Maglena komora

Vovra, Magdalena

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:160:444423

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Repository of Department of Physics in Osijek







SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



MAGDALENA VOVRA

MAGLENA KOMORA

Diplomski rad

Osijek, 2015.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



MAGDALENA VOVRA

MAGLENA KOMORA

Diplomski rad

predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku

zbog stjecanja zvanja magistra edukacije fizike i informatike

Osijek, 2015.

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

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. DETEKCIJA ZRAČENJA 2
2.1. Vrste detektora zračenja 3
2.1.1. Detektori prve kategorije 4
2.1.2. Detektori druge kategorije 7
3. WILSONOVA MAGLENA KOMORA 10
4. UTJECAJ IZUMA NA RAZVOJ ZNANOSTI 14
5. IZRADA DIFUZIJSKE MAGLENE KOMORE 19
6. REZULTATI I RASPRAVA 24
6.1. Trag α - zraka 24
6.2. Trag β – zraka 25
6.3. Trag kozmičkih zraka 27
7. PRIMJENA MAGLENE KOMORE U NASTAVI FIZIKE 29
7.1. Obrada nastavne jedinice „Elementarne čestice“ 30
8. ZAKLJUČAK 37
9. LITERATURA 38
ŽIVOTOPIS 42

Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku **Diplomski rad**
Odjel za fiziku

MAGLENA KOMORA

MAGDALENA VOVRA

Sažetak

Diplomski rad s temom Maglena komora podijeljen je u tri dijela. U uvodu je naglašena njezina važnost u fizici. Nakon toga su opisani različiti detektori zračenja i njihove karakteristike. Kao teorijski dio rada opisana je originalna maglena komora koju je izradio C. T. L. Wilson te sva otkrića u znanosti koja su uslijedila. Nakon toga je, kao praktični dio, opisan postupak dizajniranja maglene komore te je predočen krajnji proizvod. Na kraju su prezentirani rezultati eksperimenata pomoću napravljene maglene komore. Kao dodatak je opisana primjena maglene komore u nastavi fizike.

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku

Ključne riječi: detekcija zračenja / ionizirajuće zračenje / maglena komora

Mentor: doc.dr.sc. Marina Poje Sovilj

Komentor: Igor Miklavčić, pred

Ocjenjivači: doc. dr. sc. Denis Stanić
izv. prof. dr. sc. Vanja Radolić

Rad prihvaćen: 08. prosinca 2015. godine

J.J. Strossmayer University in Osijek **Master of Science Thesis**
Department of Physics

CLOUD CHAMBER

MAGDALENA VOVRA

Abstract

Master thesis with the topic Cloud chamber is divided into three parts. The introduction highlighted its importance in physics. Further in the paper, various radiation detectors and their characteristics, are described. As a theoretical part of the thesis, the original cloud chamber created by C.T.L. Wilson and all the discoveries in science that followed, are described. After that, as a practical part of the thesis, the process of designing a cloud chamber is described and its final product is presented. Finally, the paper presents the results of experiments which have been made with that cloud chamber. Application of cloud chamber in teaching physics is described, as an addition.

Thesis deposited in Department od Physics library

Keywords: ionizing radiation / radiation detection / cloud chamber

Supervisor: Marina Poje Sovilj, PhD, Assistant Professor
Igor Miklavčić, Lecturer
Reviewers: Denis Stanić, PhD, Assistant Professor
Vanja Radolić, PhD, Associate Professor
Thesis accepted: December 8, 2015

1. UVOD

Maglenu komoru, koja se još naziva oblačna komora, napravio je Charles Thomson Rees Wilson početkom 20. stoljeća. Često se može susresti naziv Wilsonova komora, u spomen na njezina kreatora. Maglena komora je jednostavan instrument koji se rabi pri eksperimentima čiji je cilj detekcija radioaktivnog zračenja pomoću ionizacije atoma ili sekundarne radijacije. Njezina je primjena vezana za proučavanje pojava u nuklearnoj fizici. Svoju je ulogu u toj grani našla kao ključni instrument za potvrđivanje određenih zakona te otkrivanje novih čestica.

Metoda proučavanja ionizirajućeg zračenja pomoću maglene komore usavršavala se tijekom godina. Razvojem tehnologije, maglena je komora izgubila na važnosti, no pokazano je da je imala znatan utjecaj na razvoj znanosti. Od njezina izuma početkom, pa sve do polovice 20. stoljeća, primijenjena je u mnogim granama znanosti. Osim njihova broja, važno je napomenuti da se radi o šarolikom spektru primjene pa se tako rabila u medicini pri proučavanju krvne plazme i učinaka zračenja na tumore, u meteorologiji za proučavanje klimatskih promjena i grmljavinskih oluja, te u fizici kod proučavanja elementarnih čestica i kozmičkog zračenja.

Primjena maglene komore vrlo je jednostavna. Može se rabiti pri eksperimentima čiji je cilj proučavanje zračenja ili pri demonstracijskim pokusima u nastavi fizike. Želi li se učenicima prikazati potvrde fizičkih zakonitosti, nužno je primjenjivati pokuse u nastavi. Maglenu komoru, za primjenu u nastavi, može se jednostavno napraviti. Ovim radom namjeravalo se načiniti maglenu komoru te provesti eksperimente pomoću nje.

Kakav je utjecaj maglena komora imala na razvoj znanosti govori izjava Rutherforda, Wilsonova suvremenika i suradnika: “Maglena je komora najoriginalniji i predivan instrument u znanstvenoj povijesti“ .

2. DETEKCIJA ZRAČENJA

Ionizacija je pojava nastajanja električki nabijenih čestica koja za rezultat daje par: pozitivno nabijeni ion i elektron. Ionizaciju može izazvati neka električki nabijena čestica, bilo da govorimo o drugom ionu, elektronu, pozitronu, mezonu, protonu, α-čestici ili deuteronu, gibajući se kroz tvar bilo kojeg agregacijskog stanja (čvrsto, tekuće ili plinovito). Do ionizacije će doći ako čestica ima dovoljno veliku kinetičku energiju da u sudaru s neutralnim atomima ili molekulama iz njih izbaci elektrone. Time atomi ili molekule mogu izgubiti po jedan ili više elektrona, a tako izbačeni elektroni se mogu nastaviti gibati i interagirati s drugim neutralnim atomima ili molekulama. Pri takvoj interakciji dolazi do stvaranja negativno nabijenih iona, ili se pak mogu vezati za neki pozitivno nabijeni ion. Postoje dvije vrste ionizacije, primarna i sekundarna. Primarnu ionizaciju izravno uzrokuje neka čestica dok je sekundarna ionizacija proces u kojem se stvaraju ioni djelovanjem iona i elektrona dovoljno velike energije nastalih primarnom ionizacijom. Ionizacija može nastati i zbog termičkoga gibanja atoma i molekula. Pri termičkom djelovanju na atome i molekule dolazi do povećanja njihove brzine te one dobiju dovoljno veliku kinetičku energiju da pri međusobnim sudarima jedni druge ioniziraju. Ionizaciju također može uzrokovati elektromagnetsko zračenje ili čestično zračenje, koje ima dovoljno veliku energiju, od kojeg elektron može preuzeti dio ili svu energiju zračenja [2].

Zračenje je pojava prijenosa energije u obliku fotona ili čestice, stoga je ionizirajuće zračenje pojava prijenosa dovoljno velike energije pri čijem međudjelovanju s tvari dolazi do ioniziranja te tvari. Ionizirajuće zračenje je posljedica promjene energije, strukture atoma ili atomske jezgre što za posljedicu ima emitiranje fotona ili neke druge čestice. Ionizirajuće zračenje nastaje ubrzavanjem nabijenih čestica te kočenjem brzih čestica [3].

Jedna vrsta ionizirajućeg zračenja je elektromagnetsko zračenje. Ovisno o energiji elektromagnetskog zračenja, postoji podjela elektromagnetskog spektra na dva dijela. U jedan dio spadaju zrake manjih energija kao što su infracrvene zrake, vidljiva svjetlost, ultraljubičaste zrake te radiovalovi i mikrovalovi. Njihova energija nije dovoljno velika da ioniziraju čestice oko sebe te one spadaju u neionizirajuće elektromagnetsko zračenje. Elektromagnetsko ionizirajuće zračenje, koje čini drugi dio spektra, ima zrake dovoljno velike energije da iz atoma izbaci elektron. Elektromagnetsko zračenje može nastati i kada se jezgra nalazi u nekom pobuđenom stanju te prelazi iz pobuđenog stanja u neko stanje niže energije. U tom procesu ne dolazi do promjene strukture atoma. Elektromagnetska ionizirajuća zračenja su X – zračenje (rendgensko zračenje), γ – zračenje (gama zračenje) i kozmičko zračenje

.

Drugu vrstu ionizirajućeg zračenja čini zračenje masenim česticama. Ono nastaje raspadom atomske jezgre. Kod takvog raspada dolazi do promjene strukture atomske jezgre. Zračenje nazvano α –zračenje (alfa zračenje) je zračenje roja čestica koji se sastoji od 2 protona i 2 neutrona, odnosno jezgre helija (^4_2He). Jezgra koja spontano zrači jezgru helija pretvara se u novu jezgru koja ima dva protona i dva neutrona manje. α - raspad koji za posljedicu ima zračenje α – čestice možemo općenito napisati: $^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$.

Zračenje nastalo spontanim emitiranjem elektrona ili pozitrona iz nestabilnih jezgara naziva se β-zračenje (beta zračenje). Ovisno o emitiranoj čestici postoje dvije vrste beta zračenja: β^- - zračenje (beta minus zračenje) nastaje emisijom elektrona iz atomske jezgre, dok β^+ - zračenje (beta plus zračenje) nastaje emisijom pozitrona (antielektrona) iz atomske jezgre. Pri β^- raspadu, jedan neutron u jezgri se spontano pretvori u proton, uz emisiju elektrona i antineutrina. Takav se raspad može općenito napisati: $^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{0}\bar{\nu}$. Pri β^+ raspadu, jedan proton u jezgri se spontano pretvori u neutron, uz emisiju antielektrona, odnosno pozitrona i neutrina. Takav se raspad može općenito napisati: $^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{+1}e + {}^{0}_{0}\nu$. Postoji još i neutronsko zračenje kojeg čini roj brzih neutrona. Neutronsko zračenje čini jedan dio kozmičkog zračenja. Postoje i druga zračenja ovakve vrste te su ona uglavnom nazvana prema čestici od kojih se sastoje, npr. proton i protonsko zračenje. Ovakva vrsta zračenja nastaje nuklearnim procesima, u reaktorima te nakon nuklearne eksplozije. Ujedno mogu biti dio kozmičkog zračenja.

Prema Državnom zavodu za radiološku i nuklearnu sigurnost Republike Hrvatske [4], izvori ionizirajućeg zračenja dijele se na radioaktivne izvore i *električne uređaje* koji proizvode ionizirajuće zračenje (npr. rendgenski uređaj i akcelerator).

2.1. Vrste detektora zračenja

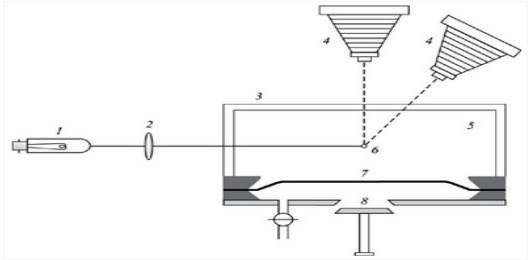
Do međudjelovanja zračenja i materije dolazi kada određene zrake prolaze kroz tvar. Time dolazi do stvaranja pozitivnih iona i elektrona u samoj materiji. Ovisno o osobini ionizacije materije kroz koju zračenje prolazi, postoje različite metode detekcije zračenja, time i različiti detektori zračenja. Općenito se detektori ionizirajućeg zračenja mogu podijeliti u tri skupine, a to su: detektori koji prikazuju gibanje čestica, dozimetri i brojači [5] . Detektori koji prikazuju gibanje čestica kao rezultat daju sliku staze neke čestice. Proučavanjem slike može se doći do potrebnih podataka. Dozimetar je uređaj pomoću kojeg se mjeri učinak ionizacije, odnosno detektira energiju koja je predana tvari. Brojači su zapravo vrsta dozimetra koji broje i daju informacije o prolasku svake pojedinačne električki nabijene čestice ili fotona.

Poseban su slučaj neutronski detektori. Neutroni su čestice bez naboja te detekcija nastaje kada neutroni svojim prolaskom stvaraju nabijene čestice. Pomoću broja nastalih nabijenih čestica određuje se broj neutrona.

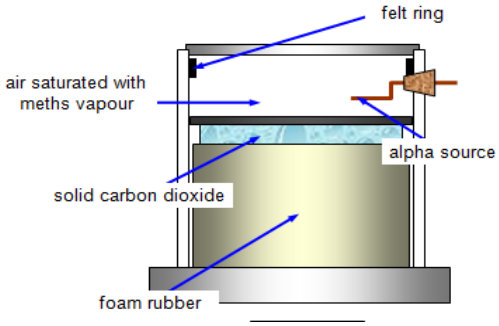
Druga je pak podjela u dvije kategorije koja detektore ionizirajućeg zračenja kategorizira prema rezultatima koje daju. Prva kategorija kao rezultat detekcije daje sliku staze nabijene čestice. Proučavanjem slike moguće je određivanje naboja, brzine i vrste čestice, njezin raspad ili raspršenje. U nju spadaju komora na iskre, Wilsonova maglena komora, difuzijska maglena komora, komora na mjehuriće (mjehuričasta komora) te Čerenkovljev brojač. Detektori druge kategorije bilježe prisustvo zračenja, njegovu vrstu, a neki od njih čak i energiju zračenja. U tu kategoriju spadaju plinski, scintilacijski i poluvodički detektori [3].

2.1.1. Detektori prve kategorije

Wilsonova maglena komora i difuzijska maglena komora pripadaju detektorima prve kategorije i rade na istom principu. Ne moraju nužno biti velikih dimenzija te su, sukladno tome, praktične i jednostavne za upotrebu. Zbog praktičnosti i ovisno o karakteru istraživanja, komoru se može staviti i u magnetsko polje. Unutar komore se nalazi prezasićena vodena para odnosno para alkohola. Da bi se para kondenzirala potrebna su središta kondenzacije. Prolaskom zračenja kroz paru dolazi do pojave ionizacije molekula zraka odnosno alkohola, a ti ioni postaju centri kondenzacije. Para se kondenzira u obliku niza sitnih kapljica te tako ionizirajuće zračenje postaje vidljivo. Fotografiranjem se može sačuvati podatak o putanji čestice te se kasnijim proučavanjem putanje može odrediti vrsta čestice, njezin naboj, masa, brzina, energija i druge karakteristike čestice. Razlika između Wilsonove i difuzijske maglene komore je u metodi stvaranja magle. Wilsonova maglena komora stvara maglu brzim pomicanjem pokretne dijafragme, zbog kojeg dolazi do ekspanzije zasićene pare. Difuzijska maglena komora nema pokretnih dijelova i njezin rad je kontinuiran [6].



Slika 1. Maglena komora [7]

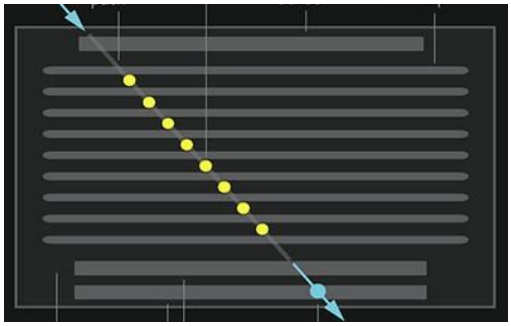


Slika 2. Difuzijska maglena komora: Unutar komore se nalazi filc natopljen alkoholom i izvor alfa zračenja. Isparavanjem alkohola zrak postaje zasičen parama alkohola. Ispod komore se nalazi spremište sa suhim ledom. [8]

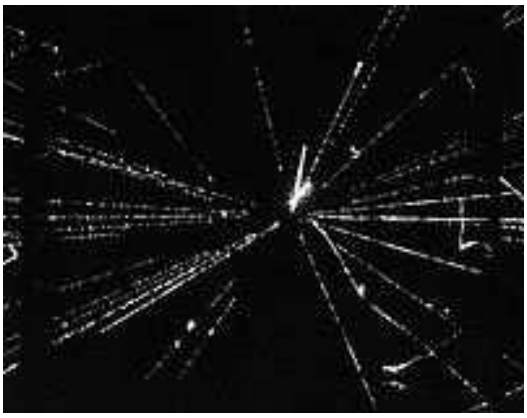


Slika 3. Prikaz putanje čestica pomoću maglene komore [9]

Druga vrsta detektora je komora na iskre. Komora na iskre sastoji se niza paralelnih metalnih ploča postavljenih u hermetički zatvorenu kutiju ispunjenu plinom (helij, neon ili njihova smjesa). Između tankih ploča vlada relativno visoki napon. Relativan u ovom smislu označava da je napon visok ali ne dovoljno da bi prouzročio izboj među pločama. Za detekciju čestice potreban je i scintilacijski detektor, koji spada u vrstu detektora druge kategorije. Visoki se napon uključuje između parova susjednih ploča detekcijom prolaska ionizacijske čestice kroz scintilacijski detektor na vanjskom dijelu kutije. Nastali ioni omogućuju izboj, odnosno iskrenje duž putanje čestice. Time putanja čestice postaje vidljiva.

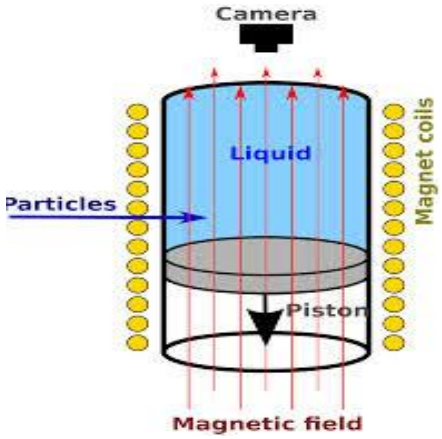


Slika 4. Komora na iskre [10]



Slika 5. Sudar protona i antiprotona snimljen u CERN-u pomoću komore na iskre

Komora na mjehuriće ili mjehuričasta komora je detektor prve kategorije u kojemu je medij bezbojna pregrijana tekućina. Pri prvim se eksperimentima rabio dietil eter, kasnije i ksenon, propan, helij i mnogi drugi, dok je tekući vodik bio najčešće upotrebljavan [11]. Prolaskom ionizirajućeg zračenja u tekućini nastaju mjehurići koji pokazuju putanju zračenja. Izumio ju je Donald A. Glaser 1952. godine te za svoj izum dobio Nobelovu nagradu 1960. godine [12]. Nakon njezina izuma, učestalost upotrebe Wilsonove i difuzijske maglene komore opada ali one nisu izgubile na važnosti.



Slika 6. Komora na mjehuriće: Komora se nalazi u magnetskom polju. Unutar komore se nalazi tekućina. Klipom se regulira volumen tekućine. Na gornjem dijelu posude postavljena je kamera koja slika trag čestice.



Slika 7. Putanje elektrona i pozitrona u magnetskom polju pomoću mjehurićaste komore [13]

Čerenkovljevo zračenje je elektromagnetsko zračenje koje nastaje prolaskom nabijene čestice kroz medij, pri čemu je brzina čestice veća od brzine svjetlosti u tome mediju[14]. Emitira se elektromagnetsko zračenje iz čijeg se smjera širenja može odrediti brzina čestice. To zračenje je vidljivo golim okom. Pojavu je uočio i opisao Pavel A.Čerenkov, objasnili I. M. Frank i I. J. Tamm te su za to dobili Nobelovu nagradu 1958. godine [15]. Čerenkovljev detektor je glavnu ulogu našao kao detektor za detekciju brzih električki nabijenih čestica i za mjerenje njihovih brzina [16]. Čerenkovljev je detektor unaprijeđen i rabi se u mnogim istraživanjima a jedan od njih se bio je postavljen na Sputnik III [17].

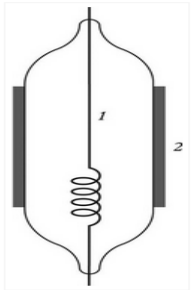
2.1.2. Detektori druge kategorije

Detektore koji spadaju u drugu kategoriju karakterizira bilježenje zračenja i vrste tog zračenja. Prvotni scintilacijski detektor je bio zastor pokriven slojem cinkova sulfida, koji imao široku primjenu. Scintilacijski detektori su standardni detektori γ zračenja. Većina tog zračenja bi kroz plin prošla bez interakcije stoga je za njih potreban gušći medij. Sastoji se od tijela scintilatora, scintilacijskog kristala i fotomultiplikatora. Kada ionizirajuće zračenje prođe kroz scintilacijski kristal u njemu dolazi do pojave scintilacije. Pod pojam scintilacija podrazumijevamo pojavu višestrukih bljeskova vidljive ili ultraljubičaste svjetlosti koje je posljedica izloženosti nekom zračenju. Kao scintilacijski kristali najčešće se upotrebljavaju alkalijski halogenidi aktivirani malim iznosom aktivatorske nečistoće, najčešće talijem [18].

Ionizacijska komora spada u drugu kategoriju detektora i jedan je od prvih detektora ionizirajućega zračenja čiji se rad zasniva na nakupljanju ionskih parova koji nastaju u plinu. Do nakupljanja parova dolazi zbog djelovanja električnog polja komore. Prikladna je za detekciju elektrona i fotona niske energije. Sastoji se od zatvorene cilindrične komore i dvije elektrode. Unutar zatvorene cilindrične komore nalazi se plin čiji je tlak točno utvrđen, najčešće je to neki

plemeniti plin. Prolaskom zračenja kroz komoru, dolazi do ioniziranja molekula plina uzduž staze fotona ili nabijene čestice te dolazi do stvaranja ionskih parova, pozitivni ion i slobodni elektron. Ionski parovi mogu nastati izravnom ionizacijom, ali je moguć i proces pobuđivanja molekula. Pod utjecajem električnog polja pozitivni ioni putuju prema negativnoj elektrodi, katodi, a elektroni prema pozitivnoj elektrodi, anodi. Ionizacijska komora ima mali napon između elektroda ali je taj napon dovoljno velik da razdvoji elektrone i pozitivno nabijene ione te da oni dospiju do elektrode. Ali napon mora biti i dovoljno mali da ne ubrza elektrone na putu do anode, te da oni ne bi interagirali s nekim atomom plina. Struja nam pokazuje brzinu kojom se energija ionizacijskih čestica apsorbira u plinu [19]. Ionizacijska komora se kasnije zamjenjuje proporcionalnim brojačem. Princip rada proporcionalnog brojača malo je napredniji. Napon između anode i katode je veći te elektroni dobivaju veću brzinu te na svojem putu ioniziraju plin. Ukupan broj stvorenih iona proporcionalan je početnomu broju parova nastalih primarnom ionizacijom [20].

Geiger - Müllerovo mjerilo ili brojač je najpoznatiji mjerni instrument za detekciju ionizirajućeg zračenja. Princip rada mu je sličan kao kod proporcionalnog brojača. Načinjen je od metalne cijevi ili staklene cijevi obložene metalom. Metal tako ima ulogu katode dok je anoda smještena unutar cijevi. Između njih vlada visoki napon. Unutar cijevi se nalazi plin. U blizini anode, duž centra cijevi, stvara se velika količina novih ionskih parova. Za razliku od proporcionalnog brojila, broj ionskih parova ne ovisi izravno o broju primarno stvorenih parova. Iz tog razloga ne postoji podatak o energiji ili vrsti zračenja već samo informacija o prisustvu zračenja, odnosno o broju čestica. Geiger - Müllerov brojač služi za detekciju beta i gama zračenja, a rjeđe za detekciju alfa zračenja [21].



GEIGER-MÜLLEROVO BROJILO, Geiger-Müllerova cijev - 1. anoda; 2. katoda

Slika 8. Geiger - Müllerov brojač

Geiger - Müllerov brojač, proporcionalno brojilo i ionizacijska komora daju tri područja rada plinskih detektora u ovisnosti o jakosti električnog polja u njima.

Poluvodički detektori rade na principu promjene električne vodljivosti poluvodičkih kristala zbog prisustva zračenja. Primjenjuju se od sredine 20. stoljeća i najbolji su detektori gama zračenja. Postoji razlika u izboru poluvodiča pa tako postoje čisti ili intrinsični poluvodiči, koji se sastoje samo od istovrsnih atoma, i primjesni ili ekstrinsični poluvodiči, koji nastaju dodavanjem primjesa (što se još naziva i dopiranje) radi promjene električnih svojstava. S obzirom na dodanu primjesu nositelji naboja mogu biti elektroni i šupljine. Poluvodiče u kojima su elektroni većinski nositelji naboja nazivamo poluvodiči n-tipa, a poluvodiče u kojima su šupljine većinski nositelji naboja nazivamo poluvodiči p-tipa [22]. Kao poluvodiči se najčešće rabe germanij uz primjesu litija, silicij uz primjesu litija te germanij posebno visoke čistoće. HPGe (High-purity Germanium) ima mali energetski razmak između vrpci te mu, povišenjem temperature, vodljivost raste. Da bi se to izbjeglo, potrebno ga je rashladiti tekućim dušikom.

Oni su formirani u pn-diodu kroz koju prolazi zračenje te ono na putu gubi energiju ionizacijom atoma kristalne rešetke. Tako se stvaraju parovi pozitivnih i negativnih nositelja naboja, što su kod poluvodiča šupljine i elektroni. U poluvodičkim je kristalima ionizacija veća nego u plinovima jer imaju veću gustoću [23].

Postoje i drugi detektori koji imaju precizniju namjenu kao što su detektori niskoenergijskih ili detektori visokoenergijskih nabijenih čestica. Postoje i detektori koji otkrivaju prisutnost određene čestice kao što su neutronski detektori i neutrino detektori.

Razvojem elektronike razvijaju se brojne metode detekcije ionizirajućeg zračenja. Detektori su omogućili razvoj i razumijevanje moderne fizike.

3. WILSONOVA MAGLENA KOMORA

Krajem 19. i početkom 20. stoljeća istraživanja atomske i nuklearne fizike ostvaruju sve veći zamah. Najveći utjecaj na takav razvoj događaja imalo je Röntgenovo otkriće X ili rentgen zraka 1895. godine [24]. Mnogi su znanstvenici istraživali tu novu vrstu zraka. Jedan od njih je škotski fizičar Charles Thomson Rees Wilson [25].

Charles T. R. Wilson je započeo svoje eksperimente pokušavajući napraviti oblake ekspanzijom vlažnog zraka [26]. Na takvu ga je vrstu eksperimenta potaknuo Aitkenov brojač kondenziranih čestica. Aitkenova ekspanzivna komora je radila na principu adijabatskog širenja plina u komori [27]. Wilson je kreirao vlastite uređaje te je tako njegova aparatura za kvantitativnu ekspanziju služila je za širenje vlažnog zraka na prilagodljiv volumen. Radila je na principu povećanja volumena zraka zasićenog parom [28]. Adijabatskim širenjem dolazi do pada temperature. Pri snižavanju temperature zraka u kojem se nalazi zasićena para nastaje prezasićena vodena para. Ona se kondenzira na sitnim česticama koje prolaze kroz zrak u komori. Čestice mogu biti prašina, nečistoća, naelektrizirane molekule i atomi [29].

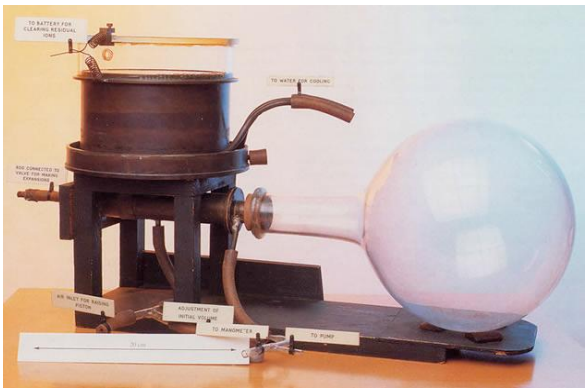


Slika 9. Prva komora za ekspanziju [30]

Nakon otkrića X-zraka, Wilson ih je proučavao pomoću svoje aparature. Ustanovio je da se para kondenzira pod utjecajem X-zraka. Zračenje izbija elektrone iz molekula plina u komori te se para kondenzira oko molekula s manjkom elektrona. Kasnije je uočio istu pojavu i kod drugih ionizirajućih sredstava [31]. Proučavanjem različitih ionizirajućih sredstava uočio je da negativni ioni bolje kondenziraju pare od pozitivnih iona. Njegov rad na ponašanju iona i kondenzaciji jezgri ometao ga je da se bavi razvojem komore na oblake. Ideja o čestičnoj prirodi α i β zračenja dala mu je uvidjeti da se putanja ionizirajućih čestica može napraviti vidljivom. Kondenzirana

voda se također može i fotografirati. Tvrdio je da je najvažnija svrha slika, koje pokazuju putanje čestica, da se potvrde tumačenja koji su, u dosta slučajeva, već bila opće prihvaćena. Sam je zatim rekao da je naišao na nešto zanimljivije od optičkog fenomena koji je nakanio istraživati [32].

Svoju je aparaturu usavršavao dok nije dobio maglenu komoru kakvu mi danas znamo. Komora je usavršena 1923. godine. Prema Leksikonu fizike [33] još se naziva i oblačna komora. U Leksikonu fizike se maglena komora opisuje kao uređaj važan za fiziku čestica.



Slika 10. Originalna maglena komora načinjena u Cavendishevu laboratoriju [34]

Njegovi najraniji rezultati pokazuju putanje α - čestica (slika 11) i β - čestica (slika 12). Na slici 11 je prikazana pravocrtna putanja α – čestice, dok je na slici 12 prikazana zakrivljena putanja β – čestice. Na slici se može vidjeti da se ioni, koji su na putanji β – čestice, nalaze u parovima ili grupama. Time je pokazano da izbačeni elektroni mogu imati energiju dovoljnu da sami ioniziraju atome oko njih. Uočio je da su putanje pri velikim brzinama elektrona izrazito pravocrtne, dok pri manjim brzinama dolazi do pojave zakretanja putanje [35].



Slika 11. Trag α - čestice



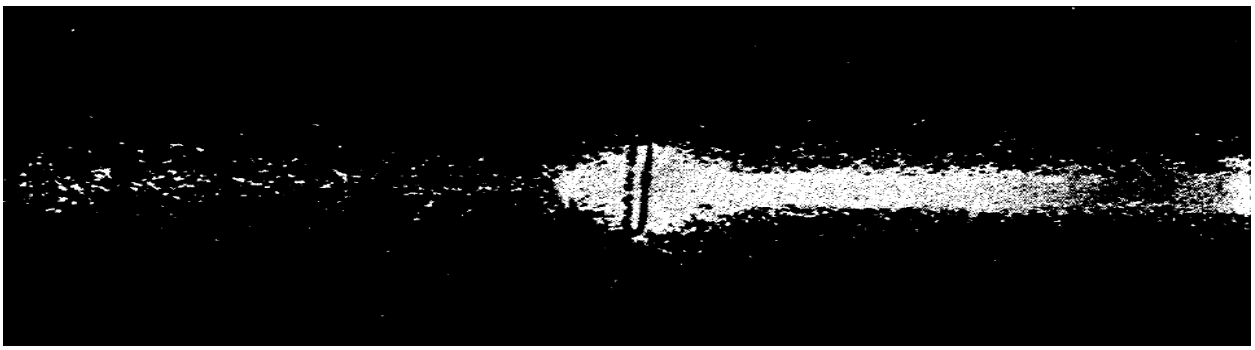
Slika 12. Trag β - čestice

Kroz maglenu komoru izravno se pusti snop X-zraka te se dobije jasna slika putanja elektrona izbačenih iz plina. Slika pokazuje sve elektrone pa se iz nje mogu odrediti točke izvora svake zrake te početni smjer svakog izbačenog elektrona iz atoma (slika 13).



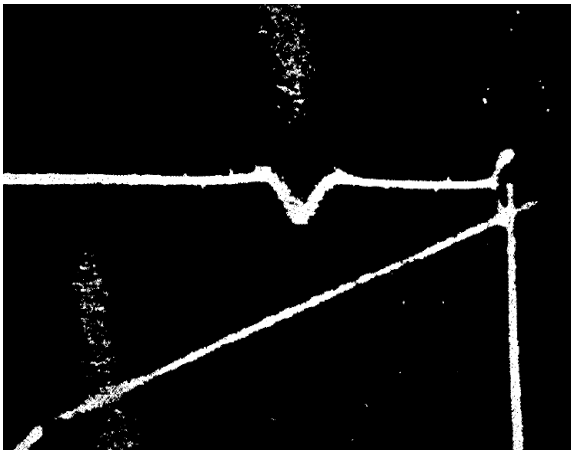
Slika 13. Trag snopa X-zraka

Umetanje bakrene ploče na put X-zrakama, da bi se ispitao njezin karakter, pokazalo je jasnu sliku apsorpcije radijacije bakrene pregrade (slika 14) .

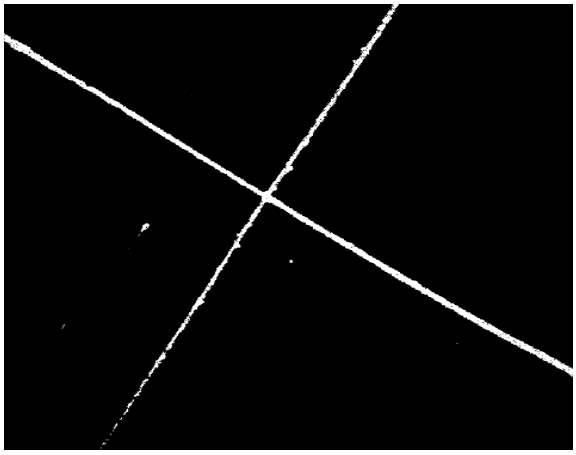


Slika 14. Ionizacija X-zrakama

Kasnija proučavanja pokazuju staze pozitivnih i negativnih iona u električnom polju oslobođenim prolaskom čestice kroz maglenu komoru prije njezine ekspanzije. Prvi primjer (slika 15) prikazuje atom torija i α-česticu. Drugi primjer (slika 16) prikazuje delta zračenje.



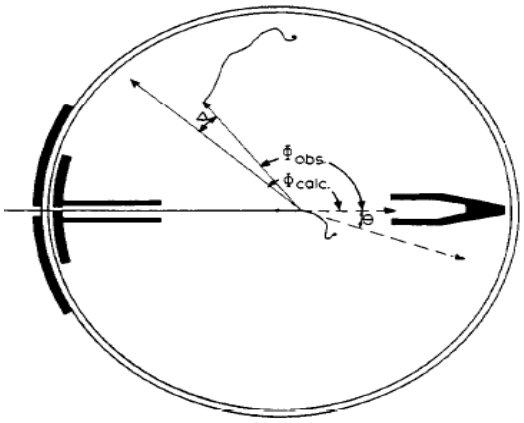
Slika 15. Razdvajanje iona (1)



Slika 16. Razdvajanje iona (2)

Maglenom je komorom započelo jedno sasvim novo istraživanje u fizici, proučavanje zračenja koje dolazi iz svemira. To zračenje nazvano je kozmičko zračenje. Iako toga nije bio svjestan, Wilson je vjerojatno prvi načinio fotografiju kozmičkog zračenja 1912. godine pomoću maglene komore [36].

No ona je najvažniju ulogu pružila pri dokazivanju Comptonove teorije raspršenja X-zraka. Zbog pojave neelastičnog raspršenja fotona o nabijenu česticu dolazi do smanjenja energije fotona (foton X ili γ zračenja) i povećanja valne duljine. Ta pojava se naziva Comptonov učinak i uočena je 1922. godine [37]. Wilson je svojim pokusima uspio potvrditi Comptonovu teoriju odnosno prisutnost elektrona koji se odbijaju. Za to su 1927. godine dobili Nobelovu nagradu za svoje djelovanje u području fizike.



Slika 17. Dijagramski predočeno odbijanje elektrona u maglenoj komori

Snop X – zraka prolazi kroz komoru. Eksperimenti su prikazali da na svaki odbijeni elektron ostane energije od raspršene X – zrake da se stvori β – zraka. Raspršene X – zrake se nastavljaju gibati kao fotoni. Na slici je pokazana razlika kuta odbijenih elektrona dobivenog računski i kuta dobivenog eksperimentom u odnosu na kut skretanja fotona.

4. UTJECAJ IZUMA NA RAZVOJ ZNANOSTI

Izumom maglene komore, znanosti je pružena mogućnost uvida u aktivnosti subatomskog svijeta.

O nekolicini znanstvenika toga vremena, koji su u svom radu upotrebljavali maglenu komoru, i sam je Wilson bio informiran. Dvije su znanstvenice, Irene Joliot-Curie i Lise Meitner, zasebno proučavale doseg α – čestice pomoću maglene komore. Iako je surađivao s Arthurom H. Comptonom te imaju jednak doprinos za Nobelovu nagradu iz 1927. godine, Compton je sa svojim suradnicima proučavao i valnu duljinu γ – zračenja.

Sir Ernest Rutherford je otkrio da se jezgre nekih elemenata, npr. dušika, mogu raspasti pri sudaru s brzim α - česticama te tako emitirati protone. Eksperimentalni dokaz prepustio je japanskom fizičaru Shimizu. On je zatim konstruirao manju komoru s kamerom u nadi da će dokazati taj raspad. Njegova komora je bila nešto modernija te automatizirana pa je slikala svakih 15 sekundi. Njegov je rad zatim preuzeo Patrick M. S. Blackett.

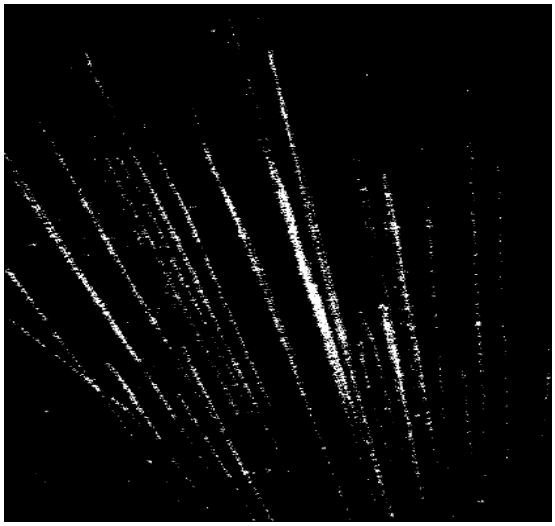
Patrick M. S. Blackett je maglenu komoru upotrebljavao pri svojim eksperimentima kojima je proučavao račvaste tragove koji nastaju pri sudaru α - čestice s atomima kisika, vodika i helija. Ako je *M* masa α - čestice i *m* masa jezgre, te uz pretpostavku da su energija i količina gibanja očuvane dolazi do relacije među masama:

$$\frac{M}{m} = \frac{\sin(2\theta+\varphi)}{\sin\varphi} \qquad (1)$$

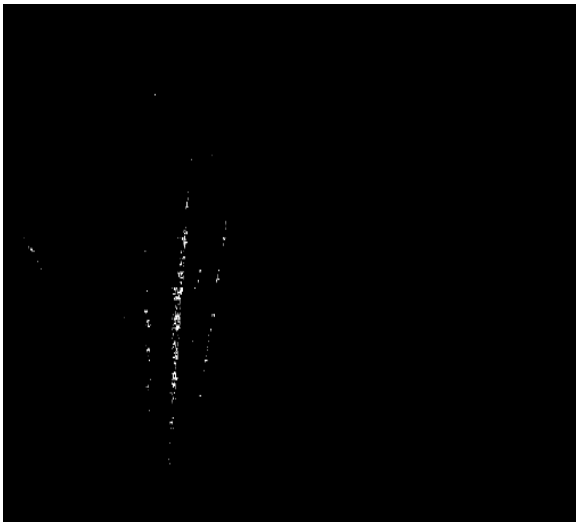
Budući da se kut skretanja α – čestice (φ) i kut projekcije jezgre (Θ) mogu odrediti sa slike dobivene u maglenoj komori, može se odrediti i omjer masa. Patrick M. S. Blackett je u svojim izračunima dobio približne mase kisika, vodika i helija te je zaključak njegovih istraživanja bio da je sudar elastičan, odnosno da ne dolazi do gubitka energije pri sudaru [38].



Slika 18. Elastični sudar alfa čestice s jezgrom kisika



Slika 19. Elastični sudar alfa čestice s jezgrom vodika



Slika 20. Elastični sudar alfa čestice s jezgrom helija

U suradnji s Giuseppeom P.S. Occhialinijem proučavao je kozmičko zračenje pomoću maglene komore izložene magnetskom polju. Da bi se odredio predznak naboja čestice nužno je znati u

kojem se smjeru čestica gibala. U svom su radu naveli 4 načina promatranja pojava sa slika [39]. Ako čestica prođe kroz metalnu ploču dovoljne debljine da uzrokuje znatan gubitak energije, morala je prijeći s područja veće jakosti magnetskog polja na područje manje jakosti. Ako čestica pri sudaru sa slobodnim elektronom proizvede sekundarnu česticu, njezina će putanja ukazati na smjer putanje čestice. Ako skup putanja čestica odstupa od nekog područja, postoji vjerojatnost da se te čestice nisu gibale u tom području. Te ako je promatrana staza usmjerena vertikalno, veća je vjerojatnost da se čestica gibala prema dolje. Slika prikazuje jednu od prvih fotografija velikog broja čestica kozmičkog zračenja (slika 21).

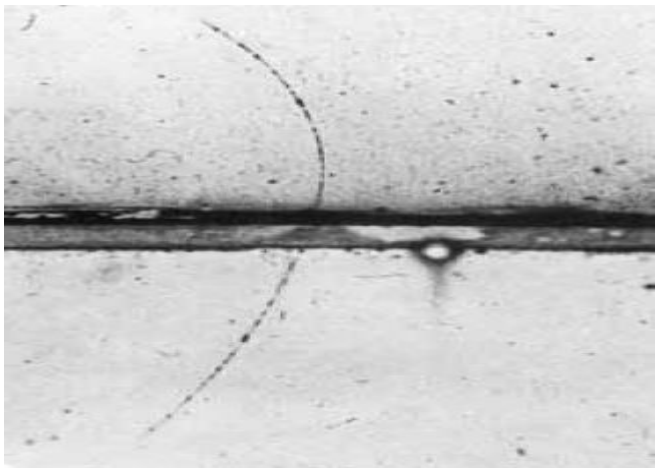


Slika 21. Pljusak kozmičkog zračenja

Za razvoj metode proučavanja pomoću Wilsonove maglene komore te doprinos u nuklearnoj fizici i proučavanju kozmičkog zračenja dobio je Nobelovu nagradu 1948. godine.

Lord James Chadwick je proučavao β – zračenje i doseg δ – zračenja te je 1935. godine dobio Nobelovu nagradu za otkriće neutrona. Neutron ima sposobnost prodiranja i cijepanja jezgre najtežih elemenata. Dugo vremena prije Jamesa Chadwicka raspravljalo se o postojanju neutralne čestice. Ernest Rutherford je smatrao da bi se proton i elektron mogli ujediniti u neutralnu česticu čija bi masa bila slična masi vodika. Proučavanje radioaktivnosti berilija je eksperimentalno pokazalo da se zračenje sastoji od čestica koje imaju masu sličnu masi protona. No njihov je doseg mnogo veći od dosega protona te je James Chadwick pretpostavio da te čestice nemaju naboj [40].

Istraživanjem kozmičkog zračenja pomoću maglene komore eksperimentalno je dokazano postojanje antičestice elektrona koja je nazvana pozitron. Za svoje je otkriće Carl David Anderson 1936. godine dobio Nobelovu nagradu [41]. Smjestio je maglenu komoru u magnetsko polje te izložio kozmičkom zračenju. Jakost magnetskog polja bila je 24 000 G, odnosno 2,4 T. Brojeći kapljice, ustanovio je da postoje čestice s pozitivnim i s negativnim jediničnim nabojem. One s negativnim jediničnim nabojem identificirao je kao elektrone. Čestice s pozitivnim jediničnim nabojem je u početku identificirao kao protone, koje su do tada bile jedine poznate čestice s pozitivnim nabojem. Kada bi te čestice bile protoni, imale bi manju energiju i bile bi izložene znatno većoj ionizaciji. Pozitron, koji je otkriven 1933. godine, ima jednaku masu kao i elektron dok mu je naboj jednakog iznosa ali drugog predznaka.



Slika 22. Trag putanje pozitrona [42]

Na slici se moglo uočiti da je gornji dio zakrivljeniji od donjeg te da se to događa zbog smanjenja momenta količine gibanja. Do smanjenja momenta dolazi pri prolasku čestice kroz metalnu ploču. Smjer čestice u magnetskom polju pokazao je da je ona pozitivno nabijena. U jednom od sljedećih istraživanja para čestice i njezine antičestice uočena je pojava anihilacije. Anihilacija je pojava poništenja pri sudaru neke čestice i njezine antičestice. Tada dolazi do nastanka fotona ili neke masene čestice. Pri sudaru elektrona i pozitrona nastaju dva fotona dok kod čestica i njihovih antičestica veće kinetičke energije može nastati i neka masena čestica.

Carl D. Anderson je zaslužan i za otkriće miona. Sa svojim je suradnikom Henrijem S. Neddermeyerom pokušao eksperimentalno dokazati postojanje piona. Pion je čestica koju je teoretski postulirao Hideki Jukava u svojoj teoriji jakih interakcija. No oni su otkrili da njihova čestica ima masu 207 puta veću od mase elektrona te tako ustanovili da se radi o još neotkrivenoj elementarnoj čestici.

Maglena se komora rabila i pri otkriću nepoznate čestice kaona koji se još naziva K-mezon. Otkriven je 1947. godine pri proučavanju kozmičkog zračenja. To je čestica bez naboja i vrlo kratkog životnog vijeka, svega 10^{-10} sekundi [43].

Walther Bothe je proučavao povezanost X – zraka i β – zraka s gibanjem radioaktivnih iona. Promatrao je prolazak X - zraka kroz plin vodika u dvije komore između kojih je stavljena prepreka. U jednoj od njih je došlo do kočenja elektrona te je uspio odrediti točnost vremenske slučajnosti među zapisima mjerenja. Ta vremenska razlika je iznosila 10^{-4} sekundi. Za svoju slučajnu metodu, koja se još naziva i metoda koincidencije, te otkrića koja su uslijedila dobio je Nobelovu nagradu 1954. godine. Njegovim su otkrićima položeni temelji nuklearne spektroskopije [44].

John D. Cockcroft i Ernest T.S. Walton su pomoću maglene komore proučavali interakciju brzih čestica s jezgrama atoma. Za svoj pionirski rad na transmutaciji atomske jezgre pomoću umjetno ubrzanih čestica dobili su Nobelovu nagradu 1951. godine. Razvili su uređaj, akcelerator, kako bi napravili još prodornije zračenje. Koristeći električno polje, protoni se ubrzaju do velikih brzina. 1932. godine bombardirali su litij s protonima. Raspadom jezgre litija proizvedene su dvije alfa čestice [45].

Leon M. Lederman, Melvin Schwartz i Jack Steinberger uspjeli su proizvesti snop neutrina koristeći visoko energetski akcelerator. 1962. godine su otkrili da u nekim slučajevima, umjesto da se proizvedu elektroni, proizvedu se mioni. Oni su oko 200 puta masivniji od elektrona. Time su pokazali postojanje nove vrste neutrina, mion neutrino. Pri svojim su istraživanjima koristili više detektora, a jedan od njih je i maglena komora [46].

5. IZRADA DIFUZIJSKE MAGLENE KOMORE

Originalna maglena komora temeljila se na detekciji zračenja pomoću zasićene vodene pare. Prikaz staze čestica bio je kratkotrajan. Metoda je poboljšana primjenom alkohola i suhog leda. Takva se maglena komora naziva difuzijska maglena komora. U difuzijskoj maglenoj komori prikaz putanje čestice je dugotrajniji [47]. Difuzijsku maglenu komoru konstruirao je Alexander Langsdorf 1936. godine. Princip njezina rada opisan je u jednom od prethodnih poglavlja ovog rada.

Za izradu maglene komore mogu se rabiti mnogi predmeti koje ima svako kućanstvo. No neke od njih potrebno je nabaviti u posebnim institucijama ili tvornicama. Za izradu difuzijske maglene komore potrebna je posuda koja će činiti komoru, pregrada i posuda u kojoj će se nalaziti proizvod za hlađenje. U Republici Hrvatskoj je zakonom zabranjena prodaja visokopostotnog alkohola, stoga se mora nabaviti u posebnim institucijama. Upotreba suhog leda, odnosno ugljikova dioksida u krutom stanja, u našim je krajevima rijetkost, pa ga se može nabaviti samo u posebnim tvornicama.

Pri izradi komore upotrebljen je stakleni akvarij dimenzija 19,2 cm x 14,2 cm x 15 cm. Za komoru se mogu rabiti stakleni akvariji drugih dimenzija kao i razne staklenke za zimnicu. Osim staklenih predmeta, mogu se rabiti i plastični predmeti, kao što su plastične čaše ili posude. Kako je detekcija zračenja pomoću komore temeljena na vizualnom tragu čestica, nužan uvjet je da posuda bude providna.



Slika 23. Akvarij

Pri dnu jedne bočne strane potrebno je napraviti otvor za radioaktivni izvor. Za ovaj je akvarij to kružni otvor promjera 3,5 cm koji je udaljen 1 cm od ruba akvarija. Na njega je zalijepljen

poklopac s boce koja se rabi u aparatima za vodu. U središtu tog poklopca postoji pomični dio koji se može ukloniti ili ponovo postaviti, ovisno o tome je li postavljen radioaktivni izvor.



Slika 24. Otvor s plastičnim poklopcem

Potrebno je napraviti spremište u kojem će biti proizvod za hlađenje maglene komore. Može se rabiti neka gotova posuda, a može se rabiti i stiropor. Pomoću stiropora se mogu napraviti posude proizvoljnih dimenzija. Pri izradi komore rabljen je stiropor koji je sastavljen tako da tvori posudu volumena 590 cm^3. Stiropor je obložen drvenim okvirom a unutar njega je postavljena limena posuda. Limenu posudu nije potrebno pričvrstiti za stiropor.



Slika 25. Stiropor



Slika 26. Limena posuda

Kako bi odvojili komoru od postolja potrebno je imati ploču koja mora imati dimenzije nešto veće od dimenzija komore. Ona treba biti obojena u crno zbog bolje vidljivosti. Pri izradi komore rabljena je limena ploča dimenzija 14,8 cm x 20 cm. Obložena je crnom trakom koja se rabi za električnu izolaciju. Ploča se može jednostavno obojiti crnom bojom.



Slika 27. Postolje s crnom pločom

Kao proizvod za hlađenje maglene komore rabi se tekući dušik ili suhi led. Tekući dušik je dušik koji pri temperaturi od -195,8°C prelazi u tekuće agregacijsko stanje. Suhi led je ugljikov dioksid u krutom agregacijskom stanju. U tom se obliku ugljikov dioksid nalazi na temperaturi od -79 °C [48]. Može se nabaviti u tvornicama koje se bave proizvodnjom i prodajom industrijskih i medicinskih plinova. Manje količine se mogu napraviti pomoću požarnog aparata punjenog ugljikovim dioksidom. Kako se ugljikov dioksid u tekućem obliku može nalaziti samo pod tlakom iznad 5.1 atm, pri standardnom tlaku prelazi iz plinovitog u kruto stanje procesom adijabatskog širenja. Pri adijabatskom širenju plina dolazi do smanjenja unutrašnje energije, time i temperature zraka. Na taj način dolazi do kristalizacije plina u kruto stanje. Za kristalizaciji ugljikova dioksida iz požarnog aparata potrebna je platnena vreća ili jastučnica. U nju stavimo cijev aparata, uklonimo sigurnosnu iglu te aktiviramo aparat. Iz dobivene količine suhog leda, pomoću pribora, odvojimo potrebnu količinu u limenu posudu. Ostatak suhog leda možemo staviti u posudu te pohraniti u hladnjak za kasniju upotrebu.



Slika 28: Suhi led

Na dno akvarija potrebno je staviti materijal koji će upiti alkohol. Za to se najčešće rabi filc. Pri izradi komore rabljena je izolacijska traka za vodovodne cijevi. Ona je s jedne strane ljepljiva te se može pričvrstiti za dno akvarija. Nakon toga, potrebno je zatvoriti postolje crnom pločom te na nju staviti komoru.



Slika 29. Maglena komora

U originalnoj maglenoj komori s vodenom parom, Wilson je uočio da su bolji centri kondenzacije negativni ioni. Thomas H. Laby eksperimentalno je uočio da se pare bolje kondenziraju na pozitivnim ionima. Većinu testiranih organskih para činila je neka vrsta alkohola [49]. Važno je rabiti alkohol sa što većim udjelom alkohola, odnosno što manjim udjelom vode. Najbolje je rabiti alkohol čistoće 95% do 100%. Za eksperimente s načinjenom maglenom komorom rabljen je 95% -tni etilni alkohol (etanol C_2H_5OH).

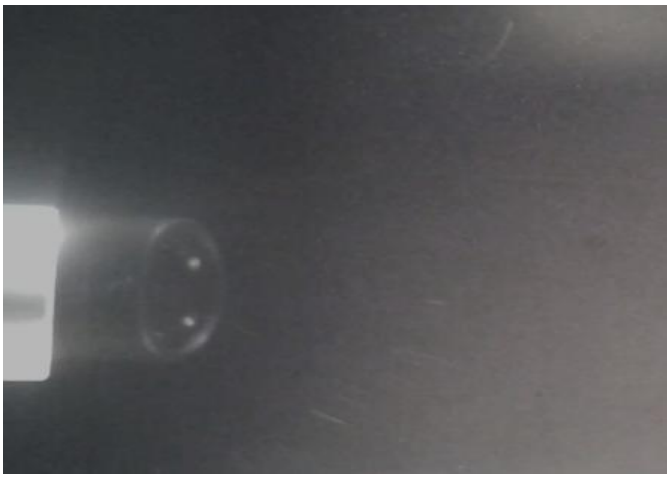
Važnu ulogu ima osvijetljenost komore. Rabimo li izvore svjetlosti koji nisu dovoljno jaki, nećemo uočiti pojavu kondenzacije. Za eksperimente s načinjenom komorom rabljen je dijaprojektor. Kao izvor ionizirajućeg zračenja rabljeni su radioaktivni izvori stroncij (^{90}Sr) i americij (^{241}Am). Americij aktivnosti 74 kBq rabljen je kao izvor α - zračenja, dok je stroncij aktivnosti 74 kBq rabljen kao izvor β^- - zračenja.

6. REZULTATI I RASPRAVA

Pomoću maglene komore mogu se odrediti veličine koje karakteriziraju pojedinu česticu. Takve su veličine specifična ionizacija, moment količine gibanja čestice u magnetskom polju, domet i masa čestice. Specifična ionizacija je pojam koji označava broj stvorenih iona po jedinici duljine puta koji nastaju prolaskom čestice radioaktivnog zračenja kroz tvar [49]. Eksperimentima je pokazano da specifična ionizacija ovisi o naboju čestice koja se giba, i o brzini njezina gibanja. Čestice, koje se gibaju sporije kroz neki medij, stvorit će više iona po jedinici duljine puta nego one s većom brzinom kroz isti medij, ako im je naboj jednak.

6.1. Trag α - zraka

α – zračenje je među prvim zračenjima čije su se karakteristike proučavale pomoću maglene komore. Na temelju prethodnih istraživanja pokazano je da su staze α – zraka ravne. Proizvode velik broj iona po jedinici duljine, a zbog toga je lako uočiti njihov trag. Njihov se domet, ovisno o izvoru, mijenja od 2,8 cm do 8,6 cm. Nakon provedenih eksperimenata s izvorom α – zračenja dobiveni su sljedeći rezultati:

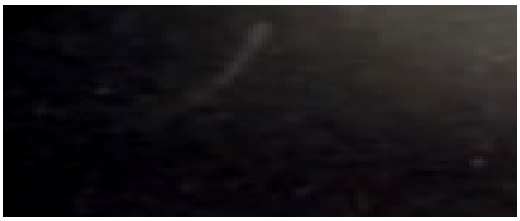


Slika 30. α - zraka

Na slici 30 uočena je jedna α - zraka (dno slike). Može se vidjeti da joj je staza ravni pravac kako je opisano od najranijih istraživanja. Promotrimo li detaljnije sliku, možemo uočiti da postoji još jedna zraka koja je na kraju zakrivljena (vrh slike). Do zakrivljenosti na kraju staze dolazi zbog sudara s jezgrama atoma plina koje se nalaze u komori. Tako se može razaznati prisutnost drugih čestica. Sljedeće slike prikazuju odvojene staze ravnog i zakrivljenog traga α – zraka.



Slika 31. Ravni trag



Slika 32. Zakrivljeni trag

Alkohol u komori isparava, te se koncentracija njegove pare povećava. Nakon što je radioaktivni izvor duže vrijeme bio u komori, došlo je do veće kondenzacije pare alkohola. Na slici 33 prikazan je snop α – zraka u komori.



Slika 33. Snop α – zraka

Slika pokazuje da su svi tragovi α – zraka pravci. Na slici se može vidjeti da staze nisu jednake duljine. Kako bi došlo do pojave centara kondenzacije, zračenje mora djelovati na atome plina i iz njih izbaciti elektrone. Proučavanjem slika α – zraka, P. M. S. Blackett je ustanovio da one moraju posjedovati određenu energiju, time i brzinu, kako bi iz atoma izbile elektron [51]. Količina energije koju posjeduje α – čestica iz nekog radioaktivnog izvora ovisi o vrsti tog izvora. Isti izvor može zračiti čestice s različitim energijama. Iz tog razloga dolazi do razlike u duljini staza α – zraka.

6.2. Trag β – zraka

U usporedbi s α – zrakama, β – zrake imaju tanje tragove staza. Proizvode manje iona po jedinici duljine, stoga je njihov trag teže uočiti. Budući da se ioni nalaze u parovima ili grupama, lako je odrediti specifičnu ionizaciju. Nakon provedenih eksperimenata s izvorom β – zračenja dobiveni su sljedeći rezultati:



Slika 34. β - zraka

Izdvoji li se sa slike trag β – zrake (slika 34), jasno se može vidjeti da je trag zakrivljen (slika 35). Istražujući svojstva β – zračenja, Wilson je uočio da staze mogu biti ravne ili zakrivljene, ovisno o brzini čestica. Brzine β – čestica mogu dosezati gotovo do iznosa brzine svjetlosti. Brze β – čestice daju ravne staze dok sporije daju zakrivljene staze. Sudari li se sporija β – čestica s nekim elektronom jednake mase, tako da je kut između njihovih staza oko 90˚, dolazi do smanjenja kuta između njihovih staza. Pri sudaru dolazi do povećanja energije, time i relativne mase čestice, te zbog toga dolazi do smanjenja kuta.



Slika 35. Trag β – zrake (a)

Na slici se jasno mogu uočiti parovi i grupe iona na stazi β – zrake. Pomoću takvih slika može se odrediti specifična ionizacija. Kada se odredi specifična ionizacija β – zrake, može se odrediti i brzina gibanja.



Slika 36. Trag β – zraka (b)

Slika 36 prikazuje stazu još jedne β – zrake. U usporedbi s tragom prethodne slike, može se ustanoviti da je trag dulji i ravniji. Ta β – čestica ima veću brzinu od čestice s prethodne slike. Njezina putanja nije u potpunosti ravna, te možemo zaključiti da β - čestica ima veću brzinu od prethodne ali spada u kategoriju sporih β – čestica.

6.3. Trag kozmičkih zraka

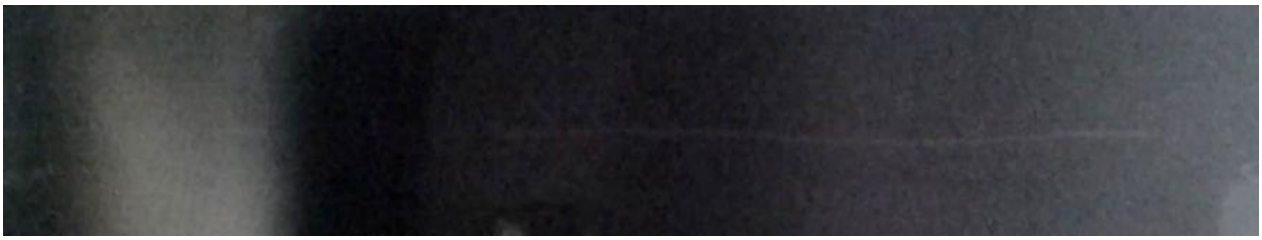
Pomoću maglene komore može se detektirati kozmičko zračenje. Kozmičke zrake su električno nabijene čestice velike energije koje na Zemlju dolaze iz svemira [51]. Najveći dio tog zračenja čine protoni, a čine ga i α – čestice i elektroni. Vrlo mala količina tog zračenja prodre kroz atmosferu. U atmosferi dolazi do pojave sekundarnog kozmičkog zračenja čiji je rezultat nastanak novih čestica. To su najčešće π – mezoni i κ – mezoni koji prelaze u stabilne mione. U komori, u kojoj nema radioaktivnog izvora, dolazi do nastajanja tragova ionizirajućeg zračenja. Tragovi kozmičkih zraka mogu se pojaviti u bilo kojem dijelu komore, dok je zračenje iz radioaktivnog izvora lokalizirano blizu izvora. Za pojavu traga kozmičke zrake u komori potrebno je duže vremena i puno strpljenja. Za vrijeme izvođenja eksperimenata uočene su svega 3 kozmičke zrake. Razlog su veće dimenzije načinjene komore i kratko vrijeme snimanja. Sljedeće slike prikazuju detekciju kozmičkih zraka pomoću načinjene komore.



Slika 37. Kozmička zraka (a)



Slika 38. Kozmička zraka (b)



Slika 39. Kozmička zraka (c)

Carl D. Andersona i Seth H. Neddermayera proučavali su kozmičko zračenje na različitim nadmorskim visinama [53]. Usporedili su rezultate na nultoj nadmorskoj visini i visini od 4300 metara iznad morske razine. Rezultati su pokazali da je na visini od 4300 m učestalost pljuskova kozmičkog zračenja 8 puta veća nego na nultoj nadmorskoj visini. Kako se Osijek nalazi na nadmorskoj visini 90 m, očekivano je da maglena komora detektira manji broj kozmičkih zraka. Slika 37 i slika 38 prikazuju staze zraka čiji je trag puno kraći od traga na slici 39. Kratke tragove su ostavili elektroni koji su dio kozmičkog zračenja. Kako kod sekundarnog zračenja dolazi do nastajanja miona, može se pretpostaviti da je taj dugi i ravni trag je ostao kada je kroz maglenu komoru prošao mion. Mion je čestica negativnog naboja i mase oko 200 puta veće od elektrona. Kao takva, može doći do površine Zemlje.

7. PRIMJENA MAGLENE KOMORE U NASTAVI FIZIKE

Nastava fizike u četvrtom razredu gimnazije uključuje gradivo o atomskim jezgrama, elementarnim česticama i razvoju svemira. Kod takvih tema može doći do nerazumijevanja i zbunjenosti učenika. Učenicima je teško vizualizirati neke veličine, kao što je na primjer veličina elektrona, stoga se često primjenjuje analogija raznim primjerima te se koristi povezivanje s temama iz kemije. Problem proizlazi iz kompleksnosti gradiva, velikog broja novih, teško objašnjivih pojmova te slabije opremljenosti učionice.

Funkcionalna maglena komora može se napraviti kako je opisano u jednom od prethodnih poglavlja ovoga rada. Konačni rezultat pokusa je slika te je učenicima pristupačnija za tumačenje i zaključivanje o gibanju sitnih, oku nevidljivih čestica. Maglena komora se može primijeniti pri obradi nastavnih tema kao što su: Detekcija zračenja, Elementarne čestice te Kozmičko zračenje.

Koristi li se u nastavi moderna tehnologija, učitelji mogu slikovitije i učinkovitije prenositi znanje. Stoga u nastavku slijedi primjer jednog nastavnog sata u kojem se primjenjuje maglena komora.

7.1. Obrada nastavne jedinice „Elementarne čestice“

Naziv škole: Gimnazija

Mjesto: Osijek

Razred: četvrti

I. PRIPREMA ZA IZVOĐENJE NASTAVNE TEME

Ime i prezime: Magdalena Vovra

Naziv nestavne cjeline: Osnove nuklerane fizike

Naziv nastavne teme: Elementarne čestice

Nastavno područje (predmet): Fizika

II. OČEKIVANA POSTIGNUĆA I NJIHOVO VREDNOVANJE

Cilj nastavne teme: Sudjelovanjem u postupcima proučavanja osnovnih elementarnih čestica, učenik treba steći sposobnost podjele poznatih elementarnih čestica u dvije osnovne skupine (vrste) te identificirati vrstu međudjelovanja elementarnih čestica.

Ključni pojmovi: leptoni, hadroni, čestice, antičestice

Obrazovna postignuća:

1. Definirati dvije osnovne vrste elementarnih čestica.
2. Opisati vrste međudjelovanja elementarnih čestica.
3. Grupirati poznate elementarne čestice u dvije osnovne skupine.
4. Usporedi svojstva čestica i antičestica.
5. Opisati međudjelovanje čestice i njezine antičestice.

Odgojna postignuća:

Prepoznati zakonitost**,** uočiti da postoje različite podjele elementarnih čestica, naglasiti važnost postojanja elementarnih čestica.

Vrednovanje obrazovnih postignuća:

1. Obzirom da postoji veliki broj elementarnih čestica;
    1.1. Zašto ne proučavamo sve njih?
    1.2. Koje su dvije osnovne vrste elementarnih čestica?
    1.3. Koje su podvrste hadrona?
2. Ako znamo da postoje 4 fundamentalne sile;

2.1. Kojim silama međudjeluju leptoni?

2.2. Kojim silama međudjeluju hadroni?

3. Poznate elementarne čestice razvrstaj u dvije osnovne vrste elementarnih čestica:

elektron, proton, neutron, antielektron, neutrino, antineutrino, foton

Lepton	Hadron

4. Obzirom da postoji i podjela elementarnih čestica na čestice i antičestice;

4.1. Kako se odnose njihove mase?

4.2. Ako imaju električne naboje, kakvog su oni iznosa?

5. Ako dođe do međudjelovanja čestice i njezine antičestice:

5.1. Opiši što se događa pri međudjelovanju čestice i njezine antičestice.

5.2. Što se događa s ukupnom masom?

5.3. Kako se naziva taj proces?

III. ORGANIZACIJA NASTAVNOG PROCESA

Nastavne metode: Izlaganje, interaktivni razgovor	**Nastavni postupci:** Prezentiranje, demonstriranje, interaktivno vrednovanje, komuniciranje	**Oblici rada:** Frontalni rad	**Nastavna sredstva i pomagala:** maglena komora, ploča, kreda
Literatura: Paar, V.; Šips, V. FIZIKA 4, udžbenik za 4. razred gimnazije. Zagreb: Školska knjiga, 2006. Horvat, D.; Hrupec, D. *Fizika 4 – Pojmovi i koncepti*, udžbenik za 4. razred gimnazija, Zagreb: Neo Didacta, 2010.			

IV. TIJEK NASTAVNOG PROCESA

Aktivnost nastavnika	*Aktivnost učenika*
Uvodni dio (otvaranje problema)	
Ponavljanje gradiva detekcije ionizirajućeg zračenja, apsorbirane i ekvivalentne doze - Nabrajanje elementarnih čestica s kojima su upoznati.	Učenici odgovaraju na pitanja, sudjeluju u razgovoru. Učenici sudjeluju u razgovoru.
Središnji dio (konstruiranje modela)	
-Predstavljanje dvije osnovne vrste elementarnih čestica. -Učenici su upoznati s pojmom antičestice te im se sada iskazuju svojstva antičestice u odnosu na čestice. - Opisivanje procesa aninilacije čestice i antičestice. - Opisivanje pokusa kojima je moguće vidjeti tragove elementarnih čestica te upoznavanje učenika s pripremljenim pokusom.	Učenici sudjeluju u razgovoru, samostalno proučavaju tablicu elementarnih čestica, pronalaze one s kojima su upoznati. Na primjeru elektrona i antielektrona iskazuju masu i naboj. Učenici sudjeluju u razgovoru, samostalno opisuju anihilaciju elektrona i antielektrona. Učenici prate izlaganje, proučavaju slike iz udžbenika te ih povezuju sa svojstvima čestica i antičestica. Prate izvođenje pokusa te samostalno traže tragove elementarnih čestica.
Završni dio (primjena modela)	
Pitanja za ponavljanje obrađenog gradiva.	Učenici odgovaraju na pitanja, sudjeluju u razgovoru.

TIJEK SATA

UVODNI DIO (8 minuta)

Ponoviti gradivo o detekciji ionizirajućeg zračenja.

Pitanje 1: S kojim ste se vrstama radioaktivnog zračenja upoznali? (*Očekivani odgovor:* Alfa zračenje, beta plus i beta minus zračenje i gama zračenje)

Pitanje 2: Što je ionizacija? (*Očekivani odgovor:* Oslobađanje elektrona iz elektronskih omotača atoma i molekula prolaskom radioaktivnih čestica)

Pitanje 3: Što nastaje ionizirajućim djelovanjem radioaktivnog zračenja? (*Očekivani odgovor:* Slobodni elektroni i pozitivni ioni)

Pitanje 4: Što je apsorbirana doza i koja je njezina mjerna jedinica? (*Očekivani odgovor*: Apsorbirana doza ionizirajućeg zračenja jest energija što je ozračena tvar upija po jednom kilogramu mase, mjerna jedinica je grej, Gy)

Pitanje 5: Što je ekvivalentna doza i koja je njezina mjerna jedinica? (*Očekivani odgovor*: Ekvivalentna doza predstavlja škodljiv utjecaj ionizirajućeg zračenja na tvari. Iskazuje se umnoškom apsorbirane doze i faktora učinka, mjerna jedinica je sivert, Sv)

Do sad ste upoznali nekoliko elementarnih čestica, koje su to?

Učenici nabrajaju elementarne čestice: elektron, proton, neutron, antielektron – pozitron, neutrino, antineutrino i foton.

Fizičari su otkrili još stotine drugih elementarnih čestica od kojih je većina vrlo nestabilna u kratkog vremena poluraspada.

Sada ćemo pobliže razmatrati elementarne čestice pa si zapišite naslov današnje teme:

Elementarne čestice

GLAVNI DIO (32 minute)

Postoje dvije osnovne vrste elementarnih čestica a to su leptoni i hadroni [paarova knjiga].

Leptoni su čestice koje međusobno i s drugim česticama djeluju samo slabom, elektromagnetskom i gravitacijskom silom.

Hadroni su čestice koje međudjeluju jakom, slabom, elektromagnetskom i gravitacijskom silom. Hadroni se dijele na mezone i barione. Ako pogledate sliku u vašoj knjizi, ondje je prikazan manji broj elementarnih čestica. Za svaku od njih naznačen je uobičajeni naziv, kratica,

električni naboj te masa izražena u odnosu na masu elektrona. Kakve su mase mezona i bariona u odnosu na elektron?

Učenici trebaju zaključiti da mezoni imaju masu koja je po iznosu slična masi elektrona dok barioni imaju puno veće mase.

Nakon razgovora i ispravnog zaključka o mezonima i barionima učenici dobivaju zadatak.

Zadatak: Poznate elementarne čestice razvrstaj u dvije osnovne vrste elementarnih čestica:

elektron, proton, neutron, antielektron - pozitron, neutrino, antineutrino

Lepton	Hadron
(elektron, pozitron, neutrino, antineutrino)	*(proton, neutron)*

Iz slike ste također mogli primijetiti da postoji podjela elementarnih čestica na čestice i antičestice. Pa tako svakoj čestici pripada njezina antičestica, a iz slike možete vidjeti da su im kratice jednake, uz dodatak ravne crte iznad znaka za antičesticu. Ako čestica ima električni naboj, njezina antičestica ima naboj jednakog iznosa a suprotnog predznaka. Mase čestice i antičestice su jednake.

Čestica i antičestica mogu međudjelovati, pa u slučaju njihova sudara, one mogu u potpunosti iščeznuti, dok se njihova ukupna masa (2m) pretvara u foton energije $E=2mc^2$. Taj proces se naziva anihilacija čestice i antičestice.

Na taj način dolazi do anihilacije elektrona i pozitrona: $e^- + e^+ \rightarrow 2\,\gamma$

Moguć je i obratan proces, da pri sudaru dvaju fotona nastane par čestice i njezine antičestice.

Prolaskom kroz plin ili tekućinu elektronički nabijena čestica izaziva ionizaciju. Duž puta čestice ostaje trag pozitivnih iona koji su predočeni kao kapljice tekućine u plinu ili mjehurići plina u tekućini. U knjizi su prikazane slike od kojih jedna prikazuje tragove elementarnih čestica pri nekim složenijim procesima dok druga prikazuje stvaranje para elektrona i antielektrona u tzv. mjehuričastoj komori u kojoj se nalazi tekući vodik. Promotrite putanje elektrona i antielektrona. Pošto se mjehuričasta komora nalazi u homogenom magnetskom polju, njihove putanje su spiralne. Kako im je naboj suprotan, one se zakreću u suprotnim smjerovima.

Postoji i komora u kojoj se nalazi plin a takva je maglena komora koju imamo u učionici.

Pokus: Detekcija ionizirajućeg zračenja

Pokus je unaprijed pripremljen te ću vas sada provesti kroz pribor i postupak izvođenja pokusa.

Maglenu komoru možete lako napraviti. *Pribor* koji vam je potreban je akvarij, alkohol (96-100%), crna metalna ploča ili metalna ploča koja se oblijepi crnom izolir-trakom, suhi led, drvena kutija obložena stiroporom, baterijska svjetiljka.

Suhi led je ugljikov dioksid u krutom agregacijskom stanju. Može se napraviti pomoću požarnog aparata koji je punjen s CO_2.

Postupak izvođenja: U kutiju obloženu stiroporom staviti suhi led. Materijal na dnu akvarija dobro natopiti alkoholom te ljepljivom trakom pričvrstiti preokrenuti akvarij za ploču. Cijeli sustav tada staviti na posudu sa suhim ledom. Sačekati 15-20 minuta.

Nakon nekog vremena stvori se magla koja je nastala zbog isparavanja alkohola. Kada nabijena čestica prođe kroz maglu, ostavlja svoj trag kao kapljice tekućine koje možemo vidjeti ako zamračimo prostoriju i komoru osvijetlimo svjetiljkom.

Tada zamračimo prostoriju i učenici traže tragove putanja čestica. U bilježnicu skiciraju putanje čestica kao rezultat pokusa.

ZAVRŠNI DIO (5 minuta)

Za domaću zadaću istražite kakvi još detektori postoje osim onih koje ste do sada upoznali. (Geiger-Mullerov detektor radioaktivnog zračenja, maglena i mjehuričasta komora)

Sada ćemo ponoviti što smo danas radili.

Pitanje 1: Koje su dvije osnovne vrste elementarnih čestica? (*Očekivani odgovor*: Leptoni i hadroni.)

Pitanje 2: Koje su podvrste hadrona? (*Očekivani odgovor*: Mezoni i barioni.)

S obzirom na to da postoji i podjela elementarnih čestica na čestice i antičestice;

Pitanje 3: Kako se odnose njihove mase? (Očekivani odgovor: Mase su im jednake.)

Pitanje 4: Ako imaju električne naboje, kakvog su oni iznosa? (*Očekivani odgovor:* Jednakog iznosa ali suprotnog predznaka.)

Ako dođe do međudjelovanja čestice i njezine antičestice:

Pitanje 5: Opiši što se događa pri međudjelovanju čestice i njezine antičestice. (*Očekivani odgovor*: Pri sudaru one mogu potpuno iščeznuti.)

Pitanje 6: Što se događa s ukupnom masom? (*Očekivani odgovor*: Pretvara se u foton energije $E=2mc^2$.)

Pitanje 7: Kako se naziva taj proces? (*Očekivani odgovor*: Anihilacija)

Plan ploče

<u>Elementarne čestice</u>

Leptoni su čestice koje međusobno i s drugim česticama djeluju samo slabom, elektromagnetskom i gravitacijskom silom.

Hadroni su čestice koje međudjeluju jakom, slabom, elektromagnetskom i gravitacijskom silom. Hadroni se dijele na mezone i barione.

Zadatak: Poznate elementarne čestice razvrstaj u dvije osnovne vrste elementarnih čestica:

elektron, proton, neutron, antielektron - pozitron, neutrino, antineutrino

Lepton	Hadron
(elektron, pozitron, neutrino, antineutrino)	*(proton, neutron)*

Anihilacija elektrona i pozitrona: $e^- + e^+ \rightarrow 2\,\gamma$

Pokus: Detekcija ionizirajućeg zračenja

Pribor: akvarij, alkohol (96-100%), metalna ploča, crna izolir-traka, suhi led, drvena kutija obložena stiroporom, baterijska svjetiljka.

Postupak izvođenja: U kutiju obloženu stiroporom staviti suhi led. Materijal na dnu akvarija dobro natopiti alkoholom te ljepljivom trakom pričvrstiti preokrenuti akvarij za ploču. Cijeli sustav tada staviti na posudu sa suhim ledom. Sačekati 15-20 minuta.

8. ZAKLJUČAK

Prije izuma maglene komore čestice se moglo proučavati samo u gomilama. Nakon njezina izuma moglo se proučavati ponašanje čestica u plinovima. Proučavane su karakteristike subatomskog svijeta te otkrivene nove čestice.

Pomoću maglene komore mogu se proučavati kozmičke zrake, dok se u komoru mogu staviti i radioaktivni izvori ciljanog zračenja. Prethodnim istraživanjem radova koji su se bavili proučavanjem karakteristika zračenja, izdvojeno je nekoliko karakteristika pojedinih zračenja.

Trag koji za sobom ostavi α – zračenje kratak je i gust. Domet α – čestice je malen, stoga i trag mora biti kratak. Koliko će trag biti gust ovisi o energiji α – čestice, odnosno o radioaktivnom izvoru α – zračenja. Čestica koja ima veću energiju, međudjelovati će s više atoma u pari te će njezin trag biti gušći. Dobiju li se tragovi snopa α – čestica, može se uvidjeti da isti izvor zrači čestice različitih energija.

Trag koji za sobom ostavi β – zračenje tanak je jer proizvodi manje iona po jedinici duljine puta. Hoće li trag biti ravan ili zakrivljen ovisi o brzini β – čestice. Brze čestice ostavljaju ravan trag, dok sporije ostavljaju zakrivljen trag. Iskazane karakteristike ne uključuju utjecaj magnetskog polja na β – zračenje. Kada bi se komora nalazila u homogenom magnetskom polju, iz smjera u kojem bi se gibala emitirana čestica mogli bi ustanoviti o kojoj se vrsti β – zračenja radi.

Glavninu primarnog kozmičkog zračenja čine protoni, no primarno zračenje rijetko dosegne do površine Zemlje. Pomoći maglene komore može se detektirati sekundarno kozmičko zračenje čiju glavninu čine mioni i elektroni. Trag koji za sobom ostavi masivna negativno nabijena čestica mion tanak je i dug.

Eksperimentima pomoću izrađene maglene komore potvrđene su opisane karakteristike zračenja. Analiza slika bazirana je na tragu i dosegu staze. Detaljnijom analizom bi se mogle odrediti različite fizičke veličine koje karakteriziraju ionizirajuće zračenje.

Izrada difuzijske maglene komore jednostavna je, a njezina upotreba svestrana. Prema tome, može se napraviti kod kuće te rabiti pri demonstraciji u nastavi fizike. Neke komponente koje su potrebne za njezinu izradu mogu se lako nabaviti. Ipak, postoje komponente čija je nabavka zahtjevnija.

9. LITERATURA

[1] The Museum at the Cavendish Laboratory. Wilson's Cloud Chamber. 2015. http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/museum/area2/cabinet1.htm (Dostupno: 12.09.2015.)

[2] Ionizacija // Hrvatska enciklopedija online, 2015. http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=27752 (Dostupno: 28.08.2015.)

[3] Dželalija, M. Ionizirajuće zračenje u biosferi, Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet, 2005.

[4] Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost, Republika Hrvatska. 2012.-2013. http://cms.dzrns.hr/zastita_od_zracenja/izvori (Dostupno: 15.09.2015.)

[5] Detekcija i zaštita od zračenja. https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Detekcija_i_zastita_od_zracenja.pdf (Dostupno: 28.08.2015.)

[6] Osmokrović, P. Osnovi nuklearne fizike. Beograd : Akademska misao, 2008

[7] Wilsonova komora. // Hrvatska enciklopedija online, 2015. http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=66207 (Dostupno: 26.07.2015.)

[8] The cloud chamber. http://www.schoolphysics.co.uk/age16-19/Nuclear%20physics/Radioactivity/text/Cloud_chamber/index.html (Dostupno: 13.08.2015.)

[9] Harvard Natural Sciences Lecture Demonstrations. Cloud Chamber. https://www.youtube.com/watch?v=e3fi6uyyrEs (Dostupno: 28.08.2015.)

[10] Griffith Observatory. Cosmic rays. http://griffithobservatory.org/exhibits/edgeofspace_cosmicrays.html (Dostupno: 28.08.2015.)

[11] Glaser, D. A. Elementary particles and bubble chambers. Nobel Lecture, December 12, 1960.

[12] Komora s mjehurićima // Hrvatska enciklopedija online, 2015. http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=32604 (Dostupno: 26.07.2015.)

[13] Subatomic particle // Encyclopædia Britannica, 2015. http://www.britannica.com/science/subatomic-particle/images-videos/Electrons-and-positrons-produced-simultaneously-from-individual-gamma-rays-curl/3048

(Dostupno: 26.07.2015.)

[14] Čerenkovljevo zračenje // Hrvatsko strukovno nazivlje online, 2015. http://struna.ihjj.hr/naziv/cerenkovljevo-zracenje/11745/#naziv (Dostupno: 25.11.2015.)

[15] Čerenkov, P. A. Radiation of particles moving at a velocity exceeding that of light, and some of the possibilities for their use in experimental physics. Nobel Lecture, December 11, 1958

[16] Čerenkovljev efekt ili Čerenkovljevo zračenje // Proleksis enciklopedija online, 2015. http://proleksis.lzmk.hr/5214/ (Dostupno: 13.08.2015.)

[17] Kovačić, Z. Leksikon nobelovaca : 1901 - 2002. Zagreb : Nart trgovina, 2003

[18] Scintilacijsko brojilo // Hrvatska enciklopedija online, 2015. http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=55064 (Dostupno: 13.08.2015.)

[19] Ionizacijska komora // Hrvatska enciklopedija online, 2015. http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=27753 (Dostupno: 13.08.2015.)

[20] Proporcionalno brojilo // Hrvatska enciklopedija online, 2015. http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=50674 (Dostupno: 13.08.2015.)

[21] Geiger - Müllerovo brojilo // Hrvatska enciklopedija online, 2015. http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=21512 (Dostupno: 13.08.2015.)

[22] Poluvodiči // Hrvatska enciklopedija online, 2015. http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=49299 (Dostupno: 20.08.2015.)

[23] Poluvodička brojila // Hrvatska enciklopedija online, 2015. http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=49300 (Dostupno: 20.08.2015.)

[24] Roentgen's discovery of the x-ray. http://www.bl.uk/learning/cult/bodies/xray/roentgen.html (Dostupno: 20.08.2015.)

[25] Wilson, C.T.R., British physicist. // Encyclopædia Britannica, 2015. http://www.britannica.com/biography/C-T-R-Wilson (Dostupno: 26.07.2015)

[26] CTR Wilson's cloud chamber. http://www.sciencemuseum.org.uk/online_science/explore_our_collections/stories/ctr_wilsons_cloud_chamber (Dostupno: 13.06.2015.)

[27] McMurry P. H. The History of Condensation Nucleus Counters // Aerosol Science and Technology, 33:4, 2000, str. 297-322

[28] Wilson C.T.R. On an expansion apparatus for making visible the tracks of ionising particles in gases and some results obtained by its use. Proc. R. Soc. Lond. A 87*(595):* 1912*;* 277-292

[29] Đurić, B. Fizika, Deo 5: Teorija relativnosti - Atomska i nuklearna fizika. Beograd :

Naučna knjiga, 1969.

[30] Early Expansion Chamber. http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/museum/area2/images/cabinet1_3.jpg (Dostupno:13.06.2015.)

[31] Wilson C.T.R. On the condensation nuclei produced by in gases by the action of Rontgen rays, Uranium rays, ultraviolet light and other agents. Philos. Trans. A R. Soc. Lond. 192*:* 1899*;* 403–453.

[32] Wilson C.T.R. On a method of making visible the paths of ionising particles through a gas. Proc. R. Soc. Lond. A 85*:* 1911*;* 285–288

[33] Wilson, Charles Thomson Rees ; oblačna komora // Leksikon fizike / Vjera Lopac. Zagreb : Školska knjiga, 2009

[34] Wilson's original Cloud Chamber. http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/museum/area2/images/cabinet1_2.jpg (Dostupno:13.06.2015.)

[35] Wilson, C. T. R. On the cloud method of making visible ions and the tracks of ionizing particles. Nobel Lecture, December 12, 1927. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1927/wilson-lecture.pdf (Dostupno: 14.06.2015.)

[36] Bowler, S. The Royal Society of Edinburgh Conference // C T R Wilson, a Great Scottish Physicist: His Life, Work and Legacy. 7 December 2012.

[37] Compton, A. H. X-rays as a branch of optics. Nobel Lecture, December 12, 1927. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1927/ (Dostupno: 17.08.2015.)

[38] Cloud chamber researches in nuclear physics and cosmic radiation//Nobel lecture/ Blackett, P.M.S. 1948. godina, str.97-119

[39] Blackett, P. M. S., Occhialini, G. P. S.; Some Photographs of the Tracks of Penetrating Radiation // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, Vol. 139, No. 839, 1933, str. 699- 720

[40] Chadwick, J. The neutron and its properties. Nobel Lecture, December 12, 1935. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1935/chadwick-facts.html (Dostupno: 28.08.2015.)

[41] The production and properties of positrons // Nobel lecture / Anderson, C.D. 1936. godina, str. 365-376

[42] Anderson, C. D. The Positive Electron. *Physical Review* 43 (6): 1933. 491–494.

https://www.aarst.org/proceedings/2005/2005_01_A_Diffusion_Cloud_Chamber_for_Viewing_Alpha_Tracks.pdf (Dostupno: 28.08.2015.)

[43] Quantum mechanics. // Encyclopædia Britannica, 2015. http://www.britannica.com/science/quantum-mechanics-physics/Applications-of-quantum-mechanics#ref611921 (Dostupno: 07.09.2015.)

[44] Bothe, W. The Coincidence Method. Nobel Lecture, 1954. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1954/bothe-lecture.html (Dostupno: 07.09.2015.)

[45] Experiments on the interaction of high-speed nucleons with atomic nuclei // Nobel Lecture/ Cockcroft , J . D . 1951. godina, str. 167-184

[46] Observations in Particle Physics from Two Neutrinos to the Standard Model // Nobel Lecture/ Lederman, L. M. 1988. godina, str. 511-539

[47] Burkhart, J. F. A Diffusion Cloud Chamber for Viewing Alpha Tracks // The American Association of Radon Scientists and Technologists, 2005; 1-11.

[48] Suhi led iz CO_2 - URL: http://www.messer.hr/products/suhiledco2/index.html (Dostupno: 22.10.2015.)

[49] Laby, T. H. The supersaturation and nuclear condensation of certain organic vapors // Phil. Trans. Roy. Soc. 208, 1908.; 445-474.

[50] Specifična ionizacija // Struna – Hrvatsko strukovno nazivlje, 2015. http://struna.ihjj.hr/naziv/specificna-ionizacija/21186/ (Dostupno: 15.09.2015.)

[51] Blackett, P.M.S. On the Analysis of α – Ray Photographs. // Proc. R. Soc. Lon. A, 102. 1922 ; 294-318.

[52] Kozmičke zrake // Struna – Hrvatsko strukovno nazivlje, 2015. http://struna.ihjj.hr/naziv/kozmicke-zrake/11499/#naziv (Dostupno: 15.09.2015.)

[53] Anderson, C.D. ; Neddermayer, S.H. Cloud Chamber Observations of Cosmic Rays at 4300 Meters Elavation and Near Sea – Level. // The Physical Review. 50 (4), 1936; 263-271.

ŽIVOTOPIS

Autorica Magdalena Vovra rođena je 05. lipnja 1989. godine u Vinkovcima. U progonstvu je započela svoje osnovnoškolsko obrazovanje u Osnovnoj školi Vladimir Nazor u Đakovu. Pri povratku u rodno mjesto nastavlja školovanje u Osnovnoj školi Zrinski u Nuštru te ga završava u Osnovnoj školi Zrinski u Tordincima. Nakon toga je, 2004. godine, upisala Prirodoslovno-matematičku gimnaziju u Vinkovcima. Po završetku srednje škole, 2008. godine, upisala se na Preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku, koji je u sastavu Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Nakon završetka preddiplomskog studija, 2013. godine, upisala je Sveučilišni diplomski studij fizike i informatike na Odjelu za fiziku.