. U praktičnoj primjeni, najčešće korišteni plin je zrak jer je jeftin i dostupan svima. Plin koji se nalazi unutar cijevi mora biti stabilan u prisutnosti zračenja.

Ionizacijska struja ovisi o masi i vrsti plina u cijevi. Prema tome, temperatura i tlak se moraju mjeriti odgovarajućim instrumentima u istoj prostoriji u kojoj se nalazi ionizacijska cijev te u kojoj ćemo obaviti mjerenje ionizacijske struje. Promjene atmosferskog tlaka i promjene temperature

utječu na gustoću plina, a samim time i na učinkovitost ionizacijske cijevi. Kako bi se postigla potrebna kvaliteta suhog zraka koristi se eksikator<sup>1</sup>. Kako bi se poboljšala efikasnost mjerenja, koriste se plemeniti plinovi budući da visoko elektronegativni kisik u zraku lako hvata slobodne elektrone i formira negativne ione. [27]

Ovisno o debljini stijenki cijevi određuje se koje će se vrste čestica propuštati. Tu ulogu ima „prozor“ koji se nalazi na jednoj strani cijevi. Pomoću „prozora“ manipulira se koje će se čestice spriječiti, a koje propustiti. Gama-čestice imaju jako veliku prodornost pa nemaju problema u probijanju metalnih stijenki cijevi. Nasuprot tome, beta-čestice i alfa-čestice zaustavlja metalna stijenka pa je tu potrebno koristiti „prozor“ koji treba biti vrlo tanak. Alfa-čestice imaju jako malu prodornost te se pri njihovom proučavanju može koristiti prozor od jednog sloja aluminijske folije debljine nekoliko desetaka mikrometara. [28]

Kao izvor električne energije koristi se baterija. Ona omogućava stvaranje električnog polja unutar ionizacijske cijevi. Kao mjerni uređaj koristi se multimetar, na kojemu je podešeno mjerno područje za mjerenje struje, kao što smo ranije napomenuli ionizacijske struje su jako male pa uređaj treba biti jako osjetljiv. Volumen cijevi određuje veličinu signala. Ionizacijske cijevi s većim aktivnim volumenom pokazuju veću osjetljivost od onih s manjim. Poželjno je da se prikupe naboji iz volumena cijevi, a ne i nasumično ionizacijsko zračenje izvan cijevi. Kako bi se unaprijed spriječile nepravilnosti u mjerenju ionizacijske struje, odnosno kako pozadinsko zračenje ne bi zasjenilo male struje ionizacije, svi dijelovi električnog kruga trebaju biti dobro izolirani i elektrostatički zaštićeni. Do curenja struje može doći kod konstrukcije same cijevi, mjernog uređaja ili vodiča. Neadekvatna elektrostatska zaštita očita je kroz osjetljivost sustava na kretanje obližnjih objekata, kao što je mahanje rukom oko ionizacijske cijevi. [26]

Izolator se koristi kako bi odvojio središnju elektrodu od stijenki cijevi i time spriječio istjecanje struje van ionizacijske cijevi. Polistiren, polietilen i teflon izvrsni su električni izolatori za upotrebu u ionizacijskim cijevima. Teflon se najmanje oštećuje jer je njegova površina najtolerantnija na vlagu u zraku te najbolje štiti ionizacijsku cijev od pozadinskog zračenja. [26]

Kao što je i ranije rečeno, prisutnost prljavštine i vlage dovodi do curenja struje, odnosno nepravilnosti u mjerenju. Vodiči ne smiju biti savijeni, nagaženi ili uvrnuti jer može doći do električnog šuma, odnosno neravnomjernog protjecanja naboja te do curenja struje što rezultira pogreškama u mjerenju. Zračenje također može oštetiti izolatore prekidom kemijske veze,

---

<sup>1</sup> Posuda za čuvanje predmeta i uzoraka osjetljivih na vlagu. [29]

uzrokujući promjenu boje materijala i na kraju gubitak mehaničkog integriteta pri visokim dozama. Pri visokim dozama zračenja značajno se smanjuje otpornost izolatora, stoga se ionizacijska cijev ne smije izlagati visokim dozama prije nego što će se mjeriti male. [27]

Ionizacijska cijev je većinom spojena na izvor napona i mjerni uređaj koji mjeri struju direktno povezanu s količinom zračenja. Pri samom mjerenju potrebno je mjerni instrument postaviti što bliže ionizacijskoj cijevi, odnosno upotrijebiti što kraće vodiče, kako ne bi došlo do pretjeranog pada napona zbog samog otpora žice budući da se radi o jako malim redovima veličine ionizacijske struje. Danas se za mjerenje ionizacijske struje najčešće koriste multimetri sa pripadajućim pojačalima.

Ionizacijska cijev najkorišteniji je tip dozimetra<sup>2</sup> za mjerenja u radioterapiji. Tri su osnovna oblika ionizacijske cijevi: sferni oblik, cilindrični oblik i napršnjak. Postoji mnogo vrsta ionizacijskih cijevi koje razlikujemo prema vrsti zračenja, energiji, stabilnosti i pouzdanosti, jednostavnosti korištenja i drugom. Pri odabiru materijala, dimenzija i oblika cijevi potrebno je paziti na vrstu zračenja koja se koristi, na njen intenzitet i brzinu promjene u prostoru i vremenu. Gledajući samo na plinske detektore postoje otvorene ionizacijske cijevi, ionizacijske cijevi za visoke energije, ionizacijske cijevi za niske energije, ionizacijske cijevi pod pritiskom i ostale. Zatvorene ionizacijske cijevi mogu mjeriti zračenja iz raznih smjerova, a ionizacijske cijevi s otvorenim krajem (prozorom) zahtijevaju gotovo usmjerene zrake poravnate da prolaze okomito kroz cijev. Kod otvorene ionizacijske cijevi, mjerena struja ovisi o gustoći zraka i sadržaju vodene pare. Ionizacijske cijevi mogu služiti i za detekciju visokih energija budući da je raspon sekundarnih elektrona u materijalu cijevi  $10^3$  puta veći od onoga u atmosferskom zraku. Kod ionizacijskih cijevi za detekciju visokih energija koristi se plin od 8 -10 atm. Što je veći tlak u većoj gustoći plina, to je veća mogućnost stvaranja ionskih parova. Mjerena struja također ovisi o udaljenosti izvora zračenja. Spiers<sup>3</sup> je proučavao ionizaciju u cilindričnoj i sfernoj ionizacijskoj cijevi postavljenu u blizini izvora zračenja. Ionizacija u cijevi bila je nešto viša od one koja bi odgovarala visini doze na geometrijskom centru cijevi. Kada je izvor bio udaljen za duljinu promjera cijevi od centra cijevi, neusklađenost nije bila veća od 11%. Kao rezultat je dobiveno da promatrana ionizacija opada kako se povećava udaljenost ionizacijske cijevi od izvora zračenja. [27]

---

<sup>2</sup> Uređaj za mjerenje količine ionizirajućeg zračenja. [30]

<sup>3</sup> Frederick William Spiers CBE, DSc, PhD, jednom predsjednik Britanskog instituta za Radiologiju, proučavao je korelaciju mjerene ionizacijske struje u odnosu na udaljenost između geometrijskog središta cijevi i izvora zračenja visoke energije. [31]

Kalibracija ionizacijske cijevi sastoji se od dva dijela. U prvom dijelu provjerava se je li uređaj mehanički ispravan, pokazuje li mjerni instrument samo pozadinsko zračenje kada nema radioaktivnog izvora zračenja, ima li na prozoru oštećenja, jesu li ispravni svi elementi strujnog kruga. Provjerava se preciznost uređaja tako da se detektor izlaže uzastopno istoj snazi izvora. U drugom dijelu, ionizacijska cijev se izlaže poznatom zračenju. Budući da su ionizacijske cijevi osjetljive na atmosferski tlak i temperaturu, bitno je da bude kalibrirana pod uvjetima približno jednakim uvjetima pod kojima će se koristiti. [25]

### 3. Praktični dio -Izrada ionizacijske cijevi

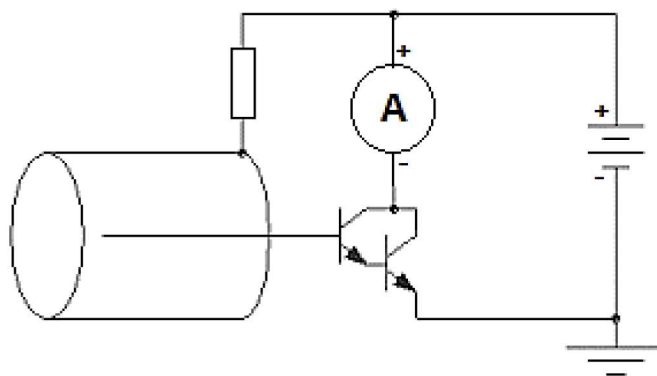
Ionizacijska cijev je iznimno pristupačan uređaj za detekciju zračenja jer se može izraditi uz minimalan napor i ulaganja. Pri izradi ionizacijske cijevi iskorišteni su materijali koji se koriste u svakodnevnom životu i elektronički elementi koji su vrlo povoljno kupljeni. Mjerni uređaj, baterija i još neki dijelovi nabavljeni su na Odjelu za fiziku.

Popis korištenog pribora:

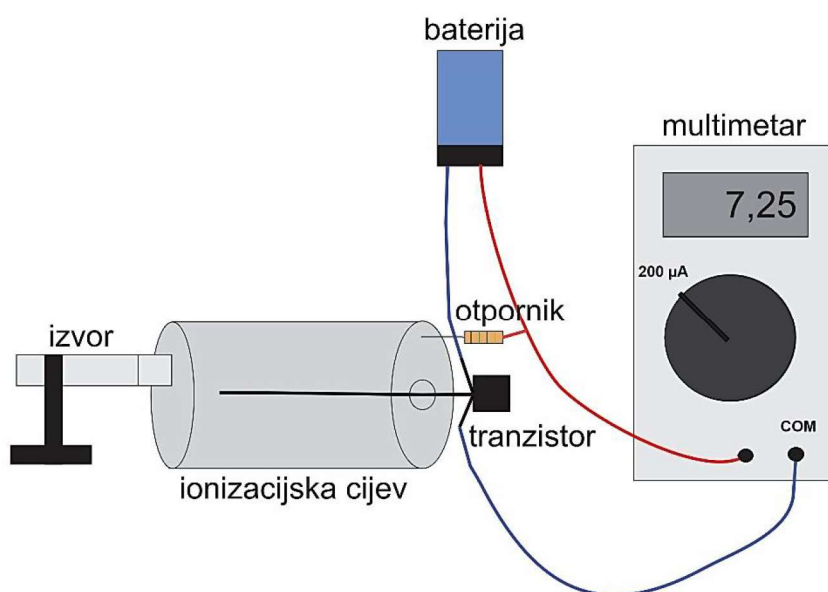
- Metalna limenka
- Žica
- Baterija 9 V
- Priključak za bateriju
- Otpornik od 4,7 k $\Omega$
- NPN Darlington tranzistor BC517
- Multimetar
- Vodiči
- Kabelske stopice

Alati i materijali:

- Točkalo
- Čekić
- Bušilica
- Svrđlo promjera 6,5 mm
- Brusni papir
- Lemilica
- Žica za lemljenje
- Mast za lemljenje
- Obostrano ljepljiva traka
- Pištolj za vruće lijepljenje



Slika 13. Shema ionizacijske komore (ionizacijska cijev s elektronikom) [32]



Slika 14. Postav ionizacijske komore (ionizacijska cijev s elektronikom)

Postupak izrade:

1) Priprema metalne cijevi i žice

Pri izradi ionizacijske cijevi upotrijebljena je metalna limenka za kompot. Limenka mora biti vodljiva. Prazna limenka ima dužinu od 10,90 cm i promjer od 8,30 cm. Volumen limenke je 589 cm<sup>3</sup>. Metalna limenka otvorena je na jednom kraju pomoću otvarača za limenke. Na taj način određen je smjer zračenja. Na drugom kraju cijevi napravljen je provrt promjera 6,5 cm u središtu cijevi kroz koji je postavljena žica. Središte je određeno geometrijskom metodom te je označeno pomoću točkala. Limenke u kojima se konzervira hrana imaju tanki premaz s unutrašnje strane koji nije električni vodljiv pa ometa prikupljanje naboja iz zraka, što otežava rad detektora.

Unutrašnji premaz limenke otklonjen je pomoću brusnog papira čime je poboljšana vodljivost limenke. Središnja žica je izolirana od metalne limenke, odnosno ne dodiruje ju, te je također vodljiva. Duljina žice je manja od duljine cijevi za otprilike 2 cm.

## 2) Spajanje tranzistora

Tranzistor je elektronički element koji je u ovom strujnom krugu poslužio kao pojačivač signala i kao sklopka. Budući da je upotrijebljen bipolarni NPN tranzistor većinski nositelji naboja su elektroni. Korišten je NPN Darlington tranzistor koji je zapravo spoj od dva bipolarna tranzistora s emiterom jednog spojenim na bazu drugog pri čemu je struja pojačana prvim tranzistorom dodatno pojačana drugim. Prije spajanja tranzistora identificirane su nožice tranzistora, a koje su opisane u tehničkoj dokumentaciji danog tranzistora. Raspored nožica tranzistora, kada je ravna strana okrenuta prema naprijed, i nožice prema dolje su: kolektor, baza i emiter. Nožica baze tranzistora savijena je pod pravim kutom. Pomoću lemilice središnja žica ionizacijske cijevi spojena je na bazu tranzistora. Emiter tranzistora spojen je na negativni pol baterije. Kolektor tranzistora spojen je na negativan priključak mjernog uređaja. Tranzistor je učvršćen za cijev pomoću dvostrane ljepljive trake i pištolja za vruće lijepljenje. Nožice tranzistora ne smiju dirati limenku jer bi to izazvalo neželjenu električnu vodljivost. Proces lemljenja ne smije trajati predugo jer su tranzistori osjetljivi na toplinu. Žice su spojene kabelskim stopicama radi praktičnijeg korištenja, odnosno mogućnosti skidanja baterije i multimetra po potrebi.

## 3) Spajanje otpornika

Otpornik od 4,7 k $\Omega$  spojen je lemljenjem sa vanjskom površinom cijevi i baterijom na pozitivan pol mjernog uređaja. Otpornik može biti bilo koje vrijednosti iznad 1 k $\Omega$ . Ovaj otpornik može biti i izostavljen, ali korišten je jer ograničava struju u slučaju kratkog spoja gdje može doći do uništenja tranzistora.

## 4) Spajanje baterije

Baterija je iskorištena za napajanje. Pomoću baterije stvoreno je električno polje između unutrašnjosti cijevi i središnje žice. Baterija je spojena na priključak za baterije s kablom. Pozitivan pol baterije spojen je preko tranzistora na vanjsku površinu ionizacijske cijevi preko otpornika, a negativan pol baterije spojen je s emiterom.

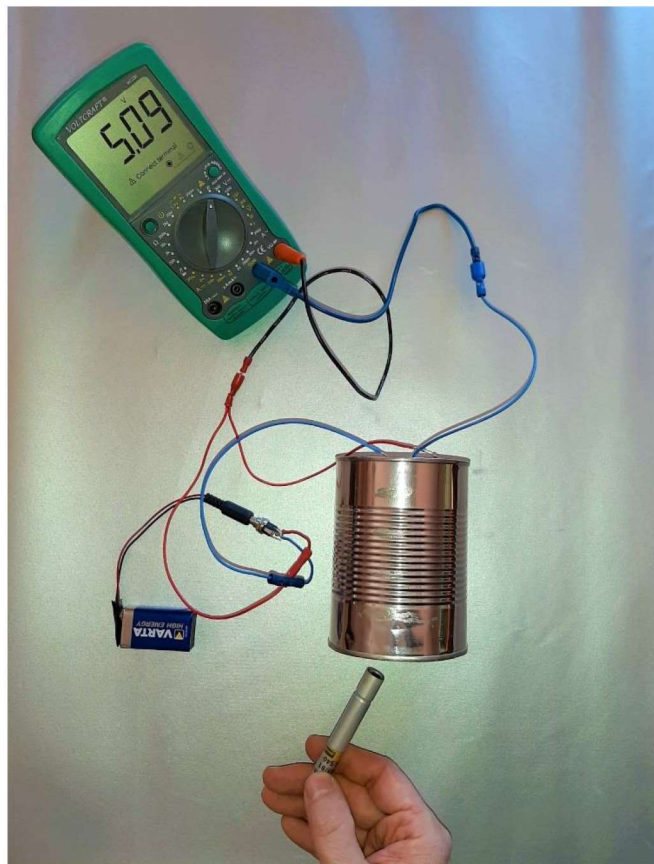
## 5) Spajanje mjernog uređaja

Kao mjerni uređaj koristi se multimeter s mjernim područjem postavljenim za mjerenje struje ili napona. Negativan priključak multimetra spojen je na kolektor, a pozitivan priključak spojen je između otpornika i pozitivnog pola baterije.

Otklanjanje grešaka:

Ukoliko mjerni uređaj ne prikazuje nikakav signal, odnosno na zaslonu je prikazana nula, potrebno je napraviti određene korake. Prvo se provjerava izvor napajanja, a nakon toga se provjerava dodiruje li neki spoj limenku. Isto tako se provjerava jesu li zalemljeni spojevi na mjestu te se provjerava shema strujnog kruga.

Na slici 15. prikazana je izrađena ionizacijska komora, odnosno izrađena ionizacijska cijev s elektroničkim elementima.



Slika 15. Eksperiment sa izrađenom ionizacijskom komorom.



### 3.1. Izrada ionizacijske komore (mala ionizacijska cijev i elektronički elementi)

U svrhu daljnjeg istraživanja, napravljena je još jedna ionizacijska komora. Sve komponente ionizacijske komore ostale su iste osim ionizacijske cijevi. U ovom slučaju ionizacijska cijev ima skoro 8 puta manji promjer, a volumen oko 173 puta manji od prve verzije ionizacijske cijevi. Kao ionizacijska cijev iskorištena je pokidana G-M cijev promjera 1,08 cm i dužine 3,70 cm. Volumen male komore iznosi  $3,39 \text{ cm}^3$ . Razlog korištenja različitih ionizacijskih cijevi je istraživanje ovisnosti detekcije ionizirajućeg zračenja o dimenzijama same ionizacijske cijevi. Budući da su potreban pribor, postupak izrade i skica jednaki kao i za prvu ionizacijsku komoru, detaljan opis izrade je suvišan. Na slici 16. prikazan je eksperiment s malom ionizacijskom cijevi.



Slika 16. Eksperiment s malom ionizacijskom cijevi.

## 4. Eksperimentalni dio – Rezultati eksperimenta

Ovako napravljena ionizacijska cijev spojena prema ranije navedenoj shemi dobar je demonstracijski pokus pri obradi nastavne jedinice Detekcija ionizirajućeg zračenja. Uređaj funkcionira kada se multimeter postavi za mjerenje struje ili napona. Uređaj pokazuje promjene u signalu koje su jako malih iznosa. Multimeter postavljen za mjerenje struje ne prikazuje pozadinsko zračenje ni na području od 200  $\mu\text{A}$ . Kada je radioaktivni izvor postavljen u blizini ionizacijske cijevi postoje male promjene u signalu.

Tablica 2. Vrijednosti jakosti struje za radioaktivni izvor  $^{241}\text{Am}$  u ovisnosti o aktivnosti radioaktivnog izvora i udaljenosti izvora zračenja od detektora (velika ionizacijska cijev).

$A$ (kBq)	$I$ ( $\mu\text{A}$ )	
	$d = 0,5$ cm	$d = 2,0$ cm
359	1,70	0,03
72	0,60	0,03
3,59	0,10	0,01

U gore navedenoj tablici slovom  $A$  označena je aktivnost radioaktivnog izvora, slovom  $I$  jakost struje, a slovom  $d$  udaljenost izvora zračenja od detektora. Aktivnost radioaktivnih izvora dobivena je pomoću formula  $A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$  i  $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$ , gdje je slovom  $A_0$  označena početna aktivnost radioaktivnog izvora, slovom  $\lambda$  konstanta radioaktivnog raspada, slovom  $T$  njegovo vrijeme poluraspada i slovom  $t$  proteklo vrijeme od dana proizvodnje. Vrijeme poluraspada  $^{241}\text{Am}$  iznosi 433 godine. Datum proizvodnje  $^{241}\text{Am}$  početne aktivnosti 370 kBq je 26. 6. 2004.,  $^{241}\text{Am}$  početne aktivnosti 74 kBq je 6. 10. 2004., a  $^{241}\text{Am}$  početne aktivnosti 3,7 kBq je 9. 10. 2004. Iz navedenih podataka i formula dobivene su trenutne aktivnosti radioaktivnih izvora.

Iz navedene tablice zaključeno je da, iako su vrijednosti struje jako male, postoji poklapanje s teorijom koja kaže da se povećanjem aktivnosti radioaktivnog izvora povećava njegova sposobnost ionizacije te da promatrana ionizacija opada kako se povećava udaljenost izvora zračenja od ionizacijske cijevi.

Tablica 3. Vrijednosti izlaznog napona za različite radioaktivne izvore koji su postavljeni na udaljenosti 1,0 cm od detektora zračenja (velika ionizacijska cijev).

Radioaktivni izvor	$A$ (kBq)	$U_I$ (V)
$^{241}\text{Am}$	359	8,62
	72	5,76
	3,59	2,23
$^{226}\text{Ra}$	3	3,62

U gore navedenoj tablici slovom  $A$  je označena aktivnost radioaktivnog izvora, a slovom  $U_I$  izlazni napon tj. napon koji očitavamo na multimetru prema slici 14. Vrijednost ulaznog napona (tj. baterije) iznosio je 9,13 V. Mjerni uređaj postavljen za mjerenje napona prikazuje osjetljivost i na pozadinsko zračenje. Vrijednost napona za pozadinsko zračenje je 1,60 V. Trenutna aktivnost radioaktivnog izvora  $^{226}\text{Ra}$  dobivena je istim postupkom koji je naveden uz tablicu 2. Podaci pomoću kojih je dobivena trenutna aktivnost  $^{226}\text{Ra}$  su početna aktivnost od 3 kBq, vrijeme poluraspada od 1599 godina i datum proizvodnje 20. 12. 2004. Način rada izrađene ionizacijske komore je drukčiji od teorijskog opisa ionizacijske komore jer se u spoju nalazi tranzistor koji ima ulogu pojačivača signala i sklopke. Baterija omogućava stvaranje električnog polja unutar ionizacijske cijevi. Budući da je emiter spojen na negativni pol baterije postoji stalna opskrba elektronima sve dok baterija radi. Ovisno o ulaznoj struji baze, tranzistor se prebacuje iz područja zapiranja u područje zasićenja i obratno. U području zapiranja radi kao isključena sklopka uz zanemarive struje, a u području zasićenja kao uključena sklopka uz mali pad napona između kolektora i emitera. Kada se ispred detektora postavi neki radioaktivni izvor, radioaktivne čestice međudjeluju s plinom unutar cijevi te dolazi do procesa ionizacije. Središnja žica, povezana s bazom tranzistora, je pozitivna i privlači slobodne elektrone nastale u procesu ionizacije. Slobodni elektroni dolaskom na bazu tranzistora međudjeluju s pozitivnim ionima te nastaju šupljine koje omogućuju kretanje elektrona iz baterije od emitera do kolektora. Na mjernom uređaju prikazana je mala vrijednost pada napona što upućuje na postojanje procesa ionizacije, odnosno da je postavljeni izvor radioaktivan.

Kako bi dokazali ranije navedenu tvrdnju, primijenjen je statistički test koji uspoređuje razlike između parova podataka (vrijednosti pada napona kada je radioaktivni izvor prisutan i kada nije prisutan, odnosno detektor je izložen samo pozadinskom zračenju) kako bi utvrdio je li razlika statistički značajna. Za ovaj test postavljene su dvije hipoteze. Nulta hipoteza govori da nema statistički značajne razlike u padu napona kada je detektor izložen radioaktivnom izvoru i kada

radioaktivni izvor nije prisutan. Alternativna hipoteza govori da postoji statistički značajna razlika u padu napona kada je detektor izložen radioaktivnom izvoru i kada radioaktivni izvor nije prisutan. Vrijednosti bitne za zaključivanje o navedenim hipotezama su t-vrijednost i jednostrana p-vrijednost. t-vrijednost opisuje koliko se srednje vrijednosti dviju grupa razlikuju. Viša t-vrijednost ukazuje na veću razliku između grupa. Kako bi zaključili postoji li značajna razlika između grupa potrebno je u tablici kvantila Studentove t-razdiobe pomoću odabrane razine značajnosti (0,05) i dobivenog broja stupnja slobode (3) pronaći kritičnu t-vrijednost (2,3534). Budući da je dobivena t-vrijednost veća od tablične t-vrijednosti zaključeno je da postoji statistički značajna razlika između grupa. Također, dobivena p-vrijednost je manja od unaprijed postavljenog praga statističke značajnosti (0,05) što dokazuje da razlika između dvije grupe nije slučajna. U ovom slučaju, odbacuje se nulta hipoteza, a prihvaća alternativna koja je pokazatelj da je izvor zaista radioaktivan. Iz provedenog t-testa vidljivo je da postoji statistički značajna veza između izmjerenog pada napona i jačine ionizacije. [33]

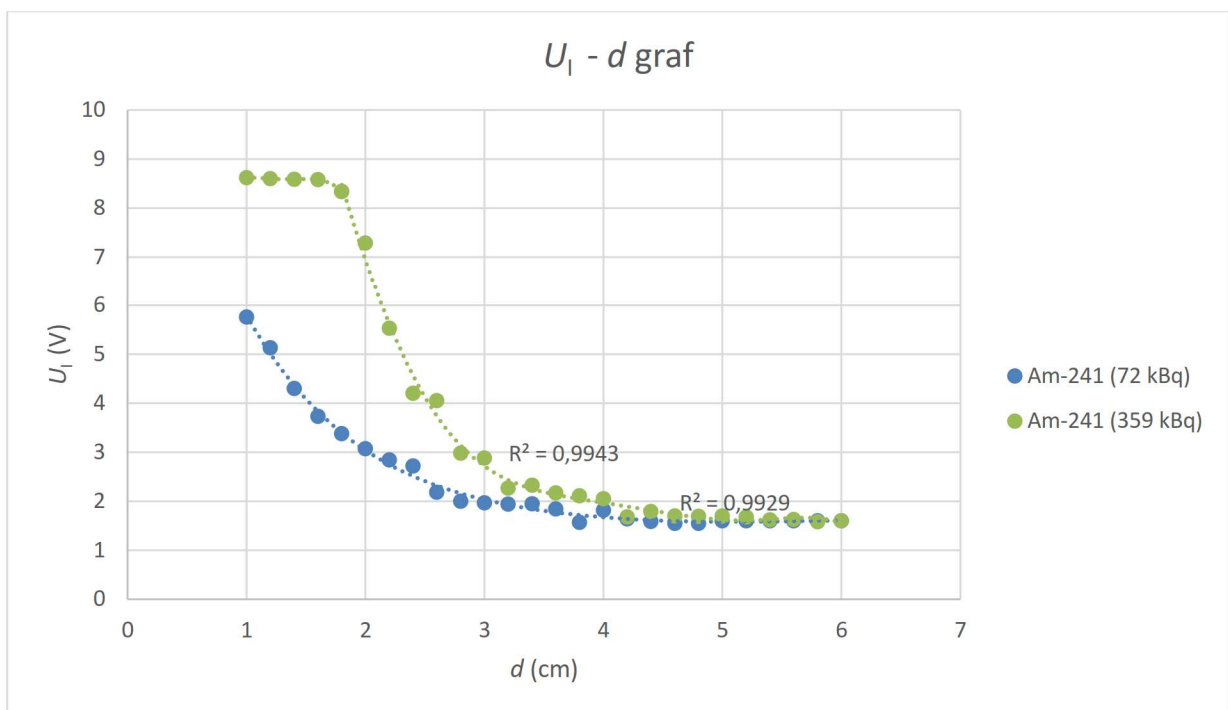
Tablica 4. Rezultati statističkog testa između dvije varijable (vrijednosti pada napona kada je detektor izložen radioaktivnom izvoru i kada nije izložen radioaktivnom izvoru) na razini 5% značajnosti. [34]

	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Standardna pogreška srednje vrijednosti	Interval pouzdanosti razlike od 95%		t-vrijednost	df	Značajnost	
				Donji	Gornji			Jednosmjerna p-vrijednost	Dvosmjerna p-vrijednost
radioaktivni izvor – pozadinsko zračenje	3,45750	2,78365	1,39182	-0,97190	7,88690	2,484	3	0,044	0,089

Tablica 5. Vrijednosti izlaznog napona za radioaktivni izvor  $^{241}\text{Am}$  različitih aktivnosti u ovisnosti o udaljenosti izvora zračenja od detektora (velika ionizacijska cijev).

$d$ (cm)	$^{241}\text{Am}$ (359 kBq)	$^{241}\text{Am}$ (72 kBq)
	$U_I$ (V)	
1,0	8,62	5,76
1,2	8,60	5,13
1,4	8,59	4,30
1,6	8,58	3,73
1,8	8,34	3,38
2,0	7,29	3,07
2,2	5,53	2,84
2,4	4,20	2,72
2,6	4,05	2,18
2,8	2,98	2,00
3,0	2,88	1,97
3,2	2,27	1,94
3,4	2,33	1,95
3,6	2,17	1,84
3,8	2,11	1,57
4,0	2,05	1,82
4,2	1,68	1,64
4,4	1,79	1,59
4,6	1,70	1,55
4,8	1,69	1,55
5,0	1,70	1,60
5,2	1,68	1,60
5,4	1,62	1,60
5,6	1,63	1,60
5,8	1,58	1,60
6,0	1,60	1,60

U gore navedenoj tablici slovom  $d$  označena je udaljenost izvora zračenja od detektora, a slovom  $U_I$  izlazni napon. Ulazni napon (napon baterije) iznosi 9,13 V. Mjerni uređaj postavljen za mjerenje napona prikazuje osjetljivost i na pozadinsko zračenje. Vrijednost napona za pozadinsko zračenje je 1,60 V. Zaključeno je da, i pri mjerenju vrijednosti pada napona, postoji poklapanje s teorijom koja kaže da promatrana ionizacija opada kako se povećava udaljenost izvora zračenja od ionizacijske cijevi. Budući da je  $^{241}\text{Am}$  primarno alfa-emiter, rezultati eksperimenta slažu se s teorijom da alfa-čestice zbog svoje velike mase imaju mali doseg u zraku te zbog toga manji broj čestica dopijeva do ionizacijske cijevi, međudjeluje sa zrakom u cijevi i uzrokuje ionizaciju.



Slika 17. Grafički prikaz ovisnosti radioaktivnog izvora  $^{241}\text{Am}$  različitih aktivnosti o udaljenosti izvora zračenja od detektora (velika ionizacijska cijev).

Iz grafičkog prikaza na slici 17 jasno se vidi da povećanje aktivnosti radioaktivnog izvora povećava njegovu sposobnost ionizacije. Vidljivo je da od udaljenosti 2,0 cm vrijednosti napona prilikom izlaganja  $^{241}\text{Am}$  aktivnosti 359 kBq detektoru zračenja naglo padaju i postaju približno jednake pozadinskoj vrijednosti napona, dok je za  $^{241}\text{Am}$  aktivnosti 72 kBq ta promjena vidljiva i na udaljenosti od 1,0 cm. Iz grafičkog prikaza vidimo da na udaljenosti od 4,0 cm pa na dalje signal dobiven na mjernom uređaju je rezultat pozadinskog zračenja. Razlog tome je sam radioaktivni izvor koji je primarno alfa-emiter.

U nastavku su prikazani grafički prikazi i podaci dobiveni provedbom eksperimenata pomoću detektora zračenja koji sadrži ionizacijsku cijev malih dimenzija.

Tablica 6. Vrijednosti izlaznog napona za različite radioaktivne izvore koji su postavljeni na udaljenosti 1,0 cm od detektora zračenja (mala ionizacijska cijev).

Radioaktivni izvor	$A$ (kBq)	$U_I$ (V)
$^{241}\text{Am}$	359	7,95
	72	1,50
	3,59	0,35
$^{226}\text{Ra}$	3	0,55

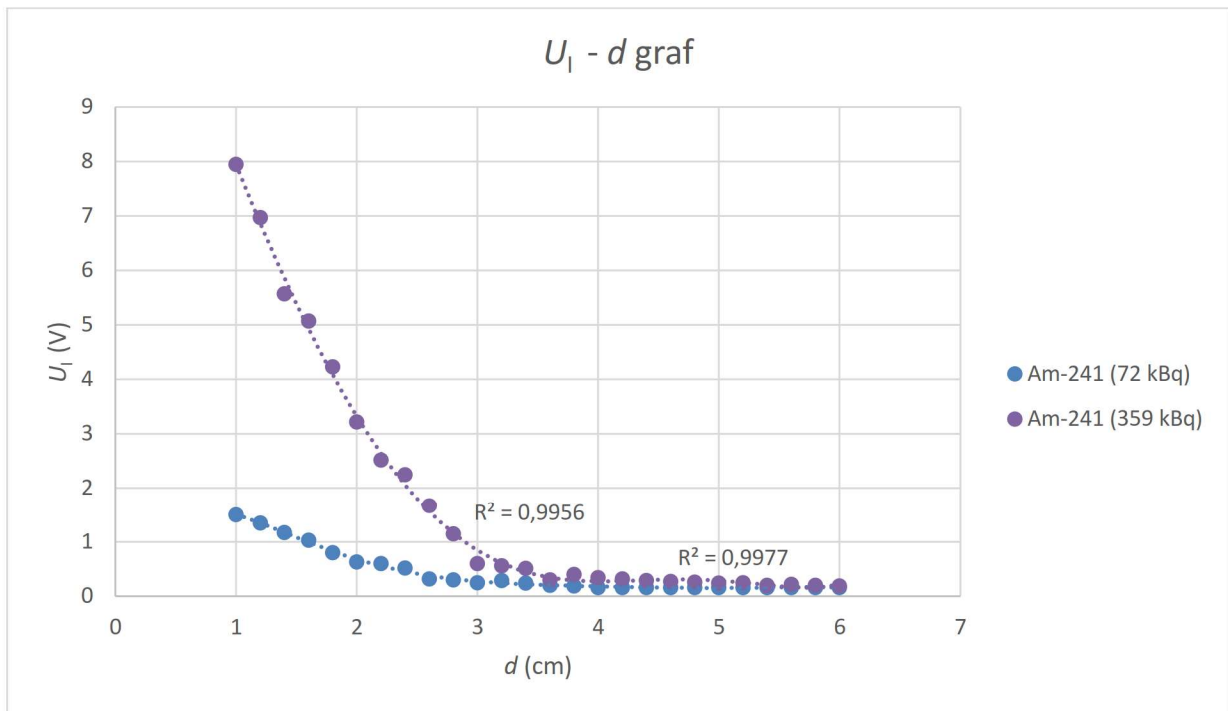
U gore navedenoj tablici slovom  $A$  je označena aktivnost radioaktivnog izvora, a slovom  $U_I$  izlazni napon. Vrijednost ulaznog napona je bila stalna i iznosila je 9,13 V.

Tablica 7. Vrijednosti izlaznog napona za radioaktivni izvor  $^{241}\text{Am}$  različitih aktivnosti u ovisnosti o udaljenosti izvora zračenja od detektora (mala ionizacijska cijev).

$d$ (cm)	$^{241}\text{Am}$ (359 kBq)	$^{241}\text{Am}$ (72 kBq)
	$U_I$ (V)	
1,0	7,95	1,50
1,2	6,97	1,35
1,4	5,57	1,17
1,6	5,07	1,03
1,8	4,23	0,80
2,0	3,22	0,63
2,2	2,52	0,60
2,4	2,25	0,52
2,6	1,67	0,32
2,8	1,15	0,30
3,0	0,6	0,25
3,2	0,56	0,29
3,4	0,51	0,24
3,6	0,30	0,20
3,8	0,40	0,19
4,0	0,34	0,16
4,2	0,32	0,16
4,4	0,29	0,16
4,6	0,27	0,16
4,8	0,26	0,16
5,0	0,24	0,16
5,2	0,25	0,16
5,4	0,20	0,16
5,6	0,22	0,16
5,8	0,20	0,16
6,0	0,19	0,16



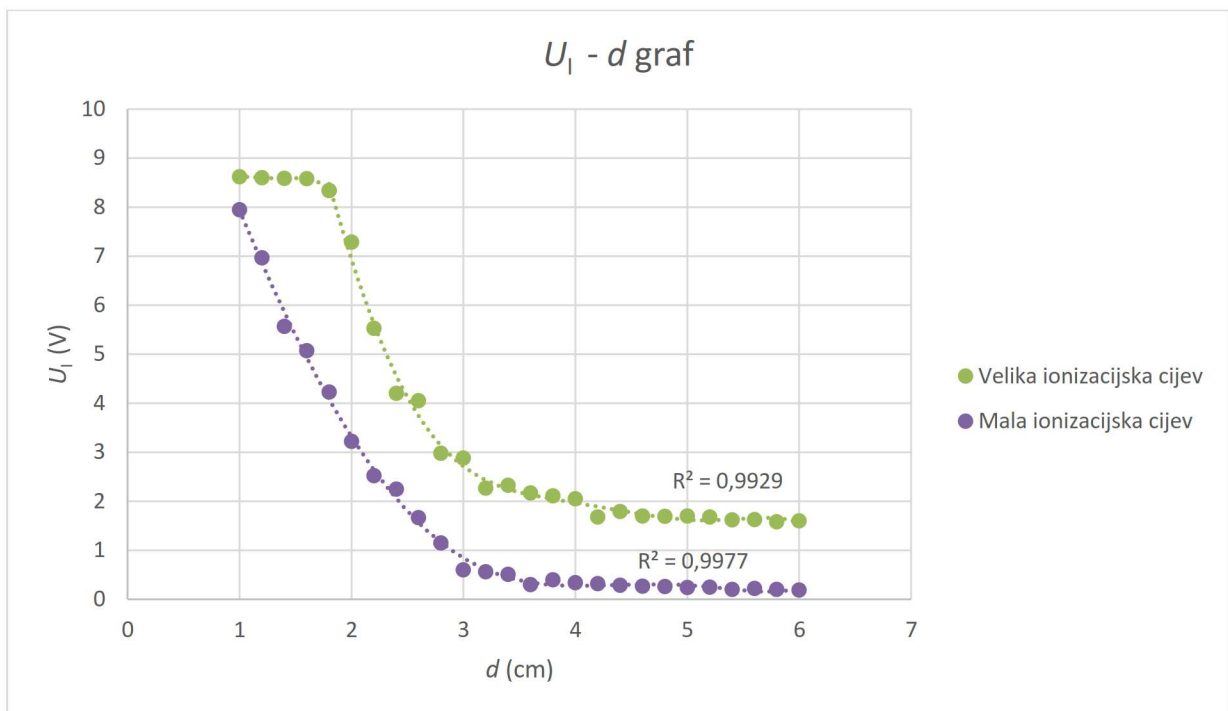
U gore navedenoj tablici slovom  $d$  označena je udaljenost izvora zračenja od detektora, a slovom  $U_I$  izlazni napon. Ulazni napon iznosi 9,13 V. Mjerni uređaj postavljen za mjerenje napona prikazuje osjetljivost i na pozadinsko zračenje. Vrijednost napona za pozadinsko zračenje je 0,16 V.



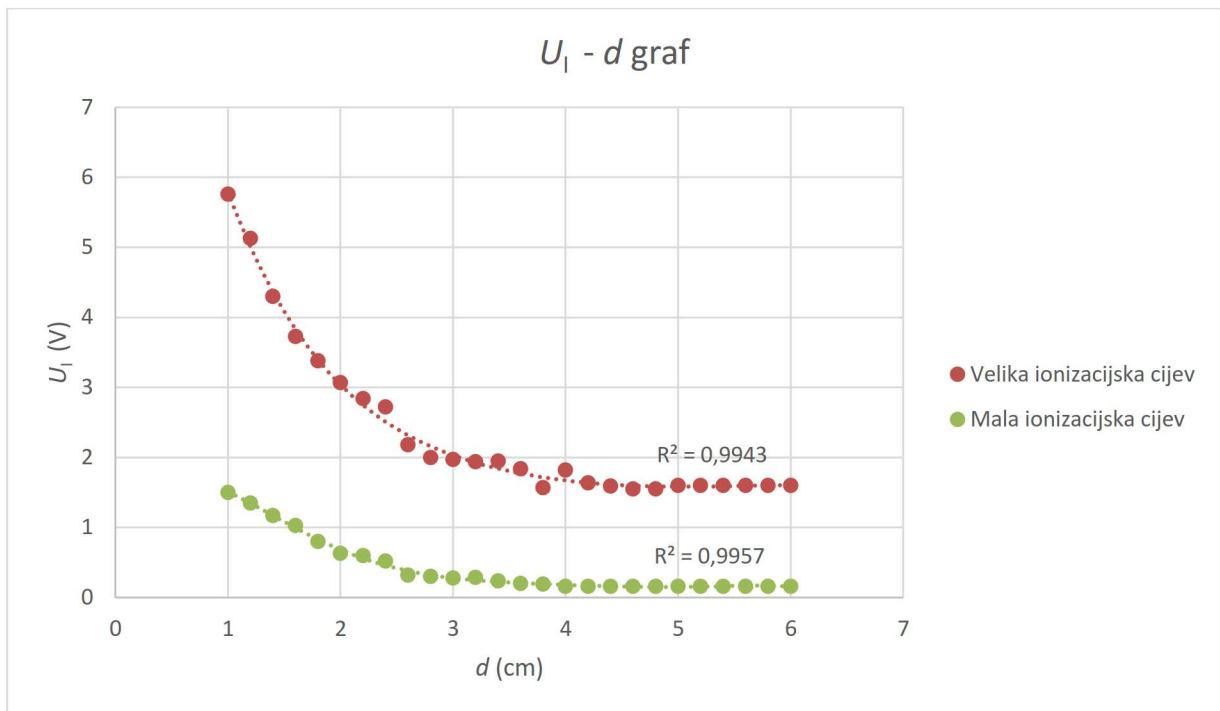
Slika 18. Grafički prikaz ovisnosti radioaktivnog izvora  $^{241}\text{Am}$  različitih aktivnosti o udaljenosti izvora zračenja od detektora (mala ionizacijska cijev).

Prilikom provedbe eksperimenta s malom ionizacijskom cijevi, prikazano na slici 18, vidljivo je znatno smanjenje signala na manjoj udaljenosti radioaktivnog izvora od detektora negoli pri eksperimentima s velikom ionizacijskom cijevi. Iz grafičkog prikaza jasno se vidi da od udaljenosti 3,0 cm vrijednosti napona prilikom izlaganja  $^{241}\text{Am}$ , aktivnosti 359 kBq i aktivnosti 72 kBq, detektoru zračenja postaju približno jednake pozadinskoj vrijednosti napona. Razlog tomu je sam radioaktivni izvor koji pri svom raspadu emitira alfa-čestice. Alfa-čestice imaju veliku specifičnu ionizaciju, odnosno na vrlo kratkom putu kroz tvar predaju svu svoju energiju. Na udaljenosti 3 cm ne vidi se doprinos radioaktivnog izvora jer su alfa-čestice na putu do ionizacijske cijevi izgubile svu svoju energiju pri međudjelovanju s okolnim zrakom.

U svrhu promatranja ovisnosti intenziteta zračenja o dimenziji ionizacijske cijevi postavljani su grafički prikazi koji sadrže podatke dobivene mjerenjem izlaznog napona radioaktivnog izvora iste aktivnosti koristeći različite dimenzije ionizacijske cijevi pri detekciji zračenja.



Slika 19. Vrijednosti izlaznog napona za radioaktivni izvor <sup>241</sup>Am aktivnosti 359 kBq u ovisnosti o udaljenosti izvora zračenja od detektora različitih dimenzija ionizacijske cijevi.



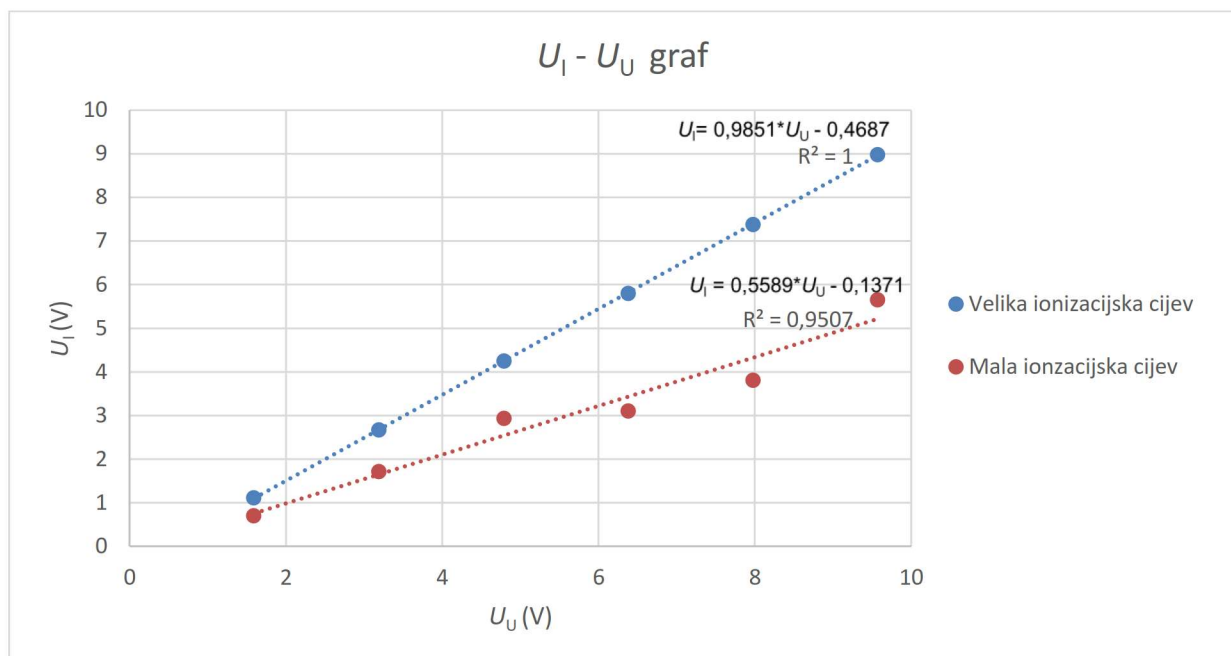
Slika 20. Vrijednosti izlaznog napona za radioaktivni izvor  $^{241}\text{Am}$  aktivnosti 72 kBq u ovisnosti o udaljenosti izvora zračenja od detektora različitih dimenzija ionizacijske cijevi.

Iz grafičkih prikaza na slikama 19 i 20 vidimo da ionizacijska cijev većih dimenzija daje bolje rezultate mjerenja. Razlog tomu je što velika ionizacijska cijev zauzima puno veći prostor te će puno više čestica ući u ionizacijsku cijev i međudjelovati za zrakom u cijevi, dok će kod male ionizacijske cijevi dio čestica proći pored cijevi i neće biti uhvaćen električnim poljem.

Tablica 8. Vrijednosti izlaznog napona u ovisnosti o ulaznom naponu za radioaktivni  $^{241}\text{Am}$  aktivnosti 359 kBq na udaljenosti 1,0 cm od detektora zračenja.

	Velika ionizacijska cijev	Mala ionizacijska cijev
$U_U$ (V)	$U_I$ (V)	$U_I$ (V)
1,59	1,11	0,70
3,19	2,67	1,71
4,79	4,25	2,93
6,38	5,80	3,10
7,98	7,38	3,81
9,57	8,98	5,65

U gore navedenoj tablici slovom  $U_U$  označen je ulazni napon tj. napon izvora (baterije), a slovom  $U_I$  izlazni napon. Za ova mjerenja iskorišteno je šest baterija, koje su serijski spojene dodajući svaki puta bateriju više, kako bi mogli mijenjati vrijednosti ulaznog napona.



Slika 21. Grafički prikaz ovisnosti izlaznog napona o ulaznom naponu za radioaktivni  $^{241}\text{Am}$  aktivnosti 359 kBq izložen detektorima zračenja različitih dimenzija ionizacijske cijevi.

Grafički prikaz pokazuje karakterističnost tranzistora koja je linearna ovisnost ulaznog i izlaznog napona, kao što se vidi na slici 21. Također, vidljivo je da povećanje ulaznog napona uzrokuje povećanje izlaznog napona. Budući da se nabijene čestice tada brže gibaju smanjena je mogućnost rekombinacije te je sve više nabijenih čestica prikupljeno elektrodama.

Također, na grafičkom prikazu prikazanom na slici 21, vidljivo je potpuno poklapanje pravca (crte trenda) i točaka prilikom detekcije velikom ionizacijskom cijevi, dok kod male ionizacijske cijevi postoje odstupanja pravca od točaka. Koeficijent determinacije ( $R^2$ ) pokazuje koliko je jaka veza izlaznog i ulaznog napona. Što je njegova vrijednost bliža jedan, zavisnost je jača. Usporedimo li dobivene koeficijente determinacije ( $R^2$ ) kod promatranja ovisnosti izlaznog napona o ulaznom naponu za radioaktivni  $^{241}\text{Am}$  izložen detektorima zračenja različitih dimenzija ionizacijske cijevi, vidljivo je da je on najveći prilikom detekcije detektorom zračenja velikih dimenzija ionizacijske cijevi i nešto manji prilikom detekcije zračenja detektorom puno manjih dimenzija ionizacijske cijevi. Razlog tome je, kao što je ranije navedeno, geometrija same ionizacijske cijevi. Budući da se zračenje širi prolaskom kroz prostor vjerojatnost ulaska alfa-čestica u ionizacijsku cijev je sve manja što je promjer ionizacijske cijevi manji. Zbog toga velika ionizacijska cijev daje bolje rezultate mjerenja jer zauzima puno veći prostor te će puno više čestica ući u nju i međudjelovati sa zrakom u cijevi, dok će kod manje ionizacijske cijevi dio čestica proći pored cijevi i neće biti uhvaćen električnim poljem.

U programu SPSS analizirana je značajnost na razini 1% za koeficijente korelacije ( $R$ ) za različite dimenzije ionizacijske cijevi. Rezultati analize su pokazali da na razini 1% značajnosti postoji jaka veza između izlaznog i ulaznog napona. Kod velike ionizacijske cijevi koeficijent korelacije iznosi 1, a kod male ionizacijske cijevi 0,9750. Zaključeno je da je ionizacijska cijev većih dimenzija precizniji i pouzdaniji detektor ionizirajućeg zračenja.

Tablica 9. Rezultati testa značajnosti za korelacijski koeficijent (detekcija zračenja malom ionizacijskom cijevi) na razini 1% značajnosti. [34]

		$U_I$	$U_U$
$U_I$	Pearsonova korelacija	1	1,000
	Značajnost (dvosmjerna)		<0,001
	N	6	6
$U_U$	Pearsonova korelacija	1,000	1
	Značajnost (dvosmjerna)	<0,001	
	N	6	6

Tablica 10. Rezultati testa značajnosti za korelacijski koeficijent (detekcija zračenja malom ionizacijskom cijevi) na razini 1% značajnosti. [34]

		$U_I$	$U_U$
$U_I$	Pearsonova korelacija	1	0,975
	Značajnost (dvosmjerna)		<0,001
	N	6	6
$U_U$	Pearsonova korelacija	0,975	1
	Značajnost (dvosmjerna)	<0,001	
	N	6	6

Budući da je detektor napravljen od velike ionizacijske cijevi puno precizniji, izložen je i dvama gama emiterima, a to su  $^{60}\text{Co}$  aktivnosti 3 kBq i  $^{137}\text{Cs}$  aktivnosti 24 kBq. Trenutne aktivnosti radioaktivnih izvora dobivene su postupkom koji je naveden uz tablicu 2. Podaci pomoću kojih je dobivena trenutna aktivnost  $^{60}\text{Co}$  su početna aktivnost od 74 kBq, vrijeme poluraspada od 5,27 godina i datum proizvodnje 1. 2. 1999. Podaci pomoću kojih je dobivena trenutna aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  su početna aktivnost od 37 kBq, vrijeme poluraspada od 30,17 godina i datum proizvodnje 9. 2. 2005. Gama emiteri imaju puno manju sposobnost ionizacije od alfa i beta emitera, što su prikazali i rezultati mjerenja uspoređujući  $^{241}\text{Am}$  i  $^{60}\text{Co}$  približnih aktivnosti, postavljeni na jednakoj udaljenosti od ionizacijske cijevi. Kada je radioaktivni kobalt postavljen na udaljenost 2 cm od detektora, multimetar pokazuje vrijednost od 9,6 mV, a kada je isto napravljeno s  $^{137}\text{Cs}$  multimetar pokazuje vrijednost od 10 mV.

Kada je detektor izložen Auerovoj mrežici (mrežica za plinske lampe koja sadrži torij) kao izvoru zračenja, multimetar pokazuje vrijednost od 200 mV. Kamenčić kolumbita daje vrijednost od 7,2 mV. U svrhu istraživanja iskorišten je i dio stijene iz rudnika uranija u Sloveniji poznatom kao Žirovski vrh koji daje vrijednost od 0,5 mV. Izvori zračenja kao što su torijeva mrežica, kamenčić kolumbita i djelić stijene iz rudnika uranija postavljeni su tik do središnje elektrode kako bi se postigli značajniji rezultati. Prilikom mjerenja u naponskom području, detektor je osjetljiv i na plamen svijeće. Najveće promjene u signalu pojave se kada je radioaktivni izvor usmjeren prema središnjoj elektrodi. Kao što je rečeno, ovakav uređaj dobar je pokazatelj ionizirajućeg zračenja i vrijedan alat pri proučavanju ionizirajućeg zračenja u školi.

## 5. Primjena ionizacijske cijevi u nastavi fizike

Gradivo koje se obrađuje u četvrtom razredu srednje škole obuhvaća teoriju vezanu uz valnu prirodu svjetlosti, elektromagnetske valove, svjetlost, građu atoma i nuklearne reakcije, radioaktivnost i ionizirajuće zračenje, specijalnu teoriju relativnosti i razvoj svemira. Za učenike ovo poglavlje učenja fizike predstavlja problem zbog velikog broja novog gradiva s kojim se susreću, gradiva kojeg je teško vizualizirati i pojmova koje je teško objasniti te nedostatka aparature. [35]

Izrađena ionizacijska cijev je vrijedan alat pri proučavanju nastavne jedinice Detekcije ionizirajućeg zračenja. Uređaj omogućava učenicima lakše shvaćanje nastavnog gradiva, a učiteljima učinkovitije prenošenje gradiva. U nastavku slijedi primjer nastavnog sata u kojem se primjenjuje ionizacijska cijev.

### 5.1. Obrada nastavne jedinice „Detekcija ionizirajućeg zračenja“

<b>SREDNJA ŠKOLA / MJESTO</b>	Srednja škola, smjer: gimnazija	<b>ŠK. GOD.</b>	2022. / 2023.
<b>PREDMET</b>	Fizika	<b>RAZRED</b>	4.
<b>STUDENTICA</b>	Vedrana Marić	<b>DATUM</b>	-
<b>PRIJEDLOG SCENARIJA ZA IZVOĐENJE NASTAVE FIZIKE</b>			
<b>BROJ NASTAVNIH SATI</b>	2	<b>BROJ NASTAVNOG SATA</b>	70., 71.
<b>DOMENA</b>	<b>B - MEĐUDJELOVANJE, D – ENERGIJA</b>		
<b>UDŽBENIČKA JEDINICA:</b>	<b>Detekcija ionizirajućeg zračenja</b>		
<b>OČEKIVANI ISHODI I NJIHOVO VREDNOVANJE</b>			
<b>ODGOJNO - OBRAZOVNI ISHODI</b>	<b>BD.4.6.</b> Analizira radioaktivne raspade i opisuje učinke ionizirajućeg zračenja na žive organizme. <b>BD.4.10.</b> Istražuje fizičke pojave. <b>BD.4.9.</b> Rješava fizičke probleme. [35]		
<b>RAZRADA ODGOJNO - OBRAZOVNIH ISHODA</b>	Definiira ionizirajuće zračenje. Opisuje promjenu i učinke ionizirajućeg zračenja na žive organizme. Opisuje načine detekcije ionizirajućeg zračenja. [35]		
<b>POVEZANOST S DRUGIM PREDMETIMA</b>	<b>Matematika</b> B.7.3. Primjenjuje proporcionalnost i obrnutu proporcionalnost.		



	<p>D.7.5. Odabire i preračunava odgovarajuće mjerne jedinice.</p> <p><b>Kemija</b></p> <p>BC.4.2. Primjenjuje međudjelovanja tvari s elektromagnetskim zračenjem. [35]</p>
<p><b>POVEZANOST S MEĐUPREDMETNIM TEMAMA</b></p>	<p><b>Osobni i socijalni razvoj</b></p> <p>C.5.2. Preuzima odgovornost za pridržavanje zakonskih propisa te društvenih pravila i normi.</p> <p><b>Učiti kako učiti</b></p> <p>A.2.5. Učenik se koristi različitim strategijama učenja i samostalno ih primjenjuje pri ostvarivanju ciljeva učenja i rješavanju problema u svim područjima učenja.</p> <p>A.4.5. Učenik samostalno kritički promišlja i vrednuje ideje.</p> <p>B.4.5. Učenik samovrednuje proces učenja i svoje rezultate, procjenjuje ostvareni napredak te na temelju toga planira buduće učenje.</p> <p>D.2.5. Učenik ostvaruje dobru komunikaciju s drugima, uspješno surađuje u različitim situacijama i spreman je zatražiti i ponuditi pomoć.</p> <p><b>Zdravlje</b></p> <p>CB.5.1. Analizira opasnosti iz okoline, prepoznaje rizične situacije i izbjegava ih.</p> <p><b>Upotreba IKT-a</b></p> <p>A.5.2. Učenik se samostalno služi društvenim mrežama i računalnim oblacima za potrebe učenja i osobnog razvoja. [35]</p>
<p><b>VREDNOVANJE ISHODA</b></p>	<p><b>VREDNOVANJE ZA UČENJE</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ praćenje rada učenika tijekom sata (pažnja, interes i aktivnost učenika)</li> <li>○ praćenje doprinosa raspravi (demonstracijski pokus)</li> <li>○ praćenje načina rješavanja problema</li> <li>○ praćenje samostalnosti u radu i interakcija s ostalim učenicima</li> <li>○ davanjem povratnih informacija</li> <li>○ kviz za ponavljanje</li> </ul> <p><b>VREDNOVANJE KAO UČENJE</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ listić za samoprocjenu znanja</li> </ul> <p><b>VREDNOVANJE NAUČENOG</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Zašto kažemo da je radioaktivno zračenje ionizirajuće zračenje?</li> <li>○ Definiraj specifičnu ionizaciju!</li> <li>○ Opiši načelo detekcije ionizirajućeg zračenja pomoću ionizacijske cijevi!</li> <li>○ Definiraj apsorbiranu dozu!</li> <li>○ Definiraj ekvivalentnu dozu!</li> <li>○ Kakva je veza između apsorbirane doze, ekvivalentne doze i faktora učinka?</li> <li>○ Tri izvora zračenja istih aktivnosti postavljena su na udaljenost 0,5 cm od ionizacijske cijevi. Prvi izvor je alfa-emiter, drugi beta-emiter i treći gama-emiter. U kojem slučaju na detektoru očitavamo najveći signal i zašto?</li> <li>○ Objasnite zašto je učinak ionizacije veći što je aktivnost radioaktivnog izvora veća!</li> <li>○ Demonstriraj pomoću ionizacijske cijevi ovisnost intenziteta zračenja o udaljenosti izvora zračenja od detektora!</li> </ul>

**KLJUČNI POJMOVI:**

ionizacija / specifična ionizacija / apsorbirana doza / ekvivalentna doza / detekcija ionizirajućeg zračenja / ionizacijska cijev.

<b>ORGANIZACIJA NASTAVNOG PROCESA</b>		
<b>NASTAVNE METODE</b>	<b>OBLICI RADA</b>	<b>NASTAVNA SREDSTVA I POMAGALA</b>
Razgovor, pisanje, računanje, demonstracije	Frontalni, individualni, grupni rad	Projektor, računalo, ploča, kreda, kalkulator, bilježnica, olovka, gumica, ionizacijska komora (ionizacijska cijev i elektronika), radioaktivni izvor (tri Auerove mrežice)
<b>LITERATURA:</b>		
1. Fizika oko nas 4 – udžbenik fizike u četvrtom razredu gimnazije, Školska knjiga, d. d., Zagreb, 2021. [36]		
2. Kurikulum nastavnog predmeta Fizika za osnovne škole i gimnazije, Ministarstvo znanosti i obrazovanja, 2019. [35]		

<b>TIJEK NASTAVNOG PROCESA</b>	
<b>Aktivnost nastavnika</b>	<b>Aktivnost učenika</b>
<b>Uvodni dio (otvaranje problema): 5 min</b>	
<p>Nastavnica pozdravlja učenike. Nastavnica ispituje učenike kako su te jesu li umorni.  <u>Cilj:</u> Uvid u atmosferu razreda te informacija o tome kakav tempo rada učenicima odgovara.  Nastavnica uključuje računalo i projektor. Nastavnica priprema materijale za nastavu. Nastavnica upisuje sat i učenike koji nisu prisutni na nastavi.</p> <p>Nastavnica govori učenicima da danas imaju obradu novog gradiva. Nastavnica motivira učenike postavljajući pitanja povezana uz svakodnevni život.  <u>Cilj:</u> Zainteresirati učenike za nastavnu jedinicu koja se obrađuje i općenito za fiziku.</p> <p>”</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <i>Navedite pojmove koje biste povezali s pojmom radioaktivno zračenje.</i></li> <li>○ <i>Ima li radioaktivno zračenje utjecaj na ljude?</i> <i>Točno tako. Zato čovjek na prezentaciji nosi zaštitnu opremu!</i></li> <li>○ <i>Možete li pomoću svojih osjetila detektirati radioaktivno zračenje? Kako se može detektirati radioaktivno zračenje?</i></li> <li>○ <i>Tako je, postoje razne vrste detektora zračenja, a rad jednog od njih ćemo danas opisati.</i></li> <li>○ <i>Vidim da ste odabrali sve negativne pojmove no, može li "zračenje" biti korisno?</i></li> <li>○ <i>Tako je, jedna od primjena radioaktivnog zračenja je u medicini. Liječenje karcinoma spada u posebnu granu medicine koja se naziva radioterapija. Iako je ovo vrlo uspješna metoda, određene nuspojave postoje kao što su oštećenje zdravih stanica.“</i></li> </ul> <p>„Prošli puta smo spominjali da radioaktivno zračenje mijenja strukturu i svojstva tvari kroz koju prolazi. Najznačajniji proces pri tome je ionizacija,</p>	<p>Učenici pozdravljaju nastavnicu.</p> <p>Učenici pripremaju materijale za nastavu.</p> <p>Učenici slušaju nastavnicu i odgovaraju na pitanja.</p> <p>”</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <i>Štetno, opasno za zdravlje, zagađenje okoliša, Černobilska katastrofa...</i></li> <li>○ <i>Ima, ukoliko su ljudi izloženi zračenju mogu se razboljeti pa čak i umrijeti.</i></li> <li>○ <i>Ne možemo. Možda pomoću uređaja koji su puno osjetljiviji nego naša osjetila.</i></li> <li>○ <i>U bolnici se koristi pri nekim pregledima, npr. kod liječenja karcinoma...“</i></li> </ul> <p>Učenici slušaju nastavnicu.</p>

<p><i>i zbog takvog djelovanja ono spada u ionizirajuća zračenja.</i>  <i>Nastavnu jedinicu Ionizirajuće zračenje ćemo danas detaljnije obraditi pa vas molim da zapišete naslov i današnji datum u svoju bilježnicu.</i>“  Nastavnica zapisuje naslov i datum na ploču.</p>	<p>Učenici zapisuju naslov i datum u svoje bilježnice.</p>
<p><b>Središnji dio (konstruiranje modela): 75 min</b></p>	
<p><i>„Prije negoli zaključimo što je ionizirajuće zračenje, prisjetimo se koje smo sve vrste zračenja naučili u osmom razredu. Nastavnica ispituje učenike da nabroje koja zračenja poznaju.</i></p> <p><i>„Elektromagnetska zračenja dijelimo na ionizirajuća i neionizirajuća ovisno o tome imaju li dovoljno energije da ioniziraju tvar s kojom međudjeluju.“</i></p> <p><i>„Kako bismo to razumijeli potrebno je definirati ranije spomenuti pojam ionizacija.“</i></p> <p>Nastavnica opisuje proces ionizacije pomoću slike na prezentaciji.  <i>„Radioaktivne čestice izlijeću iz atomskih jezgara velikom kinetičkom energijom. Prolaskom radioaktivnih čestica kroz tvar oslobađaju se elektroni iz neutralnih atoma i molekula te tvari i nastaju pozitivno nabijeni ioni.“</i> Nastavnica govori učenicima da zapišu definiciju ionizacije u svoje bilježnice.</p> <p><i>„Još jedan pojam bitan za spomenuti je specifična ionizacija pa ćemo i to zapisati. Specifična ionizacija opisuje broj iona, nastalih prolaskom radioaktivnih čestica kroz tvar, po jedinici dužine puta.“</i></p> <p><i>„Budući da neionizirajuća elektromagnetska zračenja nemaju dovoljnu energiju za ionizaciju tvari s kojom djeluju, njih ćemo samo spomenuti, a to su infracrvene zrake, vidljiva svjetlost, ultraljubičasto zračenje nižih energija, radiovalovi i mikrovalovi. U ionizirajuća zračenja spadaju ultraljubičasto zračenje viših energija, rendgensko zračenje, gama-zračenje, kozmičko zračenje i zračenje</i></p>	<p>Učenici pomno slušaju nastavnicu. Učenici odgovaraju:  <i>„Učili smo elektromagnetska zračenja, a to su infracrvene zrake, vidljiva svjetlost, ultraljubičaste zrake, radiovalovi, mikrovalovi, rendgensko zračenje, gama zračenje...“</i></p> <p>Učenici pomno prate i slušaju nastavnicu.</p> <p>Učenici zapisuju definiciju ionizacije u svoje bilježnice.</p> <p>Učenici zapisuju definiciju specifične ionizacije u svoje bilježnice.</p> <p>Učenici slušaju nastavnicu.</p>

*masenim česticama koje ćemo još kroz nastavu spominjati.“*

*„Specifična ionizacija ovisi o vrsti zračenja. Koje smo vrste zračenja upoznali na prošlom predavanju?*

*Koje zračenje ima najmanji doseg, a koje najveći?*

*Gama-zračenje ima malu specifičnu ionizaciju, odnosno sporo gubi energiju prolaskom kroz tvar pa zbog toga ima veliki doseg u tkivu. Alfa-zračenje ima veliku specifičnu ionizaciju, odnosno brzo gubi energiju prolaskom kroz tvar te je ubrzo u potpunosti apsorbirana, zbog čega ima mali doseg u tkivu.“*

Nastavnica govori učenicima da prepisu bitno s prezentacije u bilježnicu.

Nastavnica upoznaje učenike sa veličinama bitnim za razumijevanje utjecaja ionizirajućeg zračenja na tvar kroz koju prolazi.

*„Apsorbirana doza je energija što je ozračena tvar upija po kilogramu mase. Mjerna jedinica za apsorbiranu dozu je J/kg, a ta se jedinica zove grey, Gy.“*

Nastavnica govori učenicima da prepisu definiciju apsorbirane doze i pripadnu formulu u svoje bilježnice.

*„Ekvivalentna doza opisuje biološki učinak ionizirajućeg zračenja na tkivo. Faktor učinka predstavlja broj koji pokazuje relativni biološki učinak različitih vrsta zračenja na tkiva. Također, iz tablice vidimo poklapanje s ranije navedenim tvrdnjama o specifičnoj ionizaciji različitih vrsta zračenja.“* Nastavnica govori učenicima da prepisu definiciju ekvivalentne doze, pripadnu formulu i tablicu u svoje bilježnice.

*„Kakav je utjecaj ionizirajućeg zračenja na čovjeka?“*

*„Tako je, zračenje se prolaskom kroz tvar djelomično ili potpuno apsorbira i mijenja energiju molekula tkiva što dovodi do dodatnih reakcija te se tkivo oštećuje. Ovisno o jačini zračenja može doći do oštećenja ili odumiranja stanica.*

*Ljudi su stalno izloženi prirodnom zračenju koje se nalaze u tlu, zraku, hrani, vodi i*

Učenici odgovaraju na postavljena pitanja.

*„Alfa-zračenje, beta-zračenje i gama-zračenje.*

*Gama-zračenje ima najveći doseg, beta-zračenje manji, a alfa-zračenje najmanji doseg.“*

Učenici zapisuju bitno u bilježnicu.

Učenici zapisuju bitno u svoje bilježnice.

Učenici zapisuju bitno u svoje bilježnice.

*„Ionizirajuće zračenje je štetno za ljude. Primjer za to je Černobilska katastrofa.“*

Učenici slušaju nastavnicu.

*kozmičkom zračenju, no te doze zračenja su vrlo male. Osobe koje rade s ionizirajućim tvarima moraju biti propisno zaštićene.“*

*„Naveli smo na početku da ljudska osjetila nisu razvijena kako bi mogli prepoznati gdje ima ionizirajućeg zračenja, nego im za to služe razne vrste detektora.“*

Nastavnica opisuje jedan od najjednostavnijih detektora zračenja.

*„Ionizacijska cijev je metalna cijev u kojoj djeluje jako električno polje i unutar koje se nalazi plin. Stijenke ionizacijske cijevi predstavljaju katodu, a žica koja prolazi središtem cijevi anodu. Pod utjecajem električnog polja naboji se odmiču od svog mjesta nastanka te bivaju privučeni suprotno orijentiranim elektrodama što uzrokuje pojavu električne struje u strujnom krugu.“*

Nastavnica govori učenicima da će zajedno istražiti rad jednostavnog detektora koji se može lako napraviti. Nastavnica govori učenicima da će učenici na dodatnoj nastavi pokušati i sami napraviti navedeni detektor.  
Cilj: Motiviranje učenika na promatranje, opažanje i zaključivanje o ionizirajućem zračenju i samom procesu ionizacije.

Nastavnica postavlja ionizacijsku komoru (ionizacijska cijev i elektronički elementi) na stol.

*„Sada ćemo spojiti bateriju u strujni krug i postaviti mjerni uređaj za mjerenje napona - voltmetar. Molim da jedan učenik spoji bateriju, a jedan namjesti mjerni uređaj.“*  
Ukoliko se nitko ne javi, nastavnica nasumce odabere dva učenika. Na kraju, nastavnica zahvali učenicima na asistenciji.

Nastavnica ispituje učenike zašto uređaj pokazuje neku vrijednost pada napona iako nismo postavili radioaktivni izvor ispred detektora.

*„Tako je. Takvo zračenje nazivamo pozadinsko zračenje. Zapišite vrijednost napona koju ste očitali s voltmetra za pozadinsko zračenje.“*

Prije nego što nastavnica uzme radioaktivni izvor stavlja rukavice za ruke.

Učenici slušaju nastavnicu i zapisuju bitno u svoje bilježnice.

Učenici se skupljaju za stolom nastavnice.

Učenici se javljaju kako bi postavili uređaj. Jedan učenik spaja bateriju u strujni krug, a jedan namješta mjerni uređaj.

Učenici se prisjećaju i odgovaraju nastavnici: *„Iako nismo postavili radioaktivni izvor ispred detektora postoji neki signal zbog zračenja kojem smo mi svakodnevno izloženi, prirodnog zračenja.“*

Učenici zapisuju vrijednost napona koji su očitali s voltmetra za pozadinsko zračenje.

„Što mislite kakvu ćemo sad vrijednost napona dobiti?“

Nastavnica postavlja radioaktivni izvor (Auerovu mrežicu) ispred detektora te još jednom objašnjava što se događa unutar same ionizacijske cijevi.

„Radioaktivne čestice velikom kinetičkom energijom izlijeću iz atomske jezgre radionuklida kako bi on postigao stabilno stanje. Čestice ulaze u ionizacijsku cijev gdje međudjeluju s neutralnim molekulama plina, koji je u našem slučaju zrak. Prilikom sudara radioaktivnih čestica s neutralnim molekulama plina na koje čestica nailazi duž puta dolazi do izbijanja elektrona iz elektronskog omotača atoma te nastaje ionski par (slobodan elektron i pozitivan ion). Budući da se u strujni krug priključi baterija nastaje električno polje te nastali naboji bivaju privučeni elektrostatskim silama prema suprotno orijentiranim elektrodama jer znamo da se raznoimenni naboji privlače. Gibanje tih nabojâ uzrokuje pojavu električne struje u strujom krugu, vidljivu kao mali pad napona na detektoru zračenja, koja je indikator da je izvor radioaktivan.“

Nastavnica ispituje učenike da razmisle koja je ovisnost aktivnosti radioaktivnog izvora i njegovog ionizirajućeg djelovanja.

„Idemo to provjeriti!“

Budući da škola nije opremljena radioaktivnim izvorima za pokus se koristi mrežica za plinske lampe. Nastavnica postavlja jednu mrežicu ispred detektora, zatim dodaje još jednu mrežicu pa još jednu. Sve mrežice postavlja na istu udaljenost od 0,5 cm. Nastavnica govori učenicima da rezultate tablično i grafički prikažu.

Nastavnica ispituje učenike da razmisle što se događa s ionizacijom kada se radioaktivni izvor sve više udaljava od detektora. „Ovaj pokus ćemo izvesti za jednu Auerovu mrežicu i za tri mrežice postavljene na određene udaljenosti od detektora zračenja.“

Nastavnica uzima Auerovu mrežicu te ju postavlja uz detektor, na udaljenost 0,5 cm, 1,0 cm, 1,5 cm i 2 cm od detektora. Nakon

Učenici razmišljaju i odgovaraju nastavnicu: „Mislim da će vrijednost napona biti veća.“

Učenici pomno slušaju nastavnicu.

Učenici odgovaraju: „Što je aktivnost izvora veća to je veća ionizacija jer dolazi do bržeg radioaktivnog raspada, odnosno više čestica će biti prikupljeno elektrodama.“

Učenici očitavaju i zapisuju vrijednosti s mjernog uređaja, grafički prikazuju rezultate pomoću računala te dolaze do zaključka da se povećanjem broja Auerovih mrežica povećava izlazni napon, odnosno vidljiv je veći učinak ionizacije.

Učenici odgovaraju: „Vjerojatno je utjecaj slabiji što smo dalje od izvora.“

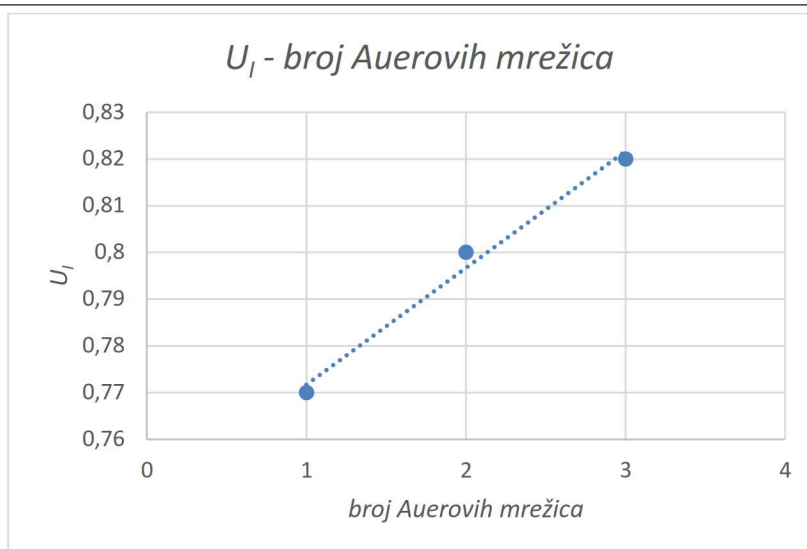
Učenici očitavaju i zapisuju vrijednosti s mjernog uređaja te grafički prikazuju pomoću računala. Nakon

<p>toga tri Auerove mrežice postavlja zajedno pred detektor zračenja na udaljenost 1,0 cm, 1,5 cm, 2,0 cm, 2,5 cm i 3,0 cm. Nastavnica govori učenicima da rezultate tablično i grafički prikažu.</p> <p>Nastavnica objašnjava zaključak i povezuje ga s dometom različitih vrsta zračenja.</p> <p><i>„Zaključili smo da je učinak ionizacije veći što je broj Auerovih mrežica veći. Brzina raspadanja radioaktivne tvari opisana je aktivnošću radioaktivnog uzorka. Što je aktivnost izvora veća to više čestica izlijeće iz atomske jezgre i međudjeluje s molekulama plina samim time stvara više ionskih parova, odnosno daje veći signal na detektoru. U našem slučaju imali smo tri Auerove mrežice koje emitiraju ionizirajuće zračenje. Zbog većeg broja radioaktivnih raspada u jedinici vremena povećava se stopa ionizacije u zraku što rezultira povećanjem signala na detektoru. Što je udaljenost detektora i izvora veća to je učinak ionizacije manji. Povežimo to s ranije spomenutim zračenjima. Alfa-zračenje ima jako mali doseg te se vjerojatnost interakcije smanjuje povećavanjem udaljenosti, dok gama-zračenje ima veliki doseg no malu sposobnost ionizacije.“</i></p>	<p>promatranja dolaze do zaključka da je njihova pretpostavka dobra.</p> <p>Učenici slušaju nastavnicu.</p>
<p><b>Završni dio (primjena modela): 10 min</b></p>	
<p>Nastavnica govori učenicima da će sada kratko ponoviti dosad naučeno kroz kviz.</p> <p>Nastavnica zajedno s učenicima prolazi kroz rješenja kviza.</p> <p><u>Cilj:</u> Provjera usvojenosti obrađenog nastavnog gradiva.</p> <p>Nastavnica govori učenicima da ispune anketu za samovrednovanje.</p> <p><u>Cilj:</u> Povratna informacija – mišljenje svakog učenika o usvojenosti gradiva obrađene nastavne jedinice.</p> <p>Nastavnica pozdravlja učenike.</p>	<p>Učenici slušaju nastavnicu.</p> <p>Učenici rješavaju kahoot kviz.</p> <p>Učenici se javljaju pri komentiranju rješenja kviza.</p> <p>Učenici rješavaju anketu za samovrednovanje.</p> <p>Učenici pozdravljaju nastavnicu.</p>

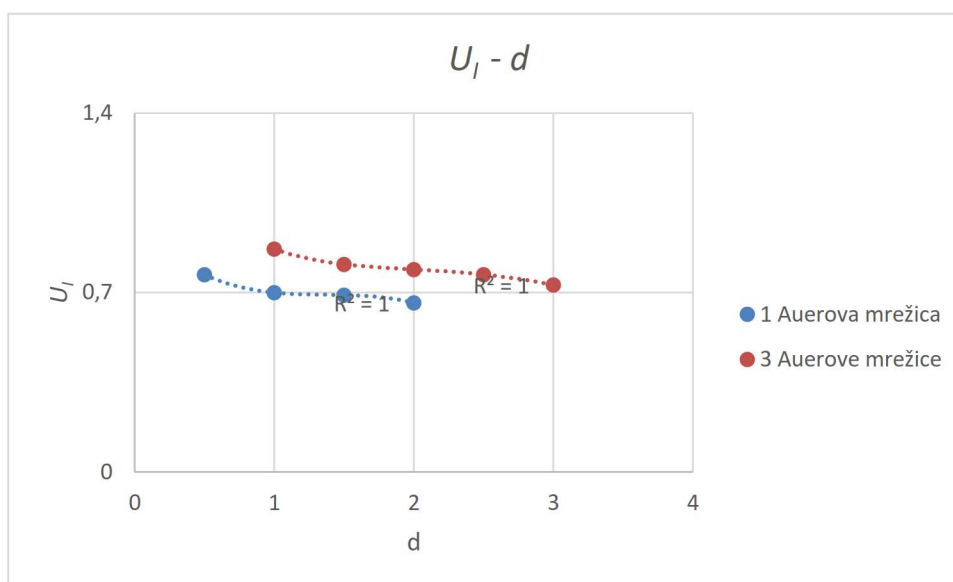


<b>PRILAGODBE ZA UČENIKE S TEŠKOĆAMA:</b>	Posvetiti više pažnje učeniku / učenicima. Prilagoditi nastavne metode i postupke učenicima tako da im njihova poteškoća ne smeta u radu. Sudjelovati u raspravi i pokusima. Prilagoditi radni listić za pokuse. Prilagoditi zadatke mogućnostima učenika. Riješiti kviz za ponavljanje. Riješiti anketu za samoprocjenu.
<b>MULTIMEDIJSKI I INTERAKTIVNI SADRŽAJI:</b>	Kviz za ponavljanje: <a href="https://create.kahoot.it/share/ionizirajuće-zračenje/a38cb101-0bd8-479f-b780-1710b703d9bb">https://create.kahoot.it/share/ionizirajuće-zračenje/a38cb101-0bd8-479f-b780-1710b703d9bb</a>

<b>PLAN PLOČE</b>									
<b>Ionizirajuće zračenje</b>									
<p>Radioaktivne čestice izlijeću iz atomskih jezgara velikom kinetičkom energijom. Prolaskom radioaktivnih čestica kroz tvar oslobađaju se elektroni iz neutralnih atoma i molekula te tvari i nastaju pozitivno nabijeni ioni. Taj proces se naziva ionizacija.</p> <p>Specifična ionizacija opisuje broj iona, nastalih prolaskom radioaktivnih čestica kroz tvar, po jedinici dužine puta.</p> <p>Specifična ionizacija ovisi o vrsti zračenja. Alfa-zračenje ima najveću specifičnu ionizaciju, manju beta-zračenje, a najmanju gama-zračenje.</p> <p>Apsorbirana doza je energija što je ozračena tvar upija po kilogramu mase. Mjerna jedinica za apsorbiranu dozu je J/kg, a ta se jedinica zove grey, Gy. Ekvivalentna doza opisuje biološki učinak ionizirajućeg zračenja na tkivo. Faktor učinka predstavlja broj koji pokazuje relativni biološki učinak različitih vrsta zračenja na tkiva.</p> <p>Ionizacijska cijev je metalna cijev u kojoj djeluje jako električno polje i unutar koje se nalazi plin. Stjenke ionizacijske cijevi predstavljaju katodu, a žica koja prolazi središtem cijevi anodu. Pod utjecajem električnog polja naboji se odmiču od svog mjesta nastanka te bivaju privučeni suprotno orijentiranim elektrodama što uzrokuje pojavu električne struje u strujnom krugu.</p> <p>Pozadinsko zračenje <math>U_1 = 0,60</math> V.</p>									
<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>broj Auerovih mrežica</i></th> <th><math>U_1</math> (V)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0,77</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0,80</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0,82</td> </tr> </tbody> </table>		<i>broj Auerovih mrežica</i>	$U_1$ (V)	1	0,77	2	0,80	3	0,82
<i>broj Auerovih mrežica</i>	$U_1$ (V)								
1	0,77								
2	0,80								
3	0,82								



	$d$ (cm)	$U_I$ (V)
1 Auerova mrežica	0,5	0,77
	1,0	0,70
	1,5	0,69
	2,0	0,66
3 Auerove mrežice	1,0	0,87
	1,5	0,81
	2,0	0,79
	2,5	0,77
	3,0	0,73



Učinak ionizacije je veći što je aktivnost radioaktivnog izvora veća i što je udaljenost od radioaktivnog izvora do detektora manja.

## Dodatni materijali:

### Prezentacija:

Ponovimo!

Ionizirajuće zračenje

#### Ionizacija

Radioaktivne čestice izlijeću iz atomskih jezgara velikom kinetičkom energijom.

Prolaskom radioaktivnih čestica kroz tvar oslobađaju se elektroni iz neutralnih atoma i molekula te tvari i nastaju pozitivno nabijeni ioni.

#### Specifična ionizacija

Specifična ionizacija opisuje broj iona, nastalih prolaskom radioaktivnih čestica kroz tvar, po jedinici dužine puta.

Specifična ionizacija ovisi o vrsti zračenja. Najveća je za alfa-zračenje, manja za beta-zračenje i najmanja za gama-zračenje.

	Papir	Plastika	Olovo
	mm	mm - cm	cm - desetak cm
Alfa-čestice	_____	_____	_____
Beta-čestice	_____	_____	_____
Gama-čestice	_____	_____	_____

#### Apsorbirana doza

$$D = \frac{E}{m}$$

$$\left[ \frac{J}{kg} = Gy \right]$$

Apsorbirana doza je energija što je ozračena tvar upija po kilogramu mase.

#### Ekvivalentna doza

$$H = D \cdot Q$$

[Sv]

Ekvivalentna doza opisuje biološki učinak ionizirajućeg zračenja na tkivo.

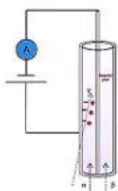
Vrsta zračenja	Faktor učinka Q
Alfa	20
Beta	1
gama	1

#### Utjecaj ionizirajućeg zračenja na čovjeka

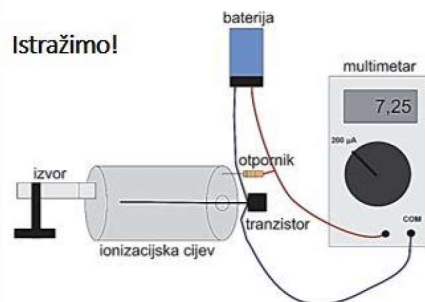
#### Detekcija ionizirajućeg zračenja

## Ionizacijska cijev

Ionizacijska cijev je metalna cijev u kojoj djeluje jako električno polje i unutar koje se nalazi plin. Stjenke ionizacijske cijevi predstavljaju katodu, a žica koja prolazi središtem cijevi anodu. Pod utjecajem električnog polja naboji se odmiču od svog mjesta nastanka te bivaju privučeni suprotno orijentiranim elektrodama što uzrokuje pojavu električne struje u strujnom krugu.



## Istražimo!



Provjerimo naučeno!

Evaluacija

## Kviz za ponavljanje:

1 - Quiz

Odaberi tvrdnju koja točno opisuje proces ionizacije!

20 sec

Nastajanje pozitivno nabijenih iona iz neutralnih atoma ili molekula.



Opisuje broj iona, nastali procesom ionizacije, u jedinici vremena.



Učinak ionizacije je veći što je udaljenost izvora od detektora veća.



2 - True or false

Najveću specifičnu ionizaciju ima gama-zračenje, manju beta-zračenje, i najmanju alfa-zračenje.

20 sec

True



False



3 - Quiz

Odaberi definiciju apsorbirane doze!



20 sec



Opisuje biološki učinak ionizirajućeg zračenja na tkivo.



Energija što ju ozračena tvar upija po kilogramu mase.



4 - Quiz

Odaberite tvrdnju koja točno opisuje princip rada ionizacijske cijevi!



20 sec



Pod utjecajem električnog polja naboji se odmiču od svog mjesta nastanka.



Naboje privlače jednako električki nabijene elektrode.



5 - True or false

Ionizacijska cijev je metalna cijev u kojoj djeluje jako električno polje i u kojoj se nalazi plin.



20 sec



True



False



## Evaluacijski listić:

IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE	ZNAM	DJELOMIČNO ZNAM	NE ZNAM
Znam objasniti proces ionizacije.			
Znam objasniti o čemu ovisi specifična ionizacija.			
Znam definirati apsorbiranu dozu.			
Znam definirati ekvivalentnu dozu.			
Znam objasniti negativan utjecaj ionizirajućeg zračenja na čovjeka.			
Znam opisati rad ionizacijske cijevi.			
Znam izvesti eksperiment detekcije ionizirajućeg zračenja pomoću detektora.			
Znam objasniti rezultate eksperimenta detekcije ionizirajućeg zračenja.			

## 6. Zaključak

Promotri li se model ionizacijske cijevi čiji je način rada najprije teorijski opisan, a zatim eksperimentalno potvrđen, moglo bi se zaključiti kako izrada i rezultati istraživanja nisu pretjerano zahtjevni, no cilj ovoga rada je ostvaren. Analizom rezultata javljaju se jasne sličnosti u usporedbi sa teorijskim pregledom, te je potvrđen način rada ionizacijske cijevi i sam proces ionizacije. Budući da su struje ionizacije jako male te zbog ograničenja mjernog uređaja, ionizacijska cijev ne omogućava detaljnije istraživanje, no prihvatljiv je detektor ionizirajućeg zračenja za neke demonstracijske pokuse.

Budući da većina škola još uvijek nije opremljena uređajima za eksperimentalni rad u nastavi fizike te da su isti skupi, ovako napravljen detektor zračenja odličan je alat za proučavanje ionizirajućeg zračenja u školi koji se može napraviti uz minimalan napor i ulaganja. Uređaj se može koristiti u nastavi fizike četvrtog razreda srednje škole kod obrade nastavne jedinice Detekcije ionizirajućeg zračenja. Ovaj diplomski rad trebao bi omogućiti svima zainteresiranima bolje razumijevanje principa rada ionizacijske cijevi i njezino korištenje te kako mogu sami izraditi sličnu ionizacijsku cijev.

## 7. Literatura

- [1] Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti, IX. Praćenje stanja radioaktivnosti okoliša, Članak 68.; Pravilnik o praćenju stanja radioaktivnosti u okolišu, III. Praćenje stanja okoliša objekta, Članak 23. – Članak 29.
- [2] Stručnjaci za zaštitu od ionizirajućeg zračenja. Republika Hrvatska. URL: <https://civilnazastita.gov.hr/podrucja-djelovanja/radioloska-i-nuklearna-sigurnost/sluzba-za-radiolosku-sigurnost/strucnjaci-za-zastitu-od-ionizirajuceg-zracenja/136> (27. 12. 2022.)
- [3] URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/80/Isotopes\\_and\\_half-life.svg/800px-Isotopes\\_and\\_half-life.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/80/Isotopes_and_half-life.svg/800px-Isotopes_and_half-life.svg.png)
- [4] Dželija, M. Ionizirajuće zračenje u biosferi. Split: Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet, 2006.
- [5] Faj, Z. Pregled povijesti fizike. Drugo dopunjeno izdanje. Osijek: Sveučilište Josip Jurja Strossmayera u Osijeku, Pedagoški fakultet, 1996.
- [6] URL: <https://www.ardalpha.de/wissen/geschichte/historische-persoenlichkeiten/roentgen-wilhelm-conrad-wuerzburg-medizin-physik-geschichte-100.html>
- [7] URL: <https://www.nobelprize.org/images/becquerel-12834-content-portrait-mobile-tiny.jpg>
- [8] URL: <https://www.skolskiportal.hr/media/slika-3-600xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx.jpg>
- [9] Ionizacija. // Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. URL: <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=27752> (13. 11. 2022.)
- [10] Rendgensko zračenje. // Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. URL: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=52438> (15. 11. 2022.)
- [11] Ionizirajuće zračenje. // Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. URL: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=27754> (20. 11. 2022.)
- [12] Silari, M. Radiation dosimetry, radiation protection and measurement. Geneva: African School of Fundamental Physics and Applications, CERN, 2018. URL:

[https://indico.cern.ch/event/926495/attachments/2054761/3456575/ASP\\_2020\\_-\\_Silari\\_-\\_Radiation\\_measurements\\_and\\_dosimetry.pdf](https://indico.cern.ch/event/926495/attachments/2054761/3456575/ASP_2020_-_Silari_-_Radiation_measurements_and_dosimetry.pdf) (20. 11. 2022.)

[13] Neutronska zračenje. // Hrvatsko strukovno nazivlje, mrežno izdanje, 2011. URL: <http://struna.ihjj.hr/naziv/neutronska-zracenje/21320/> (21. 11. 2022.)

[14] DeWerd, L. A. Ionization Chamber Instrumentation. Winconsin: University of Winconsin & ADCL Madison, 2009. URL: <https://www.aapm.org/meetings/09SS/documents/06DeWard-IonChambersInstrumentation.pdf> (25. 12. 2022.)

[15] Radioactivity: Detectors and Instrumentation, Lecture 6. Institute for structure and nuclear astrophysics. URL: [https://isnap.nd.edu/assets/248863/radioactivity\\_lecture\\_6.pdf](https://isnap.nd.edu/assets/248863/radioactivity_lecture_6.pdf) (25. 11. 2022.)

[16] Curie – Messmethode. LEIFiPhysik URL: [Curie - Messmethode | LEIFiPhysik](#) (4. 2. 2023.)

[17] Blank, H. Marie und Pierre Curie. 2004. URL: [MuP\\_Curie \(fhsev.de\)](#) (4. 2. 2023.)

[18] Aprile, E.; Bolotnikov, A. E.; Bolozdynya, A. I.; Doke, T. Noble Gas Detectors. Weinheim: WILEY-VCH, 2006.

[19] Tintor, S. Detektori ionizirajućeg zračenja, Završni rad. Karlovac: Veleučilište u Karlovcu, 2022.

[20] Martin, E. J. Physics for Radiation Protection, Third Completely Updated Edition. Weinheim: WILEY-VCH, 2013.

[21] Knoll, F. G. Radiation Detection and Measurement, Third Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000.

[22] URL: <https://www.radiation-dosimetry.org/what-is-application-of-ionization-chambers-definition/> (3. 12. 2022.)

[23] Ionization Chambers, Chapter 12. Toledo: The University of Toledo, 2012. URL: <https://www.utoledo.edu/med/depts/radther/pdf/RDII%20-%20Chapter%2012%20handout.pdf> (10. 12. 2022.)

[24] Interaction of Charged Particles With Matter. Washington: United States Nuclear Regulatory Commission, 2011. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1122/ML11229A666.pdf> (11. 12. 2022.)



- [25] Steinmeyer, P. R. Ion Chambers: Everything You've Wanted to Know (But Were Afraid to Ask). // RSO Magazine. Volume 8, Number 5, 2003.
- [26] Attix, F. H. Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry. Weinheim: WILEY-VCH, 2004.
- [27] Hine, J. G.; Brownell, L. G. Radiation dosimetry. New York: Academic Press Inc., 1956.
- [28] DOE Fundamentals Handbook: Instrumentation and Control. Washington D. C.: U.S. Department of Energy, 1992. URL: <https://www.standards.doe.gov/standards-documents/1000/1013-bhdbk-1992-v1/@@images/file> (28. 12. 2022.)
- [29] Eksikator. // Hrvatsko strukovno nazivlje, mrežno izdanje, 2011.
- [30] Dozimetar. // Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. URL: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=16087> (21. 12. 2022.)
- [31] Kondo, S.; Randolph, M. L. Effect of Finite Size of Ionization Chamber Measurements of Small Photon Sources. Radiation Research, 1960.
- [32] <http://techlib.com/science/ion.html>
- [33] Tablica kvantila Studentove t-razdiobe. <https://web.math.pmf.unizg.hr/~amimica/files/t.pdf>
- [34] Nie, H. N.; Dale H.; Bent C.; Hull H. IBM SPSS Statistics, program za statističku obradu podataka.
- [35] Kurikulum nastavnog predmeta Fizika za osnovne škole i gimnazije. Ministarstvo znanosti i obrazovanja, 2019.
- [36] Paar, V.; Hrlec, A.; Sambolek, A., Rešetar Vadjla, K. Fizika oko nas 4 – udžbenik fizike u četvrtom razredu gimnazije. Školska knjiga, d. d., Zagreb, 2021.

## **8. Životopis**

Vedrana Marić rođena je 5. 5. 1996. godine u Slavonskom Brodu, u Republici Hrvatskoj. Započela je svoje školovanje u Osnovnoj školi “Ivan Meštrović“ u Vrpolju. Svoje obrazovanje nastavila je u Tehničkoj školi u Slavonskom Brodu koju je završila 2015. godine. Iste godine upisala je Preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku, koji je u sastavu Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku. Nakon završetka preddiplomskog studija, 2020. godine, upisala je Sveučilišni diplomski studij fizike i informatike na Odjelu za fiziku. U slobodno vrijeme uči strane jezike.