

Određivanje distribucije intenziteta ionskog snopa od interesa za ozračavanje fuzijskih materijala

Grgurin, Filomena Marija

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:989359>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-04**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Filomena Marija Grgurin

ODREĐIVANJE DISTRIBUCIJE INTENZITETA
IONSKEG SNOPA OD INTERESA ZA
OZRAČIVANJE FUZIJSKIH MATERIJALA

Diplomski rad

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
FIZIKA; SMJER NASTAVNIČKI

Filomena Marija Grgurin

Diplomski rad

**Određivanje distribucije intenziteta ionskog
snopa od interesa za ozračivanje fuzijskih
materijala**

Voditelj diplomskog rada: dr. sc. Tonči Tadić

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2020.

Prvenstveno se zahvaljujem mentoru dr. sc. Tončiju Tadiću na iskazanom povjerenju i strpljenju tijekom izrade diplomskoga rada.

Hvala na svesrdnoj pomoći cijeloj grupi u Laboratoriju za interakcije ionskih snopova: uljepšali ste mi svaki dan proveden na IRB-u. Posebno hvala akademiku dr. sc. Milku Jakšiću na sugestijama, idejama i savjetima. Također, hvala ekipi iz sobe na svakoj riječi ohrabrenja i na strpljenu prilikom odgovaranja na moja pitanja. Iskrenu zahvalnost dugujem Marinu Vukšiću koji me bodrio kada je bilo najteže, hvala na pomoći i savjetima.

Ipak, najveće hvala mojoj obitelji na bezuvjetnoj podršci, ljubavi i strpljenu: hvala što ste me podržavali u svim životnim situacijama. Tata, hvala ti na tome što si vjerovao u mene i na svemu što si mi pružio u životu. Mama, hvala na razumijevanju i svakoj riječi podrške tijekom mog studiranja i života, hvala ti što si me upućivala na pravi put. Hvala mom bratu Jakovu: uvijek si bio tu kada je trebalo. Hvala mojoj sestri Anastaziji na svakoj riječi ohrabrenja kada sam bila na kraju snaga te na nesebičnoj podršci. Vi ste mi omogućili da danas budem to što jesam, uvijek ste bili uz mene i hvala vam na tome!

Hvala Angeli, Dori i Matei na moralnoj podršci i osloncu kada mi je to jako trebalo: bez vas ne bi bila ista osoba. Hvala Ani, Andrei, Klaudiji Antoniji i Nikolini na svakoj toploj riječi, podršci i veselju koje su donijele u moj život. Hvala svim kolegama i kolegicama koje sam stekla tijekom studiranja, a posebno veliko hvala Katarini i Valentini na velikom veselju, olakšavanju studiranja te na svakoj izgovorenoj riječi podrške i ohrabrenja: Hvala vam što ste vjerovale u mene od prvog dana!

Sažetak

Ispitivanje otpornosti materijala na oštećenja uzrokovana ionizirajućim zračenjem koje se emitira u fuzijskom reaktoru, provodi se najučinkovitije simulacijama tog procesa. Jedan od postupaka koristi zračenje materijala pomoću više ionskih snopova, gdje se uzorak istovremeno zrači dvjema (ili trima) vrstama iona. Jedan od uvjeta koje takvi eksperimenti moraju ostvariti je postizanje homogene distribucije defekata, odnosno postizanje jednolikog oštećenja materijala po dubini koji je izlože snopom iona. Ovakvim pristupom moguće je simulirati velik tok neutronske zračenja energije 14,1 MeV što je dominantno zračenje koje se stvara u fuzijskom reaktoru. Međutim, ioni koji simuliraju uvjete neutronske interakcije s materijalom, gube energiju nejednoliko duž svoga puta u materijalu i pri tom na kraju puta postižu maksimum predaje energije. S tom svrhom se unutar eksperimentalnih komora s dvostrukim ionskim snopovima, nalazi sustav rotirajućih zaustavnih folija. Tim sustavom se mijenja energija ubrzanih iona iz akceleratora, odnosno podešava se doseg iona, nastojeći osigurati jednoliko deponiranje energije u materijalu koji se ispituje. U ovom diplomskom radu ispitivano je ponašanje ionskog snopa koji prolazi kroz sustava rotirajućih zaustavnih folija od aluminijske folije. Korišten je ionski snop željeza Fe^{4+} energije 10 MeV prilikom prolaska kroz aluminijske folije debljine 0,65 μm , 1,2 μm i 1,8 μm . Dobiveni eksperimentalni podaci teorijski se objašnjavaju kutnim širenjem ionskog snopa radi višestrukog elastičnog raspršenja teških iona te kočenja iona u aluminijskim folijama. Cilj ovog rada je usporedba mjerene i modelirane distribucije relativnog intenziteta ionskog snopa u ovisnosti o udaljenosti od osi snopa. Analizirani eksperimentalni podaci uspoređeni su s teorijskim predviđanjima, te je to ujedno i provjerena učinkovitost koncepta sustava rotirajućih zaustavnih folija.

Ključne riječi: fuzija, elektronsko i nuklearno kočenje, višestruko elastično raspršenje teških iona, komora za raspršenje s dvostrukim ionskim snopom, sustav rotirajućih zaustavnih folija

Estimation of ion beam's intensity distribution profile of interest for irradiation of fusion materials

Abstract

Radiation hardness of materials of interest for fusion reactor application is mostly investigated using multi-ion beam chambers, where the sample is simultaneously irradiated by two (or three) ion beams. One of the aims of such experiments is achieving of homogeneous damage depth profile within the irradiated material, i.e. to achievement uniformly distributed ion-induced damage in depth. In that way, it is possible to simulate the effects of high-flux of 14,1 MeV neutrons' irradiation. Heavy ions, however, lose their energy very unevenly along their path in the material and achieve maximum energy transfer at the ultimate range in the material. Therefore, ion beam degraders are installed inside of experimental chambers of dual-beam facilities to adjust and vary the energy of accelerated ions. Degraders are respectively varying the ion range in the material, thus allowing the energy to be deposited uniformly to the material. This master's thesis particularly emphasises the behaviour of the ion beam whilst passing through an aluminium foil on ion beam degrader. The ion beam Fe^{4+} with energy of 10 MeV is studied as it passes through aluminum foils of thickness 0,65 μm , 1,2 μm i 1,8 μm . The obtained data are theoretically explained by the angular propagation of the ion beam because of the multiple elastic scattering of heavy ions and the stopping of ions in the material. This master's thesis aims to study the distributions of the relative intensity of the ion beam depending on the distance from the centre of the beam axis. The experimental data are analyzed and compared with theoretical predictions. The effectiveness of the concept of ion beam degrader is tested.

Keywords: fusion, electronic and nuclear stopping, multiple elastic scattering heavy-ion, Dual-beam station for fusion materials research, ion beam degrader

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Fuzija i fuzijske elektrane	6
2.1	Fuzija	6
2.2	Koncept fuzijske elektrane	13
2.3	Oštećenja materijala uzrokovana neutronske zračenjem	15
2.4	Simulacija neutronske zračenja	17
3	Interakcije ubrzanih iona s atomima unutar materijala	19
3.1	Elektronsko i nuklearno kočenje	22
3.2	Kutno širenje ionskog snopa zbog višestrukih (elastičnih) raspršenja teških iona	26
4	Eksperimentalni postav za određivanje širenja snopa u folijama	31
4.1	Akcelerator i ionski izvor čestica	32
4.2	Komora dvostrukog snopa za istraživanje materijala od interesa za fuziju na Institutu Ruđer Bošković	35
4.3	Korekcija energije ionskog snopa pomoću sustava rotirajućih zaustavnih folija	38
4.4	Eksperimentalna procedura	42
5	Rezultati mjerenja i diskusija	45
5.1	Mjerenja distribucije kutnog širenja iona kroz aluminijske folije	45
5.2	Usporedba eksperimentalnih podataka s teorijskim modelima	52
5.2.1	Prvi teorijski model	52
5.2.2	Drugi teorijski model	56
5.2.3	Treći teorijski model	59
5.2.4	Četvrti teorijski model	65
5.3	Diskusija i moguća rješenja problema	67
6	Zaključak	74

7 Metodički dio	76
7.1 Istraživački usmjerena nastava fizike	80
7.1.1 Osnovna struktura nastavnog sata	84
7.2 Nastavna priprema: Nuklearna fuzija i fisija	87
Literatura	110

1 Uvod

Globalni razvoj i napredak svijeta temelji se na proizvodnji i potražnji energije. Prema Međunarodnoj agenciji za energetiku (eng. *International Energy Agency*), kratica IEA, [1] najviše se električne energije u zemljama članicama organizacije za ekonomsku suradnju i razvoj (eng. *Organisation for Economic Cooperation and Development*), kratica OECD, dobiva iz ugljena (25,4%) i prirodnog plina (27,4%), što čini više od polovice svjetske proizvodnje. Kako bi se smanjila emisija ugljičnog dioksida, odnosno smanjio efekt staklenika, svijet se sve više okreće obnovljivim izvorima energije koji su ekološki prihvatljiviji od neobnovljivih izvora energije. U Parizu 12. prosinca 2015. godine potpisan je Pariški sporazum o klimatskim promjenama, koji države potpisnice obvezuje prosječnu svjetsku temperaturu smanjiti za 2 °C u odnosu na predindustrijsku razinu. Također, države se obvezuju izraditi nacionalne planove pomoću kojih će regulirati i ostvariti cilj smanjenja emisije stakleničkih plinova. [2] Europska unija je izradila projekt Obzor 2020 za istraživanje i inovacije koji se temelji na tri prioriteta: izvrsnoj znanosti, industrijskom vodstvu i društvenim izazovima. Obzor 2020 se jednim svojim dijelom bavi i sigurnošću okoliša, odnosno klimatskim aktivnostima, učinkovitijim iskorištavanjem resursa i sirovinama. [3] [4]

Energetske politike država se okreću prema upotrebi biomasa, energiji Sunca, energiji vjetra, energiji vode i geotermalnoj energiji. Kada se razmatra utjecaj obnovljivih izvora energije na globalnu klimu, oni su u velikoj prednosti pred neobnovljivim izvorima energije. Kada se donosi bilo kakva odluka, potrebno je razmotriti pozitivne i negativne aspekte određene odluke pa tako i prilikom energetske politike. Na primjer prilikom dobivanja energije pomoću prirodnog plina emitira se malo ugljičnog dioksida, što je pozitivna strana, ali se također kao jedan od produkata stvara metan koji ima puno veći efekt na klimatske promjene od ugljičnog dioksida. Također, obnovljivi izvori imaju pozitivne strane, ali i neke negativne strane. Tako prilikom proizvodnje solarnih ploča potrebno je mnogo toksičnih kemikalija koje posljedično imaju negativni efekt na okoliš. Veliki nedostatak obnovljivih izvora energije je pohrana dobivene električne energije. U budućnosti se predviđa pronalazak pogodnih materijala kojima bi se riješio problem pohrane energije. Potrebno je napomenuti kako prilikom odabira neke vrste obnovljivih izvora energije treba pripaziti i na njihov utjecaj na ekosistem. Dok se tehnološki ne dostigne prihvatljiva pohrana elek-

trične energije iz obnovljivih izvora energije, događa se isprekidana isporuka električne energije što nije prihvatljivo za današnju električnu mrežu. Za razliku od dobivanja energije iz obnovljivih izvora energije, nuklearne elektrane mogu isporučivati električnu energiju koja se prilagođava potrebama električne mreže, odnosno vrhovima i padovima potrebe za električnom energijom tijekom dana i još nema stalne emisije ugljičnog dioksida. Kao logičan zaključak se nameće kombinacija obnovljivih izvora energije i nuklearnih elektrana kako bi električna mreža bila stabilna i kako bi se smanjio utjecaj na klimatske promjene. [5]

Jedan od izvora energije je nuklearna fisijska elektrana koja ima svoje prednosti i mane. Kada se spomene nuklearna fisija, prosječna svjetska populacija pomisli na nuklearne bombe koje su bačene na Nagasaki i Hirošimu te na nuklearne nesreće poput Otoka tri milje (eng. *Three Mile Island*) 1957. godine, Černobila 1986. godine i Fukushime Daiichi 2011. godine. Znanstvenici su nakon svake nuklearne nesreće unaprijedili određene segmente proizvodnje električne energije u nuklearnim elektranama. Segmenti koji su unaprijeđeni: osiguravanje hlađenja reaktora i nakon eventualnog nestanka električne energije, stručno osposobljavanje djelatnika u kontrolnoj sobi, povećanje sigurnosne kontrole i interno dijeljenje informacija o reaktorima. Nakon nuklearne nesreće u Fukushimi Daiichi, Vijeće Europske Unije je izmijenilo i usvojilo 8.7.2014. Direktive o nuklearnoj sigurnosti. Slično je učinila i Nuklearna regulatorna komisija Sjedinjenih Američkih Država. Također, Međunarodna agencija za atomsku energiju (eng. *International Atomic Energy Agency*), kratica IAEA, izvršila je sigurnosne provjere za ekstremne uvjete što je rezultiralo uvođenjem prijenosnih dizelskih agregata i viših zaštitnih zidova. Do posljednje velike nuklearne nesreće u Fukushimi Daiichi, u svijetu je postojao trend izgradnje nuklearnih elektrana, ali nakon 2011. godine smanjuje se broj fisijskih elektrana. Zatvaranje elektrana nakon 2011. godine je došlo zbog starosti elektrana, ali i zbog javnog mnijenja. iz tih razloga, nakon 2011. vidljiv je trend usporenog rasta koji je manji nego što je prethodno bio predviđen. Nakon posljednje velike nuklearne nesreće neke države, poput Njemačke su se odlučile na potpuno ukidanje nuklearne energije do 2022. godine, dok su neke druge države poput Francuske zadržale i poboljšale nuklearne elektrane. Na ovom primjeru se vidi sukob između proizvodnje nuklearne energije i smanjenja emisije ugljičnog dioksida jer nakon što je Njemačka pristupila provođenju plana, porastao je udio obnovljivih izvora energije, ali i potrošnja ugljena kako bi se

održala potreba za električnom energijom. Dotle Francuska ima najnižu stopu proizvodnje ugljičnog dioksida po glavi stanovnika, jer je zadržala poboljšane nuklearne elektrane. Uz Njemačku još su neke države odustale od nuklearnih programa poput Švicarske, Belgije i Italije, dok su druge zemlje, uz Francusku, zadržale nuklearne programe uz preglede dosadašnjih poput Ujedinjenog Kraljevstva i Kanade. Neke druge države su modernizirale postrojenja i povećale snagu nuklearnih elektrana, poput Sjedinjenih Američkih Država, Finske, Švedske i Španjolske. Opsežnije preglede nuklearnih fisijских elektrana su napravili Japan, Kina, Indija i Meksiko. Nuklearna elektrana Fukusima Daiichi preživjela je najjači potres koji je ikad pogodio Japan. Uspješno je upaljeno vanjsko napajanje nakon potresa, odnosno dizel generatori su hladili reaktor. Nakon potresa, dogodio se tsunami visine 13 m za koji elektrana nije bila dizajnirana i kako su dizel generatori bili postavljeni prenisko, odnosno zaštitni zidovi su bili visine 5,7 m, nakon tsunamija prestalo je hlađenje reaktora i dogodila se nesreća. Sredstvo kojim se hladi nuklearni reaktor je obično voda jer se pokazalo da je jako dobra za hlađenje reaktora, ali i za zaštitu od zračenja. Kada se spomene nuklearna nesreća u Fukushima Daiichi, treba spomenuti i nuklearnu elektranu Onagawa, koja je istog tipa kao i elektrana u Fukushima Daiichi, a međusobno su udaljene 120 km. Elektrana u Onagawa se nalazila najbliže epicentru potresa, odnosno 70 km od epicentra, dok se elektrana u Fukushima Daiichi nalazila 180 km od epicentra potresa. Nakon potresa i tsunamija u nuklearnoj elektrani Onagawa nije bilo velikih posljedica i sustav hlađenja je funkcionirao ispravno. Razlog je taj što su se dizelski agregati i gorivo za hlađenje elektrane nalazili na obližnjem brdu, odnosno zaštitni zid je bio visine 14 m. U trenutku izgradnje se to smatralo nepotrebnim jer je dio struke smatrao kako je dovoljna visina 12 m. Nakon potresa je bilo isključeno četiri od pet vanjskih napajanja, ali to je bilo dovoljno za hlađenje tri reaktora u roku deset sati. Također postoji još jedna elektrana Fukushima Daini koja se nalazi 10 km južnije od Fukushime Daiichi u kojoj također nije došlo do katastrofe nakon potresa i tsunamija, jer je bio uspješno uspostavljen sustav hlađenja. Nakon nesreće u Fukushima Daiichi promijenila su se mnoga pravila, a jedna od novina je da sada visina zaštitnih zidova mora biti 17 m. Prema NASA-inom istraživanju [12] korištenje nuklearne energije spriječilo je 1,8 milijuna smrtnih slučajeva u razdoblju od 1976. do 2009. Također, prema UN WHO sve nuklearne katastrofe koje su se dogodile uzrokovale su manje od 5 000 smrtnih slučajeva, dok izgaranje fosilnih goriva uzro-

kuje prijevremenu smrt milijun ljudi svake godine. Iz svega navedenog se vidi kako nuklearna energija ima vrlo mali rizik da se nešto katastrofalno dogodi, ali ako se nešto ipak dogodi, onda ostavlja dugotrajne posljedice što dovodi do velikih podjela u društvu. Nuklearni radioaktivni otpad je jedna od glavnih tema kad se razmatra gradnja nuklearnih elektrana oko koje se treba dobro pozabaviti. Svijetli primjer je u državi Finskoj koja gradi spremište za radioaktivni otpad. Također, niti jedan izvor energije nije zaštićen od katastrofa pa tako se solarni paneli mogu zapaliti, a brane puknuti. Kroz istraživanja se pokazalo kako je nuklearna energija najsigurnija po proizvedenoj TWh energije, odnosno na posljednjem je mjestu po broju žrtava po jedinici proizvedene energije. [6] [5] [7] [8] [9] [10] [11]

Trenutna potraga za što prihvatljivijim ekološkim izvorima energije nameće fuziju kao jedno od rješenja. Trideset i pet država svijeta se ujedinilo oko prve fuzijske termonuklearne elektrane u sklopu projekta Međunarodnog termonuklearnog reaktora (eng. *International thermonuclear reactor*; lat. iter, put), kratica ITER. Međunarodni termonuklearni reaktor je posljednja stepenica prema izgradnji prve demonstracijske fuzijske elektrane (eng. *Demonstration Power Station*), kratica DEMO. Europska unija, Sjedinjene Američke Države, Rusija, Kina, Indija, Japan i Koreja odlučile su kako će se ITER graditi u Francuskoj. Trenutno je u izgradnji tokamak, a 2025. godine je u planu ostvarivanje prve plazme u reaktoru. Svaka članica konzorcija je zadužena za određenu ključnu komponentu ili provjeru određenih rezultata. Svaki aspekt projekta međusobno je raspoređen na sve članice, a važni aspekti projekta su znanost, oprema, financije i ljudi. Nakon završetka projekta je cilj da svaka članica ima potrebno znanje za izgradnju i proizvodnju vlastitog fuzijskog postrojenja. [13]

Nakon što se pokrene proces nuklearne fuzije teško ga je održavati. Stoga se radi i na produžavanju tog procesa. Tijekom procesa fuzije oslobađa se velika količina energije i jedan od izazova je skupiti tu energiju te je učiniti komercijalno isplativom. Dosadašnja istraživanja pokazuju da je potrebno uložiti više električne energije za pokretanje samog procesa fuzije, nego što se dobije električne energije prilikom procesa fuzije. Danas se radi na rješavanju problema kojim bi termonuklearni reaktor opskrbljivao električnom energijom samog sebe, odnosno traže se rješenja kojima bi se proizvodilo deset puta više energije nego što je uloženo. [14]

Buduće fuzijske termonuklearne elektrane imat će malo radioaktivnog otpada s vrlo kratkim vremenom poluraspada za razliku od postojećih fuzijskih elektrana koje

proizvode visoko radioaktivni otpad koji zahtjeva privremeno i trajno skladištenje nekoliko desetaka tisuća godina. Sadašnje mogućnosti proizvodnje energije fuzijom su reakcija deuterija i tricija prilikom koje nastaje jezgra helija i neutron, te se oslobađa 17,6 MeV energije. Jednu petinu energije odnosi jezgra helija koja ostaje zarobljena u plazmi te grije plazmu, dok četiri petine energije odnosi neutron kojeg treba „uhvatiti“ radi proizvodnje energije. Također, neutron može stvoriti i probleme radi oštećenja materijala. Odabir materijala za unutrašnju stijenu reaktora, jedan od glavnih prioriteta ITER-a. Odabrani materijal treba zadržati određenu toplinsku vodljivost i strukturna svojstva pri velikom neutronsom toku energije reda veličine 14,1 MeV. Eksperimenti, kojima se pokušava pronaći odgovarajući materijal, simuliraju uvjete unutar reaktora, na primjer pomoću dva snopa iona megaelektronvoltne energije koji padaju u istu točku. Prilikom korištenja dva snopa iona treba biti oprezan zbog toga što postoji značajna fizikalna razlika u načinu gubljenja energije kroz materijal za neutrone i za teške ione. Načini na koje neutroni i teški ioni gube energiju će biti objašnjeni kasnije u radu. [4] [13] [15]

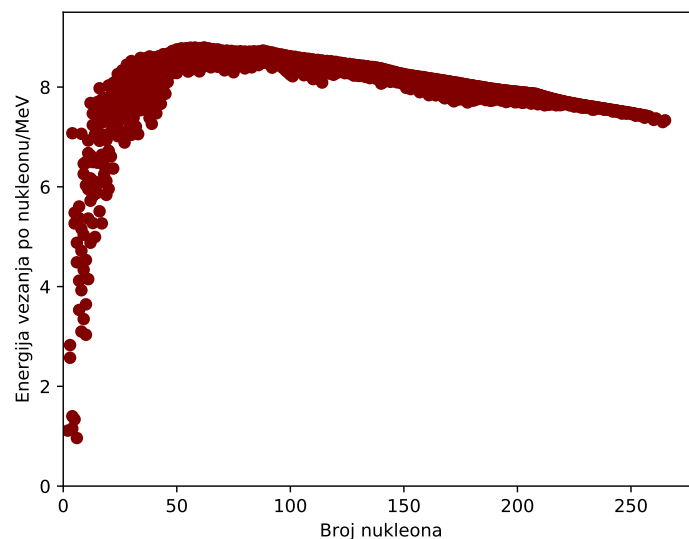
Simulaciju utjecaja neutrona, odnosno jakog neutronskega zračenja, na kristalnu rešetku materijala moguće je ispitivati s dva snopa iona i sustavom rotirajućih zaustavnih folija (eng. *ion beam degrader*) unutar komore dvostrukog ionskog snopa za istraživanje materijala od interesa za fuziju (eng. *Dual beam station for fusion materials research*). Kako bi se mogla simulirati oštećenja materijala koje uzrokuje neutronske zračenje, potrebno je prilagoditi gubljenje energije iona u materijalu pomoću sustava rotirajućih zaustavnih folija. U ovom radu će se provjeravati ponašanje, odnosno izgled i distribucija ionskog snopa nakon što prođe kroz zaustavnu foliju. Osnovni princip istraživanja je da se ioni željeza ubrzaju u akceleratoru i zatim se dovedu do komore u kojoj se nalaze aluminijske folije različite debljine. Nakon aluminijske folije nalazi se poliamidni film (kapton film) debljine 250 μm na kojem se promatra zacrnjenje kaptona uslijed prolaska snopa kroz aluminijsku foliju. Proučavat će se kutno širenje ionskog snopa koje treba uključiti prilikom određivanja utjecaja na materijal te odabira materijala koji bi osigurao jednoliku i ravnomjernu predaju energije iona materijalu za eksperimentalna testiranja.

2 Fuzija i fuzijske elektrane

2.1 Fuzija

Fuzija je nuklearna reakcija gdje se lakše jezgre spajaju u jednu težu jezgru, koja ima veću energiju vezanja po nukleonu, uz oslobađanje energije. Proces fuzije se događa sve do željeza. Nastala jezgra je stabilnija kada je energija vezanja po nukleonu u rasponu od 7 MeV do 9 MeV. [16] [17] [18]

Najstabilnije jezgre su oko masenog broja 60, odnosno željezo, kobalt, nikal, kao što se može vidjeti s grafa na slici 2.1.



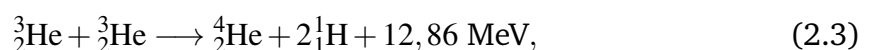
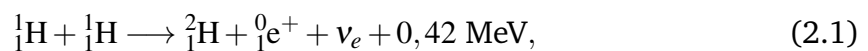
Slika 2.1: Prikaz ovisnosti energije vezanja po nukleonu o broju nukleona. Podaci preuzeti s [19]

Jezgre koje ulaze u reakciju fuzije su pozitivno nabijene i trebaju savladati odbojnu kulonsku (elektrostatsku) silu te doći na udaljenost gdje jaka nuklearna sila prevladava. Svladavanje elektrostatske sile nije klasičan proces, nego kvantno-mehanički proces, i ulazne jezgre trebaju imati dovoljnu početnu energiju. Kako bi jezgre, koje ulaze u reakciju fuzije imale potrebnu energiju trebaju biti na vrlo visokim temperaturama reda veličine 10^8 K. Potrebna temperatura za reakciju fuzije ovisi o samoj reakciji i udarnom presjeku reakcije. U procesu nuklearne fuzije potrebne su visoke temperature pa se stoga još naziva i termonuklearna reakcija. Masa reaktanata u fuzijskoj reakciji je veća od mase produkata te se prilikom reakcije oslobađa energija koja je jednaka razlici masa jezgara prije i poslije reakcije pomnožena s kvadratom

brzine svjetlosti. Reakcije fuzije možemo podijeliti na dvije osnovne vrste. Jedna vrsta je u kojoj nakon fuzije ostaje jednak broj protona i neutrona kao što je i bio prije fuzijske reakcije. Druga vrsta je kada nakon fuzije postoji drugačiji broj protona i neutrona nego prije fuzije, odnosno dolazi do pretvorbe između protona i neutrona. [17]

Postojanje nuklearne fuzije prvi je pretpostavio Arthur Eddington 1920-ih godina na temelju predviđanja kako se u zvijezdama stvara energija spajanjem vodika u helij i time predvidio je proces fuzije. Robert d'Escourt Atkinson i Fritz Houtermans su prema Eddingtonu izveli prve proračune za nuklearnu fuziju u zvijezdama. Nekoliko godina kasnije, točnije 1928. godine George Gamow je izveo formulu kvantno-mehaničkog tuneliranja. Proučavajući izvedenu formulu, Gamow je zaključio kako su potrebne visoke temperature za ostvarivanje uvjeta nuklearne fuzije. Visoke temperature su potrebne zbog nadvladavanja kulonsko odbijanja protona između jezgara. Ernest Rutherford 1934. je spajanjem jezgara deuterija, odnosno deutron, stvorio helij, a njegov asistent Mark Oliphant je modelirao eksperimentalni postav i otkrio tricij i helij ^3He . Ovim se eksperimentima otvorilo još jedno područje istraživanja u fizici. [16] [20] [21]

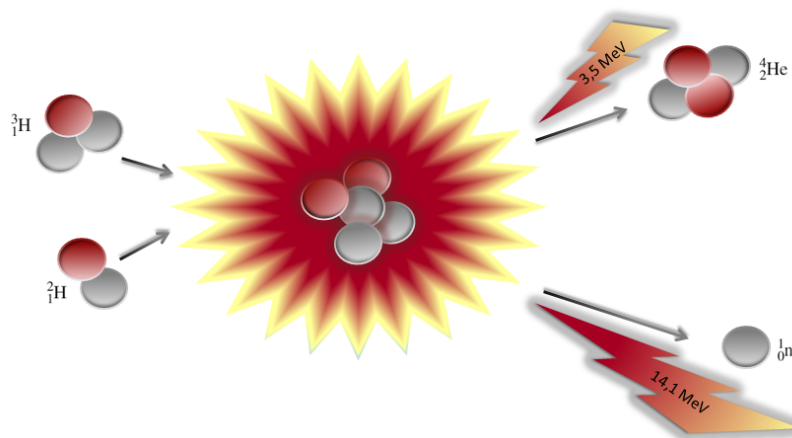
Hans Albrecht Bethe, dobitnik Nobelove nagrade za fiziku 1967. godine, teorijski je razradio procese dobivanja energije u zvijezdama. [16] Nuklearni procesi u zvijezdama se zasnivaju na temelju gorenja vodika, a osnovni niz fizikalnih procesa naziva se proton-proton lanac. Reakcije u proton-proton lancu su [22]:



U reakciji (2.1) dvije jezgre vodika, odnosno dva protona, se spajaju u jezgru izotopa vodika, odnosno jezgru deuterija (deuteronu), emitirajući pozitron i elektronski

neutrino. U reakciji (2.2) proton i jezgra deuterija se spajaju u jezgru helija ${}^3\text{He}$ emitirajući gama zrak. Ove prve dvije reakcije se ponove dva puta kako bi se dobile dvije jezgre helija ${}^3\text{He}$ za nastavak proton-proton lanca. U reakciji (2.3) dvije jezgre helija ${}^3\text{He}$ se spajaju u jezgru helija ${}^4\text{He}$ i emitirajući dva protona. U reakciji (2.1) se emitira pozitron koji s elektronom, koji se nalazi u plazmi, anihilira u reakciji (2.4). Pri svakoj reakciji se emitira određena energija. Ukupni efekt proton-proton lanca je pretvorba četiri protona u jezgru helija ${}^4\text{He}$. Pri svakoj nuklearnoj reakciji moraju biti zadovoljeni zakoni očuvanja. Broj elektrona mora biti očuvan i zbog toga jer plazma mora ostati električki neutralna preko bilo kojeg volumena koji je puno veći u odnosu na atomske volumene. Nakon jednog ciklusa ukupna oslobođena energija je 26,72 MeV. Kako bi postojalo gorenje vodika u zvijezdama, potrebna kritična temperatura zvijezde mora biti veća od 10^7 kelvina i masa zvijezde mora biti veća od 0,1 puta mase Sunca. Ako ovi uvjeti nisu zadovoljeni, na primjer zvijezde s manjom masom ili nižom temperaturom, nema dovoljno početne energije za započinjanje termonuklearnih reakcija. [22]

Nuklearna fuzija svakodnevno se događa u zvijezdama, dok znanstvenici godinama pokušavaju stvoriti uvjete na Zemlji kako bi uspjeli održati iskoristive fuzijske reakcije. Jedan od glavnih uzroka problema je visoka temperatura koja je potrebna za fuziju, odnosno materijali koji bi mogli izdržati visoke temperature. Plazma u zvijezdama je zarobljena visokim tlakom i jakim gravitacijskim poljem i te uvjete nije moguće postići u laboratorijskim uvjetima. Također, jedan od nastalih produkata fuzije je neutron, odnosno visoki tok neutrona, koji nije moguće zaustaviti električkim i magnetskim poljima i onda se događa da neutron predaje energiju materijalu s ko-



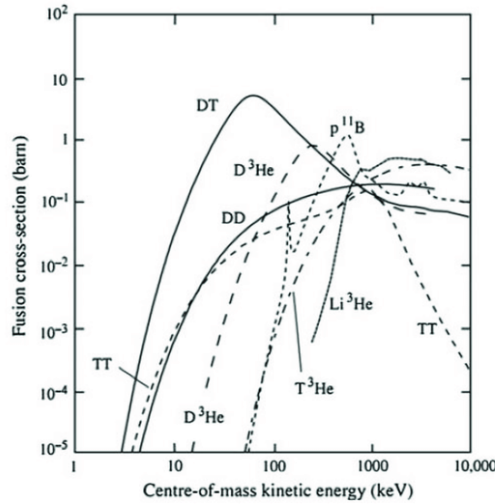
Slika 2.2: Shematski prikaz fuzijske reakcije (2.5)

jim je okružen i izaziva određene fizikalne efekte koji će biti obrađeni u potpoglavlju 2.3. [23]

Nuklearne reakcije koje bi mogle biti podobne za fuziju u laboratorijskim uvjetima, odnosno fuzijskim reaktorima su [24]:



Kada se promatraju reakcije koje bi bile iskoristive, gleda se koliko se energije oslobađa prilikom reakcije i koliki je energijski prag reakcije. Energijski prag nuklearne reakcije je najniža kinetička energija koju jezgre što ulaze u nuklearnu reakciju moraju imati radi savladavanja odbojne elektrostatske sile. Dosadašnja istraživanja upućuju na to kako je za praktičnu primjenu najizglednija reakcija (2.5), gdje je energija jezgara deuterija i tricija 10 keV, a nastaje jezgra helija ${}^4_2\text{He}$ s energijom 3,5 MeV i neutron s 14,1 MeV energije, a shematski je prikazana na slici 2.2. Reakcija (2.9) je još poželjnija zbog toga što nema oslobađanja neutrona koji može u interakciji s materijalom unutrašnje stijenke reaktora proizvesti radioaktivni element. Problem je postići održivu reakciju (2.9) jer je potrebniji energijski prag reakcije puno veći nego za reakciju (2.5) kao što je vidljivo na slici 2.3. Udarni presjek σ je vjerojatnost da neke atomske jezgre ili subatomske čestice interagiraju. Vjerojatnost udarnog presjeka ovisi o energiji čestice i vrsti interakcije, a mjerna jedinica je metar kvadratni $[\text{m}^2]$ ili barn koji iznosi 10^{-28} m^2 . Diferencijalni udarni presjek definiran je kao vjerojatnost (po jediničnom prostornom kutu) raspršenja čestice u prostorni kut $\Delta\Omega$. Pri višim kinetičkim energijama ulaznih jezgara postoji veća vjerojatnost za nuklearnu reakciju, kao što je vidljivo sa slike 2.3. [13] [25] [26]



Slika 2.3: Udarne presjeci za fuzijske reakcije u ovisnosti o energiji upadnih čestica [27]

Kinetičku energiju jezgara koje ulaze u nuklearnu reakciju možemo povećati zagrijavanjem. Maxwell-Boltzmannov zakon govori o najvjerojatnijoj brzini plina u smjesi:

$$E = k_B T \quad (2.10)$$

gdje je E kinetička energija čestica $\left[J = \frac{1}{1,602177 \cdot 10^{-19}} \text{ eV} \right]$, T temperatura smjese izražena u K, $k_B = 1,3806505 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} = 8,617343 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$ Boltzmannova konstanta. Reakcija (2.5), na slici 2.3 je označeno s DT, ima najveći udarni presjek kada je kinetička energija deuterija i tricija oko 80 keV, dok je za relativno prihvatljiv udarni presjek, prema istraživanjima, potrebno između 10 keV i 15 keV. Kada se primjeni Maxwell-Boltzmannov zakon¹, potrebna temperatura za postizanje relativno prihvatljive kinetičke energije jezgara je $1,16 \cdot 10^8 \text{ K}$. Visina kulonske barijere se određuje prema izrazu [28]:

$$V_C = \frac{q^2 Z_x Z_y}{4\pi\epsilon (R_x + R_y)} \quad (2.11)$$

gdje je q jedinični naboj elektrona, Z_x i Z_y atomski brojevi elemenata, R_x i R_y udaljenost elemenata. Visina kulonske barijere se povećava s povećanjem naboja jezgri, odnosno atomskim brojem elementa. Kada se u izraz (2.11) umjesto R_x i R_y uvrsti $R_x = 1,4 A_x^{1/3} \text{ [fm]}$ i $R_y = 1,4 A_y^{1/3} \text{ [fm]}$ i atomski i maseni brojevi za jezgre deuterija i tricija, jednostavnim matematičkim izračunom se dolazi do visine kulonske barijere koja iznosi 380 keV. Energija 380 keV odgovara otprilike temperaturi $4,4 \cdot 10^9 \text{ K}$. Re-

¹ $T = \frac{10 \cdot 10^3 \text{ eV}}{8,617343 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}}$

akciju deuterija i tricija (2.5) moguće je postići na temperaturi $1,16 \cdot 10^8$ K zbog toga što se dogodi kvantno tuneliranje, pa energija upadnih čestica ne mora biti jednaka visini kulonske barijere.

Reakcija (2.5) je prihvatljiva i zbog toga je vodik vrlo rasprostranjen element na Zemlji, deuterij (izotop vodika) je rasprostranjen u morskoj vodi, a udio deuterija je 0,0156%. [29] Tricij (izotop vodika) je radioaktivni element s vremenom poluživota 12,32 godina i može se proizvesti reakcijom neutrona i litija [30]:



gdje je neutron iz neke druge nuklearne reakcije, a litij je rasprostranjen u Zemljinoj kori i morskoj vodi. Produkti reakcije (2.5) su pozitivno nabijena alfa čestica (jezgra helija ${}^4\text{He}$) koja ostaje zarobljena u plazmi te energiju predaje u sudarima, i neutron koji izlazi iz plazme jer na neutron ne utječu električna i magnetska polja. [4]

Relativno prihvatljiv udarni presjek za reakciju (2.6), potrebna je veća kinetička energija, odnosno energija oko 50 MeV što prema izrazu (2.10) odgovara temperaturi oko $5,80 \cdot 10^8$ K. Većina današnjih fuzijskih reaktora se prilagođava za deuterij-tricij nuklearnu fuziju (2.5), a mala vjerojatnost je za deuterij-deuterij nuklearnu reakciju fuzije zbog temperature plazme koja varira. U budućnosti se očekuje uporaba reakcije (2.9) za koju je minimalno prihvatljiva kinetička energija ulaznih jezgara oko 250 keV, odnosno prema izrazu (2.10) temperatura je $29 \cdot 10^8$ K. Minimalna temperatura potrebna za reakciju (2.9) je 25 puta veće od temperature za reakciju (2.5).

Za postizanje nuklearne reakcije fuzije potrebne su jako visoke temperature smjese čestica, reda veličine 100 milijuna kelvina. Smjesa čestica se tada nalazi u potpuno ioniziranom stanju, odnosno jezgre i elektroni su razdvojeni, gdje su zasebne čestice pomiješane na visoko temperaturnoj plazmi. Plazma je električki neutralna jer ima jednak broj pozitivnih iona i elektrona, te nema određeni volumen ni oblik. Plazmom se može „upravljati“ električnim i magnetskim poljima. Oblikovanje plazme, odnosno zatočenje plazme kako ne bi došla u kontakt sa stijenkama komore i hladila se u laboratorijskim uvjetima je moguće pod utjecajem jakog magnetskog polja. Kada se nabijena čestica nalazi u homogenom magnetskom polju na nju djeluje Lorentzova sila i tjera česticu na kružno gibanje te joj ne mijenja iznos brzine, ali joj mijenja smjer brzine. Lorentzova sila je proporcionalna s magnetskim poljem uz konstantnu

brzinu i naboj čestice, te je Lorentzova sila proporcionalna s brzinom gibanja čestice uz konstantno magnetsko polje i naboj čestice. Magnetski zatočena plazma je male gustoće reda veličine 10^{19} čestica po kubičnom metru, što je puno puta manje nego gustoća molekula u atmosferi gdje je reda veličine 10^{25} molekula po kubičnom metru. Za bolji uvid, možemo ove gustoće staviti u kontekst pa tako je masa jednog kubičnog metra zraka 1 kg, a plazma koja zauzima volumen 100 m^3 ima masu jedne poštanske marke. [23] [24]

Gustoća plazme se može kontrolirati vanjskim tlakom na plazmu, odnosno magnetskim tlakom koji se definira kao [24]:

$$p_{mag} = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (2.13)$$

gdje je μ_0 magnetska permeabilnost vakuuma i iznosi $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$, B magnetsko polje koje se mjeri u teslama. Vjerojatnost reakcije između čestica plazme ovisi o gustoći plazme. Tlak plazme, kinetički tlak se može interpretirati pomoću jednadžbe stanja idealnog plina koja glasi:

$$pV = Nk_B T \quad (2.14)$$

gdje je p tlak izražen u Pa, V volumen izražen m^3 , N broj čestica, k_B Boltzmannova konstanta i T temperatura izražena u K. Iz jednadžbe (2.14) se vidi kako su pri stalnom volumenu i broju čestica, temperatura i tlak proporcionalne fizikalne veličine. Povezivanjem izraza (2.13) i (2.14) u omjer:

$$\beta = \frac{p}{p_{mag}} = \frac{2\mu_0 N k_B T}{B^2 V} \quad (2.15)$$

dobiva se podatak koliko je uspješna fuzija. Uspješna fuzija, odnosno održiva fuzija se postiže tako da je magnetski tlak veći od kinetičkog tlaka svih komponenata plazme, odnosno izraz (2.15) mora biti manji od jedan. [4] [13]

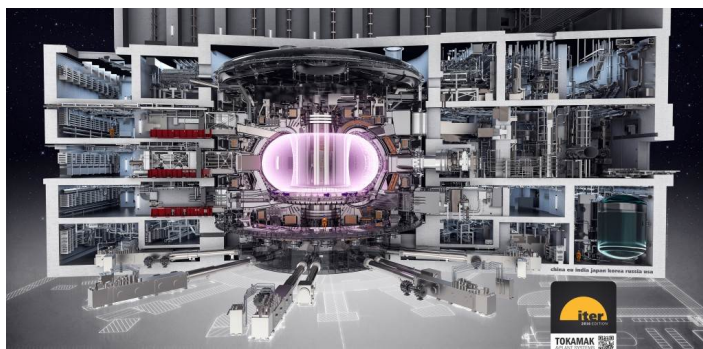
Čestice plazme zadovoljavaju Maxwell-Boltzmannovu distribuciju pa prosječna početna temperatura plazme može biti niža od potrebne temperature, odnosno kinetičke energije čestica, kako bi se postigla nuklearna reakcija. Kada se određene jezgre nalaze na „repu“ Maxwell-Boltzmannove distribucije njihova temperatura, odnosno kinetička energija će se povećati nakon što se oslobodi energija prilikom spajanja jezgara. Nakon svakog spajanja jezgara zagrijava se plazma te se na ovakav način

postiže samoodrživa plazma. Plazma se treba nalaziti u vakuumskoj komori kako ne bi došlo do hlađenja plazme zbog interakcije čestica plazme s česticama zraka. [4]

2.2 Koncept fuzijske elektrane

Glavni dio fuzijske elektrane je reaktorska komora, odnosno područje u kojem se nalazi plazma za proces fuzije. Unutar fuzijske reaktorske komore treba balansirati između dobivanja i gubljenja energije sustava, odnosno treba nadoknaditi energiju koju plazma izgubi kada se počne hladiti. Ukoliko je curenje energije iz plazme balansirano vanjskim unošenjem energije u sustav, tada plazma može biti u ravnotežnom stanju i održiva. Također, plazma se treba nalaziti u vakuumu kako ne bi došlo do dodatnog hlađenja zbog interakcije čestica plazme s česticama zraka. Još uvijek se provode istraživanja kako bi se pronašlo najbolje rješenje za oblik i materijal za unutrašnjost fuzijske reaktorske komore te magnetsko zatočenje. Krajem 1950-ih godina Igor Jevgenjevič i Tammi Andrej Dimitrijevič Saharov, sovjetski znanstvenici, su osmislili idejno rješenje, a potom je izgrađen prvi tokamak uređaj u Saveznoj Sovjetskoj Socijalističkoj Republici. Današnja dva najistaknutija tokamak uređaja su: Toroidalni fuzijski testni reaktor, (eng. *Toroidal Fusion Test Reactor*), kratica TFTR, na Princetonu u Sjedinjenim Američkim Državama i Zajednički europski torus (eng. *Joint European Torus*), kratica JET, u Culhamu u Velikoj Britaniji. Od 1967. godine do 1995. godine omjer uložene i dobivene energije je narastao od 10^{-7} do 1. Dva bitnija događaja u istraživanju postizanja održive fuzije su se odvila 1994. godine i 1997. godine. Prvi događaj je bio da su istraživači na TFTR-u uspjeli proizvesti energiju 10 MW i po prvi put su kao gorivo koristili kombinaciju deuterij-tricij plazme. Drugi događaj je vezan za tokamak JET, kada se uspjela dobiti energija 16 MW s omjerom uložene i dobivene energije 0,6. Na temelju istraživanja kontroliranja fuzije provedenih na ovim reaktorima krenulo se u osmišljavanje i izgradnju još većih i snažnijih tokamaka kako bi se dobili potrebni uvjeti za rad fuzijske reaktorske komore. Primjer takvog reaktora je budući ITER gdje je na slici 2.4 prikazana unutrašnjost tokamaka i elektrane. [13] [23]

Smjesa deuterija i tricija u stanju plazme se nalazi na vrlo visokim temperaturama, reda veličine $100 \cdot 10^6$ K. U plazmi su ioni (jezgre) i elektroni razdvojeni, ali su na istoj temperaturi, odnosno imaju istu kinetičku energiju. Kako je kinetička energija iona



Slika 2.4: Unutrašnjost ITER-a [31] ©ITER Organization, <http://www.iter.org/>

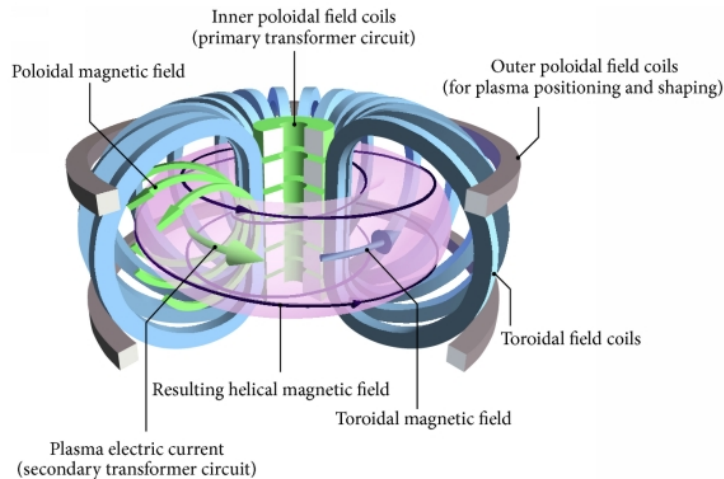
i elektrona jednaka, a masa elektrona je puno manja od mase iona, odnosno masa elektrona je 1 800 puta manja od mase protona. Posljedično je brzina elektrona puno veća od brzine iona. Pri temperaturi od 10^8 K, deuterion ima brzinu 600 km/s, a elektron ima brzinu 40 000 km/s. [24]

Konfiguracija magnetskog zatočenja plazme je jedan u nizu problema, nakon čijeg rješavanja bi se mogla osigurati duže održiva plazma. Alternativni pristup magnetskom zatočenju je zrcalno zatočenje. Unutar plazme postoje male perturbacije koji mogu pobjeći iz magnetskog polja, ali uspješna konfiguracija magnetskog polja, odnosno magnetskog zatočenja, mora zadovoljavati tri kriterija. Prvi kriterij je da plazma mora biti u ravnotežnom stanju koje je vremenski neovisno, drugi kriterij je taj da ravnoteža mora biti makroskopski stabilna i treći kriterij zahtjeva da curenje energije iz plazme bude što manje prema unutarnjim stijenkama reaktorske komore. Zadovoljenje navedenih kriterija se pokušava postići različitim oblicima reaktorskih komora i sustava magneta. Kriterij za dobro magnetsko zatočenje plazme za deuterij i tricija prema Lawsonu je „trostruki produkt“:

$$n_e T \tau_e > 3 \cdot 10^{21} \text{ keV m}^{-3} \text{ s} \quad (2.16)$$

gdje je n_e gustoća čestica izražena u m^{-3} , T temperatura izražena u keV, a τ_e vrijeme zatočenja plazme izraženo u s. Postoje dva osnovna pristupa magnetskom zatočenju plazme koji se dijele na otvorenu i zatvorenu konfiguraciju. Primjer otvorene konfiguracije je linearna konfiguracija, dok je zatvorene konfiguracije toroidalna konfiguracija. [23]

Unutar tokamaka se nalazi plazma koju jako magnetsko polje zadržava na pogodnom području kako plazma ne bi doticala stijenke komore. Shematski prikaz



Slika 2.5: Shematski prikaz tokamaka [32]

tokamaka je na slici 2.5. Oko torusa nalaze se magneti koji stvaraju toroidalno magnetsko polje koje je usmjereno dužim putem oko torusa, odnosno u smjeru toka struje u plazmi. Toroidalno magnetsko polje održava plazmu u središtu fuzijske reaktorske komore. Toroidalno magnetsko polje nije dovoljno te je potrebno poloidalno polje koje je okomito na toroidalno polje. Poloidalno polje sprječava „curenje“ nabijenih čestica, a polje se stvara pomoću poloidalnih zavojnica oko toroidalne komore i polja koje stvara sama plazma. Polje koje stvara sama plazma se stvara uslijed razdvajanja pozitivno nabijene jezgre i negativno nabijenih elektrona. Toroidalno magnetsko polje treba biti veliko pa je u nekim eksperimentima postignuta jakost magnetskog polja od 6 T. Toroidalno magnetsko polje je više od 10 000 puta veće nego Zemljino magnetsko polje. Potrebno jako toroidalno polje postiže se supravodljivim magnetima kako bi se uštedjela energija. [4] [24]

Struja koja je nastala promjenjivim magnetskim poljem ne može zagrijavati plazmu u tokamaku na dovoljno visoku temperaturu koja bi bila dovoljna za stvaranje uvjeta fuzije. Dodatno zagrijavanje plazme može se postići kompresijom plazme magnetskim poljem, visokofrekventnim (radiofrekventnim) zagrijavanjem ili ubacivanjem (injekcijom) snopa neutralnih atoma u plazmu. [13]

2.3 Oštećenja materijala uzrokovana neutronske zračenjem

Postoji značajna fizikalna razlika u načinu gubljenja energije, odnosno prijenosu energije, kroz materijal za neutrone i za teške ione. Općenito, kada nabijene čestice

interagiraju s atomima materijala, atomi materijala najčešće se direktno ioniziraju, dok to nije svojstveno neutronima. Teške nabijene čestice gube svoju energiju, odnosno prenose svoju energiju atomima materijala, preko neelastičnih sudara s elektronima u atomu, elastičnim sudarima s atomima materijala, Čerenkovljevim zračenjem, zakočnim zračenjem (Bremsstrahlung) ili nuklearnim reakcijama. Detaljniji opis gubljenja energije teških nabijenih čestica bit će objašnjen u četvrtom poglavlju. Neutroni interagiraju samo s jezgama atoma materijala elastičnim i neelastičnim sudarima, uхватom neutrona, proizvodnjom fisijskih fragmenata i još nekim nuklearnim reakcijama. Neutroni su električki neutralni pa ne interagiraju s elektronima nego je potrebno da neutroni dođu u doseg jake nuklearne sile kako bi interagirali s jezgrom atoma. Jaka nuklearna sila ima kratak doseg pa neutron mora biti jako blizu jezgre kako bi interagirali, odnosno udaljenost između neutrona i jezgre mora biti reda veličine 10^{-13} cm. Neutron kada uđe u materijal dugo putuje u materijalu jer ima malu vjerojatnost interakcije s materijalom zbog toga jer je veličina jezgre mala s obzirom na veličinu atoma. Kako neutroni nisu nabijeni, oni ne mogu direktno ionizirati atom, mogu se samo sudariti i/ili interagirati s jezgrom. Izbačena čestica dalje može izazvati kaskadne sudare u materijalu. Apsorpcija neutrona je 10^{-6} puta slabija nego kod nabijenih čestica. Kada neutroni uđu u materijal, sudaraju se s atomskim jezgama u materijalu i mogu ih izbiti s tog mjesta u kristalnoj rešetci. Te izbijene jezgre u sudarima s ostalim jezgama gube energiju, odnosno prenose energiju ostatku materijala. Također, neutroni mogu interagirati s jezgama atoma kristalne rešetke preko (n,p) reakcije i (n, α) reakcije te kao produkti reakcije nastaju vodik, odnosno helij. [33] [34]

Slobodni neutroni u slobodnom prostoru se jako brzo raspadaju beta raspadom, odnosno:



Vrijeme poluživota neutrona je približno 12-13 min. [33]

Slobodni neutroni značajan dio svoje energije gube (prenose materijalu) preko elastičnih sudara. Prosječna prenesena energija neutrona po sudaru je:

$$\left(-\frac{\Delta E}{E} \right)_{av} = \frac{2A}{(A+1)^2} \quad (2.18)$$

gdje je A maseni broj atoma koji okružuju neutron. [33]

Velika doza visokoenergetskog neutronskeg zračenja, $1,5 \cdot 10^{22}$ neutrona/s energije 14,1 MeV, na materijal predstavlja novo područje istraživanja materijala koji imaju svojstva da podnesu toliku dozu zračenja. Oštećenje materijala ovisi o izloženosti zračenju, temperaturi i deponiranoj dozi. U materijalu je moguće da se dogodi razmještaj atoma u rešetci, mijenjanje lokalne kompozicije legure materijala čime se mijenjaju mehanička svojstva materijala. [35]

Neutronske zračenje materijala može se simulirati na više načina. Jedan od načina simuliranja visokog toka neutronskeg zračenja je pomoću dva snopa iona koji će biti detaljnije objašnjen u idućem poglavlju. Kako bi se simuliralo neutronske zračenje u materijalu potrebno je prilagoditi gubitak energije iona. Teški ioni gube energiju u materijalu nejednoliko duž cijele putanje, s tim da postižu najveću vrijednost gubitka energije na najvećoj dubini do koje prodiru u materijalu. Potrebna je prilagodba energije ubrzanih iona tako da se postigne što ravnomjernija raspodjela gubitka energije, odnosno predaje energije iona materijalu od ulaska u materijal do krajnjeg dosega. Trenutno se jednolika predaja energije teških iona materijalu pokušava dobiti sa sustavom rotirajućih zaustavnih folija, što je mehanički sustav koji varira energiju ubrzanih iona megaelektronvoltskih energija tako da se koristi više tankih metalnih folija različitih debljina. O sustavu rotirajućih zaustavnih folija će biti više riječi u 4.3 potpoglavlju.

2.4 Simulacija neutronskeg zračenja

Materijali od interesa za prve stijenke reaktora fuzijske elektrane zahtijevaju temperaturnu izdržljivost i izdržljivost na ionizirajuće zračenje. Materijali su izloženi zračenju γ i X zraka, brzih neutrona (dominantno energije 14,1 MeV), protona i alfa čestica uz istovremeno toplinsko opterećenje zbog oslobađanja energije zračenjem koja je veća od 1 MW/m^2 . Odabiru materijala koji će izdržati jako ionizirajuće zračenje unutar reaktora, pristupa se trima različitim metodama. Prva metoda je zračenje fuzijskog materijala s brzim neutronima energije 14,1 MeV iz akceleratora, druga metoda je zračenje fuzijskog materijala sa sporim neutronima energije 2,5 MeV iz fisijskih reaktora i treća metoda je zračenje pomoću jednog, dva ili tri snopa iona koji upadaju na isto ozračeno područje. [13]

Prava metoda se bazira na nuklearnim reakcijama u akceleratorima koji proizvode

neutrone. Jedan od načina proizvodnje neutrona u akceleratoru je u sudarima snopa deuterija s metom koja sadrži tricij, odnosno reakcijom $T(d,n)He$. Sudari rezultiraju zračenjem 14,1 MeV neutronima. Tok neutrona je premali u usporedbi s tokom neutrona u fuzijskim reakcijama, pa je za validne rezultate potrebno dugo vrijeme (mjeseci/godine) ozračivanje uzorka.

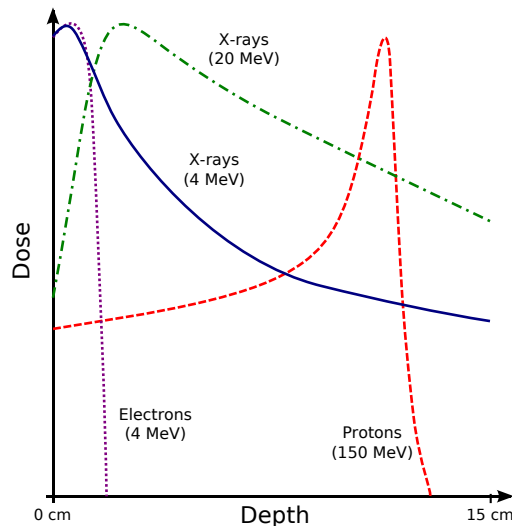
Druga metoda koristi fisijske neutrone koji nekad imaju energiju ispod 2 MeV i mali tok što povlači dugo vrijeme ozračivanja kako bi se postigli približni simulirani efekti neutronske zračenja 14,1 MeV. Također, neutroni koji imaju manju energiju od 5 MeV ne stvaraju reprezentativne uvjete neutronske zračenja unutar fuzijske reaktorske komore. Razlog zbog kojih neutroni manje energije od 5 MeV ne mogu biti reprezentativni primjer je taj da ne interagiraju s jezgrama materijala s istom ili sličnom vjerojatnošću kao neutroni s viskom energijom.

Treća metoda imitiranja interakcije neutrona s jezgrama atoma kristalne rešetke materijala se može napraviti tako da se određeni uzorak materijala, na primjer čelika, ozrači s na primjer ionima željeza i helija. Ozračivanje čelika ionima željeza je zračenje *self*-ionima što znači da se zrači uzorak materijala s istim ionima atoma od kojih je pretežito načinjen materijal. Ovim načinom se pokušava imitirati neutronske izbijanje jezgre atoma s nekog mjesta u kristalnoj rešetci. Za drugi način interagiraju neutrona s jezgrama atoma materijala, u ovoj metodi se imitira tako da se koriste ioni vodika i/ili helija zbog toga jer su to produkti reakcija (n,p) reakcije i (n,α) reakcije. Za razliku od prve dvije metode, ozračeni uzorak kod treće metode nije radioaktivan te ga je samim time lakše analizirati. Treća metoda omogućava veliku prilagodljivost temperature, doze i brzine doze kako bi se promatrala oštećenja materijala. Također, kako bi se proučio određeni efekt na materijalu potrebno je kraće vrijeme nego kod prve dvije metode. Efekt se postiže u redu veličine satima, dok kod prve dvije metode su potrebni mjeseci ozračivanja. Kao i svaka metoda, *dual-beam* metoda ima mane i ograničenja. Potrebno je osigurati homogeno ozračeno područje do određene dubine, potrebno je prilagoditi energije protona, odnosno alfa čestica i energije teških iona tako da im je doseg jednak u određenom materijalu što nije trivijalno. Nedostatak ove metode je i malo područje koje se može ozračiti, dubina je otprilike tri do pet mikrometara ovisno o energiji i vrsti iona. Također se osim dva ionska snopa, mogu koristiti i tri ionska snopa. [13] [35]

3 Interakcije ubrzanih iona s atomima unutar materijala

U ovom poglavlju će se predstaviti teorijska pozadina koja je potrebna za razumijevanje i interpretiranje rezultata mjerenja. Općenito, kinetička energija teških nabijenih čestica se smanjuje u materijalu, odnosno prenosi se energija materijalu, ovisno o vrsti interakcije i svojstvima čestica i atoma materijala. Smanjenje kinetičke energije teških nabijenih čestica je kod određenih vrsta interakcije prenesu većinu svoje energije materijalu, a nekad nabijene čestice prenesu svu energiju materijalu. Teške nabijene čestice su čestice koje imaju masu puno veću od mase elektrona, a to su na primjer pioni, mioni, protoni, alfa čestice, ioni. Gubitak energije teških nabijenih čestica po putu ($-\frac{dE}{dx}$) nije konstantan nego je dan Braggovom krivuljom. Gubitak energije, odnosno prijenos energije atomima materijala, raste kako čestica putuje kroz materijal i najveći specifični gubitak energije je na kraju puta čestice. Teške nabijene čestice na kraju svoje putanje u materijalu prenesu većinu svoje preostale energije i što se naziva Braggov vrh jer nakon što dosegnu maksimum predaje energije materijalu vrlo brzo se zaustave. Primjeri prijenosa energije za različite čestice se nalazi na slici 3.1. Doseg čestice u materijalu je udaljenost koju čestica prijeđe od ulaska u materijal do točke zaustavljanja. Doseg ovisi o vrsti čestica, kinetičkoj energiji čestica i materijalu. Na primjer alfa čestica (jezgra helija ^4He) ima doseg 7,1 cm u zraku pri normalnom tlaku i temperaturi, dok se na udaljenosti 6,3 cm od izvora nalazi Braggov vrh. [33] [36]

Kada ionski snop kada uđe u uzorak materijala interagira na razne načine s atomima uzorka materijala, kao što je ranije spomenuto. Čestice snopa interagira s jezgrama atoma ili s elektronskim omotačem jezgre. Interakcije, odnosno međudjelovanja najosnovnije se mogu podijeliti u dvije osnovne skupine. U prvu skupinu bi spadala „mala“ međudjelovanja, odnosno interakcije iona s jezgrama atoma uzorka ili elektronskim omotačem, gdje se nakon međudjelovanja jako malo promjeni energija i smjer iona. Primjer ovakvih interakcija su procesi kočenja iona, višestruka raspršenja iona na atomima uzorka materijala. Primjena „malih“ međudjelovanja može biti u određivanju dubine na kojoj je došlo do „velikih“ međudjelovanja bitnih za analitičke metode. Kod analitičkih metoda, „mala“ međudjelovanja zbog svoje statističke prirode, unose nepouzdanost. Druga skupina su „velika“ međudjelovanja



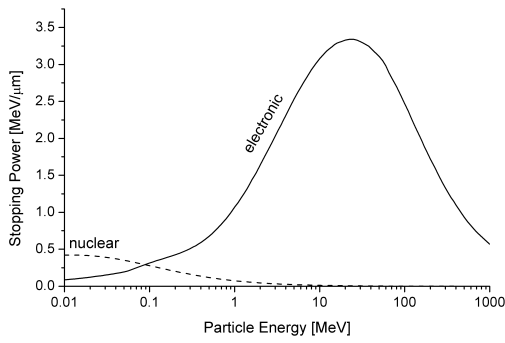
Slika 3.1: Doseg različitih čestica u materijalu [38]

nakon kojih postoji značajna promjena energije i smjera iona. Nakon „velikih“ međudjelovanja može se dogoditi emisija raspršenih iona snopa, produkta nuklearnih reakcija ili elektromagnetskog zračenja (X ili γ zračenje). Upotreba „velikih“ međudjelovanja može biti kod određivanja kemijskog sastava materijala uzorka, tj. na njima se zasnivaju analitičke metode temeljene na snopovima ubrzanih iona. [37]

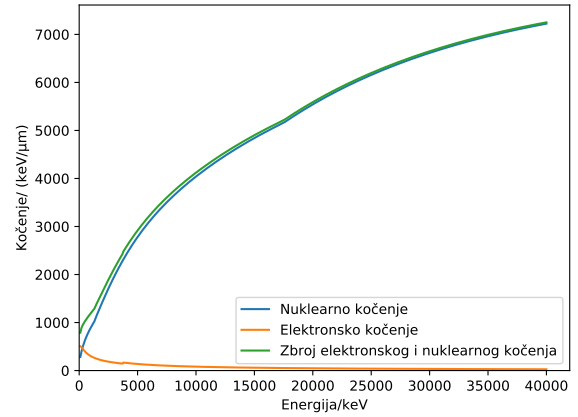
Kočenje iona unutar materijala uzorka, uz višestruka raspršenja, uzrokuje postepeni gubitak energije iona, pri čemu zbog statističke prirode procesa, dolazi do neodređenosti u energiji pojedinih iona. Višestruko elastično raspršenje iona u materijalu uzorka uzrokuje kutno i bočno širenje ionskog snopa.

Glavne komponente kočenja iona su: elektronsko kočenje (eng. *electronic stopping*) i nuklearno kočenje (eng. *nuclear stopping*) te obje doprinose gubljenju njihove energije. Prikaz ovisnosti kočenja o energiji iona se nalazi na slici 3.2. Elektronsko kočenje $S_e(E)$ nastaje kao posljedica interakcije iona upadnog snopa s elektronima u materijalu uzorka. Elektronsko kočenje je prisutno i doprinosi na gotovo svim energijama upadnih iona. Nuklearno kočenje $S_n(E)$ nastaje kao posljedica interakcije iona sa zasjenjenim jezgrama atoma materijala uzorka, a rezultira u izbijanju atomskih jezgri iz njihovih početnih pozicija. Nuklearno kočenje je prisutno i dominantno na nižim energijama upadnog snopa iona. Elektronsko i nuklearno kočenje u uzorku materijala su statistički procesi. [37]

Energija teško nabijenog ionskog snopa se može smanjiti prolaskom kroz materijal interagirajući s jezgrama atoma u materijalu uzorka, kao i s elektronima materijala uzorka. Na ovakav način teške nabijene čestice gube energiju, a primjer teških nabi-



(a)



(b)

Slika 3.2: (a) Ovisnost nuklearnog i elektronskog kočenja o energiji čestica, odnosno $S/(\text{MeV}/\mu\text{m})$ o E/MeV [39] (b) Teorijski podaci kočenja u ovisnosti o energiji iona koji će se koristiti u nastavku rada, odnosno u teorijskim modelima. Eksperimentalni podaci su prikazani za interakciju željeza i aluminija.

jenih čestica su ioni koji su ranije spomenuti. Početna energija iona $E(x)$ prolaskom kroz sloj materijala uzorka Δx mijenja se te iznosi [37]:

$$E(x + \Delta x) = E(x) - S(E)\Delta x \quad (3.1)$$

gdje je x duljina dužine prijeđenog puta u materijalu, $S(E)$ gubitak energije iona po jedinici dužine (specifični gubitak energije), odnosno kočenje iona. Kočenje iona je definirano kao:

$$S(E) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta x} = \frac{dE}{dx}. \quad (3.2)$$

Kočenje iona je određeno vrstom i energijom iona te vrstom materijala uzorka, obično se koristi mjerna jedinica $\text{eV}/(10^{15} \text{ atoma}/\text{cm}^2)$, ali zbog jasnoće u ovom radu se koristi mjerna jedinica $\text{keV}/\mu\text{m}$. Konačno kočenje iona je zbroj elektronskog i nuklearnog kočenja na određenoj energiji. [37]

Statistički proces zbog mnogo interakcija upadnih iona s jezgrom i elektronskim omotačem uzorka materijala uvodi nepouzdanost elektronskog kočenja (eng. *electronic straggling*) i nepouzdanost nuklearnog kočenja (eng. *nuclear straggling*). Razlikuju se vrste kočenja pa tako i nepouzdanosti te su procesi nezavisni. Konačna širina nepouzdanosti kočenja δE_s dobije se zbrajanjem kvadrata širina za distribucije nepouzdanosti elektronskog kočenja δE_{se} , odnosno nepouzdanosti nuklearnog kočenja

δE_{sn} [37]:

$$\delta E_s^2 = \delta E_{se}^2 + \delta E_{sn}^2. \quad (3.3)$$

Nakon što se izvrši jednostavna matematička operacija nad izrazom (3.2), slijedi procjena dometa čestice u uzorku materijala na temelju gubitka energije čestice. Oblik Gaussove distribucije se obično uzima za razdiobu iona oko srednje energije za elektronsko kočenje, uz napomenu kako vrijedi za određeni interval energije iona, odnosno za određeni gubitak energije iona, o čemu će biti govora u idućem potpoglavlju. [37]

3.1 Elektronsko i nuklearno kočenje

Niels Bohr je 1948. godine u svom radu [40] opisao elektronsko kočenje teških iona. Pretpostavka se temeljila na tome da teški ioni s brzinom v doživljavaju elektronsko kočenje $S_{eHI}(v)$ koje se može opisati pomoću efektivnog naboja tog teškog iona i kočenja protona $S_{ep}(v)$ na istoj toj brzini v . Efektivni naboj za protone u ovoj pretpostavci je jedinični naboj, odnosno $Z_p^* \approx 1$. Izraz kojim se opisuje elektronsko kočenje teških iona je [37]:

$$S_{eHI}(v) = (Z_{HI}^*)^2 S_{ep}(v). \quad (3.4)$$

Programski paket za račun kočenja iona SRIM razvio je J.F.Ziegler na temelju teorijskog Betheovog modela kočenja iona, parametrizacije protonskog kočenja, parametrizacije efektivnog naboja iona, odnosno zasjenjenja jezgre iona u materijalu te mnogobrojnih tabeliranih eksperimentalnih mjerenja. [37]

Duljina zasjenjenja a može se definirati na više različitih načina, ovisno o modelu koji se koristi. Općenito, duljina zasjenjenja ovisi o nabojima jezgara Z_1 i Z_2 koje su u interakciji. Općeniti izraz za efektivni naboj Z_{12} je [37]:

$$Z_{12} = (Z_1^x + Z_2^x)^y \quad (3.5)$$

dok se duljina zasjenjenja a definira kao:

$$a = \left(\frac{9\pi^2}{128} \right)^{1/3} a_B Z_{12}^{-1/3} \quad (3.6)$$

gdje je Bohrov radijus $a_B = 0,0529$ nm, a faktor $\left(\frac{9\pi^2}{128} \right)^{1/3}$ je jednak 0,8853.

Postoje više različitih modela u kojima su drugačije vrijednosti x i y . Firsov model koristi $x = 1/2$ i $y = 2$, Lindhard-Scharf-vom model koristi $x = 2/3$ i $y = 3/2$, dok Thomas-Fermijev model $x = 2/3$ i $y = 3/2$. U ovom radu će se koristiti aproksimacija Thomas-Fermijevog modela zasjenjenja [37]:

$$a_{TF} = 0,8853 a_B \left(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3} \right)^{-1/2}. \quad (3.7)$$

Prilikom razmatranja gubitka energije iona elektronskim kočenjem, ovisno o postotku smanjenja energije, razlikuju se četiri različita modela s pripadajućim distribucijama za elektronsko kočenje.

Prvi model, odnosno Vavilovljev model kočenja, se koristi kad je gubitak energije iona manji od 10% i pripadajuća asimetrična Vavilovljeva distribucija. Drugi model, Bohrov model kočenja, vrijedi kada je gubitak energije iona između 10% i 25% te je distribucija kojom se opisuje Gaussian. Treći model, Symonov model kočenja, se koristi za gubitak energije iona između 20% i 50% i distribucija je također Gaussian sa širinom do dva puta većom nego u Bohrovom modelu. Četvrti model, Payne-Tschalar model kočenja, vrijedi za gubitak energije iona od 50% do 90% i pripadajuća distribucija je asimetrična te manjom širinom nego u Symonovom modelu. Kada se proučavaju niske energije iona, zbog jednostavnosti i lakšeg računa elektronskog kočenja, u ovom radu će se koristiti Bohrov model. Također, kod teških iona niskih energija treba uzeti u obzir nuklearno kočenje, ali o tome će biti riječi malo kasnije. Postizanje ostanka u okviru Bohrovog modela se dobiva tako da se uzorak materijala podijeli na slojeve i unutar svakoga vrijedi gubitak energije oko 10%. Uvjet kojim se može postići ova prilagodba je debljina sloja koja mora biti veća od granične vrijednosti i manja od dvije vrijednosti granične vrijednosti. Granična vrijednost se definira izrazom [37]:

$$x_G = 3 \cdot 10^{-4} \left(\frac{M_2}{Z_2} \right) \left(\frac{E}{Z_1 M_1} \right)^2 \quad (3.8)$$

gdje su M_1 i M_2 molarne mase iona i atoma materijala izražene u $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$, Z_1 i Z_2 atomski broj iona i materijala te E energija iona. Mjerna jedinica granične vrijednosti je g/cm^2 .

Ukoliko se dogodi da je sloj debljine manji od granične vrijednosti, onda je ion izgubio energije manje od 10% te prilikom toga treba koristiti asimetričnu Vavilovljevu

distribuciju. Izbjegavanje ovakve situacije se može postići ako se zadnji sloj pridoda prethodnom sloju te se provjeri uvjet kako gubitak energije nije veći od 25%. Ako je zadovoljen uvjet, nastavlja se koristiti Bohrov model i primjenjivati Gaussova distribucija te se konačna širina dobije zbrajanjem kvadrata širine distribucije u svakom od slojeva. [37]

Pretpostavka od koje osnovno polazi Bohrov model je ta kako nema korelacije između međudjelovanja iona s elektronima, odnosno kako nema ni atomskih ni molekulskih niti prostornih korelacija. Kao što je ranije navedeno, Bohrov model kočenja ima oblik Gaussiana, odnosno daje energijsku distribuciju s varijancom Ω_B [37]:

$$\Omega_B^2 = 4\pi Z_2 (Z_1 e^2)^2 N dx F(\beta) \quad (3.9)$$

gdje je Ω_B izražena u keV, Z_1 i Z_2 atomski broj iona i materijala, e^2 kvadrat jediničnog naboja elektrona koji iznosi $2,56697 \cdot 10^{-38} C = 1,4398 \cdot 10^{-10} \text{keV cm}$, N gustoća broja atoma po kubičnom centimetru unutar promatranog sloja, dx debljina promatranog sloja izražena u cm, dok je $F(\beta)$ funkcija relativističke korekcije iona s brzinom v . Funkcija je dana izrazom:

$$F(\beta) = \frac{1 - \frac{\beta^2}{2}}{1 - \beta^2} \quad (3.10)$$

gdje je veličina β jednaka $\frac{v}{c}$, a gdje je v brzina iona, a c je brzina svjetlosti. [37]

Kako je ranije spomenuto, osim razmatranja elektronskog kočenja na nižim energijama, potrebno je pridodati i nuklearno kočenje. Nuklearno kočenje teških iona na vrlo niskim energijama, reda veličine 1 MeV, dominira zbog sudara zasjenjene jezgre iona sa zasjenjenim atomskim jezgrama materijala na kojima se temelji. Uvodi se kulonski potencijal V_S koji se definira kao [37]:

$$V_S(r) = V_C(r) F_s \left(\frac{r}{a} \right) \quad (3.11)$$

gdje je F_s funkcija u ovisnosti a radijus zasjenjenja definiran (3.6) i r udaljenost između dvije čestice i interakciji, a $V_C(r)$ kulonski potencijal koji definiran kao:

$$V_C(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (3.12)$$

gdje su Z_1 i Z_2 atomski brojevi čestica u interakciji, a ϵ_0 je dielektrična permitivnost vakuuma i iznosi $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$. Na temelju gore navedenog i Wilsonovih rezultata,

Ziegler je dobio izraz za nuklearno kočenje iona [37]:

$$S_n(E) = 8,462 \cdot Z_1 \cdot Z_2 \cdot M_1 \cdot (M_1 + M_2)^{-1} \cdot s_n(\varepsilon) \quad (3.13)$$

gdje su M_1 i M_2 molarne mase iona i atoma materijala izražene u $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$, Z_1 i Z_2 atomski broj iona i materijala, $s_n(\varepsilon)$ reducirano nuklearno kočenje koje ovisi o parametru ε koji uz energiju iona E iznosi [37]:

$$\varepsilon = 32,53E M_2 (M_1 + M_2)^{-1} (Z_1 Z_2)^{-1} \left(Z_1^{0,23} + Z_2^{0,23} \right)^{-1} \quad (3.14)$$

gdje je energija E iona izražena u keV.

Nuklearno kočenje iona ima energijsku distribuciju, Gaussovu distribuciju, s varijansom [37]:

$$\Omega_n^2 = 4\pi (Z_1 Z_2 e^2)^2 N dx \left(1 + \frac{M_2}{M_1} \right)^{-2} W^*(\varepsilon) F(\beta) \quad (3.15)$$

gdje je e^2 kvadrat jediničnog naboja elektrona, N gustoća broja atoma po kubičnom centimetru unutar promatranog sloja, dx debljina promatranog sloja izražena u cm, $F(\beta)$ definirano izrazom (3.10), $W^*(\varepsilon)$ je nepouzdanost za reducirano nuklearno kočenje $s_n(\varepsilon)$ [37]:

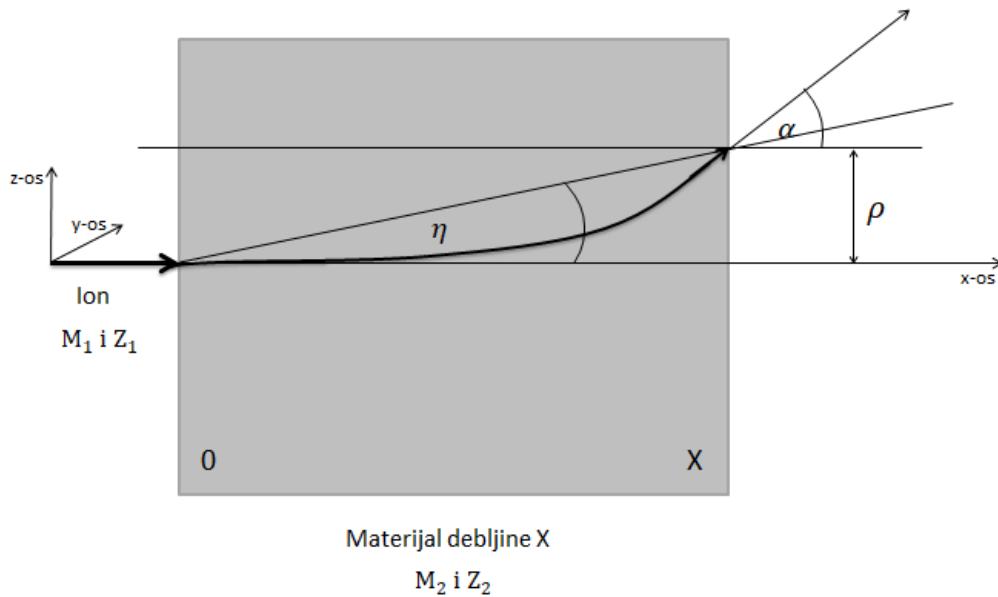
$$W^*(\varepsilon) = \left(4 + A\varepsilon^{-B} + C\varepsilon^{-D} \right) \quad (3.16)$$

gdje su konstante $A = 1,6460$, $B = -1,0494$, $C = 0,0492$ i $D = -1,6991$, a reducirana energija ε je definirana u izrazu (3.14). Varijanca nuklearnog kočenja daje punu širinu na pola maksimuma (eng. *full width at half maximum*), kratica FWHM:

$$\delta E = 2,355\Omega_n. \quad (3.17)$$

Prilikom korištenja izraza (3.17) bitno je podijeliti slojeve uzorka tako da je energija iona približno stalna, jer Ω_n ovisi o energiji iona. [37]

Korištenjem podjele slojeva debljine između granične vrijednosti i dvostruke granične vrijednosti, odnosno $x_G \leq x \leq 2x_G$, gubitak energije unutar svakog sloja je otprilike 10% što je približno konstantno pa se može koristiti energijska distribucija elektronskog kočenja po Bohorovom modelu te je Gaussian širine δE_{ei} te energijska distribucija nuklearnog kočenja je također Gaussian širine δE_{ni} . Zaključuje se kako je ukupni doprinos, nezavisnih procesa, nuklearnog i elektronskog kočenja unutar



Slika 3.3: Shematski prikaz kutnog i bočnog širenja iona (M_1 i Z_1) nakon što prođe kroz materijal (M_2 i Z_2) debljine x

svih slojeva suma kvadrata širina svih Gaussiana kočenja iz svakog od slojeva, prema izrazu (3.3). [37]

3.2 Kutno širenje ionskog snopa zbog višestrukih (elastičnih) raspršenja teških iona

Prilikom teorijskih razmatranja teških iona trebalo bi uključivati doprinose višestrukih elastičnih raspršenja iona pod malim kutovima jer doprinose nepouzdanosti energije. Višestruka kutna raspršenja, u teoretskom modelu, su pod malim kutovima $\theta \leq 20^\circ$, za koje vrijedi $\sin\theta \approx \theta$ kada se snop teških iona na atomima u uzorku rasprši bočno, uz istodobnu kutnu divergenciju. Obrada podataka i teorijski model, u ovom radu će promatrati kutno širenje i kutnu divergenciju ionskog snopa. Na slici 3.3 se vidi shematski prikaz prolaska teškog iona Z_1 , M_1 kroz materijal debljine dx i nakon prolaska kroz materijal uzorka ima kutnu poluširinu $\alpha_{1/2}$ i bočnu poluširinu $\rho_{1/2}$. Kutno širenje ionskog snopa, P. Sigmund i L. Meyera su obradili u svojim radovima. [41] [42] Događa se promjena kuta raspršenja θ zbog kutne distribucije višestrukih elastičnih raspršenja čime utječe na energijsku rezoluciju. Postoji razlika u visini ulaska teških iona i izlaska iz materijala i time se prijeđeni put iona treba pažljivo promatrati. [37]

U Sigmundovom modelu višestrukih elastičnih raspršenja je osnovna pretpos-

tavka kako su rasporedi centara raspršenja slučajni, a raspršenja su međusobno neovisna i aksijalno simetrična. Model je ograničen na male kutove $\theta \leq 20^\circ$ i zanemaruje gubitak energije u materijalu. Zbog zanemarivanja gubitka energije bitno je podijeliti uzorak na slojeve, kao kod računa kočenja, tako da vrijedi $x_G \leq x \leq 2x_G$, gdje je x_G definiran izrazom (3.8). Unutar svakog sloja uzorka materijala će postojati smanjenje energije oko 10%, što je približno stalna vrijednost energije. Prilikom provedbe računa kutnog raspršenja potrebno je provoditi račun gubitka energije u sklopu računa kočenja iona. Osim ovih pretpostavki modela, u nastavku rada će biti prezentirane još tri varijante modela koji koriste neke od ovih pretpostavki ili dodaju još neke pretpostavke kako bi se eksperimentalni rezultati mogli analizirati i usporediti. [37]

Nakon prolaska snopa iona kroz sloj materijala debljine dolazi do kutne distribucije snopa iona u prostornom kutu $d\Omega$ jer vektori brzine iona nisu više u potpunosti paralelni, već poprimaju kutnu distribuciju. Kutna distribucija ionskog snopa je jednaka $F(dx, \alpha)$ gdje je dx debljina materijala (ili debljina sloja materijala), a α kut odklona od osi snopa iona. Prelazi se s realnih varijabli na reducirane varijable. Uvodi se reducirani kut α^* pomoću faktora μ [37]:

$$\alpha^* = \mu \alpha = \frac{E a_{TF}}{2 Z_1 Z_2 e^2} \alpha \quad (3.18)$$

gdje je E energija iona izražena u keV, a_{TF} je definiran (3.7), Z_1 i Z_2 atomski broj, odnosno broja elektrona, iona i atoma materijala, e^2 je kvadrat jediničnog naboja elektrona koji iznosi $2,56697 \cdot 10^{-38} \text{C} = 1,4398 \cdot 10^{-10} \text{keV cm}$. Također se uvodi reducirana dubina τ pomoću faktora ν , a definira se kao [37]:

$$\tau = \nu dx = \pi a_{TF} N dx \quad (3.19)$$

gdje je a_{TF} definiran (3.7), N gustoća broja atoma po kubičnom centimetru u promatranom sloju, dx debljina sloja izražena u cm.

Distribucija $F(dx, \alpha)$ je definirana za prostorni kut $d\Omega$, ali su umjesto te distribucije uvodi se rotacijska simetrična bezdimenzionalna distribucija $f(\tau, \alpha^*)$, koja je definirana kao [37]:

$$F(dx, \alpha) d\Omega = \alpha^* d\alpha^* f(\tau, \alpha^*). \quad (3.20)$$

Normalizacija za realne i reducirane kutove je jednaka [37]:

$$\int_{4\pi} F(x, \alpha) d\Omega = 2\pi \int \alpha F(x, \alpha) d\alpha = 1, \quad (3.21)$$

$$\int_{4\pi} F(x, \alpha) d\Omega = 2\pi \int \alpha^* f(\tau, \alpha^*) d\alpha^* = 1. \quad (3.22)$$

U model P. Sigmunda su izračunate i tabelirane razne vrijednosti τ za distribuciju $f(\tau, \alpha^*)$. Tabelirane vrijednosti funkcija $f(\tau, \alpha^*)$ su aproksimirane analitičkim funkcijama radi lakšeg korištenja u računima obrađenima u disertaciji T. Tadića. Linearna kombinacija Gaussiana $G(\alpha)$ i Lorentziana $L(\alpha)$ se pokazala kao najbolja kombinacija analitičkih funkcija [37]:

$$G(\alpha) = \frac{e^{-\frac{\alpha^2}{\sigma^2}}}{(\sigma^2 2\pi)^{1/2}}, \quad (3.23)$$

$$L(\alpha) = \frac{\frac{\Gamma}{2\pi}}{\left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2 + \alpha^2}. \quad (3.24)$$

Pune širine na pola maksimuma, FWHM-a, Gaussiana i Lorentziana međusobno su ovisne tako da je kvadrat širine Γ proporcionalan s kvadratom širine σ uz faktor proporcionalnosti, odnosno $\Gamma^2 = 8\sigma^2$. Također su uvedeni parametri A, C, D koji ovise o reduciranoj dubini τ . Stoga je linearna kombinacija Gaussiana i Lorentziana [37]:

$$f_{GL}(\tau, \alpha^*) = \gamma G(\alpha^*) + \lambda L(\alpha^*) \quad (3.25)$$

gdje su $\gamma = C \left(\frac{\pi}{A}\right)^{1/2}$ i $\lambda = \pi D A^{-1/2}$ parametri linearne kombinacije. Uvrštavanjem parametara linearne kombinacije i izraza za Gaussian (3.23) i Lorentzian (3.24) u izraz (3.25) dobiva se konačni izraz za distribuciju koji glasi [37]:

$$f_{GL}(\tau, \alpha^*) = C e^{-A\alpha^{*2}} + \frac{D}{1 + A \alpha^{*2}}. \quad (3.26)$$

Ako vrijednosti τ variraju od 0,001 do 2000, parametre A, C, D (koji ovise o τ) se mogu promatrati preko $\ln A$, $\ln C$, $\ln D$ u ovisnosti o L_τ preko polinoma četvrtog stupnja po L_τ . Odnosno za parametra A je [37]:

$$\ln A = a_A L_\tau^4 + b_A L_\tau^3 + c_A L_\tau^2 + d_A L_\tau + e_A, \quad (3.27)$$

za parametar C:

$$\ln C = a_C L_\tau^4 + b_C L_\tau^3 + c_C L_\tau^2 + d_C L_\tau + e_C, \quad (3.28)$$

za parametar D:

$$\ln D = a_D L_\tau^4 + b_D L_\tau^3 + c_D L_\tau^2 + d_D L_\tau + e_D, \quad (3.29)$$

L_τ je definiran kao:

$$L_\tau = \ln \tau = \ln(\pi \alpha^2 N dx). \quad (3.30)$$

Na ovakav način se može izračunati $f(\tau, \alpha^*)$ i dobiti vrijednosti τ koje nisu tabelirane. U računu nepouzdanosti energije bitni su kutovi i distribucije u ravnini koju definira normala na površinu, os detektora, os snopa iona. Uvodi se projicirana kutna distribucija $f_p(\alpha_p^* = \alpha^*)$ i projicirana kutna poluširina $\alpha_{p1/2}^*$ zbog toga jer je distribucija $f(\tau, \alpha^*)$ prostorna, odnosno određuje vjerojatnost smjera iona za prostorni kut $2\pi\alpha^2 d\alpha^*$. Izraz koji daje prijelaz od prostorne na ravninsku projiciranu distribuciju glasi [37]:

$$f_p(\alpha_p^* = \alpha^*) = 2 \int_0^\infty f \left((\alpha^{*2} + \omega^{*2})^{1/2} \right) d\omega^*. \quad (3.31)$$

U ovom radu će se koristiti projicirana analitička aproksimacija $f_{pGL}(\tau, \alpha_p^*)$ za vrijednosti τ između 15,46 i 45,22. Projicirana analitička aproksimacija $f_{pGL}(\tau, \alpha_p^*)$ je linearna kombinacija Gaussiana i Lorentziana. Parametri linearne kombinacije su A_p, C_p, D_p koji ovise o L_τ . Parametri A_p, C_p, D_p se dobivaju na analogan način kao i parametri A, C, D, odnosno [37]:

$$\ln A_p = a_{A_p} L_\tau^4 + b_{A_p} L_\tau^3 + c_{A_p} L_\tau^2 + d_{A_p} L_\tau + e_{A_p}, \quad (3.32)$$

$$\ln C_p = a_{C_p} L_\tau^4 + b_{C_p} L_\tau^3 + c_{C_p} L_\tau^2 + d_{C_p} L_\tau + e_{C_p}, \quad (3.33)$$

$$\ln D_p = a_{D_p} L_\tau^4 + b_{D_p} L_\tau^3 + c_{D_p} L_\tau^2 + d_{D_p} L_\tau + e_{D_p} \quad (3.34)$$

gdje su koeficijenti koji su prikazani u radu T. Tadića prikazani u tablici 3.1.

Za prostorne i projicirane kutne distribucije vrijednosti vrijedi tzv. konvolucijska koherentnost. Konvolucija kutnih distribucija u dva bliska $f_{pGL}(\tau_2, \alpha_p^*)$ i $f_{pGL}(\tau_1, \alpha_p^*)$ sloja rezultira ukupnom distribucijom $f_{pGL}(\tau_1 + \tau_2, \alpha_p^*)$ [37]:

$$f_{pGL}(\tau_1 + \tau_2, \alpha_p^*) = f_{pGL}(\tau_1, \alpha_p^*) \otimes f_{pGL}(\tau_2, \alpha_p^*). \quad (3.35)$$

Postoji doprinos od bočnog širenja ionskog snopa, koji je obrađen u radu A. D. Marwicka [43]. Bočno (lateralno) širenje ionskog snopa ρ definirano je u ravni okomitoj na os ionskog snopa. Za kutno širenje ionskog snopa definirana je distribucija $F(dx, \alpha)$, tako je i za bočno širenje definirana ista distribucija $G(dx, \rho)$ s istom normalizacijom. Kao i kod kutnog širenja, i kod bočnog širenja napravljen je prijelaz s realnih varijabli na reducirane varijable. Realna varijabla dubine u materijalu dx prelazi u reduciranu varijablu, odnosno reduciranu dubinu τ na isti način kao i kod kutnog širenja, odnosno prema izrazu (3.19). Također se uvodi reducirana bočna širina preko faktora μ i ν , odnosno [37]:

$$\rho^* = \nu \mu \rho = \pi a^2 N \frac{E a}{2 Z_1 Z_2 e^2} \rho. \quad (3.36)$$

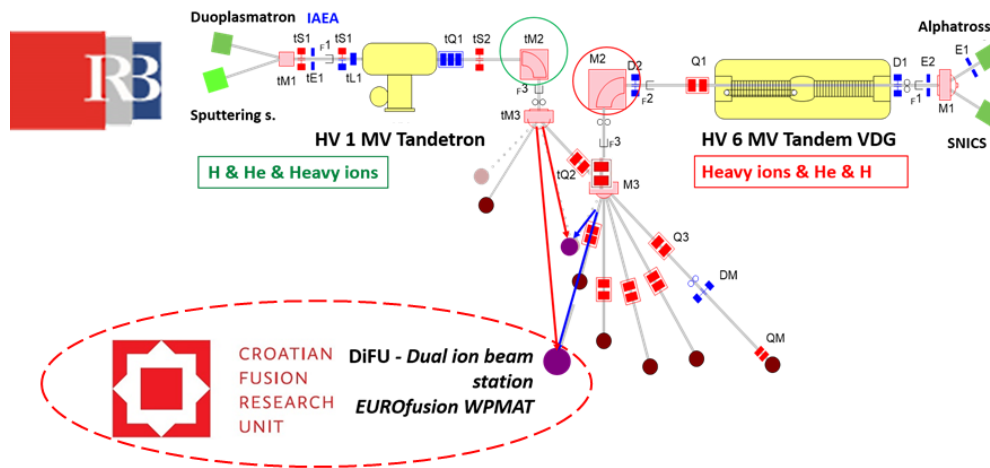
U daljnju analizu bočnog širenja neće se ulaziti iz tog razloga što u ovom radu neće uključivati u teorijska razmatranja i račun.

	A_p	C_p	D_p
a	$-4,663 \cdot 10^{-4}$	$-9,252 \cdot 10^{-4}$	$1,426 \cdot 10^{-4}$
b	$-3,384 \cdot 10^{-3}$	$1,760 \cdot 10^{-2}$	$-1,266 \cdot 10^{-3}$
c	$1,212 \cdot 10^{-1}$	$-1,178 \cdot 10^{-1}$	$3,039 \cdot 10^{-2}$
d	$-1,877$	$-2,260 \cdot 10^{-1}$	$-1,052$
e	$1,849$	$7,952 \cdot 10^{-1}$	$1,367$

Tablica 3.1: Vrijednosti parametara polinoma koji su potrebni za izračun projiciranih parametara A_p , C_p , D_p za projiciranu distribuciju $f_{pGL}(\tau, \alpha_p^*)$ [37]

4 Eksperimentalni postav za određivanje širenja snopa u folijama

Eksperimentalni postav koji je korišten u ovom radu se nalazi na Institutu Ruđer Bošković u Laboratoriju za interakcije ionskih snopova. Najjednostavnije opisano, eksperimentalni postav se sastoji od je 6,0 MV EN Tandem Van de Graaff akceleratora i komore dvostrukog snopa za istraživanje materijala od interesa za fuziju (eng. *Dual-beam station for fusion materials research*), a koja je postavljena unutar EUROfusion projekta. Shematski prikaz sustava akceleratora na Institutu Ruđer Bošković se nalazi na slici 4.1.



Slika 4.1: Shematski prikaz akceleratora i eksperimentalnih linija u Laboratoriju za interakcije ionskih snopova na Institutu Ruđer Bošković [44]

U laboratoriju se nalazi akceleratori sustav od dva elektrostatska akceleratora. Jedan je 6,0 MV EN Tandem Van de Graaff akcelerator s dva ionska izvora i 1,0 MV Tandetron akcelerator s duoplasmatronskim izvorom. Trenutno postoji deset eksperimentalnih linija, a devet različitih komora za istraživanja u područjima nuklearne i atomske fizike, analizu materijala ionskim snopovima, ozračivanje i modifikaciju materijala te nuklearnu mikroskopiju. [45]

U ovom eksperimentalnom postavu se koristiti jedna eksperimentalna linija i za dobivanje snopa teških iona se koristi 6,0 EM Tandem Van de Graff. Na eksperimentalnoj liniji se nalaze magnetski dipoli i kvadrupola kako bi se usmjerio snop proizveden u akceleratoru.

4.1 Akcelerator i ionski izvor čestica

U akceleratoru ili ubrzivaču se ubrzava snop nabijenih čestica. Svi ubrzivači se sastoje od otprilike istih osnovnih komponenti: izvora čestica, strukture koja ubrzava čestice i cijevi za napuštanje čestica. Pomoću ubrzivača čestica općenito se proučava struktura subatomske čestice kao što su veličina i naboj jezgre, struktura nukleona, ponašanje osnovnih sila. Ako se čestice žele ubrzati, čestica ne smije biti električki neutralna, odnosno mora biti nabijena. Osnovni princip rada ubrzivača je kad se iz nekog izvora, nabijena čestica dovede u električno polje na napon U [22]:

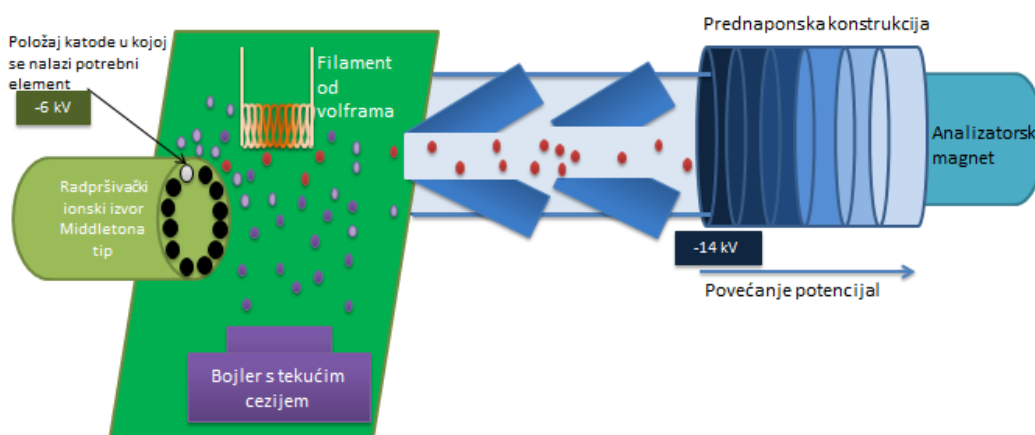
$$\Delta E_k = ZeU. \quad (4.1)$$

U jednadžbi (4.1) je Ze naboj čestice, U napon i ΔE_k promjena kinetičke energije čestice prije i poslije ubrzanja. Kada se čestica ubrza, tako ubrzana izlazi iz električnog polja te se dalje usmjerava pomoću dipolnih ili kvadrupolnih magneta, do komore u kojoj se odvija eksperiment, odnosno gdje se nalazi meta.

Postoji više osnovnih tipova ubrzivača, a to su: elektrostatski akcelerator, linearni akcelerator i kružni akcelerator koji se dijeli na ciklotron i sinkrotron. Elektrostatski akceleratori su najjednostavniji ubrzivači te postoje dvije varijante ubrzivača, a to su jednostupanjski Van de Graff i Tandem van de Graff. U jednostupanjskom Van de Graffovom akceleratoru čestice prolaze samo jednom kroz razliku potencijala, a sastoji se od generatora visokog napona, terminala s izvorom pozitivnih iona i cijevi za ubrzavanje čestica. Terminal je metalna sfera u kojoj se nalazi ionski izvor. Terminal se nabija na visoki potencijal izolacijskom trakom koja transportira naboj. Tandem van de Graff je ubrzivač kojim se može postići dva puta veća energija od Van de Graff-ovog ubrzivača jer čestice snopa dva puta ubrzaju (tj. čestice prolaze dva puta kroz razliku potencijala). Prvo se proizvedu negativni ioni na potencijalu Zemlje i ubrzaju se. Općenito, negativni ioni dolaze do tanke folije koja skida dio elektrona s iona i oni postaju pozitivno nabijeni. Pozitivno nabijeni ioni se ponovno ubrzaju. Teški ioni mogu izgubiti nekoliko elektrona i ubrzati se i preko 30 MeV. Radni naponi u Tandem Van de Graffovom ubrzivaču su od 1 do 6 MV. [22]

EM Tandem Van de Graff na Institutu Ruđer Bošković, trenutno radi na naponima od 1 MV do 4 MV. U ovom radu će se koristiti ionski snop željeza (Fe^{4+}), energije 10 MeV, pri čemu je napon terminala bio 2 MV. Kao što je prethodno navedeno, prvo se

proizvede negativni snop određenog iona, odnosno negativni ioni željeza, pomoću raspršivačkog ionskog izvora Middletonovog tipa. Unutar samog ionskog izvora nalazi se četrdeset katoda koje su napunjene različitim elementima. Shematski prikaz ionskog izvora i prednaponska konstrukcija se nalazi na slici 4.2. Na shematskom prikazu 4.2 ljubičasti kružići su atomi cezija, svijetloljubičasti kružići pozitivni ioni cezija, a crveni kružići su negativni ioni željeza.



Slika 4.2: Shematski prikaz ionskog izvora i prednapona

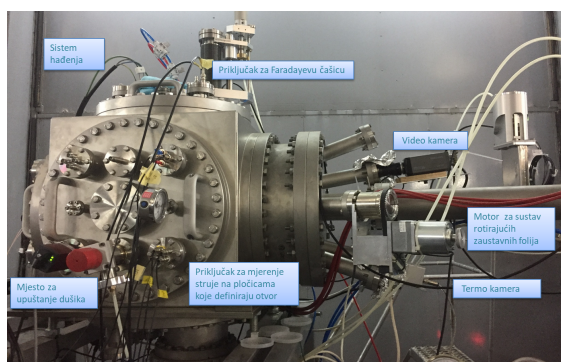
Odabirom elementa koji je potreban za dobivanje određenog snopa iona se namješta položaj katode u kojoj se nalazi potrebn element, a u ovom radu je korišten spoj koji sadrži željezo. U sklopu ionskog izvora se nalazi filament kroz koji teče struja reda veličine 25 A i filament se zagrije na visoku temperaturu, otprilike između 600°C i 700°C i bojler s tekućim cezijem koji se također zagrijava na temperaturu između 75°C i 120°C. Nakon što se cezij zagrije na temperaturu kada prelazi u plinovito stanje, otprilike na 670°C, on udara u zagrijani filament, koji je načinjen od volframa, čime se dobivaju pozitivni ioni cezija. Pozitivni ioni cezija dolaze do katode u kojoj se nalazi željezovog oksida i pri čemu se stvaraju ioni željeza. Radni napon ionskog izvora je velik zbog što većeg intenziteta ionskog snopa koji izlazi iz akceleratora, a to se dobiva većom energijom ulaznih iona u akcelerator. Katoda se nalazi na -6 kV, negativni ioni željeza se jednoliko ubrzano kreću prema pozitivnom potencijalu, odnosno negativni ioni željeza dolaze do predubrzanja gdje se na početku nalazi negativni potencijal od -14 kV i ide prema potencijalu Zemlje. Moguće je regulirati napon na početku prednaponske konstrukcije, ali standardno je -14 kV. Negativni ioni željeza prolaze negativni potencijal zbog prednaponske konstrukcije i kinetičke energije iona, ali mali dio iona se vraća nazad u izvor. Smanjenje potencijala je iz-

vedeno pomoću omskih otpora u obliku prstena. Snop se fokusira elektrostatskim ionsko-optičkim elementima. Zbog preciznosti fokusiranja snopa ulazni analizatorski magnet, odnosno injektorski magnet, je kalibriran za više različitih iona i potrebni ionsko-optički parametri se nalaze u programu MAG40. Snop iona ulazi u analizatorski magnet i otklanja se pod kutom od 40° prema ulazu u akcelerator. Negativni snop iona, $q = -1$, ulazi u akcelerator gdje se prvo ubrzava u nisko-energetskom dijelu akceleratora i dolazi do središta akceleratora gdje je visokonaponski terminal. U sredini akceleratora se nalazi *stripper* plin u jednom kanalu, gdje se događa promjena naboja iona. U ovom eksperimentalnom postavu *stripper* plin je i izolacijski plin koji okružuje kanal u kojem se nalazi snop kako ne bi došlo do proboja. Izolacijski plin je smjesa plinova dušika N_2 i ugljikovog dioksida CO_2 , odnosno 80% smjese je dušik, a i 20% smjese ugljikov dioksid. Izolacijski plin ulazi u *stripper* kanal kroz mali otvor, tek toliko da negativni snop iona nakon niza sudara s atomima *stripper* plina postane pozitivan snop iona te da što manje ulazi u ostale kanale kako se ne bi narušavao vakuum koji se nalazi kanalima. Nakon što snop iona prođe kroz *stripper* kanal, pozitivan naboj teških iona nije jednoznačno definiran, odnosno može poprimiti vrijednosti ionizacije $q = +1$, $q = +2$, $q = +3$ ili $q = +4$ i tako dalje, a ovisi o atomskom rednom broju i atomskoj masi iona. Gaussovom raspodjelom se približno može odrediti vrijednost naboja iona oko ravnoteže. Širina Gaussove raspodjele ovisi o atomskom rednom broju iona. Pozitivan ionski snop se ubrzava u visokoenergijskom dijelu akceleratora, a nakon izlaska pozitivnog snopa iona poprima energiju koja je $q + 1$ puta veća od napona visokonaponskog terminala akceleratora. Energija iona je izražena u MeV. Program MAG90 služi za određivanje najpovoljnije kombinacije naboja iona i ionsko optičkih parametara akceleratora kako bi se dobila tražena energija iona s najvećim intenzitetom ionskog snopa. Razvoj programa MAG90 se zasniva na semiempiričkom izrazu H.D. Betza i B. Delaunaya za srednji naboj iona. Nakon izlaska snopa iz akceleratora, snop prolazi kroz elektromagnetske leće i elektrostatske leće te dolazi do analizatorskog magneta koji služi za separiranje određenog naboja iona koji je potreban u eksperimentu. Analizatorski magnet dobro definira naboj iona, ali i skreće ionski snop za 90° . Izlaskom snopa iz analizatorskog magneta, snop dolazi do *switching* magneta gdje se usmjerava na određenu eksperimentalnu liniju. Energija snopa je općenito dobro definirana nakon analizatorskog magneta s točnošću od 0,2%. Točnost energije snopa ovisi o vrsti iona i energiji iona. Točnost

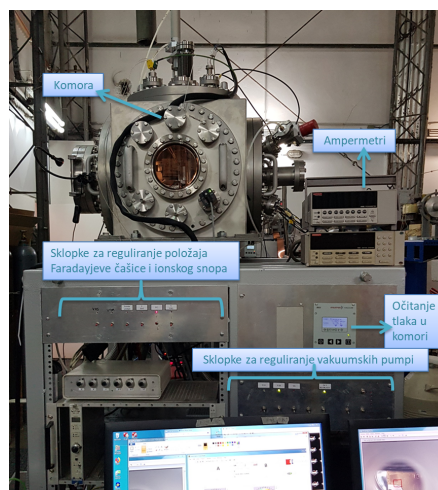
energije ionskog snopa željeza Fe^{4+} od 10 MeV je 1 ‰. Tijekom dobivanja snopa kroz faze se ubacuju Faradayeve čaše zbog provjere iznosa jakosti struje i podešavanja maksimalnih performansi ionskog snopa. [37]

4.2 Komora dvostrukog snopa za istraživanje materijala od interesa za fuziju na Institutu Ruđer Bošković

Komora dvostrukog snopa za istraživanje materijala od interesa za fuziju (eng. *Dual beam station for fusion materials research*), kratica DiFU, se nalazi u Hrvatskoj na Institutu Ruđer Bošković. Slične komore dvostrukog snopa za istraživanje materijala od interesa za fuziju još se nalaze u Njemačkoj, Francuskoj, Ujedinjenom Kraljevstvu, Japanu i Indiji.



(a) Vanjski izgled komore

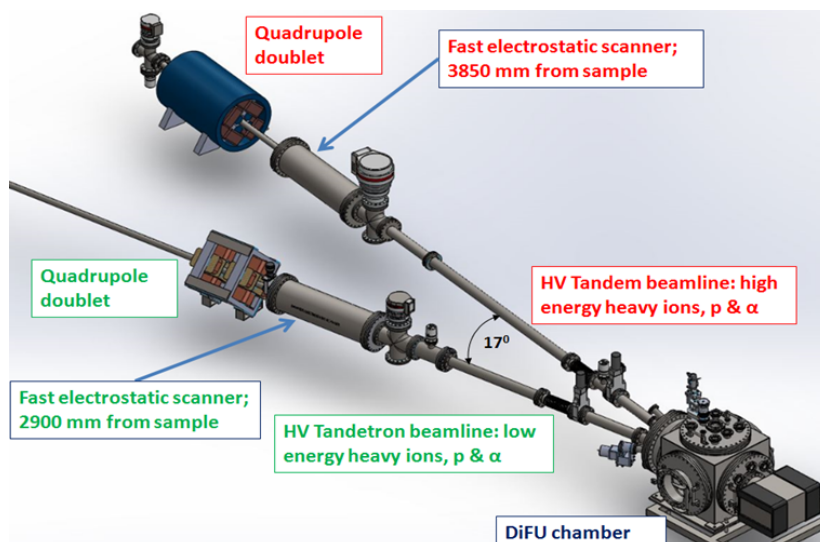


(b) Vanjski izgled komore

Slika 4.3: Prikaz vanjskog izgleda komore

Vanjski izgled komore je prikazan na slici 4.3, dok je unutrašnjost komore prikazana na slici 4.5. U komoru se mogu dovesti dva snopa iona pod kutom $8,5^\circ$ prema normalni kao što je prikazano na slici 4.4. Unutar komore dvostrukog ionskog snopa za istraživanje materijala od interesa za fuziju, nalazi se pločice koje definiraju otvor (eng. *slit*), sustav rotirajućih zaustavnih folija, Faradayeva čaša, postolje za uzorak i uzorak na nosaču. U ovom eksperimentalnom postavu uzorak je poliamidni film (kapton film) s kojeg se analizira oblik i relativni intenzitet ionskog snopa.

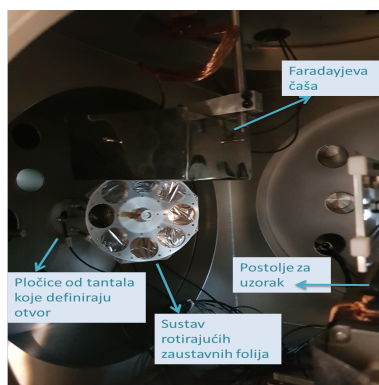
Izvan komore na svakoj od eksperimentalnih linija se nalazi Danfysikov elektrostatički X-Y skener koji omogućava homogeno ozračivanje uzorka, a maksimalna površina skeniranja je $40 \times 40 \text{ mm}^2$. [35]



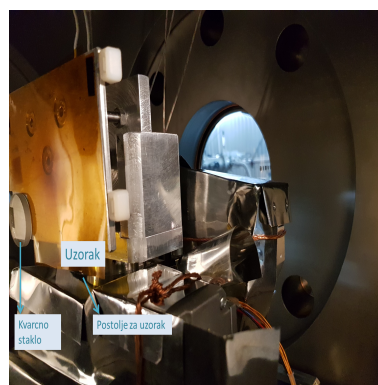
Slika 4.4: Shematski prikaz dvije eksperimentalne linije i komore [44]

Prije početka ozračivanja uzorka potrebno je postići visoki vakuum u komori. Visoki vakuum se postiže pomoću rotacijske i turbomolekularne pumpe. Uključivanje i isključivanje pumpi se kontrolira sklopkama prikazanim na slici 4.3b. Tlak u komori se očitava na zaslonu vakuummetra. Nakon završetka ozračivanja i prije otvaranja komore potrebno je upustiti dušik dok tlak u komori ne dođe na razinu tlaka atmosferskog zraka (1 bar). Mjesto gdje se upustiti dušik prikazano je na slici 4.3a. U komoru se upušta dušik, a ne zrak, zbog toga što se treba zadržati kvalitetnog vakuuma i skratiti vrijeme dostizanja. Kvaliteta vakuuma se smanjuje kada su prisutni ugljikovodici koji ulaze iz zraka, odnosno CO i CO₂. Pri ozračivanju dolazi do taloženja ugljikovodika i upuštanjem dušika umjesto zraka se smanjuje problem. [35] [44]

Izvan komore se nalaze dvije kamere. Jedna kamera je video kamera za pro-



(a) Unutrašnjost komore



(b) Unutrašnjost komore

Slika 4.5: Unutrašnjost komore dvostrukog ionskog snopa za istraživanje materijala od interesa za fuziju

matranje procesa koji se događaju unutar komore u realnom vremenu. Druga kamera je Optris PI640, odnosno infracrvena kamera za mjerenje temperature koja ima razlučivost od 70 mK, a raspon spektra je od 7,5 μm do 13 μm . Kameru je moguće koristiti u temperaturnom području od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Položaj kamera se vidi na slici 4.3b. [35] [44]

Prilikom zračenja uzorka materijala bitan je parametar jakost struje iona. Iz podataka jakosti struje iona, može se pretpostaviti količina iona koji dolaze na uzorak. Jakost struje iona unutar komore se mjeri pomoću Faradayeve čaše koja se spušta u komoru na visinu u razini ionskog snopa u određenim trenucima tijekom eksperimenta, o čemu će biti više riječi u potpoglavlju 4.4. Faradayeva čaša (eng. *Faraday cup*) je sustav za mjerenje struje ionskog snopa direktnim ozračivanjem, a sastoji se od osjetljivog ampermetra. Nalazi unutar komore, a njen položaj unutar komore je prikazan na slici 4.5a. Vanjski, dok je vanjski dio prikazan na slici 4.3a kojima se direktno mjeri struja ionskog snopa pri ozračivanju uzorka. Faradayeva čaša je vodljivi metalni krnji stožac koji „hvata” snop nabijenih čestica promjera 35 mm, a debljine 70 mm. Faradayeva čaša ima potiskivač za sekundarne elektrone (eng. *suppressor*) kako ne bi došlo do povišenog čitanja visine struje. Prednapon potiskivača emisije elektrona iz Faradayeve čaše varira o tipu iona i energiji ionskog snopa, a obično je -280 V . Faradayeva čaša može biti u dva položaja: na visini u razini ionskog snopa kada se bilježe podatci o struji ionskog snopa ili iznad ionskog snopa kada se zrači uzorak. Faradayeva čaša na spuštеноj poziciji, odnosno na visini u razini ionskog snopa u komori, ostaje od nekoliko sekundi do nekoliko minuta, ovisno o potrebama i uvjetima eksperimentalnog postava. Položaj u kojem se nalazi Faradayeva čaša se upravlja sklopkom koja je prikazana na slici 4.3b. Pored sklopki za spuštanje i podizanje Faradayeve čaše nalazi se i sklopka kojom se regulira prisutnost ionskog snopa u komori, odnosno je li ionski snop zaustavljen ispred komore ili je u komori. [35] [44] [46]

Položaj pločica od tantala koje definiraju otvor (eng. *slit*) je prikazan na slici 4.5a i služi za definiranje maksimalne veličine i oblika upadnog snopa, ali i za mjerenje i kontrolu struje tijekom zračenja aluminijskih folija. Sustav koji definira otvor se sastoji od četiri pločice i pomicanjem svake pločice može se dobiti maksimalna određena veličina i oblik. Izmjerena struja na pločicama koje definiraju otvor je relativna struja zbog toga što nema potiskivača za sekundarne elektrone. [35] [44]

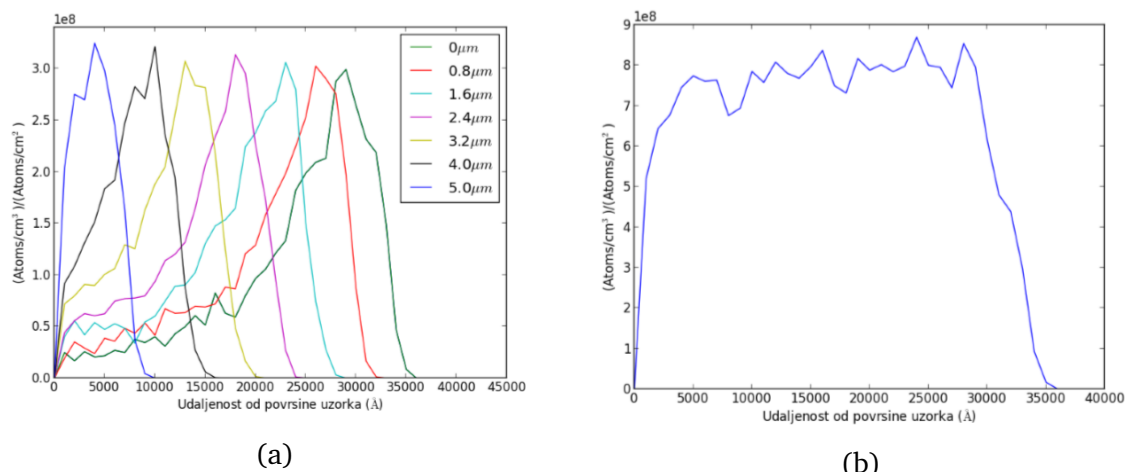
Unutar komore u njeno središte se postavlja uzorak koji se ispituje ionskim sno-

pom. Postolje na kojem se nalazi uzorak se može pomicati u tri okomita smjera (XYZ), odnosno lijevo-desno 120 mm, gore-dolje 50 mm, naprijed-nazad 100 mm. Pomicanje postolja se kontrolira pomoću računala. Postolje za uzorak je prikazano na slici 4.5b i na postolje se stavi nosač na kojem je uzorak i kvarcno staklo. Uzorak je u ovom slučaju poliamidni film (kapton film) na temelju kojeg se kasnije vrši analiza, dok je kvarcno staklo potrebno kako bi se vidio izgled snopa kroz praznu poziciju na sustavu rotirajućih zastavnih folija prije početka eksperimenta. Ali, kvarcno staklo služi i kao referentna točka u tijeku eksperimenta. U tijeku eksperimenta provjerava se izgled snopa i da se slučajno nisu promijenili početni uvjeti. Početni uvjeti snopa bi trebali biti isti prije svakog ozračivanja nove aluminijske folije. Uzorak u komori se može grijati pomoću otpornog grijača (*boraelfectric*) preko površine $30 \times 20 \text{ mm}^2$ i na maksimalnoj radnoj temperaturi $800 \text{ }^\circ\text{C}$. U sklopu ovog rada nije se koristio ovaj režim rada komore. [35] [44]

Unutar komore je moguće postaviti dva sustava rotirajućih zaustavnih folija (eng. *ion beam degrader*) na kojima se nalaze folije različitih debljina ovisno o potrebama eksperimenta. Sustavom rotirajućih zaustavnih folija se može upravljati motorom, ali se može i ručno okretati. Više o sustavu rotirajućih zaustavnih folija u idućem potpoglavlju. [35] [44]

4.3 Korekcija energije ionskog snopa pomoću sustava rotirajućih zaustavnih folija

Sustavom rotirajućih zaustavnih folija želi se postići različiti gubitci energije ionskih snopova i time njihov različiti doseg u materijalu. Odnosno, na ovaj način se želi postići ravnomjeran gubitak energije od ulaska snopa u materijal uzorka do krajnjeg dosega u materijalu uzorka, kao i postignuće jednakog dosega u materijalu za teške i lake ione. Homogenost ozračenog područja duž cijele dubine je jedan od izazova koji se pokušavaju riješiti sustavom rotirajućih zaustavnih folija. Na slici 4.6 se nalaze eksperimentalni podaci homogenog ozračivanja uzorka. Kada snop iona prođe kroz foliju, ioni gube energiju ovisno o debljini folije, što rezultira da do površine uzorka dolazi s drugom prilagođenom energijom. Sustav rotirajućih zaustavnih folija je geometrijski izrađen na takav način da ionski snop okomito pada na svaku foliju. Sustav rotirajućih zaustavnih folija na Institutu Ruđer Bošković ima osam



Slika 4.6: Snop iona željeza 20 MeV zrači uzorak čistog željeza debljine 10 μm
 (a) Ovisnost pojedinih distribucija premještenih atoma uzorka o udaljenosti od površine uzorka materijala nakon folija različitih debljina (b) Ovisnost ukupne distribucije premještenih atoma uzorka o udaljenosti od površine uzorka za upadne ione željeza energije 20 MeV [13]

rupa kružnog promjera 35 mm, odnosno pozicija, na koje se pričvrste tanke metalne folije debljina 0,65 μm , 0,8 μm , 1,2 μm , 1,8 μm , 2,5 μm , 4 μm , 7 μm , 13 μm ili neke njihove kombinacije. Odabir debljine tanke metalne folije ovisi o vrsti iona, energiji ionskog snopa i materijalu koji se ozračuje. Tanke metalne folije su u ovom slučaju od aluminija zbog osigurane dobre toplinske vodljivosti. Prilikom korištenja sustava rotirajućih zaustavnih folija potrebno je ostaviti jednu poziciju bez tanke folije zbog određivanja izgleda ionskog snopa i mjerenja struje. Tanka folija mijenja efektivni naboj nekih iona u snopu te nije moguće precizno odrediti jakost struje već tada imamo promjenu struje. Na slici 4.7g je prikazan sustav rotirajućih zaustavnih folija i na slici 4.5a je prikazan položaj sustava rotirajućih zaustavnih folija u komori koja se nalazi na Institutu Ruđer Bošković. [13] [35]

Sustav rotirajućih zaustavnih folija se okreće oko osi rotacije brzinom od 60 do 150 okretaja u minuti. Kada se koristi sustav rotirajućih zaustavnih folija potrebno je da ionski snop 85% vremena ozrači folije, odnosno prolazi kroz folije, dok ostatak vremena ionski snop prolazi preko prijelaza između folija. Povećanje površine koju prekriva folija, odnosno smanjenje površine između folija, trenutno nije moguće zbog toga jer dolazi do rastapanja folija i time se gubi njihova namjena. Sustav rotirajućih zaustavnih folija se ne smije presporo rotirati kako ne bi došlo do taljenja folija tijekom eksperimenta. Ali, sustav rotirajućih zaustavnih folija se ne smije ni prebrzo rotirati kako bi se ionski snop mogao zadržati na poziciji bez folije zbog kontrole

mjerenja struje. [13] [35]

U ovom eksperimentalnom postavu su korištene aluminijske folije debljine 0,65 μm , 1,2 μm i 1,8 μm . Na sustav rotirajućih zastavnih folija su postavljene po dvije folije iste debljine kako se tijekom eksperimentalnog mjerenja ne bi trebalo ponovno postavljati iste folije ako dođe do taljenja folije, pucanja same folije prilikom ozračivanja ili postavljanja unutar komore. Također, sustav rotirajućih zaustavnih folija ima jedno prazno mjesto na kojem se ne nalazi aluminijska folija. Prazno mjesto je potrebno za određivanje početnog oblika snopa i kao referentna točka nakon ozračivanja svake pojedine folije. Proces postavljanja aluminijskih folija na sustav rotirajućih zaustavnih folija prikazan je na slici 4.7.

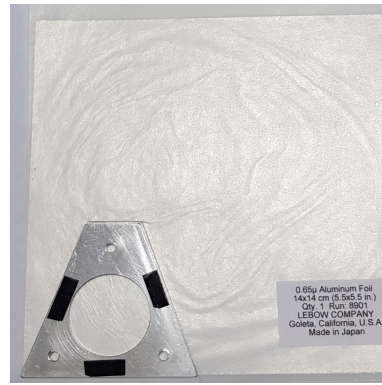
Prvi korak u postupku pripreme odgovarajućeg sustava rotirajućih zaustavnih folija je očistiti alkoholom (etanolom) i acetonom okvire i postolje sustava rotirajućih zaustavnih folija. Zatim kreće izrezivanje pojedine aluminijske folije, koja se nalazi unutar zaštitne folije, prema dimenzijama i obliku okvira, kao što je prikazano na slici 4.7a. Na slici 4.7b je prikazan pripremljeni okvir na kojem je zalijepljena ugljikova traka, koji se zalijepi na aluminijsku foliju, kao što je prikazano na slici 4.7d. Okvir na kojem je zalijepljena ugljikova traka mora biti unaprijed pripremljen zbog toga što postoji mogućnost da vrlo tanka aluminijska folija, reda veličine mikrometara, pukne ukoliko se ne nalazi unutar zaštitne folije. Do pucanja aluminijske folije može doći i zbog najmanje vibracije ili fluktuacije zraka. Odvajanje aluminijske folije od zaštitne folije je prikazano na slici 4.7c.

Nakon što se okvir na kojem je aluminijska folija postavi na postolje sustava rotirajućih zaustavnih folija, kao što je prikazano na slici 4.7e, potrebno je učvrstiti okvir i postolje pomoću vijaka. Zadnji korak postupka prikazan je na slici 4.7f i konačni sustav rotirajućih zaustavnih folija je prikazan na slici 4.7g.

Do sada se sustav rotirajućih zaustavnih folija koristio tako da se okretao jednolikom brzinom, a snop iona bi u jednakim vremenskim intervalima prolazio kroz svaku foliju. U daljnjem radu će biti više govora o ovakvom korištenju sustava rotirajućih zaustavnih folija i mogućim poboljšanjima zbog određenih fizikalnih efekata koji se do sada nisu promatrali ni uključivali u račun.



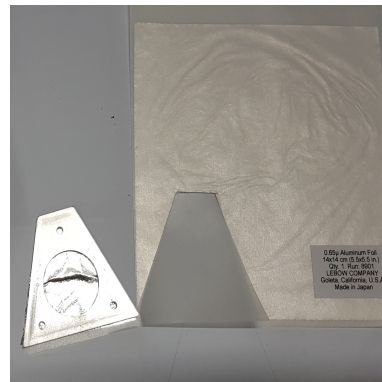
(a) Izrezivanje aluminijske folije



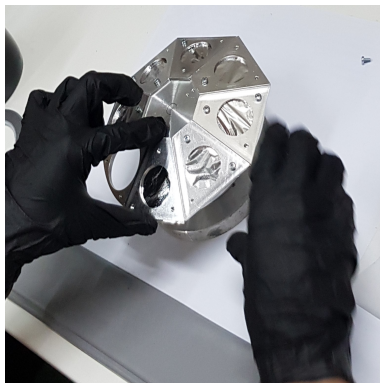
(b) Ugljikova traka zalijepljena na okvir



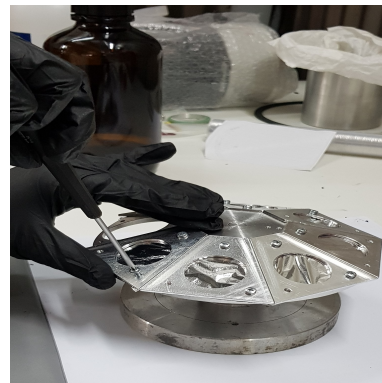
(c) Odvajanje aluminijske folije



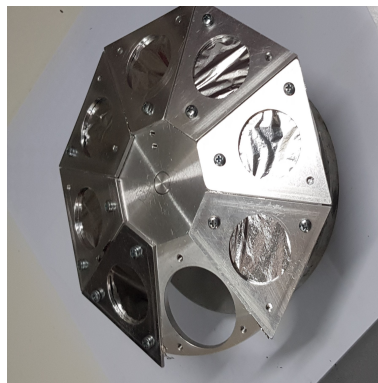
(d) Na aluminijsku foliju zalijepljen okvir



(e) Postavljanje okvira na sustav rotirajućih zaustavnih folija

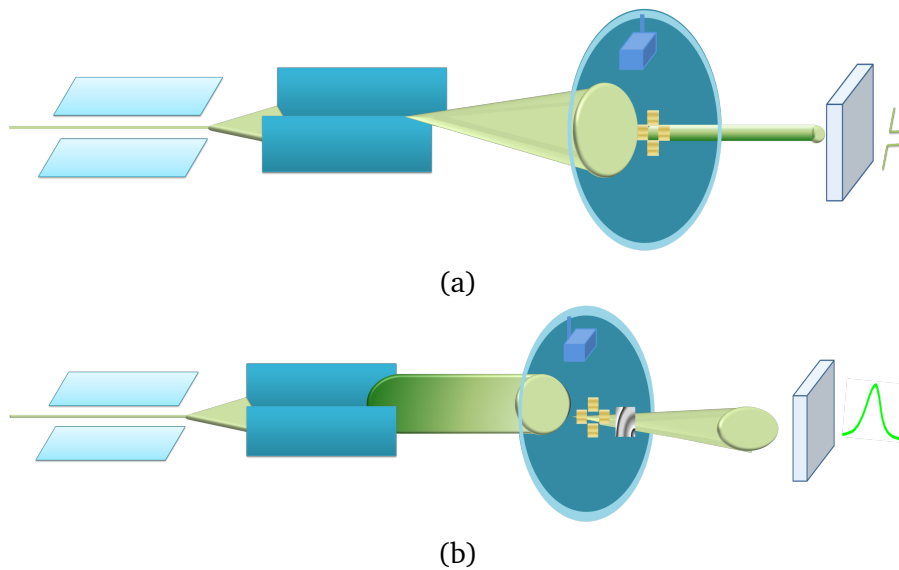


(f) Učvršćivanje okvira na postolje sustava rotirajućih zaustavnih folija



(g) Konačni izgled sustava rotirajućih zaustavnih folija

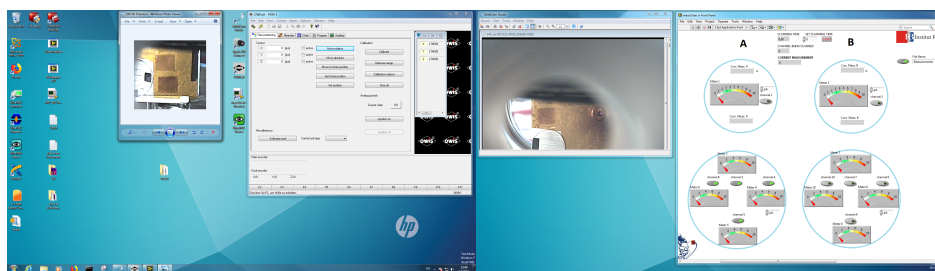
Slika 4.7: Postupak postavljanja odabranih aluminijskih folija na sustav rotirajućih zaustavnih folija



Slika 4.8: Shematski prikaz kraja eksperimentalnog postava na eksperimentalnoj liniji i u DiFU komori (a) Shematski prikaz eksperimentalne linije i komore kada ionski snop prolazi kroz praznu poziciju na sustavu rotirajućih zaustavnih folija (b) Shematski prikaz eksperimentalne linije i komore kada ionski snop prolazi kroz aluminijsku foliju sustava rotirajućih zaustavnih folija

4.4 Eksperimentalna procedura

Shematski prikaz kraja eksperimentalne linije i DiFU komore je prikazano na slici 4.8. Prije početka eksperimenta potrebno je očistiti alkoholom (etanolom) i acetonom cijelu komoru i elemente koji se stavljaju unutar komore. Elemente, koji su građeni od plastike, potrebno je očistiti samo alkoholom (etanolom) jer je aceton agresivan i otapa neke vrste plastike. Čišćenje komore i elemenata u komori se radi kako bi se uklonila prašina i veće čestice, a ponajviše ugljikovodici. Prije početka eksperimenta potrebno je pripremiti sustav rotirajućih folija s određenim debljinama aluminijskih folija. Nakon što su svi elementi postavljeni unutar komore uključuju se vakuumske pumpe. Prvo se uključuje rotacijska pumpa s kojom se postiže niski vakuum. Kada je postignut niski vakuum, uključuje se turbomolekularna pumpa s kojom se postiže visoki vakuum unutar komore. Tijekom eksperimentalnog mjerenja tlak u komori je varirao između $1 \cdot 10^{-5}$ mbar i $5,4 \cdot 10^{-7}$ mbar. Tlak u komori tijekom pojedinog zračenja će biti kasnije naveden. Unutrašnjost komore tijekom cijelog eksperimenta je promatrana pomoću kamere u realnom vremenu. Programi koji su korišteni pri mjerenjima su prikazani na slici 4.9. Skroz desno na slici 4.9 se nalazi otvorena jedna fotografija pomoću koje se uspoređuje je li poliamidni film (kapton film) zacr-njen u odnosu na trenutno stanje u komori, a program kojim se promatra trenutno



Slika 4.9: Slika zaslona računala s programima koji su korišteni u eksperimentalnom mjerenju

stanje u komori nalazi se na slici lijevo od centra slike. Lijevo od centra slike 4.9 je prikazan program pomoću kojeg se pomiči položaj uzorka u komori, dok je skroz desno na slici prikazan program pomoću kojeg se mjeri struja na pločicama koje definiraju otvor i na Faradayevoj čaši. Shematski prikaz eksperimentalnog postava na eksperimentalnoj liniji i u komori je prikazan na slici 4.8

Eksperimentalna procedura se provodila u nekoliko faza, a neke su se faze ponavljale. Nakon što je ionski snop proizveden i doveden u eksperimentalnu liniju, odnosno do komore, kreće prva faza. Prva faza eksperimentalne procedure je podešavanje skenera pomoću kojeg se ionski snop pomiče po cijelom otvoru kako bi se ravnomjerno ozračio poliamidni film (kapton film). Otvor je definiran rubovima metalnih pločica (eng. *slit*). Početni izgled snopa se promatra na kvarcnom staklu i time se određuje kada je snop dovoljno dobar za nastavak eksperimenta. Pomoću mjerenja relativne struje na pločicama koje definiraju otvor se također podešavao snop, odnosno snop se centrirao. U ovoj fazi eksperimenta sustav rotirajućih folija se nalazi na praznoj poziciji.

Nakon što je prva faza eksperimenta završena, mjeri se struja ionskog snopa u trajanju od otprilike sto sekundi pomoću Faradayeve čaše koja je spuštена na visinu u razini ionskog snopa. Mjerenje jakosti struje pomoću Faradayeve čaše provodi se samo kad je sustav rotirajućih zaustavnih folija na praznoj poziciji. Prilikom spuštanja i podizanja Faradayeve čaše, ionski snop se mora zaustaviti ispred komore kako ne bi ozračivao poliamidni film (kapton film). Ionski snop općenito je zaustavljen ispred komore dok se obavljaju određeni međukoraci. Ionski snop se pušta u komoru kada se želi ozračiti poliamidni film ili izmjeriti jakost struje pomoću Faradayeve čaše.

Nakon što je struja izmjerena, podiže se Faradayeva čaša i ionski snop se propušta kroz praznu poziciju na sustav rotirajućih zaustavnih folija u trajanju od otprilike 100 sekundi. Ovo ozračivanje poliamidnog filma ionskim snopom je potrebno kao re-

ferentni profil izgleda i relativnog intenziteta ionskog snopa u nastavku mjerenja i obradi rezultata. Tijekom propuštanja ionskog snopa kroz praznu poziciju, bilježi se struja na pločicama koje definiraju otvor i time se provjerava koliko je snop dobro centriran. Nakon zračenja poliamidnog filma, ionski snop se zaustavlja ispred komore.

Kada je treća faza završena, ponavlja se druga faza eksperimenta, spušta se Faradayeva čaša na visinu u ravnini ionskog snopa i mjeri se jakost struje otprilike sto sekundi nakon čega se podiže Faradayeva čaša. U četvrtoj fazi, ručno se regulira položaj sustava rotirajućih zaustavnih folija tako da ionski snop prolazi kroz određenu aluminijsku foliju. Kada je dobro podešena aluminijska folija na sustavu rotirajućih zaustavnih folija, pušta se ionski snop u komoru i ozračivanje traje određeno vrijeme. Vrijeme zračenja ovisi o debljini aluminijske folije. Nakon što se na poliamidnom filmu (kaptonu) vidi zacrnjenje, ozračivanje se prekida, odnosno ionski snop se zaustavlja ispred komore. Kako bi postojali pouzdani eksperimentalni podaci o jakosti struje, sustav rotirajućih zaustavnih folija se ručno vraća na praznu poziciju i pomoću Faradayeve čaše se mjeri jakost struje nakon ozračivanja, odnosno ponavlja se druga faza.

Nakon zračenja svake pojedine aluminijske folije potrebno je zamijeniti poliamidni film kako ne bi došlo do preklapanja područja ozračivanja. Područje zračenja je ograničeno dimenzijama prostora za uzorak i smjerovima pokretljivosti postolja za uzorak. Kako bi se zamijenio poliamidni film, potrebno je otvoriti komoru. Prije otvaranja komore potrebno je pustiti dušik u komoru dok tlak u komori ne dođe do vrijednosti atmosferskog tlaka zbog kasnijeg održavanja vakuuma. Nakon postavljanja novog poliamidnog filma u komoru, potrebno je pričekati oko sat vremena i trideset minuta kako bi se tlak u komori spustio na zadovoljavajuću razinu, reda veličine 10^{-6} mbar.

Ozračivanje aluminijske folije debljine $0,65 \mu\text{m}$ je trajalo desetak minuta, odnosno (599 ± 1) s, aluminijske folije debljine $1,2 \mu\text{m}$ je trajalo tridesetak minuta, odnosno (1810 ± 1) s i aluminijske folije debljine $1,8 \mu\text{m}$ je trajalo oko dva sata i trideset minuta, odnosno (9134 ± 1) s.

Završetkom eksperimenta, poliamidni filmovi su skenirani i obrada fotografija je izvršena u programu ImageJ. Analiza podataka i grafovi su napravljena u računalnim programima Microsoft Excel, Origin Lab i računalnom jeziku Python 3.

5 Rezultati mjerenja i diskusija

U sklopu projekta EUROfusion na Institutu Ruđer Bošković izrađena su preliminarna istraživanja ponašanja ionskog snopa nakon prolaska kroz aluminijsku foliju u komori dvostrukog snopa za istraživanje materijala od interesa za fuziju, odnosno DiFu komori.

5.1 Mjerenja distribucije kutnog širenja iona kroz aluminijske folije

Poliamidni film se zrači ionskim snopom željeza Fe^{4+} i energije snopa 10 MeV. Odstupanje u energiji je 1 % te je struja izmjerena na Faradayevoj čaši varirala između $(22,1 \pm 0,1)$ nA i $(24,2 \pm 0,1)$ nA.

Vrijednosti prosjeka struja izmjerene prije, tijekom i nakon zračenja aluminijske folije $0,65 \mu\text{m}$ prikazane su u tablici 5.1. Prvo mjerenje struje na Faradayevoj čaši i na pločicama za definiranje otvora (eng. *slit*) se vršilo prije ozračenja poliamidnog filma ionskim snopom i trajalo je (102 ± 1) s. Drugo mjerenje struje na pločicama za definiranje otvora se vršilo tijekom zračenja poliamidnog filma ionskim snopom kroz praznu poziciju na sustavu rotirajućih zaustavnih folija i trajalo je (102 ± 1) s. Treće mjerenje struje na pločicama koje definiraju otvor se vršilo tijekom zračenja poliamidnog filma ionskim snopom kada snop prolazi kroz aluminijsku foliju debljine $0,65 \mu\text{m}$ i zračenje je trajalo (599 ± 1) s. Četvrto mjerenje struje na Faradayevoj čaši i pločicama koje definiraju otvor je trajalo (103 ± 1) s. Tlak u komori tijekom eksperimenta je varirao između $1,9 \cdot 10^{-5}$ mbar i $8,6 \cdot 10^{-6}$ mbar.

	Struja izmjerena na Faradayevoj čaši /nA	Struja izmjerena na <i>slit</i> -u 1 /nA	Struja izmjerena na <i>slit</i> -u 2 /nA	Struja izmjerena na <i>slit</i> -u 3 /nA	Struja izmjerena na <i>slit</i> -u 4 /nA
1	$(22,7 \pm 0,1)$	(37 ± 1)	(49 ± 1)	$(34,0 \pm 0,2)$	$(38,8 \pm 0,8)$
2	/	$(40,0 \pm 0,9)$	$(51,7 \pm 0,1)$	$(35,6 \pm 0,4)$	$(40,9 \pm 0,8)$
3	/	$(34,5 \pm 0,3)$	$(48,3 \pm 0,4)$	$(31,05 \pm 0,07)$	$(37,3 \pm 0,3)$
4	$(22,1 \pm 0,1)$	(37 ± 1)	(50 ± 1)	$(32,8 \pm 0,2)$	$(37,7 \pm 0,9)$

Tablica 5.1: Srednja vrijednost i odstupanje struje za foliju $0,65 \mu\text{m}$

Vrijednosti prosjeka struja izmjerene prije, tijekom i nakon zračenja aluminijske folije $1,2 \mu\text{m}$ prikazane su u tablici 5.2. Prvo mjerenje struje na Faradayevoj čaši i na pločicama za definiranje otvora se vršilo prije ozračenja poliamidnog filma ionskim snopom i trajalo je (103 ± 1) s. Drugo mjerenje struje na pločicama za definiranje otvora se vršilo tijekom ozračivanja poliamidnog filma ionskim snopom kroz praznu poziciju na sustavu rotirajućih zaustavnih folija i trajalo je (102 ± 1) s. Treće mjerenje struje na pločicama koje definiraju otvor se vršilo tijekom ozračivanja poliamidnog filma ionskim snopom kada snop prolazi kroz aluminijsku foliju debljine $1,2 \mu\text{m}$ i ozračivanje je trajalo (1810 ± 1) s. Četvrto mjerenja struje na Faradayevoj čaši i pločicama koje definiraju otvor je trajalo (103 ± 1) s. Tlak u komori tijekom eksperimenta je varirao između $6,3 \cdot 10^{-6}$ mbar i $3,4 \cdot 10^{-6}$ mbar.

	Struja izmjerena na Faradayevoj čaši /nA	Struja izmjerena na slit-u 1 /nA	Struja izmjerena na slit-u 2 /nA	Struja izmjerena na slit-u 3 /nA	Struja izmjerena na slit-u 4 /nA
1	$(22,6 \pm 0,3)$	(39 ± 1)	(42 ± 1)	$(35,4 \pm 0,4)$	(49 ± 1)
2	/	$(41,8 \pm 0,9)$	$(43,6 \pm 0,9)$	$(36,5 \pm 0,3)$	$(49,5 \pm 0,9)$
3	/	$(33,2 \pm 0,2)$	$(38,0 \pm 0,2)$	$(30,07 \pm 0,06)$	$(43,1 \pm 0,2)$
4	$(23,0 \pm 0,1)$	$(36,7 \pm 0,8)$	$(39,0 \pm 0,9)$	$(30,3 \pm 0,2)$	$(43,2 \pm 0,8)$

Tablica 5.2: Srednje vrijednosti i odstupanje struje za foliju $1,2 \mu\text{m}$

Vrijednosti prosjeka struja izmjerene prije, tijekom i nakon zračenja aluminijske folije $1,8 \mu\text{m}$ prikazane su u tablici 5.3. Prvo mjerenje struje na Faradayevoj čaši i na pločicama za definiranje otvora se vršilo prije ozračenja poliamidnog filma ionskim snopom i trajalo je (99 ± 1) s. Drugo mjerenje struje na pločicama za definiranje otvora se vršilo tijekom ozračivanja poliamidnog filma ionskim snopom kroz praznu poziciju na sustavu rotirajućih zaustavnih folija i trajalo je (104 ± 1) s. Treće mjerenje vrijednosti struje na Faradayevoj čaši i pločicama koje definiraju otvor je trajalo (102 ± 1) s. Četvrto mjerenje struje na pločicama koje definiraju otvor se vršilo tijekom ozračivanja poliamidnog filma ionskim snopom kada snop prolazi kroz aluminijsku foliju debljine $1,8 \mu\text{m}$ i ozračivanje je trajalo (9134 ± 1) s. Peto mjerenja struje na Faradayevoj čaši i pločicama koje definiraju otvor je trajalo (104 ± 1) s. Tlak u komori tijekom eksperimenta je varirao između $6,3 \cdot 10^{-7}$ mbar i $4,0 \cdot 10^{-7}$ mbar.

	Struja izmjerena na Faradayevoj čaši /nA	Struja izmjerena na slit-u 1 /nA	Struja izmjerena na slit-u 2 /nA	Struja izmjerena na slit-u 3 /nA	Struja izmjerena na slit-u 4 /nA
1	(24,2 ± 0,1)	(38,4 ± 0,9)	(49 ± 1)	(31,1 ± 0,3)	(51,4 ± 0,7)
2	/	(34,2 ± 0,9)	(52 ± 1)	(32,5 ± 0,4)	(45,7 ± 0,9)
3	(22,1 ± 0,1)	(35,5 ± 0,9)	(52 ± 1)	(32,0 ± 0,2)	(43,9 ± 0,9)
4	/	(33,81 ± 0,08)	(46,89 ± 0,10)	(30,53 ± 0,02)	(38,64 ± 0,07)
5	(22,2 ± 0,1)	(34,6 ± 0,9)	(46,6 ± 0,9)	(30,4 ± 0,2)	(37,7 ± 0,8)

Tablica 5.3: Srednja vrijednost i odstupanje struje za foliju 1,8 μm

Srednja vrijednost pojedinog seta mjerenja izračunata pomoću izraza:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + \dots + x_n}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} x_i \quad (5.1)$$

dok je srednji kvadrat pogreške aritmetičke sredine izračunat:

$$M^2 = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5.2)$$

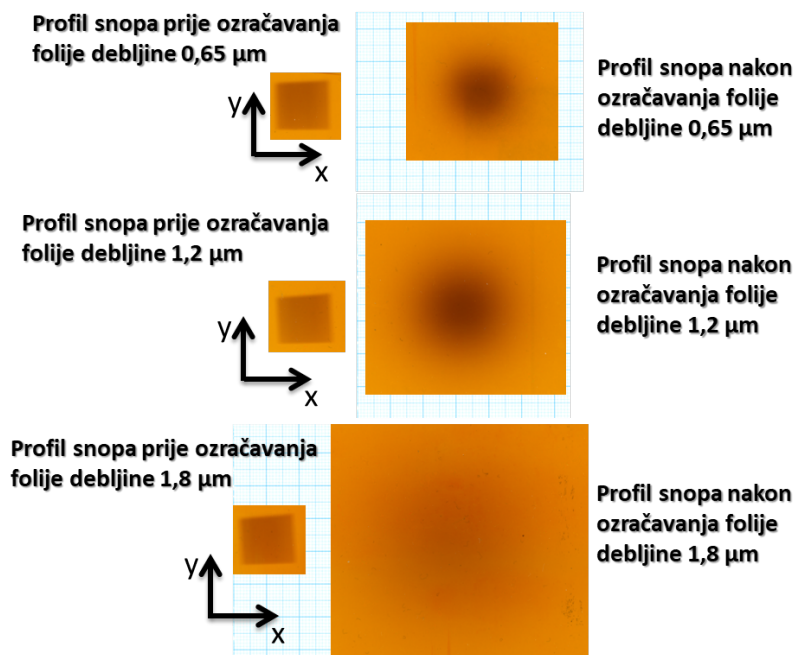
odnosno nepouzdanost mjerenja.

Nakon eksperimenta uzorci su podvrgnuti skeniranju sa svrhom procjene distribucije zacrnljenja. Skenirana slika poliamidnih filmova su analizirana u programu ImageJ iz kojeg su dobiveni podaci o recipročnoj vrijednosti zacrnljenja. U programu ImageJ vrijednost inverza zacrnljenja se dobiva kao:

$$\frac{1}{\text{Zacrnljenje}} = \frac{aR + bG + cB}{3} \quad (5.3)$$

gdje je aR postotak zastupljenosti crvene boje, bG postotak zastupljenosti zelene boje i cB postotak zastupljenosti plave boje u jednom stupcu koji je okomit na horizontalnu os definiranog pravokutnika. [47] Svaki pojedini profil snopa je analiziran u dva okomita smjera (ravnine). Zbog načina analize slike u ImageJ-u i dobivanja vrijednosti podataka pristupilo se analizi slike u dva okomita smjera. Slika skeniranih poliamidnih filmova se nalazi na slici 5.1.

Podacima dobiveni iz ImageJ-a su prilagođeni radi bolje preglednosti prilikom analize. Vrijednosti na osi y, odnosno 1/Zacrnljenje je prilagođeno tako da su u daljnjem radu prikazani invertirani podaci. Vrijednosti na osi x, odnosno udaljenost, u



Slika 5.1: Skenirani poliamidni film nakon završetka eksperimenta

ImageJ-u su počinjale od 0 pa su vrijednosti samo pomaknute za određeni iznos kako bi iznosu maksimuma krivulje odgovarala vrijednost $x = 0$.

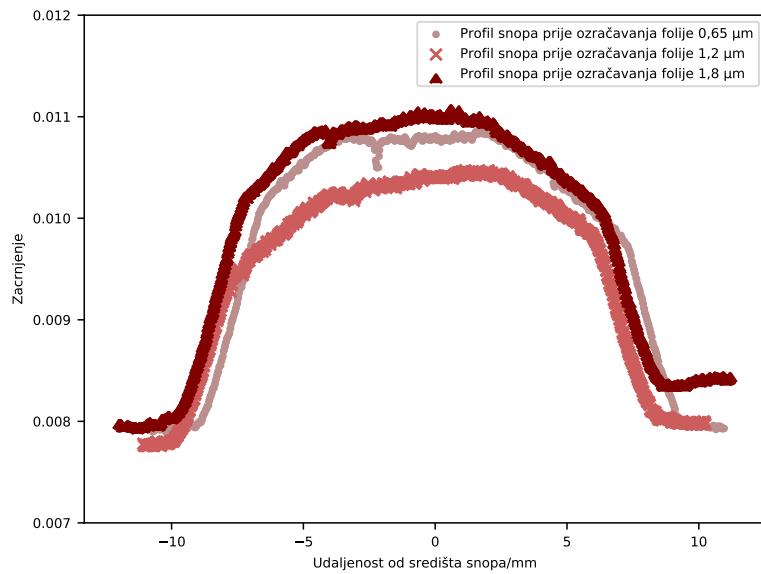
Eksperimentalni podaci, u dva okomita smjera, profila snopa prije zračenja kroz aluminijsku foliju su prikazani na slikama 5.2 i 5.3. Primjećuje se kako zacrnjenje poliamidnog filma nije homogeno već postoji određeno odstupanje. Odstupanje zacrnjenja u eksperimentalnim podacima se može zanemariti. Do nehomogenog ozračivanja poliamidnog filma je došlo zbog ograničenosti eksperimentalne opreme. Zbog jednostavnosti analize u teorijskim modelima će se eksperimentalna krivulja profila snopa prije zračenja aproksimirati s:

$$g(x) = \begin{cases} 1, & -7 < x < 7. \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (5.4)$$

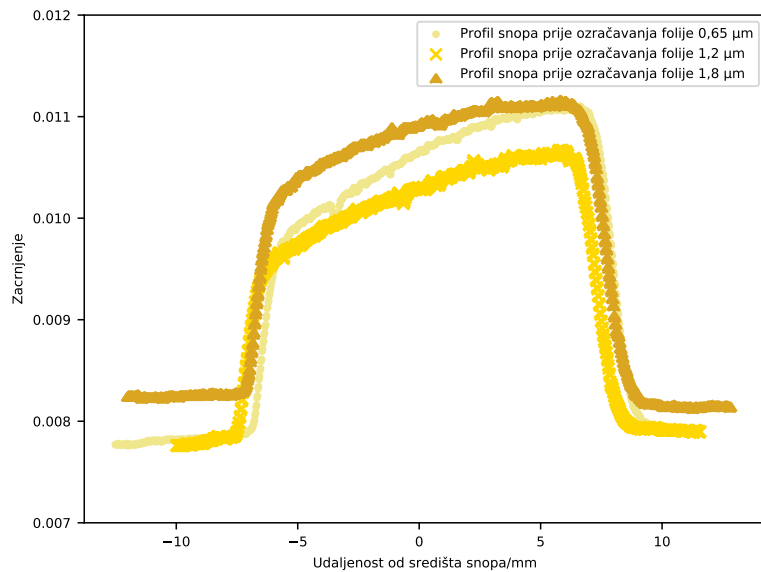
gdje je x udaljenost od središta snopa izražena u mm.

Daljnja analiza podataka profila snopa prije ozračivanja kroz aluminijsku foliju je rađena u programu Origin Lab-u gdje je dobivena krivulja podijeljena na dva dijela na sredini podataka o udaljenosti. Na pojedini dio krivulje je prilagođena Boltzmannova distribucija koja glasi:

$$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{x-x_0}{dx}}} + A_2 \quad (5.5)$$



Slika 5.2: Ovisnost zacrnjenja o udaljenosti od središta snopa. Prikazane ovisnosti su za tri profila snopa prije zračenja aluminijske folije u x ravnini



Slika 5.3: Ovisnost zacrnjenja o udaljenosti od središta snopa. Prikazane ovisnosti su za tri profila snopa prije zračenja aluminijske folije u y ravnini

gdje je A_1 minimum krivulje kad saturira, A_2 maksimum krivulje kad saturira, x_0 vrijednost x -a za pripadajući y kojem odgovara vrijednost pola visine zbroja A_1 i A_2 , dx vremenska konstanta.

Puna širina na polovici maksimuma, FWHM, je dobivena kao razlika dobivenih vri-

	FWHM u horizontalnom smjeru/mm	FWHM u okomitom smjeru/mm
Profil snopa prije zračenja folije 0,65 μm	(15,59 \pm 0,03)	(14,41 \pm 0,01)
Profil snopa prije zračenja folije 1,2 μm	(15,64 \pm 0,04)	(14,42 \pm 0,01)
Profil snopa prije zračenja folije 1,8 μm	(15,31 \pm 0,02)	(14,39 \pm 0,01)
Profil snopa nakon zračenja folije 0,65 μm	(15,85 \pm 0,01)	(15,40 \pm 0,01)
Profil snopa nakon zračenja folije 1,2 μm	(20,87 \pm 0,01)	(20,39 \pm 0,02)
Profil snopa nakon zračenja folije 1,8 μm	(35,99 \pm 0,04)	(37,26 \pm 0,05)

Tablica 5.4: Eksperimentalne srednje vrijednosti i odstupanje pune širine na pola maksimuma, FWHM-a

jednosti x_0 , odnosno

$$\text{FWHM} = x_{0_2} - x_{0_1} \quad (5.6)$$

i pripadajuća pogreška je izračunata pomoću izraza:

$$m^2 = \left(\frac{\partial(x_{0_2} - x_{0_1})}{\partial x_{0_1}} m(x_{0_1}) \right)^2 + \left(\frac{\partial(x_{0_2} - x_{0_1})}{\partial x_{0_2}} m(x_{0_2}) \right)^2. \quad (5.7)$$

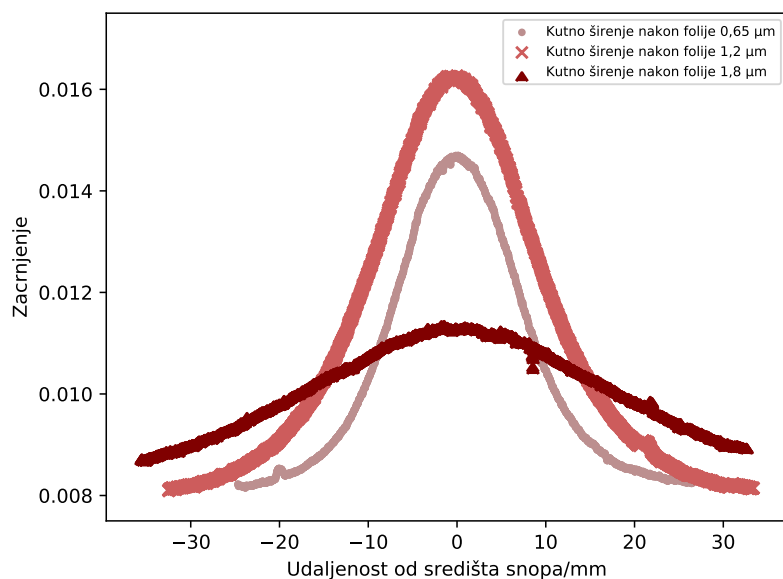
Eksperimentalni podaci, u dva okomita smjera, profila snopa nakon ozračivanja kroz aluminijsku foliju su prikazani na slikama 5.4 i 5.5. Na slikama se može primijetiti kako se maksimum iznosa zacrnjenja smanjuje kako se povećava debljina aluminijske folije iako je vrijeme zračenja folija eksponencijalno raslo kako se povećavala debljina folija.

Određivanje FWHM-a i pripadajuće pogreške za profil snopa nakon zračenja kroz foliju je napravljena pomoću programa u Pythonu. Na eksperimentalne podatke je prilagođena Pseudo-Voigt funkcija koja je konvolucija Gaussiana i Lorentziana. Eksperimentalne vrijednosti FWHM-a su prikazane u tablici 5.4.

Vrijednosti zacrnjenja će se u nastavku teksta normalizirati tako da:

$$I = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \cdot 100\% \quad (5.8)$$

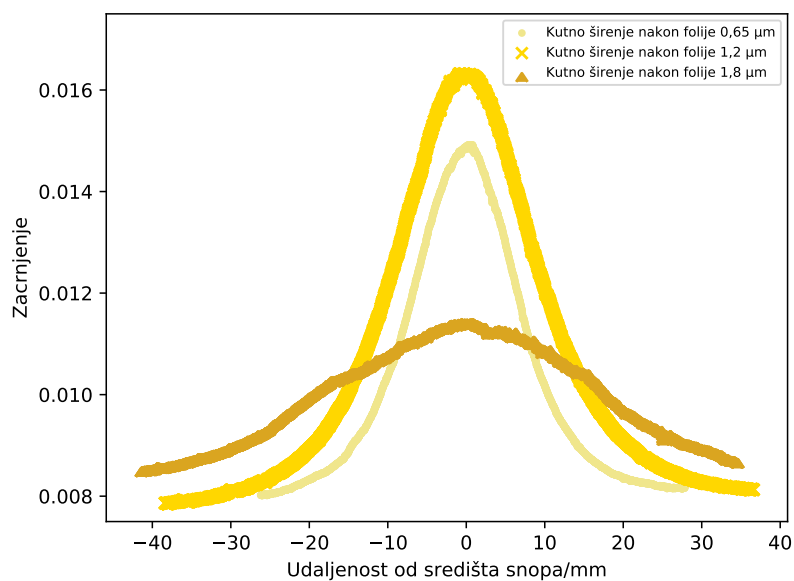
gdje je x_i i -ti član podataka, x_{min} minimalna vrijednost zacrnjenja u pojedinom setu mjerenja, x_{max} maksimalna vrijednost zacrnjenja u pojedinom setu mjerenja. Prikladniji izraz za normaliziranu vrijednost zacrnjenja je relativni intenzitet. Razlog tome je što se podaci zacrnjenja mogu povezati s relativnim intenzitetom. R, G i B su boje koje imaju pripadajuću valnu duljinu, a valna duljina se može povezati s energijom.



Slika 5.4: Ovisnost zacrnjenja o udaljenosti od središta snopa. Prikazane ovisnosti su za tri profila snopa nakon zračenja aluminijske folije u x ravnini

Intenzitet se može odrediti preko energije i poznatog vremena zračenja te površine koja se zrači.

U daljnjim prikazima grafova bit će prikazane ovisnosti relativnog intenziteta u ovisnosti o udaljenosti od središta snopa.



Slika 5.5: Ovisnost zacrnjenja o udaljenosti od središta snopa. Prikazane ovisnosti su za tri profila snopa nakon zračenja aluminijske folije u y ravnini

5.2 Usporedba eksperimentalnih podataka s teorijskim modelima

Izrađena su četiri teorijska modela kojima se pokušavaju opisati dobiveni rezultati.

- Prvi teorijski model kutnog širenja ionskog snopa zbog višestrukog elastičnog raspršenja teških iona je napravljen pod pretpostavkom da nema kočenja iona u materijalu.
- Drugi teorijski model kutnog širenja ionskog snopa zbog višestrukog elastičnog raspršenja teških iona je napravljen pod pretpostavkom kako je kočenje iona u pojedinom sloju materijala 10%.
- Treći teorijski model kutnog širenja ionskog snopa zbog višestrukog elastičnog raspršenja teških iona je napravljen pod pretpostavkom kako je kočenje iona u pojedinom sloju materijala 20%.
- Četvrti teorijski model kutnog širenja ionskog snopa zbog višestrukog elastičnog raspršenja teških iona je napravljen pod pretpostavkom kako je kočenje iona u pojedinom sloju materijala 30%.

Za svaki pojedini model izrađen je izračun kada je broj elektrona (naboj) željeza $Z_1 = 26$ i kada je broj elektrona željeza $Z_1 = 22$. Broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ je uzet jer je korišteni ionski snop bio Fe^{4+} pa je broj elektrona s kojim ion uđe u materijal jednak dvadeset dva. Energija ionskog snopa je 10 MeV, a početna širina snopa je 14 mm.

Usporedba teorijskih predviđanja i eksperimentalnih podataka će se izražavati preko relativnog odstupanja pune širine na pola maksimuma, FWHM-a, iz eksperimentalne i teorijske distribucije. Eksperimentalni podaci su analizirani u dvije ravnine (x ravnina i y ravnina) tako da će relativno odstupanje teorijskog FWHM-a od eksperimentalnih uvijek biti navedeno za obje ravnine.

5.2.1 Prvi teorijski model

Prvi teorijski model je najosnovniji model gdje se ne uključuje kočenje nabijenih čestica u materijalu, odnosno gubitak (prijenos) energije materijalu. Energija snopa 10 MeV za aluminijske folije 0,65 μm i 1,2 μm , dok je za aluminijsku foliju 1,8 μm napravljena analiza kada je konstantna energija unutar folije 10 MeV i prosječna

energija 7 000 keV. Početna širina ionskog snopa je 14 mm. U nastavku će biti prezentirane projekcije modela kada je broj elektrona ionskog snopa željeza $Z_1 = 26$ i broj elektrona $Z_1 = 22$ te kada je udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka 250 mm.

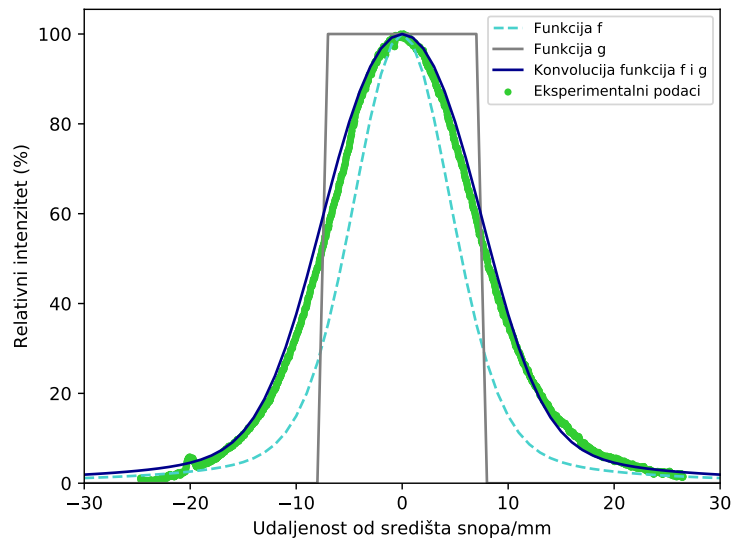
Predviđanje prvog teorijski modela kada je broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ i usporedba s eksperimentalnim podacima u x ravnini kada ionski snop prođe kroz aluminijsku foliju debljine $0,65 \mu\text{m}$ je prikazano na slici 5.6.

Kad se u prvi teorijski model za aluminijsku foliju $0,65 \mu\text{m}$ uvrsti broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ dobije se vrijednost FWHM-a ($16,7 \pm 0,1$) mm. Eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u x ravnini je ($15,85 \pm 0,01$) mm, a eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u y ravnini je ($15,40 \pm 0,01$) mm, odnosno odstupanje u odnosu na eksperimentalne podatke za x smjer je 5,1% i za y smjer 7,8%. Puna širina na polovici maksimuma i repovi krivulja se zadovoljavajuće podudaraju.

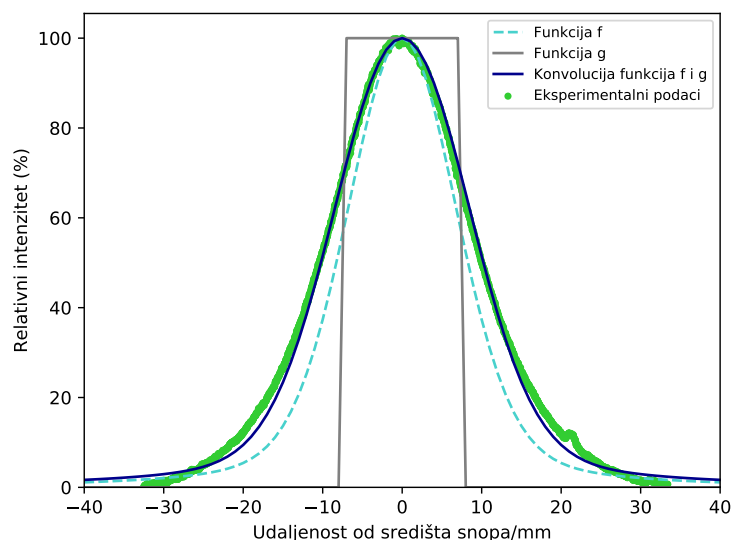
Kada se u prvi teorijski model za aluminijsku foliju $0,65 \mu\text{m}$ uvrsti broj elektrona željeza $Z_1 = 26$ dobije se vrijednost FWHM ($17,83 \pm 0,08$) mm. Eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u x ravnini je ($15,85 \pm 0,01$) mm, a eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u y ravnini je ($15,40 \pm 0,01$) mm, odnosno odstupanje u odnosu na eksperimentalne podatke za x smjer je 11,1% i za y smjer 13,6%. Kada se u prvi teorijski model uzme početni broj elektrona ionskog snopa željeza $Z_1 = 22$ dobiva se bolje poklapanje mjerenja i teorijskog predviđanja, nego kada je broj elektrona željeza $Z_1 = 26$.

Predviđanje prvog teorijskog modela kada je broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ i usporedba s eksperimentalnim podacima u x ravnini kada ionski snop prođe kroz aluminijsku foliju debljine $1,2 \mu\text{m}$ je prikazano na slici 5.7. Eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u x ravnini je ($20,87 \pm 0,01$) mm, a eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u y ravnini je ($20,39 \pm 0,02$) mm, dok je FWHM na osnovu ovog modela ($20,20 \pm 0,05$) mm, odnosno odstupanje u odnosu na eksperimentalne podatke za x smjer je 3,2% i za y smjer 0,9%. Teorijska krivulja i eksperimentalne krivulje se izvrsno poklapaju. Ovim modelom se postiže vrlo dobar opis eksperimentalne krivulje.

Kada se u prvi teorijski model za aluminijsku foliju $1,2 \mu\text{m}$ uvrsti broj elektrona željeza $Z_1 = 26$ dobije se vrijednost FWHM ($22,55 \pm 0,04$) mm. Eksperimentalno



Slika 5.6: Ovisnost relativnog intenziteta o udaljenosti od središta snopa za aluminij-sku foliju $0,65 \mu\text{m}$ i broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ unutar prvog teorijskog modela. Eksperimentalni podaci su iz x ravnine. Udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka je 250 mm. Funkcija f je definirana (3.25), a funkcija g je definirana (5.4).



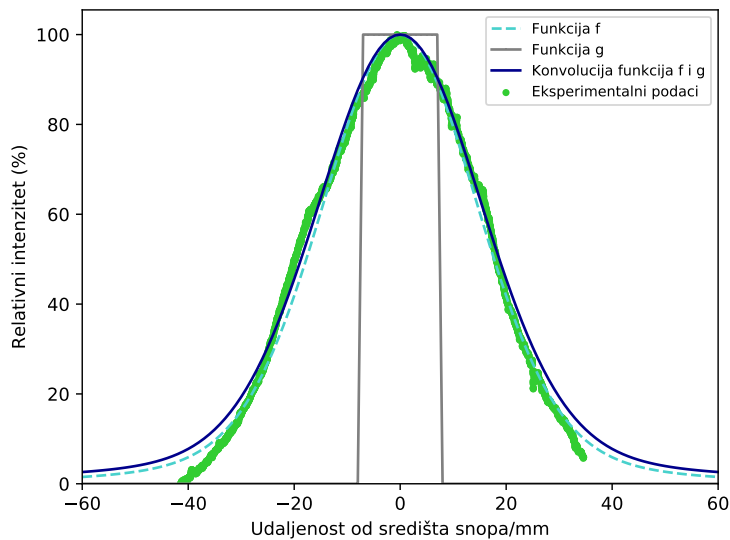
Slika 5.7: Ovisnost relativnog intenziteta o udaljenosti od središta snopa za alumi-nijsku foliju $1,2 \mu\text{m}$ i broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ unutar prvog teorijskog modela. Eksperimentalni podaci su iz x ravnine. Udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka je 250 mm. Funkcija f je definirana (3.25), a funkcija g je definirana (5.4).

dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u x ravnini je $(20,87 \pm 0,01)$ mm, a eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u y ravnini je $(20,39 \pm 0,02)$ mm, odnosno odstupanje u odnosu na eksperimentalne podatke za x smjer je 7,5% i za y smjer 9,6%. Teorijska krivulja predviđa malo veću punu širinu na polovici maksimuma od eksperimentalne krivulje. Kao i kod aluminijske folija debljine $0,65 \mu\text{m}$, bolje poklapanje mjerenja i teorijskog predviđanja je za početni broj elektrona snopa željeza.

Kada se u prvi teorijski model za aluminijsku foliju $1,8 \mu\text{m}$ uvrsti broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ i energija 10 MeV dobije se vrijednost FWHM $(23,97 \pm 0,03)$ mm. Eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u x ravnini je $(35,99 \pm 0,04)$ mm, a eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u y ravnini je $(37,26 \pm 0,05)$ mm, odnosno odstupanje u odnosu na eksperimentalne podatke za x smjer je 33,4% i za y smjer 35,7%. teorijska krivulja se ne poklapa s eksperimentalnom krivuljom i to je povod za aproksimiranje energije. Energija 10 MeV aproksimirana je prosječnom energijom 7 000 keV. Prosječna energija od 7 000 keV je odabrana jer je to otprilike energija na polovici ulazne i izlazne energije koju daje SRIM i modeli koji uzimaju u obzir kočenje u materijalu.

Kada se u prvi teorijski model za foliju $1,8 \mu\text{m}$ uvrsti broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ i prosječna energija 7 000 keV dobije se vrijednost FWHM $(32,21 \pm 0,03)$ mm. Eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u x ravnini je $(35,99 \pm 0,04)$ mm, a eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u y ravnini je $(37,26 \pm 0,05)$ mm, odnosno odstupanje u odnosu na eksperimentalne podatke za x smjer je 10,5% i za y smjer 13,6%. teorijska krivulja predviđa malo užu širinu od eksperimentalne krivulje. Prvi model je poboljšán uvrštavanjem prosječne energije 7 000 keV.

Kada se u prvi teorijski model za foliju $1,8 \mu\text{m}$ uvrsti broj elektrona željeza $Z_1 = 26$ i prosječna energija 7 000 keV dobije se vrijednost FWHM $(37,26 \pm 0,05)$ mm. Eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa na u x ravnini je $(35,99 \pm 0,04)$ mm, a eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u y ravnini je $(37,26 \pm 0,05)$ mm, odnosno odstupanje u odnosu na eksperimentalne podatke za x smjer je 3,4% i za y smjer nema odstupanja srednje vrijednosti. Predviđanje prvog teorijskog modela kada je broj elektrona željeza $Z_1 = 26$ i prosječna energija 7 000 keV i usporedba s eksperimentalnim podacima u y ravnini kada



Slika 5.8: Ovisnost relativnog intenziteta o udaljenosti od središta snopa za aluminijsku foliju $1,8 \mu\text{m}$ i broj elektrona željeza $Z_1 = 26$ unutar prvog teorijskog modela aproksimiranom prosječnom energijom $7\,000 \text{ keV}$. Eksperimentalni podaci su iz y ravnine. Udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka je 250 mm . Funkcija f je definirana (3.25), a funkcija g je definirana (5.4).

ionski snop prođe kroz aluminijsku foliju debljine $1,8 \mu\text{m}$ je prikazan na slici 5.8. teorijski i eksperimentalni se FWHM-ovi slažu, ali rep krivulja se ne slaže. Kod eksperimentalnih krivulja vidi se veći doprinos Gaussiana, odnosno postoji oštriji pad funkcije kutnog širenja ionskog snopa. U ovom primjeru vidimo kako zanemarivanje kočenja iona u materijalu nije dobra pretpostavka te je potrebno tragati za boljim aproksimacijama i teorijskim modelima. Za razliku od aluminijske folije debljine $0,65 \mu\text{m}$ i $1,2 \mu\text{m}$, kod aluminijske folije debljine $1,8 \mu\text{m}$ bolje slaganje se dobiva za broj elektrona ionskog snopa $Z_1 = 26$.

5.2.2 Drugi teorijski model

Drugi teorijski model uključuje kočenje nabijenih čestica u materijalu, odnosno gubitak energije ionskog snopa. Svaka aluminijska folija je podijeljena u slojeve gdje je pretpostavka da unutar svakog sloja ionima se u snopu smanji energija za 10% . Za svaki pojedinu foliju će biti navedena teorijski predviđena izlazna energija. Pripadajuća nepouzdanost energije je određena pomoću izraza (3.3). Početna širina ionskog snopa je 14 mm . U nastavku će biti prezentirane projekcije modela kada je broj elektrona ionskog snopa željeza $Z_1 = 26$ i broj elektrona $Z_1 = 22$ te kada je

udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka 250 mm.

Aluminijska folija debljine $0,65 \mu\text{m}$ podijeljena je u dva sloja i izlazna energija iona iz materijala je (7548 ± 582) keV.

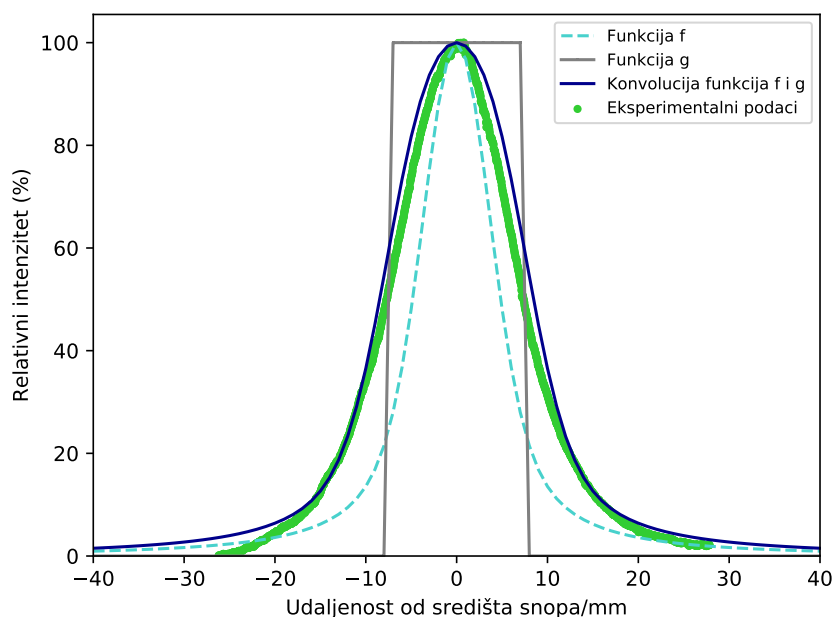
Kada se u drugi teorijski model za aluminijsku foliju $0,65 \mu\text{m}$ uvrsti broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ dobije se vrijednost FWHM $(16,3 \pm 0,1)$ mm. Eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u x ravnini je $(15,85 \pm 0,01)$ mm, a eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u y ravnini je $(15,40 \pm 0,01)$ mm, odnosno odstupanje u odnosu na eksperimentalne podatke za x smjer je 2,8% i za y smjer 5,5%. Predviđanje drugog teorijskog modela kada je broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ i usporedba s eksperimentalnim podacima u y ravnini kada ionski snop prođe kroz aluminijsku foliju debljine $0,65 \mu\text{m}$ je prikazano na slici 5.9.

Kada se u drugi teorijski model za aluminijsku foliju $0,65 \mu\text{m}$ uvrsti broj elektrona željeza $Z_1 = 26$ dobije se vrijednost FWHM $(17,3 \pm 0,1)$ mm. Eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u x ravnini je $(15,85 \pm 0,01)$ mm, a eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u y ravnini je $(15,40 \pm 0,01)$ mm, odnosno odstupanje u odnosu na eksperimentalne podatke za x smjer je 8,4% i za y smjer 11,0%. Veće slaganje eksperimenta i teorije je u slučaju kada je u račun uvršten broj elektrona ionskog snopa željeza $Z_1 = 22$ što se uočava po manjem odstupanju pune širine na pola maksimuma.

Aluminijska folija debljine $1,2 \mu\text{m}$ podijeljena je u pet sloja i izlazna energija iona iz materijala je (5748 ± 718) keV.

Kada se u drugi teorijski model za aluminijsku foliju $1,2 \mu\text{m}$ uvrsti broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ dobije se vrijednost FWHM $(25,88 \pm 0,06)$ mm. Eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u x ravnini je $(20,87 \pm 0,01)$ mm, a eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u y ravnini je $(20,39 \pm 0,02)$ mm, odnosno odstupanje u odnosu na eksperimentalne podatke za x smjer je 19,4% i za y smjer 21,2%. teorijska krivulja predviđa veću punu širinu na pola maksimuma nego što su eksperimentalni podaci. Kod eksperimentalne krivulje se vidi oštiji pad i veći doprinos Gaussiana nego što ovaj teorijski model predviđa.

Kada se u drugi teorijski model za aluminijsku foliju $1,2 \mu\text{m}$ uvrsti broj elektrona željeza $Z_1 = 26$ dobije se vrijednost FWHM $(29,18 \pm 0,08)$ mm. Eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u x ravnini je $(20,87 \pm 0,01)$ mm, a eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u y ravnini je

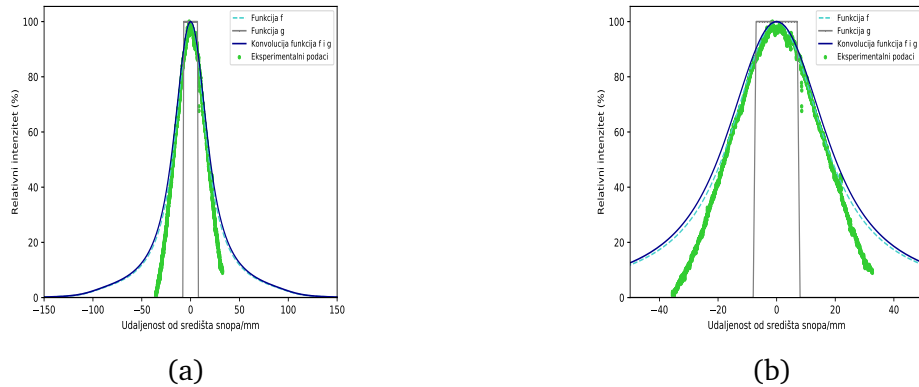


Slika 5.9: Ovisnost relativnog intenziteta o udaljenosti od središta snopa za aluminijsku foliju $0,65 \mu\text{m}$ i broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ unutar drugog teorijskog modela. Eksperimentalni podaci su iz y ravnine. Udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka je 250 mm . Funkcija f je definirana (3.25), a funkcija g je definirana (5.4).

$(20,39 \pm 0,02) \text{ mm}$, odnosno odstupanje u odnosu na eksperimentalne podatke za x smjer je $28,5\%$ i za y smjer $30,1\%$. Drugi teorijski model predviđa veću punu širinu na pola maksimuma nego što je dobivena eksperimentalno te postoji veći doprinos Lorentziana kod teorijske krivulje. Bolje slaganje eksperimentalnih podataka i teorijskih podataka je vidljivo kada se uzme aproksimacija broja elektrona željeza $Z_1 = 22$, ali je potrebna daljnja provjera i istraživanje kako bi analiza bila uspješnija.

Aluminijska folija debljine $1,8 \mu\text{m}$ podijeljena je u osam sloja i izlazna energija iona iz materijala je $(4041 \pm 960) \text{ keV}$.

Kada se u drugi teorijski model za aluminijsku foliju $1,8 \mu\text{m}$ uvrsti broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ dobije se vrijednost FWHM $(40,3 \pm 0,2) \text{ mm}$. Eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u x ravnini je $(35,99 \pm 0,04) \text{ mm}$, a eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u y ravnini je $(37,26 \pm 0,05) \text{ mm}$, dok je FWHM na osnovu ovog modela odnosno odstupanje u odnosu na eksperimentalne podatke za x smjer je $10,7\%$ i za y smjer $7,5\%$. Na slici 5.10a se vidi kako se teorijski i eksperimentalni podaci dobro slažu u punoj širini na pola maksimuma, ali teorijski podaci imaju veći doprinos Lorentziana dok eksperimentalni podaci strmije



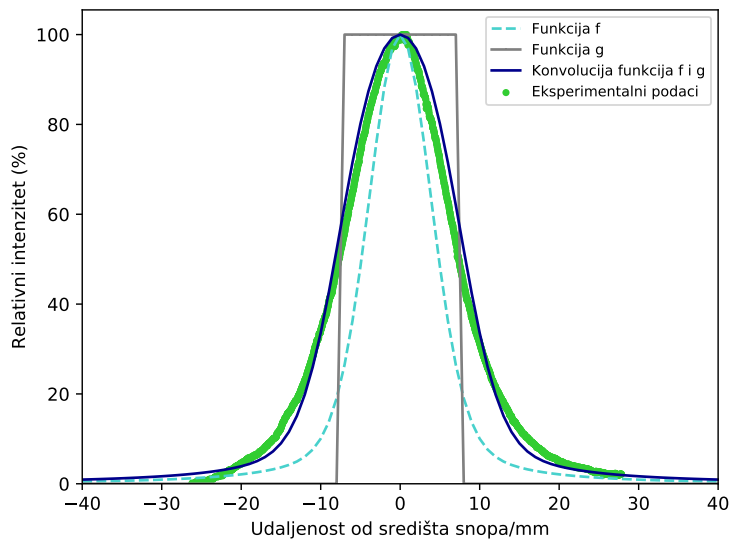
Slika 5.10: Ovisnost relativnog intenziteta o udaljenosti od središta snopa za aluminijsku foliju $1,8 \mu\text{m}$ i broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ unutar drugog teorijskog modela. Eksperimentalni podaci su iz x ravnine. Desno (a) se nalazi veći raspon udaljenosti, dok je lijevo (b) manji raspon udaljenosti na osi udaljenosti od centra snopa. Udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka je 250 mm. Funkcija f je definirana (3.25), a funkcija g je definirana (5.4).

padaju. Vidimo bolje podudaranje pune širine na pola maksimuma kod aluminijske folije debljine $1,8 \mu\text{m}$ nego kod aluminijske folije debljine $1,2 \mu\text{m}$.

Kada se u drugi teorijski model za aluminijsku foliju $1,8 \mu\text{m}$ uvrsti broj elektrona željeza $Z_1 = 26$ dobije se vrijednost FWHM ($46,7 \pm 0,2$) mm. Eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u x ravnini je ($35,99 \pm 0,04$) mm, a eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u y ravnini je ($37,26 \pm 0,05$) mm, odnosno odstupanje u odnosu na eksperimentalne podatke za x smjer je 22,9% i za y smjer 20,2%. Postoji veće odstupanje pune širine na pola maksimuma kad se u račun uvrsti broj elektrona ionskog snopa željeza 26, nego kada se uvrsti broj elektrona 22. Također se usporedbom teorijskih i eksperimentalnih podataka vidi kako iz teorije proizlazi veći doprinos Lorentziana pa postoji veći doprinos u repu krivulje.

5.2.3 Treći teorijski model

Treći teorijski model uključuje kočenje nabijenih čestica u materijalu, odnosno gubitak energije ionskog snopa. Svaka aluminijska folija je podijeljena u slojeve gdje je pretpostavka da unutar svakog sloja ionima se u snopu smanji energija za 20%. Za svaku pojedini foliju će biti navedena teorijski predviđena izlazna energija. Pripadajuća nepouzdanost energije je određena pomoću izraza (3.3). Početna širina ionskog snopa je 14 mm. U nastavku će biti prezentirane projekcije modela kada je broj elektrona ionskog snopa željeza $Z_1 = 26$ i broj elektrona $Z_1 = 22$ te kada je

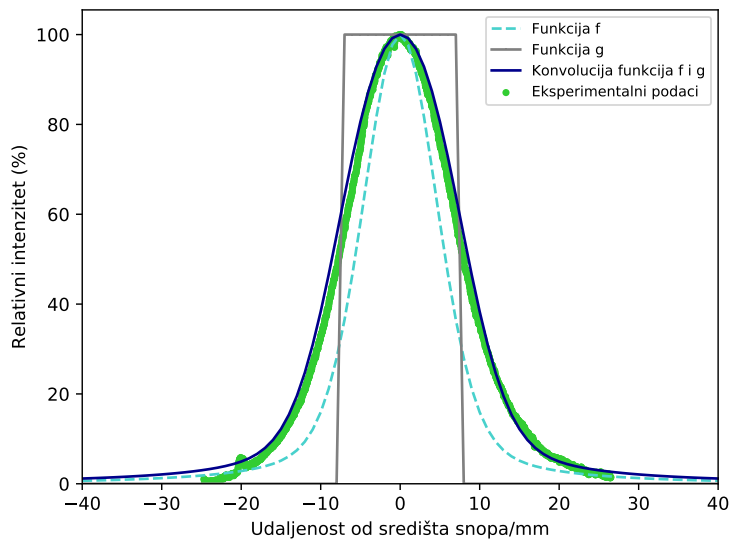


Slika 5.11: Ovisnost relativnog intenziteta o udaljenosti od središta snopa za aluminijsku foliju $0,65 \mu\text{m}$ i broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ unutar trećeg teorijskog modela. Eksperimentalni podaci su iz y ravnine. Udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka je 250 mm . Funkcija f je definirana (3.25), a funkcija g je definirana (5.4).

udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka 250 mm .

Aluminijska folija debljine $0,65 \mu\text{m}$ podijeljena je u jedan sloj i izlazna energija iona iz materijala je $(7548 \pm 582) \text{ keV}$.

Predviđanje trećeg teorijskog modela kada je broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ i usporedba s eksperimentalnim podacima kada ionski snop prođe kroz aluminijsku foliju debljine $0,65 \mu\text{m}$ je prikazano na slici 5.11. Eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u x ravnini je $(15,85 \pm 0,01) \text{ mm}$, a eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u y ravnini je $(15,40 \pm 0,01) \text{ mm}$, dok je FWHM na osnovu ovog modela $(15,8 \pm 0,1) \text{ mm}$, odnosno odstupanje u odnosu na eksperimentalne podatke za x smjer je $0,3\%$ i za y smjer $2,5\%$. Usporedbom teorijskih i eksperimentalnih podataka uočava se gotovo savršeno poklapanje podataka. Ovim modelom se postiže izvrstan opis eksperimentalne pune širine na pola maksimuma. Predviđanje trećeg teorijskog modela kada je broj elektrona željeza $Z_1 = 26$ i usporedba s eksperimentalnim podacima u x ravnini kada ionski snop prođe kroz aluminijsku foliju debljine $0,65 \mu\text{m}$ je prikazano na slici 5.12. Kada se u treći teorijski model za aluminijsku foliju $0,65 \mu\text{m}$ uvrsti broj elektrona željeza $Z_1 = 26$ dobije se vrijednost FWHM $(16,73 \pm 0,09) \text{ mm}$. Eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje

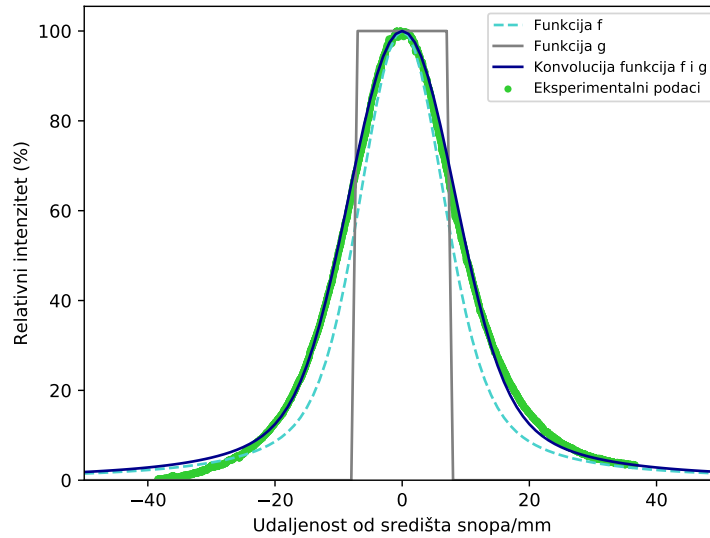


Slika 5.12: Ovisnost relativnog intenziteta o udaljenosti od središta snopa za aluminijsku foliju $0,65 \mu\text{m}$ i broj elektrona željeza $Z_1 = 26$ unutar trećeg teorijskog modela. Eksperimentalni podaci su iz x ravnine. Udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka je 250 mm . Funkcija f je definirana (3.25), a funkcija g je definirana (5.4).

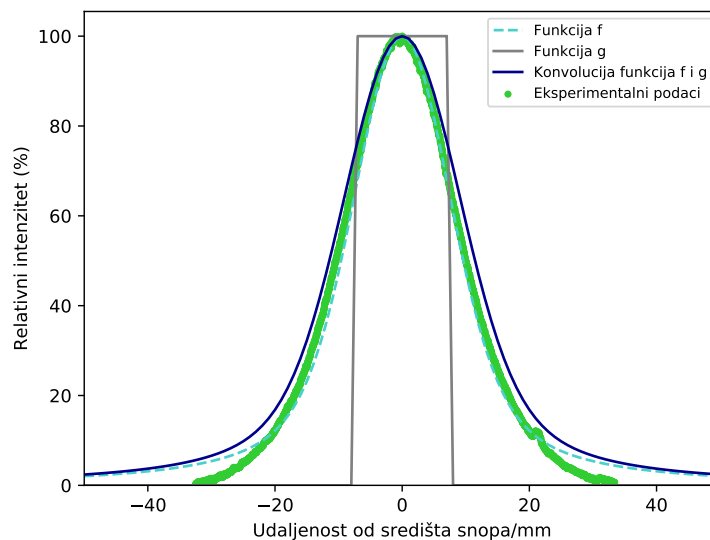
ionskog snopa u ravnini x je $(15,85 \pm 0,01) \text{ mm}$, a eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u ravnini y je $(15,40 \pm 0,01) \text{ mm}$, odnosno odstupanje u odnosu na eksperimentalne podatke za x smjer je $5,3\%$ i za y smjer $7,9\%$. Usporedbom teorijskih i eksperimentalnih podataka uočava se gotovo savršeno poklapanje podataka, ali puna širina na pola maksimuma ima manje odstupanje kada se uzme broj elektrona snopa iona $Z_1 = 22$, nego kada se uzme broj elektrona $Z_1 = 26$.

Aluminijska folija debljine $1,2 \mu\text{m}$ podijeljena je u dva sloja i izlazna energija iona iz materijala je $(5729 \pm 718) \text{ keV}$.

Predviđanje trećeg teorijskog modela kada je broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ i usporedba s eksperimentalnim podacima u y ravnini kada ionski snop prođe kroz aluminijsku foliju debljine $1,2 \mu\text{m}$ je prikazana na slici 5.13. Eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u x ravnini je $(20,87 \pm 0,01) \text{ mm}$, a eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u y ravnini je $(20,39 \pm 0,2) \text{ mm}$, dok je FWHM na osnovu ovog modela $(20,40 \pm 0,06) \text{ mm}$, odnosno odstupanje u odnosu na eksperimentalne podatke za x smjer je $2,3\%$ i za y smjer $0,05\%$. Usporedbom teorijskih i eksperimentalnih podataka vidimo vrlo dobro slaganje pune širine na pola maksimuma i oblik funkcija. Treći teorijski model najpribližnije opisuje eksperimentalne podatke.



Slika 5.13: Ovisnost relativnog intenziteta o udaljenosti od središta snopa za aluminjsku foliju $1,2 \mu\text{m}$ i broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ unutar trećeg teorijskog modela. Eksperimentalni podaci su iz y ravnine. Udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka je 250 mm . Funkcija f je definirana (3.25), a funkcija g je definirana (5.4).



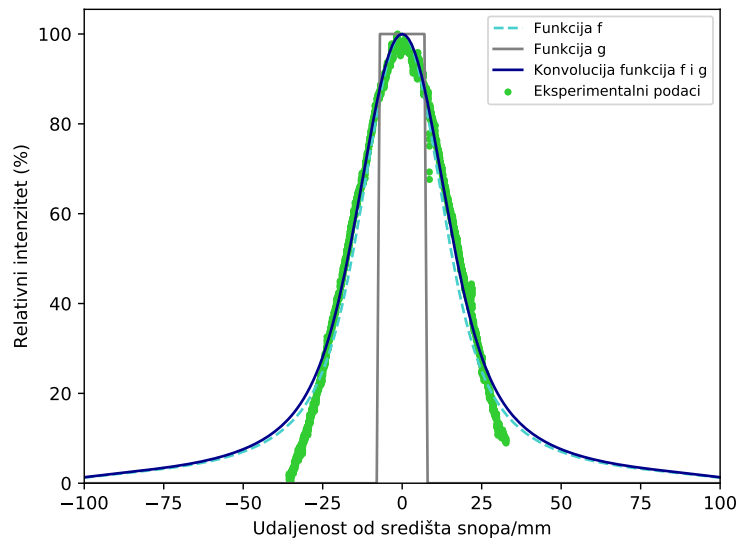
Slika 5.14: Ovisnost relativnog intenziteta o udaljenosti od središta snopa za aluminjsku foliju $1,2 \mu\text{m}$ i broj elektrona željeza $Z_1 = 26$ unutar trećeg teorijskog modela. Eksperimentalni podaci su iz x ravnine. Udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka je 250 mm . Funkcija f je definirana (3.25), a funkcija g je definirana (5.4).

Predviđanje trećeg modela kada je broj elektrona željeza $Z_1 = 26$ i usporedba s eksperimentalnim podacima u x ravnini kada ionski snop prođe kroz aluminijsku foliju debljine $1,2 \mu\text{m}$ je prikazana na slici 5.14. Eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u x ravnini je $(20,87 \pm 0,01)$ mm, a eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u y ravnini je $(20,39 \pm 0,2)$ mm, dok je FWHM na osnovu ovog modela $(22,62 \pm 0,06)$ mm, odnosno odstupanje u odnosu na eksperimentalne podatke za x smjer je 7,7% i za y smjer 9,9%. Usporedbom teorijskih i eksperimentalnih podataka vidimo vrlo dobro slaganje pune širine na pola maksimuma i oblik funkcija. Manje odstupanje pune širine na pola maksimuma je kada se uzme broj elektrona ionskog snopa željeza $Z_1 = 22$ u račun.

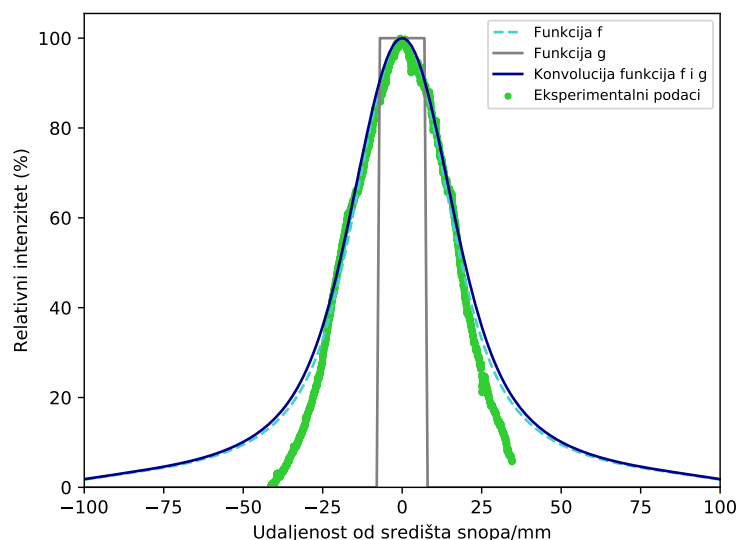
Aluminijska folija debljine $1,8 \mu\text{m}$ podijeljena je u četiri sloja i izlazna energija iona iz materijala je (4040 ± 960) keV.

Predviđanje trećeg teorijskog modela kada je broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ i usporedba s eksperimentalnim podacima u x ravnini kada ionski snop prođe kroz aluminijsku foliju debljine $1,8 \mu\text{m}$ je prikazana na slici 5.15. Eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u x ravnini je $(35,99 \pm 0,04)$ mm, a eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u y ravnini je $(37,26 \pm 0,05)$ mm, dok je FWHM na osnovu ovog modela $(33,96 \pm 0,07)$ mm, odnosno odstupanje u odnosu na eksperimentalne podatke za x smjer je 5,6% i za y smjer 8,9%. Puna širina na pola maksimuma je dobro predviđena u modelu, ali model predviđa veći doprinos Lorentziana što se ne dobiva u eksperimentu.

Predviđanje trećeg modela kada je broj elektrona željeza $Z_1 = 26$ i usporedba s eksperimentalnim podacima u y ravnini kada ionski snop prođe kroz aluminijsku foliju debljine $1,8 \mu\text{m}$ je prikazan na slici 5.16. Eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u x ravnini je $(35,99 \pm 0,04)$ mm, a eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u y ravnini je $(37,26 \pm 0,05)$ mm, dok je FWHM na osnovu ovog modela $(39,12 \pm 0,08)$ mm, odnosno odstupanje u odnosu na eksperimentalne podatke za x smjer je 8,0% i za y smjer 4,8%. Puna širina na pola maksimuma je dobro predviđena u modelu, ali model predviđa veći doprinos Lorentziana što se ne dobiva u eksperimentu.



Slika 5.15: Ovisnost relativnog intenziteta o udaljenosti od središta snopa za aluminijsku foliju $1,8 \mu\text{m}$ i broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ unutar trećeg teorijskog modela. Eksperimentalni podaci su iz x ravnine. Udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka je 250 mm. Funkcija f je definirana (3.25), a funkcija g je definirana (5.4).



Slika 5.16: Ovisnost relativnog intenziteta o udaljenosti od središta snopa za aluminijsku foliju $1,8 \mu\text{m}$ i broj elektrona željeza $Z_1 = 26$ unutar trećeg teorijskog modela. Eksperimentalni podaci su iz y ravnine. Udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka je 250 mm. Funkcija f je definirana (3.25), a funkcija g je definirana (5.4).

5.2.4 Četvrti teorijski model

Četvrti teorijski model uključuje kočenje nabijenih čestica u materijalu, odnosno gubitak energije ionskog snopa. Svaka aluminijska folija je podijeljena u slojeve gdje je pretpostavka da unutar svakog sloja ionima se u snopu smanji energija za 30%. Za svaku pojedini foliju će biti navedena teorijski predviđena izlazna energija. Pripadajuća nepouzdanost energije je određena pomoću izraza (3.3). Početna širina ionskog snopa je 14 mm. U nastavku će biti prezentirane projekcije modela kada je broj elektrona ionskog snopa željeza $Z_1 = 26$ i broj elektrona $Z_1 = 22$ te kada je udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka 250 mm. U sklopu četvrtog modela nije napravljena usporedba za aluminijsku foliju debljine $0,65 \mu\text{m}$ zbog toga što je izlazna energija na temelju svih prethodnih modela i SRIM-a manja od smanjenja energije unutar pojedinog sloja u ovom modelu.

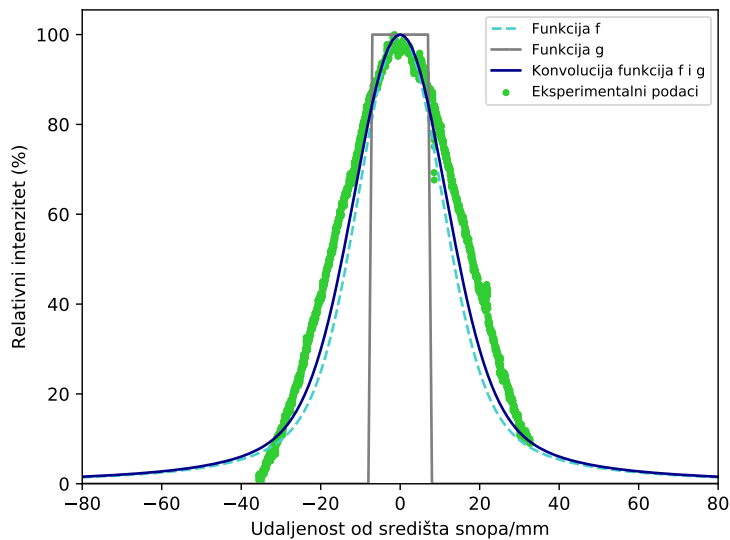
Aluminijska folija debljine $1,2 \mu\text{m}$ podijeljena je u jedan sloj i izlazna energija iona iz materijala je (5681 ± 718) keV.

Kada se u četvrti teorijski model za aluminijsku foliju $1,2 \mu\text{m}$ uvrsti broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ dobije se vrijednost FWHM $(17,61 \pm 0,08)$ mm. Eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u x ravnini je $(20,87 \pm 0,01)$ mm, a eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u y ravnini je $(20,39 \pm 0,02)$ mm, odnosno odstupanje u odnosu na eksperimentalne podatke za x smjer je 15,6% i za y smjer 13,6%. Puna širina na pola maksimuma se relativno dobro slaže, dok se unutar modela predviđa strmiji pad vrijednosti nego što je eksperimentalno dobiveno.

Kada se u četvrti teorijski model za aluminijsku foliju $1,2 \mu\text{m}$ uvrsti broj elektrona željeza $Z_1 = 26$ dobije se vrijednost FWHM $(19,19 \pm 0,05)$ mm. Eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u x ravnini je $(20,87 \pm 0,01)$ mm, a eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u y ravnini je $(20,39 \pm 0,02)$ mm, odnosno odstupanje u odnosu na eksperimentalne podatke za x smjer je 8,0% i za y smjer 5,9%. Puna širina na pola maksimuma i oblik krivulja se bolje slaže kad se u teorijski model uvrsti broj elektrona ionskog snopa $Z_1 = 26$ nego kad je u teorijski model uvršten broj elektrona $Z_1 = 22$.

Aluminijska folija debljine $1,8 \mu\text{m}$ podijeljena je u dva sloja i izlazna energija iona iz materijala je (3993 ± 960) keV.

Kada se u četvrti teorijski model za aluminijsku foliju $1,8 \mu\text{m}$ uvrsti broj elektrona



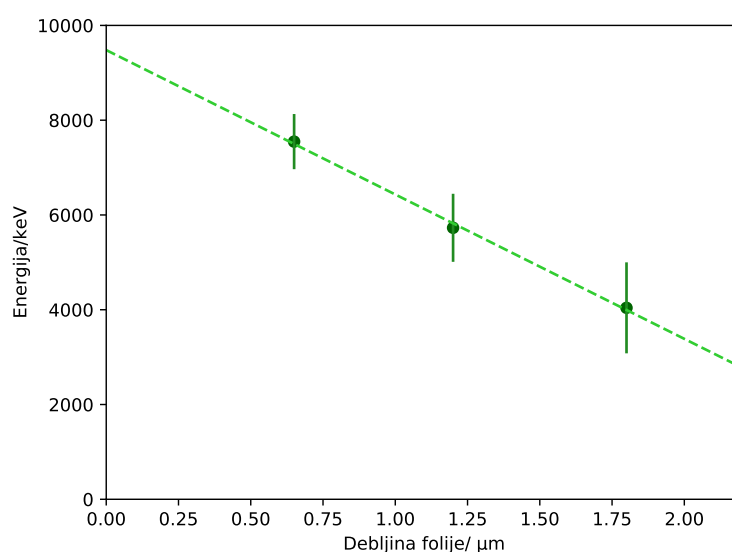
Slika 5.17: Ovisnost relativnog intenziteta o udaljenosti od središta snopa za aluminijску foliju $1,8 \mu\text{m}$ i broj elektrona željeza $Z_1 = 26$ unutar četvrtog teorijskog modela. Eksperimentalni podaci su iz x ravnine. Udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka je 250 mm. Funkcija f je definirana (3.25), a funkcija g je definirana (5.4).

željeza $Z_1 = 22$ dobije se vrijednost FWHM ($25,46 \pm 0,05$) mm. Eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u x ravnini je ($35,99 \pm 0,04$) mm, a eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u y ravnini je ($37,26 \pm 0,05$) mm, odnosno odstupanje u odnosu na eksperimentalne podatke za x smjer je 29,3% i za y smjer 31,7%. Postoji značajno odstupanje teorijskih i eksperimentalnih podataka u veličini pune širine na pola maksimuma i oblik krivulje.

Predviđanje četvrtog modela kada je broj elektrona željeza $Z_1 = 26$ i usporedba s eksperimentalnim podacima u x ravnini kada ionski snop prođe kroz aluminijску foliju debljine $1,8 \mu\text{m}$ je prikazan na slici 5.17. Eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u x ravnini je ($35,99 \pm 0,04$) mm, a eksperimentalno dobiven FWHM za kutno širenje ionskog snopa u y ravnini je ($37,26 \pm 0,05$) mm, dok je FWHM na osnovu ovog modela ($28,94 \pm 0,05$) mm, odnosno odstupanje u odnosu na eksperimentalne podatke za x smjer je 19,6% i za y smjer 22,3%. Postoji značajno odstupanje teorijskih i eksperimentalnih podataka u veličini pune širine na pola maksimuma i oblika krivulje.

5.3 Diskusija i moguća rješenja problema

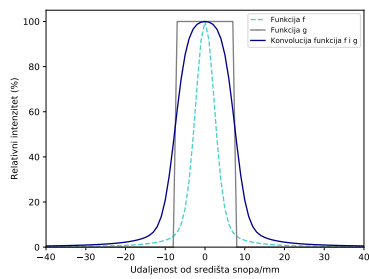
Svaki navedeni teorijski model ima prednosti i nedostatke kad se primjeni na pojedine folije, ali kad bi se odlučivalo koji model najbolje opisuje eksperimentalne krivulje za sve tri folije, bio bi to treći model. Treći model uzima u obzir višestruko elastično raspršenje teških iona i gubitka energije u materijalu, odnosno smanjenje energije unutar svakog sloja za dvadeset posto. Ovisnost energije o debljini folije je prikazana na slici 5.18 gdje je nepouzdanost u energiji određena pomoću izraza (3.3). U daljnjoj diskusiji bit će govora samo o trećem teorijskom modelu.



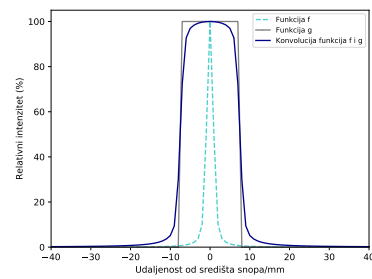
Slika 5.18: Ovisnost energije kada prolazi kroz aluminijsku foliju

Efekt višestrukog elastičnog raspršenja teških iona, koji uzrokuje kutno širenje ionskog snopa, postoji i utječe na konačan rezultat. Zbog efekta koji je izraženiji kod debljih folija postoji više implikacija na dozu koja je deponirana u materijalu uzorka. Trenutačno se uočavaju četiri strategije kojima bi se efekt višestrukog elastičnog raspršenja teških iona mogao smanjiti ili ukloniti. [44]

(i) Prvi pristup rješavanju problema je približavanje sustava rotirajućih zaustavnih folija uzorku materijala čime se smanjuje efekt višestrukog elastičnog raspršenja, ali se time ne eliminira. Za svaki model napravljena je projekcija ovisnosti relativnog intenziteta o udaljenosti od središta snopa kada bi udaljenosti sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka bile 150 mm i 50 mm. Također, unutar svakog modela napravljeno je predviđanje, kako za pojedine udaljenosti sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka, tako i za broj elektrona $Z_1 = 22$ i broj elektrona $Z_1 = 26$. U ovom radu



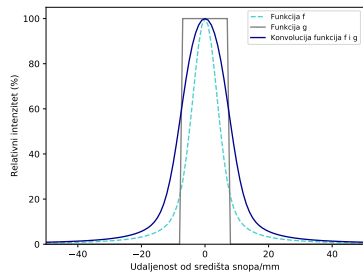
(a)



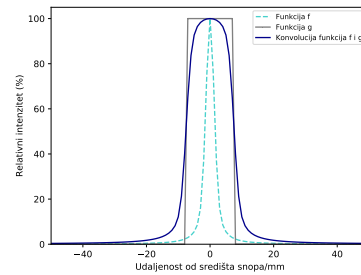
(b)

Slika 5.19: Ovisnost relativnog intenziteta o udaljenosti od središta snopa za aluminijsku foliju debljinu $0,65 \mu\text{m}$ i broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ unutar trećeg teorijskog modela. Funkcija f je definirana (3.25), a funkcija g je definirana (5.4).

(a) Udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka je 150 mm. (b) Udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka je 50 mm.



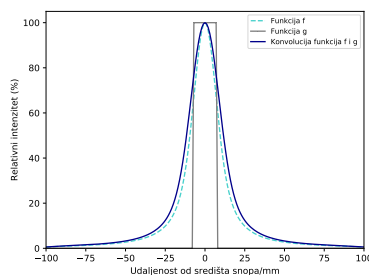
(a)



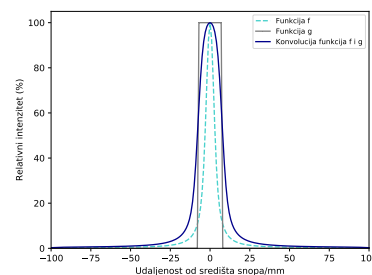
(b)

Slika 5.20: Ovisnost relativnog intenziteta o udaljenosti od središta snopa za aluminijsku foliju debljine $1,2 \mu\text{m}$ i broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ unutar trećeg teorijskog modela. Funkcija f je definirana (3.25), a funkcija g je definirana (5.4).

(a) Udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka je 150 mm. (b) Udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka je 50 mm.



(a)



(b)

Slika 5.21: Ovisnost relativnog intenziteta o udaljenosti od središta snopa za aluminijsku foliju debljine $1,8 \mu\text{m}$ i broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ unutar trećeg teorijskog modela. Funkcija f je definirana (3.25), a funkcija g je definirana (5.4).

(a) Udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka je 150 mm. (b) Udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka je 50 mm.

su navedena samo predviđanja u sklopu trećeg modela i to kada je broj elektrona željeza $Z_1 = 22$ jer je treći teorijski model najprihvatljiviji za sve tri aluminijske folije. Predviđanja su navedena na slikama 5.19, 5.20 i 5.21. Približavanjem uzorka sustavu zaustavnih folija, funkcija kutnog širenja ionskog snopa sve više nalikuje step funkciji, odnosno početnom aproksimiranom izgledu snopa. Kod ostalih modela se uočava slična pravilnost kao i na ovom prezentiranom primjeru. Ovim pristupom bi se reorganizirala komora, no postoje određene tehničke zapreke. Tehnička poteškoća približavanja elemenata je ta što bi svi elementi bili jako blizu te ne bi bilo puno prostora unutar komore kada bi se dodavali i/ili zamjenjivali elementi. Također, treba ostaviti prostor za Faradayevu čašu koja se treba nalaziti između sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka. Osim za Faradayevu čašu treba ostaviti prostor za sustav rotirajućih folija za protone ili ione helija. Vjerojatno bi u ovakvoj konstrukciji komore došlo do preklapanja dva sustava rotirajućih zaustavnih folija pa bi ovaj pristup mogao odgovarati za *single-beam* komore. Ako se pristupi mijenjanju udaljenosti između sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka, onda treba ići u novu konstrukciju komore. Ovaj pristup ima još jednu negativnu stranu, a ta je što se aluminijska folija (na sustavu rotirajućih zaustavnih folija) nalazi bliže materijalu uzorka te se folija dodatno grije, odnosno postoji prijenos topline, što može uzrokovati oštećenje folije.

(ii) Drugi pristup rješavanju problema je ne koristiti sustav rotirajućih zaustavnih folija za teške ione, nego koristiti samo sustav rotirajućih zaustavnih folija za ione helija i protone. Dobra strana ovog rješenja je da više nema utjecaja višestrukog raspršenja za teške ione, jer ioni u tom slučaju ne prolaze kroz aluminijske folije. Zatim, eksperiment se ne bi trebao zaustavljati zbog eventualnog puknuća aluminijskih folija na sustavu rotirajućih zaustavnih folija za teške ione. Ovakav pristup rješavanju problema koriste znanstvenici na TIARA *triple-beam* komori u Takasaki. Negativna strana ovog pristupa je ta što je manje oštećenje materijala blizu površine uzorka nego oštećenja koja se događaju na većim dubinama. Postoji mogućnost gradijenta oštećenja po dubini. Zbog smanjenja gradijenta oštećenja po dubini se koristi sustav rotirajućih zaustavnih folija kako bi variranjem energije teških iona, varirao i njihov doseg i time se stvara otprilike jednako homogeno oštećenje uzorka po dubini. Oštećenje uzorka blizu površine uzrokuje niža doza zračenja, nego oštećenje

Debljina folije/ μm	Postotak površine/%
0,65	65,18
1,2	49,15
1,8	29,92

Tablica 5.5: Postotak površine je omjer površine ispod distribucije kutnog širenja ionskog snopa širine 14 mm oko centra snopa i površine ispod cijele distribucije. Treći teorijski model za udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka je 250 mm te broj elektrona $Z_1 = 22$.

Debljina folije/ μm	Postotak površine/%
0,65	61,50
1,2	44,79
1,8	26,43

Tablica 5.6: Postotak površine je omjer površine ispod distribucije kutnog širenja ionskog snopa širine 14 mm oko centra snopa i površine ispod cijele distribucije. Treći teorijski model za udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka je 250 mm te broj elektrona $Z_1 = 26$.

uzorka koje je na većoj dubini. Također, primjenom ovog pristupa potrebno je jako pažljivo odabrati folije za sustav rotirajućih zaustavnih folija za ione helija ili protona.

(iii) Treći pristup rješavanju problema je da se koristi više folija istih debljina na sustavu rotirajućih zaustavnih folija kako bi one kompenzirale širenje ionskog snopa. Pozitivna strana je ta što će se ovim osigurati potrebna veća doza kako bi došlo do oštećenja blizu površine. Veća doza zračenja blizu površine uzorka bila bi reda veličine jednake kao i zračenje koje uzrokuje oštećenja dublje u materijalu te se time dobiva približno homogeno ozračivanje uzorka. Negativni aspekt ovog pristupa je da se treba testirati i modelirati za svaki pojedini ion i energiju iona. Izuzetno je teško uskladiti dva zahtjeva: S jedne strane traženu korekciju energije iona, a s druge strane traženu korekciju kutnog širenja snopa iona.

(iv) Četvrti pristup rješavanju ovog problema je uporaba step motora za sustav rotirajućih zaustavnih folija za teške ione. Prednost ovog pristupa je podešavanje efektivnog vremena za svaku foliju zbog degradacije doze koja je uzrokovana širenjem snopa. Nedostatak pristupa je dulje vrijeme zračenja najdeblje aluminijske folije pri čemu je moguće pucanje aluminijske folije te prekidanje zračenja s vremenom relax-

sacije za neozračene dubine uzorka.

U tablicama 5.5 i 5.6 prikazani su postoci, odnosno omjer distribucije kutnog širenja ionskog snopa (širine 14 mm oko centra snopa) i ukupne površine distribucije kada je udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka 250 mm. Slike prikaza teorijskih predviđanja, iz kojih su određeni postotci, nalaze se u 5.2.3. Uočava se kako je postotak površine manji kada se u račun uvrsti broj elektrona željeza $Z_1 = 26$ zbog toga što je distribucija šira nego kada se uvrsti broj elektrona $Z_1 = 22$.

U tablicama 5.7 i 5.8 prikazani su postoci, odnosno omjer distribucije kutnog širenja ionskog snopa (širine 14 mm oko centra snopa) i ukupne površine distribucije kada je udaljenosti između sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka 150 mm te 50 mm. Teorijskih predviđanja iz kojih su izračunati postotci se nalaze na slikama 5.19, 5.20 i 5.21. Temeljem podataka se uočava kako se približavanjem sustava rotirajućih zaustavnih folija uzorku postotak površine znatno povećava.

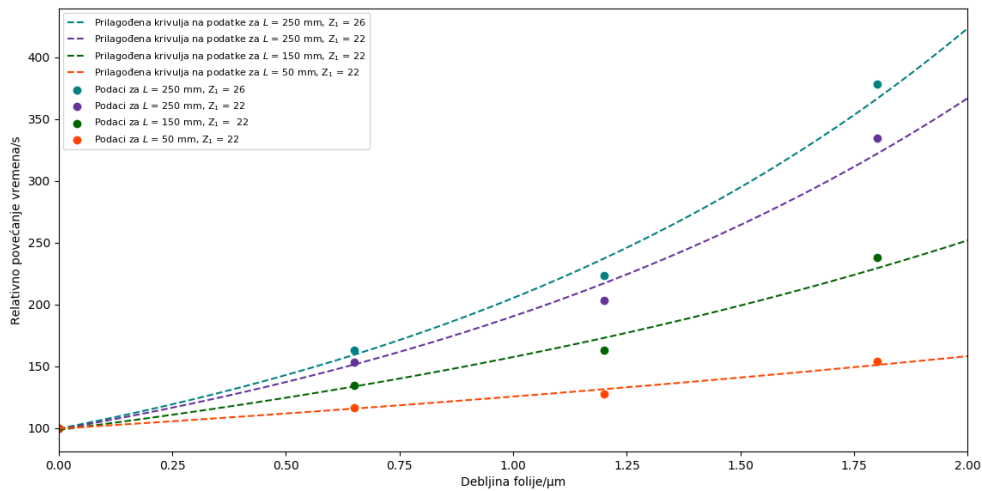
Debljina folije/ μm	Postotak površine/%
0,65	74,51
1,2	61,44
1,8	42,00

Tablica 5.7: Postotak površine je omjer površine ispod distribucije kutnog širenja ionskog snopa širine 14 mm oko centra snopa i površine ispod cijele distribucije. Treći teorijski model za udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka je 150 mm te broj elektrona $Z_1 = 22$.

Debljina folije/ μm	Postotak površine/%
0,65	85,82
1,2	78,65
1,8	65,06

Tablica 5.8: Postotak površine je omjer površine ispod distribucije kutnog širenja ionskog snopa širine 14 mm oko centra snopa i površine ispod cijele distribucije. Treći teorijski model za udaljenost sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka je 50 mm te broj elektrona $Z_1 = 22$.

Podaci iz navedenih tablica su prilagođeni te su prikazani na slici 5.22. Na slici se može vidjeti ovisnost relativnog povećanja vremena o debljini folije. Kao početna pretpostavka je uzeto kako je vrijeme ozračivanja uzorka kroz praznu poziciju 100 s. Na podatke su prilagođene funkcije.



Slika 5.22: Ovisnost relativnog povećanja vremena o debljini aluminijske folije

Za podatke $L = 250$ mm i $Z_1 = 22$ prilagođena je funkcija:

$$f(x) = 98,75 \cdot e^{0,6562x}, \quad (5.9)$$

za podatke $L = 250$ mm i $Z_1 = 26$ prilagođena je funkcija:

$$f(x) = 99,366 \cdot e^{0,7248x}, \quad (5.10)$$

za podatke $L = 150$ mm i $Z_1 = 22$ prilagođena je funkcija:

$$f(x) = 98,353 \cdot e^{0,47x}, \quad (5.11)$$

za podatke $L = 50$ mm i $Z_1 = 22$ prilagođena je funkcija:

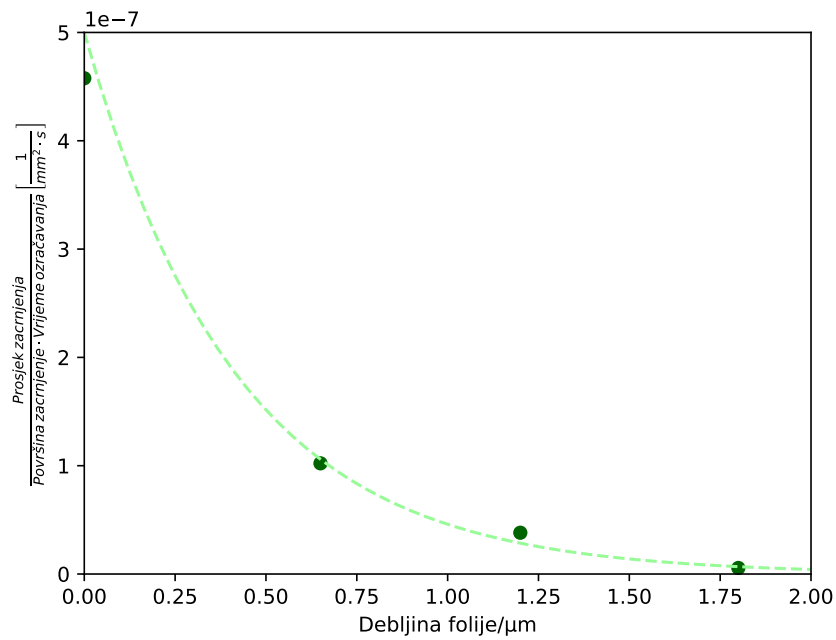
$$f(x) = 99,438 \cdot e^{0,2317x} \quad (5.12)$$

gdje je x debljina aluminijske folije.

Na slici 5.23 su prikazani eksperimentalni podaci zacrnjenja po površni u vremenu ozračivanja u ovisnosti o debljini aluminijske folije i prilagođena je krivulja koja glasi:

$$f(x) = 5 \cdot 10^{-7} e^{-2,388x} \quad (5.13)$$

gdje je x debljina folije. Prosjek zacrnjenja za svaki pojedini slučaj je uzet preko



Slika 5.23: Ovisnost prosjeka zacrnenja po površini u vremenu o debljini aluminijske folije

površine $(221 \pm 4) \text{ mm}^2$, dok su podaci za vrijeme zračenja pojedinih slučajeva navedeni ranije u radu (potpoglavlje 5.1). Iz grafa se može odrediti koliko je potrebno dulje zračiti određenu foliju kako bi zacrnenje bilo jednako kao i pri ozračivanju uzorka bez korištenja sustava rotirajućih zaustavnih folija. Usporedbe prilagođenih krivulja na eksperimentalne podatke i teorijske podatke nije zahvalno komentirati. Razlog tome je što za kvalitetno određivanje eksponencijalne krivulje potrebno više točaka kako bi se dobili egzaktniji podaci o prilagođenoj krivulji. Potrebno je napraviti dodatna mjerenja kako bi se došlo do potpunijih zaključaka.

6 Zaključak

U ovom diplomskom radu preliminarno je istražen oblik distribucije relativnog intenziteta ionskog snopa željeza Fe^{4+} energije 10 MeV nakon prolaska kroz aluminijske folije debljine 0,65 μm , 1,2 μm i 1,8 μm . Analizom eksperimentalnih podataka utvrđeno je očekivano kutno širenje ionskog snopa prolaskom kroz foliju određene debljine. Širenje ionskog snopa je relativno veliko u odnosu na početnu dimenziju snopa. Daljnjom analizom bi se moglo ustvrditi kada se kutno širenje ionskog snopa relativno može zanemariti. Eksperimentalno dobiveni podaci su se pokušali objasniti pomoću četiri teorijska modela. Kod većine teorijskih modela se pokazalo bolje slaganje eksperimentalnih podataka kada se u model uvrsti početni broj elektrona ionskog snopa $Z_1 = 22$. Međutim, možda postoje ograničenja za pojedine teorijske modele jer za određenu distribuciju koja opisuje ionski snop koji prolazi kroz aluminijsku foliju određene debljine model jako dobro odgovara, dok za drugu debljinu aluminijske folije isti model nije prihvatljiv. Trebalo bi u budućim istraživanjima uzeti u obzir višestruko elastično raspršenje teških iona te prije primjene testirati efekt višestrukog elastičnog raspršenja za svaki korišteni teški ion pri svakoj korištenoj energiji i svakoj korištenoj foliji koja se postavlja na sustav rotirajućih zaustavnih folija. Sukladno ovom je sustav rotirajućih zaustavnih folija prihvatljiv uz određene aproksimacije.

Na temelju rezultata moguće su četiri strategije rješavanja problema kutnog širenja ionskog snopa i deponirane energije u materijalu. Strategije bi još trebalo eksperimentalno istražiti, a na pojedinim znanstvenim timovima je da se odluče koju strategiju će odabrati prema potrebama njihovih eksperimenata. Učinkovitost pojedinog od četiri pristupa će se vidjeti kroz daljnja istraživanja i primjenu. Kao što je navedeno u prethodnom poglavlju, iz predviđanja modela se vidi kako približavanjem uzorka sustavu rotirajućih zaustavnih folija, postoji sve manji efekt širenja, ali se ne eliminira. To zahtjeva redizajn eksperimentalne komore. Na slikama 5.19, 5.20 i 5.21 se uočava promjena distribucije relativnog intenziteta kada se distribucije usporede s eksperimentalnim podacima na slikama 5.4 i 5.5. Ako se pristupi rješavanju problema tako da se ostavi udaljenost od 250 mm između sustava rotirajućih zaustavnih folija i uzorka, onda je potrebno dulje vrijeme zračenja aluminijskih folija kako bi se postigla doza deponirane energije kao i kod ozračivanja uzorka kroz praznu poziciju. Na slici 5.22 se nalazi predviđanje produljenja vremena ozračivanja. Jedna

od rješenja ovog problema je zamjena postojećeg motora sa step motorom. Step motorima je moguće postići različito vrijeme zračenja pojedine folije, ali opet postoje ograničenja na koja treba pripaziti. Također, ostaje rješenje nekorištenja sustava rotirajućih zaustavnih folija za teške ione, nego samo za protone i ione helija. Zadnja, ali ne i manje značajna solucija je upotreba više aluminijskih folija iste debljine kako bi se kompenziralo kutno širenje ionskog snopa i deponiranje energije.

Unaprjeđivanje dual beam komore je neophodno za dobivanje valjanih rezultata simulacije neutronske zračenja. Sadašnji način upotrebe sustava rotirajućih zaustavnih folija nije zadovoljavajući. Za utvrđivanje najbolje strategije poboljšanja ovog sustava, potrebno je provesti mjerenja za širi raspon energija i debljina aluminijskih folija koje se koriste u eksperimentima.

7 Metodički dio

U današnjem društvu događaju se mnoge promjene u raznim aspektima ljudskog djelovanja. Odgoj i obrazovanje, jedan su od temelja za funkcioniranje društva i sami su zahvaćeni promjenama. Reforme u obrazovanju se trebaju orijentirati na sadašnjost, a koliko god je moguće i na budućnost, kad učenici izlaze iz obrazovnog sistema. Moderna paradigma odgoja i obrazovanja je odvojiti se od tradicionalnog pristupa nastavi gdje su učenici pretežito bili pasivni promatrači koji sjede i slušaju, a taj pristup zamijeniti s modernim pristupom u kojem su učenici aktivni sudionici i sukreatori nastavnih procesa. Kako se mijenja svijet tako se mijenja i odnos prema učenju. Nekad je glavna odlika uspješnog učenja bila reprodukcija znanja, dok se danas teži razumijevanju gradiva i sposobnosti primjene znanja. Reforma formalnog obrazovanja trebala bi biti u interesu svakog pojedinca, društva i države, a koja će se odraziti na dobrobit i učenika i društva. Bitna stvar kod reformi, pa tako i kod obrazovne reforme, je analizirati posljedice promjena obrazovnog sustava. Kod obrazovnog sustava je problem što konačne posljedice određene strukturne promjene se mogu vidjeti tek nakon osnovne, odnosno srednje škole. Uzmimo u obzir da se u međuvremenu može dogoditi još nekoliko strukturnih promjena. Zato će biti teško s dovoljnom pouzdanošću reći zbog koje promjene je određena posljedica nastala. Obrazovna reforma dotiče najosjetljiviju skupinu društva i zato treba biti dobro promišljena.

Istraživanja u području edukacijske fizike pokazala su kako je za zadovoljavajuće usvajanje fizikalnog gradiva potreban visoki intelektualni angažman učenika te su znanstvenici osmislili interaktivnu istraživački usmjerenu nastavu fizike. Današnje stajalište je da su učenici intelektualno aktivni sudionici u nastavi i nastava fizike bi trebala odražavati karakter fizike kao znanstvene discipline. Karakter fizike kao istraživački znanstvene discipline se oslikava kroz postavljanje sljedećih pitanja: „Što znamo?“, „Kako znamo?“ i „Zašto je to što znamo važno?“ te davanja kvalitetnih odgovora na dobro postavljena pitanja. Istraživački usmjerena nastava uvedena je u hrvatsko školstvo osamdesetih godina prošlog stoljeća i zadržala se u hrvatskom školstvu do danas u većoj ili manjoj mjeri. Održavanje kontinuiteta istraživački usmjerene nastave je većinom bilo prepušteno na volju nastavnika (učitelja) i njegovoj ustrajnosti. Uspješnost ovog pristupa se pokazala u velikoj meta studiji [48] koja je obuhvatila 160 000 učenika u Sjedinjenim Američkim Državama. Meta studija

je analizirala učinkovitosti pojedinih nastavnih strategija. To istraživanje je pokazalo da podizanje relevantnosti gradiva za učenike je najučinkovitije, ali su visoku učinkovitost imale i strategije vezane uz istraživački pristup u nastavi. [49]

Nastavnik potiče aktivno učenje kroz komunikaciju učenika međusobno, ali i komunikaciju između nastavnika i učenika. Prilikom provođenja istraživački usmjerene nastave fizike, nastavnik mora pripaziti kako ne bi upao u zamku postavljanja pitanja kojima se provjerava/ispituje samo činjenično znanje. Ne bi smio postavljati sugestivna ili retorička pitanja. Pitanja koja postavlja nastavnik trebaju poticati kreativno razmišljanje i time učenika voditi prema kvalitetnijem konceptualnom učenju. Međutim, kada nastavnik postavi kvalitetno pitanje, ne bi smio upasti u još jednu zamku, a to je da sam odgovori na pitanje. Nakon postavljenog pitanja nastavnik treba učenicima dati dovoljno vremena kako bi samostalno promislili i izrekli svoje razmišljanje/odgovor. Nekad je potrebno dodatno pojasniti i razjasniti pitanje pomoću dodatnih pitanja koja će također usmjeravati i poticati učenike na razmišljanje. Nastavnik treba pohvaliti i uvažiti učenički angažman oko predlaganja odgovora i naglasiti bitne stvari koje su učenici iskazali. Pozitivnoj atmosferi u razredu doprinosi i to kad nastavnik sluša učeničke odgovore bez obzira na točnost odgovora, prihvaća ih i pomoću dodatnih pitanja potiče učenike da još razmisle o svojim odgovorima. Ovim pristupom se poboljšavaju učeničke govorne sposobnosti i razvija se argumentirano iznošenje stajališta. Interaktivno istraživački usmjerena nastava, koja je vrlo strukturirana i vođena nastava koju nastavnik pripremi, treba se razlikovati od istraživačke nastave (eng. *discovery learning*) gdje je osnova otvoreno istraživanje, što podrazumijeva da učenik sve samostalno otkrije i istraži, bez nastavničke pomoći. Istraživački usmjerenom nastavom fizike se pokušava postupno izgraditi razumijevanje fizikalnih pojava i razvijati razmišljanje koje se može primijeniti u realnom životu. Za provođenje suvremene nastave fizike, nastavnici trebaju imati integrirano stručno i pedagoško znanje (eng. *pedagogical content knowledge*). Integrirano stručno i pedagoško znanje ima dva vida. Prvi je deklarativno znanje koje je utemeljeno na rezultatima edukacijskih istraživanja u fizici, a drugi vid je proceduralno znanje koje se može razvijati kroz nastavnu praksu. [50] [51] [52]

Istraživački usmjerena nastava se temelji na dva aspekta. Jedan aspekt je interaktivnost koja bi trebala potaknuti učenike na učenje i promišljanje o sadržaju, već na nastavnom satu. Uključivanjem interaktivnosti u nastavu se postiže bolje

razumijevanje sadržaja i povećava se učinkovitost nastave. Ovaj aspekt bi trebalo koristiti na svakom nastavnom satu kroz korištenje interaktivnih nastavnih metoda kojima se potiče učenički angažman. Drugi aspekt ove vrste nastave je istraživački i problemski pristup koji pomaže razviti kod učenika znanstveno zaključivanje na temelju kritičko-logičkog razmišljanja i razvijanja sposobnosti poput eksperimentalnih vještina, opažanja i formalnog mišljenja. Ovakva nastava bi trebala učenicima pružiti uvid u prirodoslovne znanosti, odnosno približiti učenicima fiziku kao istraživačku disciplinu koja evaluira znanstvene rezultate. Istraživački usmjerena nastava potiče učeničko samostalno zaključivanje uz pomoć dobro koncipiranih i vođenih nastavnih pitanja kako učenik ne bi morao sve samostalno otkrivati. Ako ne postoje određene smjernice, odnosno dobra konstruktivna pitanja može doći do „velikog lutanja“ prilikom traženja odgovora i gubljenja vremena koje je jako dragocjeno na nastavnom satu. Ovakav tip nastave zahtjeva veliki nastavnički angažman na samom nastavnom satu koji se sastoji od usmjeravanja i nastavničke pomoći, ali i veliku, ozbiljnu i sistematičnu pripremu nastavnog sata. Uz vođenje istraživanja nastavnik treba paziti da ostavi dovoljno prostora kako bi učenik samostalno došao do zaključka. Jedna od ključnih komponenti uspjeha je dobra komunikacija između nastavnika i učenika. Također, nastavnik bi trebao davati povratne informacije učeniku kako bi učenik stekao uvid u svoj napredak. Fokus istraživački usmjerene nastave bi trebao biti na postavljanju kvalitetnih pitanja, razvoju kritičkog mišljenja i rješavanju određenih problema. Kvalitetna pitanja ne bi smjela biti trivijalna niti preteška, moraju biti konstruirana tako da potaknu učenika na aktivno samostalno razmišljanje. Težište ovog pristupa bi trebalo biti na razvijanju vještina i sposobnosti te na izgradnji koncepata. Ovim pristupom u nastavi se naglašava proces znanstvenog istraživanja i posljedično dovodi do toga da učenici ne moraju zapamtiti samo gotove rezultate. Kada se uvodi istraživački usmjerena nastava, potrebno je učenicima pojasniti kako se radi i zbog čega se nešto radi, zatim što se od njih očekuje te ih upoznati s nagradama kojima će se vrednovati njihov angažman i doprinos u nastavi. [51] [53] [49]

Kao što je već spomenuto, istraživački usmjerena nastava bi se trebala postizati traženjem odgovora na znanstvena pitanja, formuliranjem i testiranjem hipoteza, osmišljavanjem i provođenjem pokusa, samostalnim zapisivanjem učeničkih predviđanja, opažanja i zaključaka, prezentiranjem istih pred drugima i njihovom argumentiranom obranom. Znanstveno zaključivanje koje potiče i razvija istraživački

usmjerena nastava, oslanja se na formalno mišljenje i time ga razvija te je to još jedan od ciljeva istraživački usmjerene nastave. Za ove ciljeve nastave potrebna je određena kognitivna razina učenika. Prema Piagetovoj teoriji kognitivnog razvoja, djeca u dobi od sedme do jedanaeste godine su u stadiju razvoja konkretnih operacija, a od jedanaeste godine u stadiju razvoja formalnih (apstraktnih) operacija koje se razvijaju cijeli život. Neka djeca u jedanaestoj godini još nisu počela ovladavati apstraktnim operacijama ili su u prijelaznom razdoblju između konkretnog i apstraktnog mislioca. Iz navedenih razloga u hrvatskom obrazovnom sustavu djeca fiziku počinju učiti u trinaestoj godini kada se očekuje da je većina počela ovladavati apstraktnim operacijama. [50] [49]

Glavna razlika između konkretnog mislioca i apstraktnog mislioca je u tome što konkretni mislilac rješava konkretne probleme uporabom logike, ali ima poteškoće s razumijevanjem i rješavanjem problema izvan konkretnog konteksta. Ako konkretni kontekst uključuje hipotetičke zadatke i apstraktni kontekst to za konkretnog mislioca predstavlja nepremostivu zapreku sve dok ne prijeđe u stadij apstraktnog mislioca. Apstraktni mislilac ima sposobnost zaključivanja o apstraktnim konceptima i vezama iskazanima simbolima i/ili matematički, identificiranju relativne varijable u pojedinom problemu. On kontrolira varijable koje su uključene u problem, koristi proporcionalno, kombinirano, probabilističko i korelacijsko zaključivanje, formira i testira hipoteze na konkretne i apstraktne hipoteze primjenom hipotetičko-deduktivnog zaključivanja. Razvoj apstraktnih operacija se ne događa sam od sebe, nego se mora direktno poticati. Nastava fizike uvelike pomaže u razvoju formalnog razmišljanja i znanstvenog zaključivanja. U tom smislu ona nije samo važna zbog fizikalnih fenomena i fizikalnog opisa svijeta koji nas okružuje nego i zbog osobnog intelektualnog razvoja svakog pojedinog učenika. [50]

Glavni argument ne provođenja istraživački usmjerene nastave jest taj kako „oduzima“ dragocjeno vrijeme nastavnog sata. Ukoliko nastavnik dovoljno dobro ne pripremi nastavni sat, to će stvarno biti gubitak vremena, ali ukoliko je nastavnik pripremio sat to nikako neće biti gubljenje vremena već dobitak za učenike i samog nastavnika. Priprema ovakvog tipa nastave zahtjeva početnu pripremu nastavnika od nekoliko radnih sati pa do nekoliko dana, ovisno o temi.

7.1 Istraživački usmjerena nastava fizike

Glavno obilježje istraživački usmjerene nastave je istraživački pristup gdje učenici traže odgovore na znanstvena pitanja, formuliraju i testiraju hipoteze, osmišljavaju i provode pokuse, samostalno zapisuju svoja predviđanja, opažanja i zaključke te prezentiraju drugima svoje rezultate i argumentirano ih brane. Znanje fizike se sastoji od više različitih komponenti: poznavanja fizičkih pojava, zakona, modela i teorija, konceptualnog razumijevanja (razumijevanje sadržaja koncepta i veza među njima), vještina (reprezentiranje znanja kroz grafove, dijagrame ili sheme, provođenje i obrade mjerenja, matematičke procedure), znanstvenog zaključivanja (proporcionalno zaključivanje, kontrola varijabli, osmišljavanje pokusa, testiranje hipoteza, evaluiranje znanstvenih rezultata...) i matematičkog modeliranja fizičkih situacija. U osnovnim i srednjim školama se većinom samo vrednuju numerički zadaci, odnosno samo zadnja komponenta znanja fizike dok bi trebalo razvijati i vrednovati sve komponente. [49] [51]

Drugi važni obilježje istraživački usmjerene nastave je interaktivnost u nastavi u kojoj su zastupljene nastavne metode: razredna rasprava, konceptualna pitanja s karticama, kooperativno rješavanje zadataka u malim skupinama, interaktivno izvođenje pokusa i računalne interaktivne metode. Istraživanja u području edukacijske fizike su pokazala kako predavački tip nastave ne utječe mnogo na konceptualno razumijevanje ni sposobnost rješavanja zadataka za razliku od interaktivnog tipa nastave fizike. Određena istraživanja su pokazala kako interaktivna nastava fizike daje otprilike dvostruko veću učinkovitost kod učeničkog razumijevanja mehanike od tradicionalne predavačke nastave fizike. Mali postotak ljudi, oko 5% populacije, može samostalno aktivno učiti, dok svim ostalim ljudima je potrebno vodstvo nastavnika. Korištenje više metoda istovremeno daje bolji efekt, nego korištenje samo jedne metoda. [52]

Konceptualna pitanja s karticama su pitanja višestrukog izbora (obično četiri ponuđena odgovora) kojima se ispituje razumijevanje bitnih aspekata modela i produbljuje konceptualno razumijevanje. Učenici odgovaraju na pitanja istovremenim podizanjem kartica. Kada se vidi raspodjela glasova za pojedini odgovor, slijedi diskusija o mogućem točnom odgovoru. Ovom metodom nastavnik dobiva direktan uvid u usvojenost gradiva na brz i jednostavan način. Kooperativno rješavanje zadataka u malim skupinama je metoda u kojoj troje do četvero učenika zajedno rješavaju

zadatke. Učenici se međusobno pomažu te je poželjno da učenici različite razine znanja budu u istoj grupi. Zadaci se rješavaju u četiri koraka. Prvi korak je skiciranje i označavanje podataka pri čemu učenici vizualiziraju situaciju i prepoznaju relevantne fizikalne veličine, odnosno nacrtaju skicu i označavaju na njoj relevantne i poznate veličine, uočavaju što se zapravo od njih traži. Drugi korak je modeliranje i prikaz pri čemu treba modelirati problem, odnosno prepoznati fizikalni model koji odgovara situaciji i naznačiti potrebne aproksimacije. Također treba prikazati situaciju pomoću dijagrama sila, grafa, silnica ili drugih fizikalnih reprezentacija. Treći korak je matematički opisati problem, tj. napisati jednadžbe koje odgovaraju fizikalnoj situaciji. Četvrti korak je riješiti i promisliti o rješenju u kojem treba riješiti jednadžbe i evaluirati rezultate, odnosno provjeriti mjerne jedinice, procijeniti realnost i smislenost rezultata. Računalne interaktivne metode se moraju provoditi kao i pokusi. Ako se ne provodi na takav način onda je slaba komunikacija u razredu, a komunikacija i verbalizacija ideja je nužna za razvoj razmišljanja i poticanje konceptualnih promjena. [52] [49]

Pravilno izvođenje pokusa u sklopu istraživački usmjerene nastave je važno zbog veće intelektualne uključenosti učenika u sam obrazovni proces. Time se proces učenja fizike prezentira na interesantniji način, a ujedno učenici dobivaju direktan uvid i iskustvo o fizikalnim fenomenima. Također je bitan aspekt razvoja znanstvenog razmišljanja i zaključivanja koje učenici mogu transferirati na probleme u realnom životu i kritički promatrati stvari oko sebe. Pokus ne može biti sam sebi svrha, već ga treba dobro oblikovati u nastavnom satu. [51] [50]

Postoje dva osnovna tipa istraživanja u sklopu istraživački usmjerene nastave, a to su otvoreno istraživanje i vođeno istraživanje. Otvoreno istraživanje u današnjem obrazovnom sustavu nije prikladno jer zahtijeva puno više vremena od vođenog istraživanja, mnogobrojnu opremu i znatno veću količinu potrebnog materijala. Eventualno je prihvatljivo za napredne grupe ili samostalne učeničke projekte. Ovakav tip istraživanja zahtijeva da učenik posve samostalno osmisli i postavi istraživačko pitanje na neku zadanu temu. Također, učenik treba samostalno odabrati metodu potrebnu za istraživanje i na kraju provesti istraživanje te samostalno donijeti zaključke na temelju istraživanja. [49]

Vođeno istraživanje je prikladnije i glavni je oblik istraživanja koji bi se trebao provoditi u hrvatskom obrazovnom sustavu. Glavna karakteristika vođenog istraživanja je

da učenik ima usmjereno i vođeno istraživanje pod kontrolom nastavnika koji sistematično potiče samostalnost učenika u razmišljanju i zaključivanju. Ovako pripremljeno istraživanje ima funkciju i svrhu povećanja intelektualnog angažmana učenika i njihovu uključenost u interakciju sa sadržajem. Također, postiže se razvijanje znanstvenog razmišljanja i zaključivanja te zornijeg i boljeg razumijevanja rezultata i procesa unutar znanstvenog svijeta. Čest primjer je da nastavnik zada istraživačko pitanje, a učenici samostalno osmišljavaju pokus s priborom koji im je dostupan, aktivno primjenjuju kontrolu varijabli, osmišljavaju i zapisuju hipoteze, a zatim ih testiraju. Nakon izvedenog pokusa učenici samostalno iznose i zapisuju opažanja te dobivene rezultate i na kraju dolaze do zaključaka. Tijekom cijelog procesa istraživanja nastavnik pomaže učenicima ako zapnu s određenim dijelom, pokušava ih usmjeriti i time skratiti vrijeme potrebno za određeni dio istraživanja. Ovakav pristup nije ekvivalentan klasičnim laboratorijskim vježbama te se ne može zamijeniti s njima. Glavna razlika između istraživački usmjerene nastave fizike i laboratorijskih vježbi je u tome što istraživački usmjerena nastava ima naglasak na opisivanju, razumijevanju i istraživanju novih pojava, dok kod laboratorijskih vježbi učenici provjeravaju teorijski dobivene zakonitosti čime se ne ostavlja previše prostora za ueničku kreativnost. Time je intelektualni angažman učenika najčešće vrlo nizak kod laboratorijskih vježbi. Efekt izvođenja pokusa kojim se provjerava već prethodno objašnjeno nastavno gradivo je mali, gotovo zanemariv, za učenikov razvoj znanstvenog i kritičkog razumijevanja, razumijevanja fizikalnih pojava te konceptualno razumijevanje fizikalnih pojava. [50] [51] [49]

Osim ove navedene „grube“ podjele ueničkih istraživanja, postoji i preciznija podjela ueničkih istraživanja prema T. MacKenzie-ju. Prema toj podjeli, uenička istraživanja se dijele na četiri tipa istraživanja. Prvi tip istraživanja je strukturirano istraživanje kod kojeg učenici slijede upute nastavnika i cijeli razred sudjeluje u istom istraživanju. Zatim postoji nadzirano istraživanje kod kojeg nastavnik odabire temu i sredstva kojima bi učenici trebali doći do odgovora. Treći tip istraživanja je vođeno istraživanje gdje nastavnik odabire i postavlja problem/pitanje, a učenici dizajniraju rješenje. Četvrti tip istraživanja je slobodno istraživanje gdje učenici samostalno biraju probleme i traže rješenja. Četvrti tip istraživanja je više namijenjen studentima, a u manjoj mjeri učenicima osnovnih i srednjih škola. Kako bi vođeno istraživanje tijekom nastavnog sata bilo uspješno, potrebno je mnogo truda i rada, kako od strane

nastavnika tako i od samih učenika. Tijekom nastavnih sati nastavnik bi trebao naviknuti učenike na samostalni rad i konstantno poticanje istraživačkog duha kod njih. Nastavnik bi se trebao voditi principom da uvijek počne s lakim i jednostavnim problemima/pitanjima i postupno povećavati težinu i složenost problema/pitanja. Korisno je da se vodi načelom od konkretnih prema apstraktnim pojmovima i modelima. Nastavnik treba biti vrlo strpljiv i dati učenicima dovoljno vremena kako bi odradili zadatak. Nastavnik treba biti ustrajan u svom načinu rada te ne bi smio upasti u zamku pružanja pomoći učenicima oko jednostavnih stvari. Odnosno, nastavnik ne bi smio davati gotova rješenja problema/pitanja, nego bi trebao s dodatnim pitanjima učenike navoditi i voditi prema rješenju problema. Ovim načinom nastavnik postiže cilj kojim omogućuje učenicima da im fizika postane jasnija i zanimljivija. Time razvija njihovu kreativnost, kroz otkrivanje i spoznanje novog znanja što postaje podloga za izvor zadovoljstva i entuzijazma, a učenici imaju priliku rješavati probleme novostečenim znanjem i dotadašnjim iskustvom. [53]

Osnovno načelo izvođenja pokusa je da pokus treba biti dobro vidljiv i da ga treba više puta ponoviti. Pokusi trebaju biti oblikovani u obliku istraživanja, a mogu se provoditi frontalno ili u manjim učeničkim skupinama. Frontalno provođenje pokusa obično provodi nastavnik, ali može ga provoditi i uz asistenciju učenika ili sam učenik može izvesti pokus pred cijelim razredom. U manjim učeničkim skupinama, učenici samostalno provode pokus i dodatno razvijaju svoje eksperimentalne vještine, a nastavnik ih nadgleda. Provođenje istraživanja u manjim učeničkim skupinama je bolji pristup, ali zbog realnih zapreka, kao što su zahtjevnost pokusa, ograničen broj nastavnih sati i količina opreme, nije moguće uvijek primjenjivati ovaj pristup. Važno je prilikom oba pristupa uključiti učenike tijekom cijelog intelektualnog puta istraživanja. Intelektualni put učenika se sastoji od: ideja za osmišljavanje pokusa koje se diskusijom u razredu zadržavaju ili odbacuju, samostalnog postavljanja hipoteza, predlaganja i zapisivanja pretpostavki, izvođenja pokusa, iskazivanjem i zapisivanjem opažanja, skiciranjem pokusa, obradom rezultata i zaključivanjem na temelju opažanja i dobivenih rezultata. Nastavnik ne treba uvijek tražiti pretpostavke za sve pokuse, a pogotovo u trenucima kada učenici nemaju nikakav uvid ili saznanja o određenom fizikalnom fenomenu. Ako nastavnik traži predviđanja potrebno je zahtijevati i obrazloženje od učenika zašto je određeni ishod po njima najizgledniji. Pošto za određene fizikalne fenomene nije moguće izvesti pokus na satu, onda nastavnik

može koristiti snimljene pokuse i simulacije, ali uz jednaku pripremu istraživanja. Prilikom uporabe snimljenih pokusa i simulacija nastavnik mora paziti na fizikalnu točnost i objašnjenja. Također, pokusi se mogu podijeliti s obzirom na njihovu ulogu u nastavnom satu, odnosno na uvodni pokus, istraživački pokus i aplikacijski pokus, ali više o tome u nastavku teksta. [51] [53]

Ovakvim pristupom učenike se potiče i osposobljava za cjeloživotno učenje, a ne učenje samo radi fizike. Osim transfera znanja u svakodnevni život, učenicima se pruža prilika za lakše učenje o svijetu koji ih okružuje jer ne moraju memorirati činjenice samo zbog toga što one postoje. [53]

7.1.1 Osnovna struktura nastavnog sata

Osnovna struktura istraživački usmjerene nastavne jedinice sadrži tri dijela koja mogu, ali i ne moraju biti obrađeni unutar jednog školskog sata. Prvi dio sata se naziva uvodni dio, drugi dio sata središnji dio, a treći dio je završni dio sata. Pripremljenost i organiziranost nastavnog sata je bitna te se treba obratiti pažnja da se uključi što više učenika, a poželjno je uključiti cijeli razred čime se postiže dinamičnost sata. Međutim, bez obzira na pripremljenost nastavnog sata moguće su nepredviđene situacije u kojima nastavnik treba biti fleksibilan i prilagoditi se situaciji. [49]

Osnovna značajka uvodnog dijela sata je otvaranje uvodnog problema i demonstriranje nove pojave koja će se obrađivati na nastavnom satu i time započeti problematika sata. Na početku sata nastavnik iznosi uvodni problem u obliku pitanja (po mogućnosti koja su vezana za svakodnevni život učenika) ili opservacijskim pokusom prikuplja učeničke ideje i njihovo prethodno znanje o toj novoj pojavi. Također, pokusom ih može zainteresirati za određenu temu. Nastavnik prikupljanju ideja treba pristupiti oprezno i pažljivo te dati učenicima dovoljno vremena za sistematično promatranje pojave, opisivanje i uočavanje glavnih i bitnih aspekata. Prije izvođenja opservacijskog pokusa nije nužno pitati učenike njihove pretpostavke, ali je jako bitno od njih tražiti sistematično promatranje, samostalno iskazivanje i zapisivanje opažanja te uočavanje glavnih obilježja, skice i opis pokusa. Ovaj dio sata je iznimno važan kako bi učenici novo nastavno gradivo povezali s vlastitim iskustvom i sa svakodnevnim životom. Time nastavnik potiče njihovu motivaciju i daje im orijentaciju za daljnji tijek sata. U ovom dijelu sata nastavnik neće iznijeti odgovore na postavljeni problem ili pitanja već će pažljivo slušati odgovore i ne će komenti-

rati točnost odgovora. Upoznavanje i opažanje u uvodnom dijelu sata nerijetko se preskače što nije dobro, jer učenici ako ne shvate što trebaju proučavati, ne će im biti jasna daljnja matematička pozadina problema koja se onda stavlja u prvi plan. Nakon što su se učenici upoznali s novom pojavom nastavnik uvodi naslov nastavnog sata. [51] [53] [49]

U središnjem dijelu nastavnog sata se izvodi vođeno istraživanje, matematički opis pojave i konstrukcija modela pojave. Središnji dio sata u kojem se provodi istraživanje je okosnica istraživački usmjerene nastave jer se njime direktno koristi hipotetičko-deduktivno zaključivanje koje je osnova za znanstveno zaključivanje. Bit ovog dijela sata je učeničko upoznavanje s gradivom i znanstvenim procesima kroz istraživanje, ali i razvijanje mnogih učeničkih sposobnosti i vještina. Ovaj dio sata se započinje istraživačkim pitanjem, koje je jako bitno jer daje usmjerenost cijeloj nastavnoj jedinici te ga je potrebno naglasiti. Važnost ovog dijela sata za učenike je ta, što eksperimentalno istražuju pojavu i traže odgovor, a ne dobivaju „servirano“ rješenje. Istraživačko pitanje mora sadržavati ono što nas zanima o novoj pojavi ili konceptu. Prije provođenja pokusa diskutiraju se prijedlozi, dogovaraju se detalji izvedbe pokusa. Također, nastavnik se dogovara s učenicima hoće li se pokusi izvoditi u manjim učeničkim grupama ili frontalno, što najviše ovisi o dostupnosti i količini potrebnog materijala. Prema istraživačkom pitanju učenici identificiraju relevantne varijable, postavljaju hipoteze, provode kontrolu varijabli, predlažu istraživačke pokuse, daju predviđanja, planiraju kako na zoran način prikazati podatke i rezultate mjerenja, te izvode pokuse i testiraju hipotezu, skiciraju pokus, promatraju, opisuju i zapisuju opažanja, tablično i grafički prikazuju rezultate mjerenja. Nakon što se dobije konačan rezultat potrebno je diskutirati pogrešku i preciznost pojedinog seta mjerenja. Ovo je posebno potrebno u srednjoj školi. Zatim se analiziraju dobiveni rezultati i donose zaključci koje međusobno prezentiraju jedni drugima. Diskutiraju o ispravnost hipoteze i pretpostavkama i na kraju sve to sistematiziraju. Nakon zaključka, učenici utvrđuju je li hipoteza podržana ili nije podržana. Svrha istraživačkog pokusa je istražiti međuovisnost veličina koje su relevantne za određeni problem. Nakon završetka istraživanja slijedi konstrukcija modela i matematički opis modela koji se temelji na izvedenom pokusu (istraživanju) ili se provodi interaktivni izvod. Funkcionalna ovisnost se može utvrditi nakon niza mjerenja, uz kontrolu varijabli, i kasnijom matematičkom analizom. Kontrola varijabli je vrlo bitna prilikom

fizikalnih mjerenja jer tijekom jednog seta mjerenja može se promijeniti samo jedna fizikalna veličina, a ostale fizikalne veličine moraju biti konstantne zbog toga što se gleda utjecaj jedne fizikalne veličine na drugu. Ako se promjeni više fizikalnih parametara, onda može doći do konfuzije o tome koji parametar utječe na konačan rezultat. Nakon završetka istraživanja, potrebno je odgovoriti i prodiskutirati odgovor na istraživačko pitanje. [50] [51] [53] [49]

U završnom dijelu sata se odvija evaluacija novog znanja i primjena novog konstruiranog modela. Učenicima je završni dio sata zanimljiv i potreban zbog toga jer mogu uvidjeti što znači upravo konstruiran model i kako može poslužiti u svakodnevnom životu i na određenim konceptualnim ili numeričkim zadacima. Učenici imaju više volje i želje rješavati i razmišljati o novo postavljenom problemu ako vide vezu između postavljenog problema i njihovog realnog, svakodnevnog života. Numerički zadaci bi trebali biti postavljeni tek nakon temeljito provjerenog kvalitativnog razumijevanja novog modela. Numerički zadaci i složenija primjena modela se obično ne obrađuje na istom nastavnom satu kada se konstruira novi model. To je zato što potrebno postupno ići prema složenijim problemima. Rješavanje numeričkih zadataka najbolje je izvoditi metodom kooperativnog rješavanja u manjim grupama. Umjesto rješavanja numeričkih zadataka, u završnom dijelu sata, prikladnije je koristiti metodu konceptualnih pitanja s karticama. Također se u završnom dijelu sata, nastavnik može vratiti na uvodni problem koji bi učenici na kraju sata trebali samostalno objasniti koristeći novi konstruirani model ili se može izvesti aplikacijski pokus. Aplikacijski pokus se izvodi kako bi učenici dobili priliku pomoću novog znanja protumačiti neki novi eksperimentalni problem vezan uz određeni fizikalni fenomen. Kraj sata je nastavniku jako bitan kako bi provjerio stupanj razumijevanja kod učenika i njihovu sposobnost snalaženja u primjeni naučenog znanja na novi model kako bi mogao intervenirati kroz raspravu. Tako im dodatno može razjasniti ono što je eventualno ostalo nejasno nekim učenicima te ih korigirati. Kroz provjeru stupnja razumijevanja, nastavnik treba dati svakom učeniku povratnu informaciju o njegovom doprinosu na satu i stupnju razumijevanja. [51] [53] [49]

7.2 Nastavna priprema: Nuklearna fuzija i fisija

Nastavna priprema za nastavnu jedinicu „Nuklearna fuzija i fisija“ predviđena je za dva školska sata u četvrtom razredu opće gimnazije.

Vrsta nastave je interaktivno istraživački usmjerena nastava. Oblik rada na nastavnim satima je zamišljen uglavnom frontalno, uz mogućnost prilagodbe nastavne pripreme za rad u skupinama, u paru ili individualno, ukoliko je dostupan dovoljan broj računala. Tijekom nastavnog sata svaki bi učenik trebao aktivno sudjelovati na satu kroz postavljanje predviđanja, opisa opažene pojave i donošenje zaključka na temelju prethodno utvrđenih činjenica. Učenički individualni rad bi se također poticao njihovim samostalnim zapisivanjem u bilježnicu. Nastavna pomagala i sredstva, koja su potrebna za izvođenja nastavnog sata su spužvaste lopte, posuda za vodu, voda, plitke limene posude, duguljasti baloni, škare, domino kockice, udžbenik, ploča, kreda, računalo i projektor. Prilikom izrade nastavna pripreme korištena je literatura [54] - [67]. Simulacije i videa koje se koristiti na nastavnom satu bit će navedeni u daljnjem tekstu. Nastavne metode koje se koriste na nastavnim satovima su demonstracija pokusa, učeničko izvođenje pokusa, metoda razgovora-usmjerena rasprava, kooperativno rješavanje zadataka u skupinama, metoda pisanja/crtanja. Korelacije s drugim predmetima su s matematikom, engleskim jezikom i kemijom. Na kraju nastavne pripreme je naveden prijedlog za još jedan nastavni sat gdje bi učenici za domaću zadaću trebali istražiti funkcioniranje nuklearne elektrane, pozitivne i negativne strane korištenja nuklearne energije te utjecaj na ljude, životinje i biljke. Na tom nastavnom satu bi učenici svoja istraživanja još povezali s poviješću, geografijom i biologijom.

Obrazovni ishodi koje nastavnik očekuje da će učenici postići po završetku, odnosno znati/moći napraviti i sposobnosti koje učenici razvijaju su navedeni u daljnjem tekstu.

Učenik će znati/ moći:

- opisati pojavu nuklearne fuzije
- opisati pojavu nuklearne fisije
- objasniti pojam termalnih neutrona
- objasniti odakle se oslobađa energija prilikom procesa fuzije i fisije

- opisati jaku nuklearnu silu (doseg, interakciju)
- povezati graf energije vezanja po nukleonu u ovisnosti o masenom broju s fuzijom i fisijom

Učenik će na satu razvijati sposobnosti:

- promatranja i logičkog zaključivanja
- prosuđivanja i oblikovanja apstraktnih pojmova
- uočavanja uzročno-posljedičnih veza

Odgojni ishodi (koje će vrijednosti učenici usvajati tijekom sata) su:

- razvijati sistematičnost u radu i razmišljanju
- uvažavati tuđe mišljenje i zaključivanje te razvijati konstruktivno usmeno izražavanje vlastitog mišljenja
- uočiti važnosti fizike u svakodnevnom životu
- poticati intelektualnu radoznalost i radost otkrivanja te razvijati interes za istraživanje
- razvijati osjećaj odgovornosti
- razvijati znanstveni jezik i pristup pri rješavanju problema

Uvodni dio: otvaranje problema, prikupljanje ideja, upoznavanje pojave

UVODNI PROBLEM: Odakle potječe energija koju dobivamo sa Sunca, iz nuklearnih elektrana i nuklearnih bombi? Postoji li razlika u dobivanju energije u ova tri slučaja?

Učenici iznose svoje ideje, međusobno raspravljaju o uvodnom problemu, a nastavnik ih sluša i pita ih za njihova predviđanja kako bi stekao uvid u njihov način razmišljanja.

Kao zanimljivu činjenicu nastavnik spominje kako se svake sekunde u Suncu oslobodi $3,8 \cdot 10^{26}$ J energije te kako na Zemlju dolazi otprilike 10^{17} J energije svake sekunde. Za usporedbu s nuklearnom elektranom Krško, za toliku energiju svake sekunde bilo bi potrebno 100 milijuna elektrana Krško.

U kakvom stanju je materija u Suncu? Jesu li jezgre slobodne ili su vezane s elektronima u atomu? Što mislite kako se gibaju protoni u Suncu?

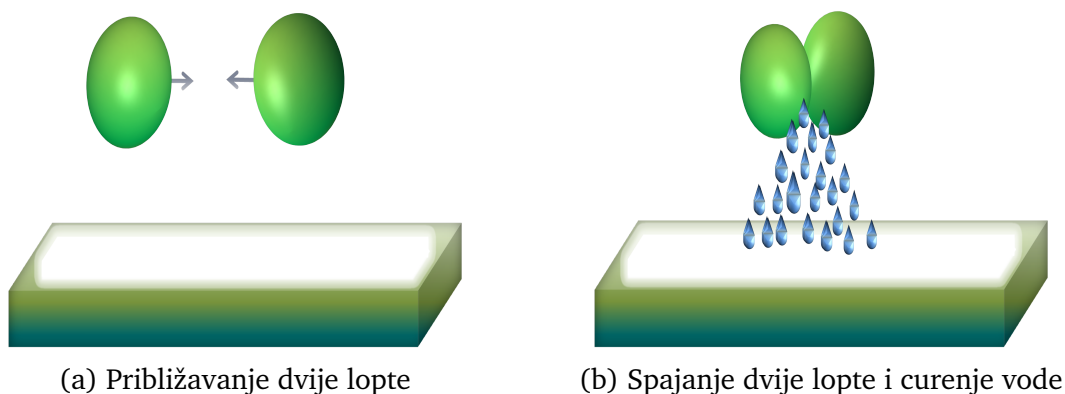
Učenici iznose svoje ideje. Međusobna rasprava učenika bi trebala voditi prema tome da elektroni i jezgre nisu vezane u atome, već da su slobodne čestice, ali kako je globalno gledajući Sunce električki neutralno tijelo. Pomoću dodatnih pitanja nastavnik usmjerava učenička razmišljanja, ukoliko je to potrebno.

Što se dogodi kada se ti protoni približe?

Učenici iznose svoja predviđanja, nastavnik ih sasluša te pomoću prvog pokusa pokušava im približiti što se događa u unutrašnjosti Sunca i zvijezda.

Prvi pokus

Nastavnik svakom učeniku podijeli po dvije spužvaste lopte i limenu kadu. Unutar spužvi se nalazi magnet takve jačine da kada se lopte dovoljno približe, tj. spoje onda one ostanu spojene. Magnet ne smije biti niti prejak niti preslab. Prije nastavnog sata nastavnik spužvaste lopte natopi vodom. Na slici 7.1 se nalazi skica pokusa. Učenici samostalno izvode svoje pretpostavke ponašanja, odnosno gibanja protona.



Slika 7.1: Skica prvog pokusa

Što mislite da će se dogoditi kada jako sudarimo ove dvije lopte?

Učenici iznose svoja predviđanja.

Sudarite lopte.

Učenici sudaraju dvije lopte, iscure voda, a lopte ostanu spojene.

Što mislite da predstavljaju ove dvije lopte?

Dvije lopte predstavljaju dvije jezgre. Vjerojatno će učenicima trebati postaviti još neka dodatna pitanja. Na primjer od čega su građena tijela i pitanja slična tome.

Što mislite da ovo curenje vode predstavlja?

Učenici bi trebali povezati curenje vode s energijom koja se oslobađa prilikom sudara lakih atoma.

Što mislite da predstavlja dvije spojene lopte?

Dvije spojene lopte predstavljaju novu jezgru.

Kakva je ta nova jezgra?

Nova jezgra je manje mase nego same dvije jezgre. Na početku su dvije jezgre bile natopljene vodom, a nakon sudara voda je iscurila i onda spojene lopte imaju manju masu.

Skicirajte i zapišite u bilježnicu.

Nastavnik obilazi učenike dok pišu u bilježnicu. Nastavnik prozove dvoje-troje učenika neka pročitaju što su zapisali. Nakon što su učenici izveli prvi pokus, nastavnik im pomoću videa [68] od 1:08 minute do 1:27 minute prikaže simulaciju fuzije. Prije prikazivanja videa nastavnik upozori učenike neka pažljivo prate video. Nakon prikazanog videa, nastavnik nastavlja s postavljanjem pitanja i razrednom diskusijom.

Što ste uočili?

Dva atoma izotopa vodika se velikom brzinom sudare i prilikom sudara nastane jezgra helija i jedan neutron s određenim kinetičkim energijama. Po potrebi nastavnik prikaže video više puta dok se učenici ne usuglase oko opažanja.

Nastavnik uvodi pojam nuklearne fuzije i piše prvi dio naslova na ploču.

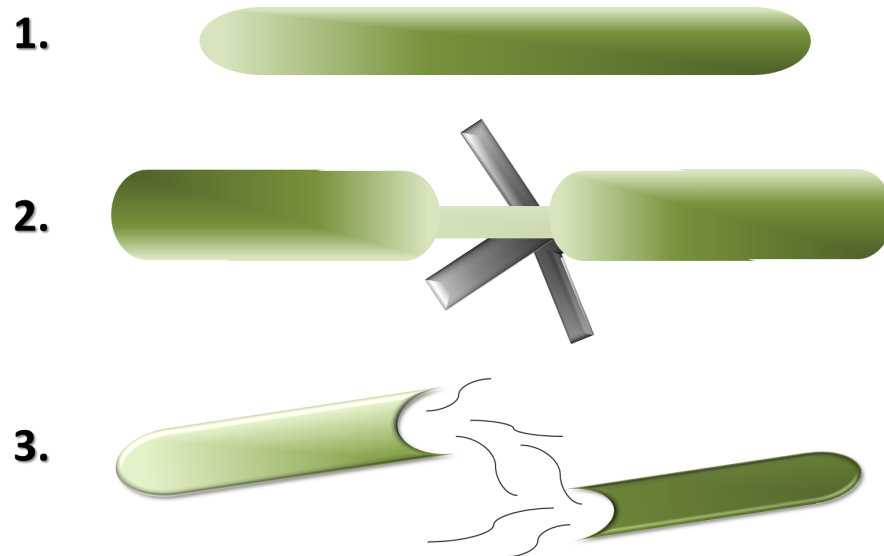
Drugi pokus

Nastavnik podijeli učenike u parove te im da duguljasti napuhani balon i škare. Zatim im kaže da jedan učenik podijeli balon na dva dijela, dok drugi prereže škarama u udubini. Koraci su shematski prikazani na slici 7.2. Nastavnik naglasi učenicima da trenutno ne skupljaju komade balona s poda. Kasnije će ih skupiti i to će biti uvod u radioaktivni otpad.

Što ste opazili?

Učenici zapisuju svoja zapažanja i nekoliko učenika iznosi svoja zapažanja. Kada je početni balon razdvojen na dva dijela i prerezan škarama čuo se zvuk te je pojedini dio balona odletio svak na svoju stranu.

Što mislite da je predstavljao „početni“ balon, zrak koji je izašao prilikom rezanja „početnog“ balona i dva dijela balona?



Slika 7.2: Shematski prikaz drugog pokusa u tri koraka

Nastavnik s učenicima kroz dijalog dolazi do toga da „početni“ balon predstavlja tešku jezgru, dva manja dijela lakše jezgre, a zrak koji je izašao iz balona oslobođenu energiju. Ovdje bi učenici već trebali moći povezati makroskopske stvari s jezgrom atoma. Ukoliko to ne mogu povezati, nastavnik ih pomoću dodatnih pitanja navodi na razmišljanje i zaključivanje.

Skicirajte i zapišite zaključke u bilježnicu.

Nastavnik obilazi učenike dok pišu u bilježnicu. Nastavnik prozove dvoje-troje učenika neka pročitaju što su zapisali. Nastavnik prikaže ilustrativni video fisije [69] od 0:14 minute do 0:25 minute. Tri isječka iz tog videa su prikazane na slici 7.3. Prije prikazivanja videa nastavnik upozori učenike neka pažljivo prate video. Nakon prikazanog videa, nastavnik nastavlja s postavljanjem pitanja i razrednom diskusijom.

Što ste uočili?

Učenici iznose svoja opažanja. Na početku postoji teška jezgra, u ovom primjeru uran $^{235}_{92}\text{U}$, i na tu jezgru se usmjeri ubrzani neutron. Događa se reakcija jezgre urana i neutrona i kao produkt nastaju dvije lakše jezgre, u ovom slučaju $^{91}_{36}\text{Kr}$ i $^{142}_{56}\text{Ba}$ i tri slobodna neutrona, uz određenu oslobođenu energiju. Po potrebi nastavnik prikaže video više puta dok se učenici ne usuglase oko opažanja.

Nastavnik uvodi pojam nuklearne fisije i dovršava naslov.

Kako je moguće da iz jednog kilograma urana prilikom fisije nastane isto električne energije kao i iz 19 000 kilograma ugljena ili iz jednog grama deuterija i tricija prilikom fuzije nastane jednaka količina električne energije kao i iz

što u simulaciji mogu mijenjati, a što držati konstantnim. Na simulaciji je moguće mijenjati temperaturu na kojoj se nalaze jezgre.

Što očekujete da će se dogoditi u prvom slučaju? Zapišite svoja predviđanja.

Učenici iznose svoja očekivanja i zapisuju.

Nastavnik pokreće simulaciju kada je temperatura manja od 15 000 000 °C. Nastavnik učenicima sugerira da pažljivo prate simulaciju, ponovi je nekoliko puta, odnosno koliko je potrebno.

Što ste opazili? Skicirajte.

Učenici zapisuju zapažanja i skiciraju, a zatim iznose opažanja.

Zašto se jezgre nisu spojile?

Učenici iznose što misle zašto se jezgre nisu spojile. Istoimeni naboji se odbijaju.

Što očekujete da će se dogoditi u drugom slučaju?

Učenici iznose svoja očekivanja i zapisuju.

Nastavnik pokreće simulaciju kada je temperatura veća od 15 000 000 °C. Nastavnik učenicima sugerira da pažljivo prate simulaciju, ponovi je nekoliko puta, odnosno koliko je potrebno.

Što ste opazili? Skicirajte.

Učenici zapisuju zapažanja i skiciraju, a zatim iznose opažanja.

Zašto su se jezgre spojile u drugom slučaju? Što se promijenilo u odnosu na prethodni slučaj?

Učenici iznose svoje mišljenje. Učenici bi trebali povezati da povišenjem temperature jezgre se spajaju zbog toga jer se javlja dodatna sila. Pri nižim temperaturama sila između jezgara je odbojna, a pri višim temperaturama jezgre se spoje.

Kako je moguće da se naboji koji se inače odbijaju sada spoje u novu jezgru?

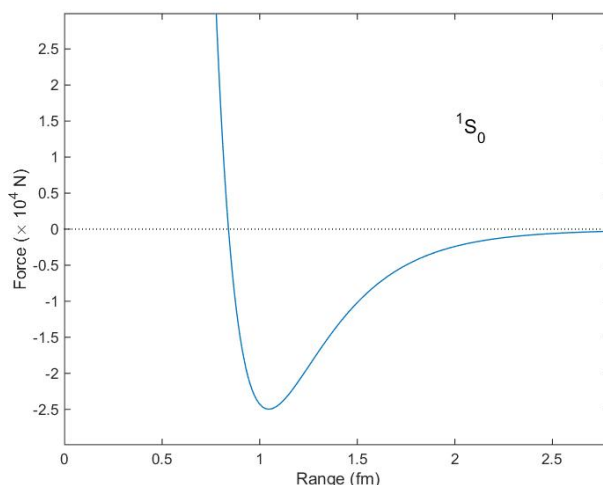
Učenici iznose svoje ideje, slušajući učeničke ideje i njihovu međusobnu diskusiju nastavnik ih usmjerava (ako sami ne krenu u tom pravcu) na to da možda postoji još neka sila koja se javlja, odnosno koja omogućuje odvijanje ovog procesa.

Kako izgleda graf ovisnosti električne sile o udaljenosti? Skicirajte slučajeve kada je električna sila privlačna i odbojna. Skicirajte u svoje bilježnice graf.

Nastavnik obilazi učenike dok oni skiciraju graf i prozove jednog učenika koji onda skicira graf na ploči.

Što možete iščitati iz ovog grafa?

Učenici komentiraju graf uz argumentaciju. Električna sila je obrnuto proporcionalna-



Slika 7.4: Ovisnost jake nuklearne sile $F/10^4$ N (eng. *Force*) o udaljenosti između nukleona r/fm (eng. *Range*) [71]

Ina s kvadratom udaljenosti, uz konstantan naboj čestica.

Što mislite kako ta nova sila ovisi o udaljenosti? Skicirajte svoja predviđanja. Učenici skiciraju svoja predviđanja, a nastavnik obilazi učenike i prozove nekoliko učenika da skiciraju svoje grafove na ploču. Svaki učenik objašnjava zašto je predložio određeni oblik grafa. Nastavnik tijekom učeničkog obrazloženja treba obratiti pažnju na učeničko razmišljanje, ali i potaknuti ga s dodatnim pitanjima ako samostalno ne kaže redove veličina na osima grafa.

Na koji način možete povezati, odnosno usporediti ova dva grafa? Slažu li se vaši zaključci na temelju simulacije s vašim grafovima?

Učenici raspravljaju o grafovima.

Koji vaš graf ovisnosti nove sile o udaljenosti bi mogao najbolje odgovarati? Učenici diskutiraju o najboljem opisu nove sile. Nastavnik diskusiju može potaknuti s dodatnim pitanjima. Dodatna pitanja: Osjećamo li tu silu u svakodnevnom (makroskopskom) životu? Što mislite onda koliki je domet nove sile? Ako uspoređujemo električnu silu s novom silom gdje bi nova sila trebala prevladavati?

Nastavnik uvodi pojam jake nuklearne sile i prikazuje graf ovisnosti sile o udaljenosti. Graf se nalazi na slici 7.4.

Što uočavate na grafu?

Učenici proučavaju graf i iznose zaključke o usporedbi njihovih predviđanja grafa i prikazanog grafa ovisnosti jake nuklearne sile o udaljenosti.

Kako jaka nuklearna sila ovisi o udaljenosti između nukleona?

Učenici detaljnije proučavaju graf i donose zaključke. Na udaljenosti manjoj od $0,5 \cdot 10^{-15}$ m sila je odbojna, onda postaje privlačna, na $1 \cdot 10^{-15}$ m je najvećeg iznosa, zatim se privlačna sila smanjuje i na $3 \cdot 10^{-15}$ m postaje nula.

Kako doseg jake nuklearne sile možete povezati s dimenzijama jezgre i atoma?

Učenici iznose svoje zaključke. Radijus jezgre je $1 \cdot 10^{-15} - 10 \cdot 10^{-15}$ m, dok je radijus atoma 10^{-10} m. Pomoću dodatnih pitanja nastavnik usmjerava učenička razmišljanja, ako je potrebno.

Zapišite svoje zaključke o jakoj nuklearnoj sili.

Nastavnik obilazi učenike dok zapisuju zaključke u bilježnicu, prozove nekoliko učenika da pročitaju zaključke.

Kako se mijenja iznos jake nuklearne sile kada se javlja između dva protona, dva neutrona ili između protona i neutrona (kada su na istoj udaljenosti nukleoni)?

Učenici iznose svoja predviđanja i pokušavaju ih argumentirati. Iznos jake nuklearne sile se ne mijenja.

Zadan je jedan proces fuzije i učenici trebaju odrediti masu prije reakcije i nakon reakcije.

Učenici ovaj zadatak rješavaju kooperativno u manjim skupinama.

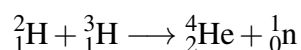
Zadatak 1.

Prilikom fuzijske reakcije jezgre deuterija i jezgre tricija, nastaje jezgra helija ${}^4\text{He}$ i neutron. Masa deuterija je 2,014102 u, masa tricija je 3,016030 u, masa helija je 4,002604 u, masa neutrona 1,008665 u. Izračunaj masu prije reakcije i poslije reakcije.

- SKICIRAJ I OZNAČI

Skica zadatka se nalazi na slici 7.5.

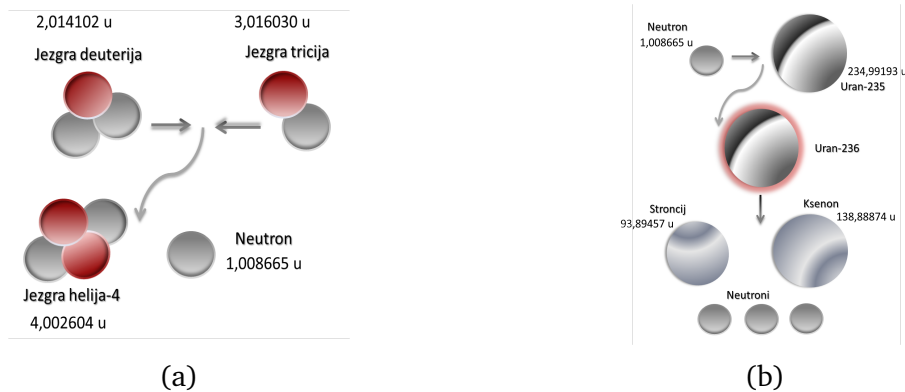
- MODELIRAJ I PRIKAŽI



- MATEMATIČKI OPIŠI

$$m_{\text{prije}} = m({}^2_1\text{H}) + m({}^3_1\text{H})$$

$$m_{\text{poslije}} = m({}^4_2\text{He}) + m({}^1_0\text{n})$$



Slika 7.5: Skice zadataka (a) Skica prvog zadatka i označavanje varijabli (b) Skica drugog zadatka i označavanje varijabli

• RIJEŠI I PROMISLI

$$m_{\text{prije}} = 2,014102\text{u} + 3,016030\text{u}$$

$$m_{\text{prije}} = 5,030132\text{u}$$

$$m_{\text{poslije}} = 4,002604\text{u} + 1,008665\text{u}$$

$$m_{\text{poslije}} = 5,011269\text{u}$$

Postoji razlika u ukupnoj masi prije sudara i ukupnoj masi poslije sudara. Mjerna jedinica je zadovoljavajuća. $1\text{u} = \frac{1}{12}M_{12\text{C}} = 931,494 \frac{\text{MeV}}{c^2} = 1,66054 \cdot 10^{-27}\text{kg}$

Što uočavate?

Postoji razlika u masama s lijeve i desne strane reakcije.

$$5,030132\text{u} \neq 5,011269\text{u}$$

$$\Delta m = 0,018863\text{u}$$

Kako dobivene rezultate možete povezati s energijom?

Učenici se prisjećaju izraza za energiju vezanja.

$$E = \Delta mc^2$$

$$E = 0,018863\text{u}c^2 = 0,018863 \cdot 931,5022 \text{ MeV} = 17,570926 \text{ MeV}$$

Druga simulacija [72]

Koji uvjeti moraju biti zadovoljeni kako bi se dogodila fuzija u Suncu?

Učenici iznose svoje ideje.

Nastavnik prikaže simulaciju i učenici proučavaju simulaciju. Simulacija ilustrativno prikazuje unutrašnjost Sunca. Tirkizni kružići prikazuju protone, ljubičasti prikazuju neutrone i žuti prikazuju pozitrone, odnosno antielektone. Pomoću simulacije može se mijenjati temperatura, zatočenje (zarobljavanje čestica) i gustoća čestica. U ovoj simulaciji se mogu mijenjati tri parametra pa učenici prilikom korištenja simulacije trebaju primjenjivati kontrolu varijabli. Ukoliko ima dovoljan broj mobilnih uređaja, ovu simulaciju učenici proučavaju u paru, a ako nema dovoljan broj mobilnih uređaja, jedan ili dva učenika mijenjaju određene postavke (parametre) na računalu na prijedlog drugih učenika u razredu.

Učenici bi u ovom dijelu već samostalno mogli postaviti uvjete kako će proučavati simulaciju, a nastavnik ih nadzire i korigira ukoliko je potrebno. Na primjer: Učenici bi trebali promatrati što se događa unutar Sunca kada je ograničenje i gustoća čestica konstantna, a mijenjaju temperaturu, a zatim i druge moguće kombinacije parametara.

Učenici promatraju što se događa, iznose opažanja i zaključke za svaku pojedinu kombinaciju. Svoje opažanja i zaključke zapisuju u bilježnicu, nastavnik ih obilazi, a neke učenike prozove da pročitaju što su zapisali.

Tijekom istraživanja pomoću simulacije nastavnik postavlja sljedeća pitanja: **Što mislite da će se dogoditi? Što ste opazili? Što ste zaključili?**

Nakon završetka proučavanja simulacije, potrebno se vratiti na istraživačko pitanje i odgovoriti na njega. Učenici zapisuju svoje odgovore na istraživačko pitanje i neki učenici čitaju odgovore na njega. Fuzija je proces spajanja manjih jezgri u jednu veću jezgru. Masa jezgara prije sudara je veća nego masa produkata fuzije. Energija pri procesu fuzije se dobiva zbog razlike ukupne mase prije i poslije fuzije.

ISTRAŽIVAČKO PITANJE: Kako dobivamo energiju pri procesu fisije?

Učenici iznose ideje za istraživanje.

Hoće li se fisija dogoditi i sa sporim i s brzim neutronima?

Učenici iznose svoje pretpostavke. Nakon učeničkih odgovora nastavnik prikazuje video [73] od 3:00 do 3:16 minute. Prije prikazivanja videa nastavnik upozori učenike

neka pozorno prate video. Nakon prikazanog videa, nastavnik nastavlja s postavljanjem pitanja i razrednom diskusijom.

Što ste uočili u videu?

Učenici iznose svoja opažanja. Prvo se jezgra gađa sporim neutronima i ona se razdvaja na dvije jezgre. Zatim se jezgra gađa brzim neutronom, jezgra se izobličuje dok neutron prolazi kroz nju, ali neutron prolazi kroz jezgru i jezgra ostaje u početnom stanju. Po potrebi nastavnik prikaže video više puta dok se učenici ne usuglase oko opažanja.

Zapišite svoja opažanja i zaključke.

Nastavnik obilazi učenike i prozove nekoliko učenika da pročitaju opažanja i zaključak.

Zašto uopće koristimo neutrone?

Učenici iznose svoja razmišljanja. Neutroni se koriste zbog toga što nema odbijanja s jezgrom, neutroni su električki neutralni, a jezgra je električki pozitivna. Pomoću dodatnih pitanja nastavnik usmjerava učenička razmišljanja. Dodatno pitanje može biti: Kako je električki nabijena jezgra, a kako neutron?

Treća simulacija [74]

Pomoću Phetove simulacije učenici proučavaju fisiju. Frontalno izvođenje i poučavanje simulacije. Isječci iz simulacije su prikazani na slici 7.6. Učenici proučavaju simulaciju, što sve mogu mijenjati i na koje sve načine mogu istraživati.

Što mislite da će se dogoditi kada iz pištolja izađe neutron?

Učenici iznose svoja predviđanja.

Što mislite da će se dogoditi na grafu ovisnosti energije o udaljenosti između nastalih jezgara?

Učenici iznose svoja predviđanja.

Zapišite svoja predviđanja.

Učenici zapisuju svoja predviđanja. Nastavnik pokreće simulaciju. Nastavnik učenicima sugerira da pažljivo prate simulaciju i ponovni je nekoliko puta, odnosno koliko je potrebno dok učenici ne usuglase opažanja.

Što ste opazili? Slaže li se vaše predviđanje s opažanjem?

Učenici iznose opažanja. Nastavnik pozorno sluša opažanja učenika i uključuje se ako je potrebno. Nastavnik treba obratiti pažnju na sistematičnost opažanja i usmjeravati

ih ukoliko je potrebno.

Neutron, koji je ispucan iz pištolja približava se jezgri urana ^{235}U što je prikazano na slici 7.6a. Potencijalna energija urana ^{235}U se nalazi u lokalnom minimumu potencijalne energije, između dva maksimuma, odnosno u potencijalnoj jami. Kada jezgra urana ^{235}U apsorbira neutron, jezgra urana ^{235}U prelazi u jezgru urana ^{236}U . Jezgra urana ^{236}U se nalazi u pobuđenom stanju i to je prikazano na slici 7.6b. Energija jezgre ^{236}U je sada veća nego energija urana ^{235}U i titra između dva maksimuma potencijalne energije, prikazano je na slici 7.6c. U jednom trenutku pobuđena jezgra se raspada na dva fragmenta i neutrone.

Zapišite svoja opažanja.

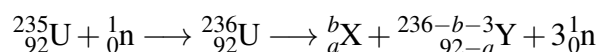
Učenici zapisuju opažanja, nastavnik ih obilazi, prozove dvoje-troje učenika.

Što možete zaključiti? Zapišite zaključke.

Učenici zapisuju zaključke. Fisija u ovom slučaju se događa kada jezgra urana ^{235}U apsorbira neutron i prelazi u pobuđeno stanje urana ^{236}U . Ubrzo se pobuđena jezgra raspada na dva fragmenta i tri neutrona. Nastavnik naglasi kako se pri određenoj fisiji može emitirati dva do tri neutrona ovisno o tome na koje elemente se raspada jezgra.

Skicirajte i samostalno pokušajte zapisati reakciju.

Učenici skiciraju opaženu simulaciju i zapisuju reakciju. Nastavnik ih obilazi.



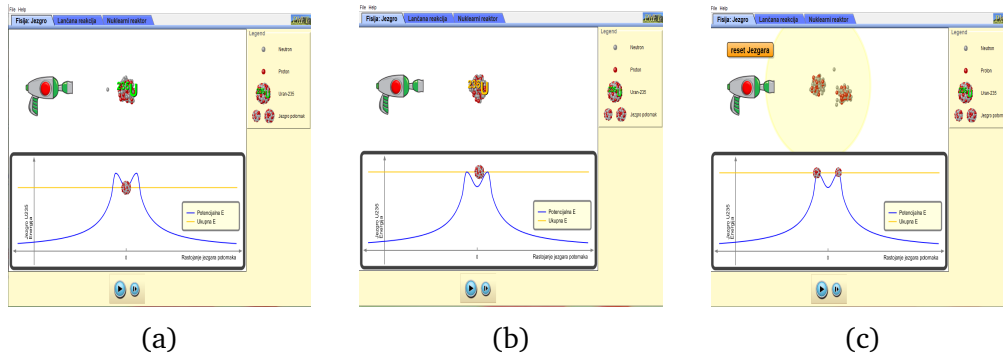
Nastavnik prozove nekoliko učenika da napišu svoje reakcije na ploču. Nastavnik ih pomoću dodatnih pitanja usmjerava prema točnijem zapisu, ukoliko su nešto pogriješili. U ovom dijelu nastavnik naglašava kako trebaju biti zadovoljeni zakoni očuvanja kao i kod ostalih reakcija koje su ranije radili, odnosno kod alfa, beta i gama raspada.

Što znači da su neutroni spori?

Spori ili termalni neutroni su neutroni koji se termički gibaju odnosno energija gibanja pri sobnoj temperaturi $T = 300\text{ K}$, odnosno imaju energiju $0,025 - 0,04\text{ eV}$.

Zadan je jedan proces fisije i učenici trebaju odrediti masu prije i nakon reakcije.

Učenici ovaj zadatak rješavaju kooperativno u manjim skupinama.



Slika 7.6: Isječci iz treće simulacije [74] (a) Na jezgru urana ^{235}U se pošalje neutron (b) Jezgra urana ^{236}U prelazi u pobuđeno stanje (c) Jezgra pobuđenog urana ^{236}U se raspada na dva fragmenta i neutrone koji se udaljavaju

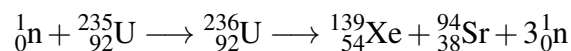
Zadatak 2.

Prilikom fisije neutrona i jezgre urana ^{235}U , nastale su jezgre ksenona i stroncija te tri neutrona. Masa neutrona je $1,008665\text{u}$, masa urana ^{235}U je $234,99193\text{u}$, masa ksenona je $138,88874\text{u}$, masa stroncija $93,89457\text{u}$. Izračunaj masu prije reakcije i poslije reakcije.

- SKICIRAJ I OZNAČI

Skica zadatka se nalazi na slici 7.5.

- MODELIRAJ I PRIKAŽI



- MATEMATIČKI OPIŠI

$$m_{\text{prije}} = m({}_0^1\text{n}) + m({}_{92}^{236}\text{U})$$

$$m_{\text{poslije}} = m({}_{54}^{139}\text{Xe}) + m({}_{38}^{94}\text{Sr}) + 3 \cdot m({}_0^1\text{n})$$

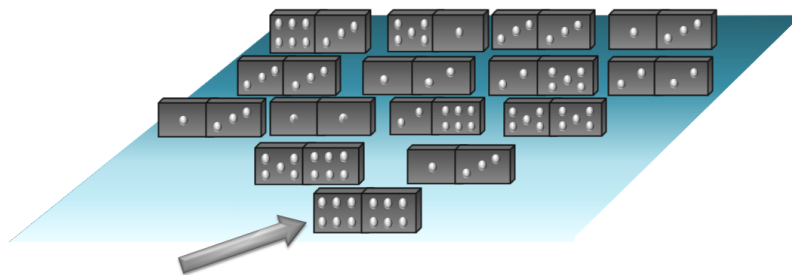
- RIJEŠI I PROMISLI

$$m_{\text{prije}} = 1,008665\text{u} + 234,99193\text{u}$$

$$m_{\text{prije}} = 236,000595\text{u}$$

$$m_{\text{poslije}} = 138,88874\text{u} + 93,89457\text{u} + 3 \cdot 1,008665\text{u}$$

$$m_{\text{poslije}} = 235,809305\text{u}$$



Slika 7.7: Shematski prikaz lančane reakcije pomoću domino kockica

Postoji razlika u ukupnoj masi prije sudara i ukupnoj masi poslije sudara. Mjerna jedinica je zadovoljavajuća.

Što uočavate?

Postoji razlika u masama s lijeve i desne strane reakcije.

$$236,000595u \neq 235,809305u$$

$$\Delta m = 0,19129u$$

Kako dobivene rezultate možete povezati s energijom?

Učenici se prisjećaju izraza za energiju vezanja.

$$E = \Delta mc^2$$

$$E = 0,19129uc^2 = 0,19129 \cdot 931,5022 \text{ MeV} = 178,1870558 \text{ MeV}$$

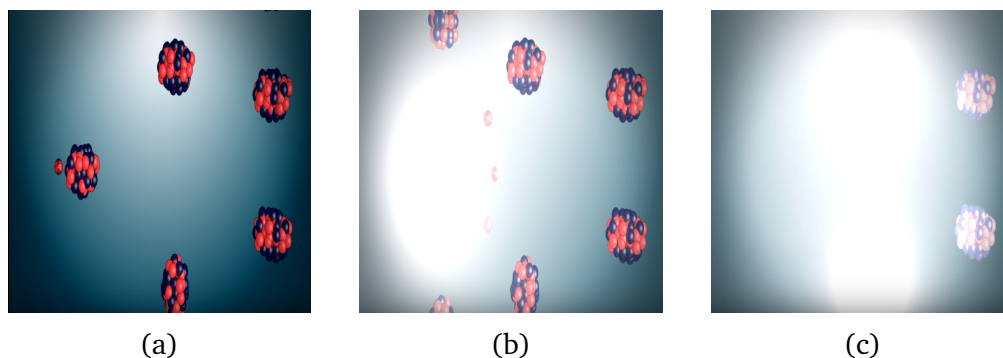
Treći pokus

Nastavnik prikazuje model lančane reakcije preko domino kockica. Shematski prikaz modela je na slici 7.7. Domino kockice se uspravno polože na ravnu podlogu tako da čine trokut kada se pogleda odozgor. Treba paziti na to kada jedna domino kockica padne na drugu da se nalaze na takvoj udaljenosti da padajuća domino kockica može srušiti domino kockicu koja se nalazi iza nje. Kada je model lančane reakcije pravilno posložen, „pokretanje“ reakcije se napravi tako da se udari prva domino kockica. Prva domino kockica je ona koja se nalazi u vrhu trokuta.

Što mislite da bi ove domino kockice mogle predstavljati? Što predstavlja početni udar u prvu domino kockicu?

Učenici iznose svoje ideje.

Domino kockice predstavljaju teške jezgre, na primjer jezgre urana ^{235}U . Početni



Slika 7.8: Isječci iz videa [75] (a) Neutron se približava jednoj jezgri urana ^{235}U (b) Dogodila se fisija (c) Nastali neutroni izazivaju nove fisije s drugim jezgrama urana ^{235}U

udar u prvu dominu kockicu je početni „impuls“, odnosno prvi neutron koji udari u tešku jezgru. Pomoću dodatnih pitanja nastavnik usmjerava učenička razmišljanja, ukoliko je potrebno. Dodatna pitanja mogu biti: Koji proces trenutno promatramo? Koji elementi su sudjelovali u procesu fisije?

Kako biste opisali ovaj proces pomoću jedne riječi?

Učenici iznose prijedloge. Ako učenici ne dođu samostalno do pojma lančane reakcije, nastavnik uvodi pojam lančane reakcije.

Nastavnik prikazuje video [75] od 2:15 minute do 2:44 minute i video [76] od 3:03 minute do 3:18 minute. Isječci iz videa su prikazani na slici 7.8. Prije prikazivanja videa nastavnik upozori učenike neka pažljivo prate video. Nakon prikazanog videa, nastavnik nastavlja s postavljanjem pitanja i razrednom diskusijom.

Što ste uočili u videima?

Učenici iznose svoja opažanja. Prva jezgra urana se pogodi neutronom i onda se ta jezgra raspadne na dva fragmenta i tri neutrona. Zatim ti neutroni uzrokuju nove fisijske reakcije. Jedan „novi“ neutron pogodi drugu jezgru urana i dogodi se fisija. Ovaj proces se na takav način nastavlja. Ne mora nužno svaki neutron izazvati novu fisijsku reakciju. Nastavnik naglasi kako se uran ne mora svaki put raspasti na dva jednaka fragmenta uz emitiranje neutrona. Po potrebi nastavnik prikaže videe više puta dok se učenici ne usuglase oko opažanja.

Što zaključujete, što je lančana reakcija?

Učenici iznose svoje zaključke. Lančana reakcija je samoodrživ proces sve dok postoje projektili (neutroni) iz prethodne nuklearne reakcije kako bi izazvali novu nuklearnu reakciju.

Nakon što ste pogledali video simulacije lančane reakcije i vidjeli model lančane reakcije pomoću domino kockica, uvidate li neku razliku, odnosno manjkavosti modela?

Učenici iznose svoja razmišljanja. Nastavnik prati tijek diskusije učenika i ukoliko je potrebno uključi se i moderira smjer diskusije. Učenici bi tijekom diskusije trebali uočiti da je model lančane reakcije pomoću domino kockica prihvatljiv u prvoj aproksimaciji, ali da ga je potrebno korigirati. Prvo što se uočava u modelu je to da nema fizičkog raspada domino kockica na fragmente i neutrone, nego je taj dio procesa predstavljen padom domino kockice. Doticanje prstom domino kockice je predstavljalo početni neutron, dok u daljnjem rušenju domino kockica više nema doticanja prstom. Pad domino kockice također predstavlja i neutrone koji izazivaju iduću fisiju. Do konfuzije može doći jer domino kockica predstavlja više stvari, odnosno dok stoji uspravno na stolu predstavlja tešku jezgru, a pad predstavlja raspad teške jezgre i indukciju iduće fisije. Novu fisiju uzrokuju nastali neutroni, a ne teške jezgre kao što bi se moglo pomisliti površnim shvaćanje ovoga modela. Također u modelu nije prikazano to da svaki neutron ne mora izazvati fisiju. Ovom analizom modela i simulacije, učenici stječu uvid u način konstruiranja modela. Model je pojednostavljeni prikaz fizikalne pojave koji zanemaruje određene fizikalne efekte. Kada se konstruira pojedini model treba se dobro izvagati koji fizikalni efekti se mogu zanemariti, a koji fizikalni efekti nužno trebaju biti prisutni u modelu.

Možete li sada skupiti ostatke balona s poda? Što bi ti ostaci balona mogli predstavljati?

Učenici, uz pomoć nastavnika, ostatke balona povezuju s radioaktivnim otpadom. Nastavnik zadaje jednom učeniku za seminar da istraži o radioaktivnom otpadu u nuklearnim elektranama. Prilikom spominjanja radioaktivnog otpada učenici će vjerojatno prvo spomenuti radioaktivni otpad nuklearnih elektrana. Nastavnik bi ih trebao upozoriti na to, da nuklearne elektrane proizvode vrlo malo radioaktivnog otpada s obzirom koliko se dobije električne energije u elektrani. Također, radioaktivni otpad proizveden u nuklearnoj elektrani se skladišti u vrlo kontroliranim uvjetima. Određeni dio radioaktivnog otpada će se u budućnosti možda moći ponovno iskoristiti kada se steknu tehnološki uvjeti i to je jedan od razloga zašto je bitno pravilno skladištiti radioaktivni otpad.

Zašto je važno pravilno zbrinuti radioaktivni otpad?

Radioaktivni otpad je materijal koji emitira zračenje ili je njime kontaminiran te se ne može preraditi za ponovnu uporabu ili ga nije isplativo preraditi. Izravni doticaj čovjeka i radioaktivnog otpada u većini slučajeva završava kobno.

**Prošli sat smo spominjali energiju vezanja po nukleonu u ovisnosti o mase-
nom broju, odnosno broju nukleona u jezgri. Što smo uočili na tom grafu? Kako
se mijenja energija vezanja po nukleonu? Tko će graf skicirati na ploču?**

Učenici se prisjećaju što su zapamtili s prošlog sata. Nastavnik prozove jednog učenika da na ploči skicira graf. Graf se nalazi na slici 2.1. Nastavnik ih s dodatnim pitanjima potiče da se prisjete zaključaka s prošlog sata. Energija vezanja najveća je za željezo i iznosi 8,5 MeV po nukleonu, dok je za uran 7,5 MeV po nukleonu.

$$E_B = [Zm_p + Nm_n - M(Z,A)] \cdot c^2$$

Kako biste fuziju i fisiju povezali s ovim grafom?

Učenici iznose svoje ideje. Lijeva strana koja ide prema željezu bi bile jezgre za koje je pogodna fuzija, dok na desnoj strani koja ide prema željezu, bi bila pogodnija fisija. Nastavnik učenike pomoću dodatnih pitanja potiče da dođu do zaključaka, ukoliko je to potrebno.

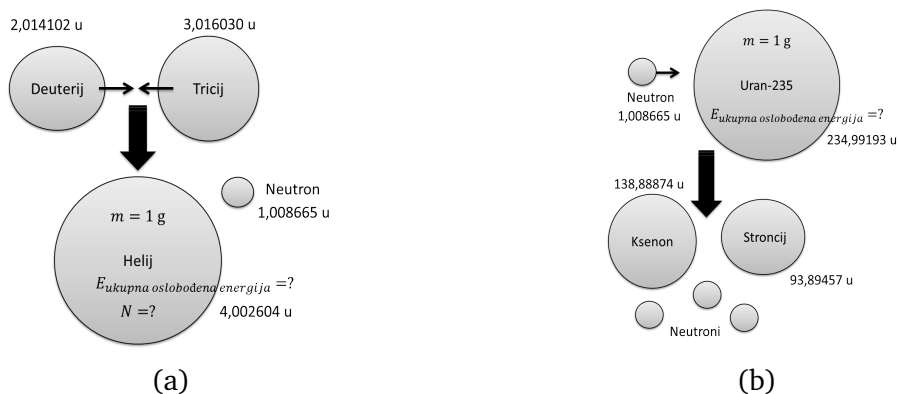
Na kraju središnjeg dijela nastavnog sata potrebno se vratiti na istraživačko pitanje i cjelovito odgovoriti. Učenici zapisuju svoje odgovore na istraživačko pitanje, a neki učenici čitaju odgovor koji su zapisali. Fisija je proces cijepanja teže jezgre na lakše jezgre pri čemu se oslobađa energija. Masa jezgre prije fisije je veća nego masa produkata fisije. Energija pri procesu fisije se dobiva zbog razlike ukupne mase prije i poslije fisije.

Završni dio : primjena modela - korištenje novostečenog znanja u novim situacijama, provjera ostvarenosti obrazovnih ishoda

U završnom dijelu sata, nastavnik podijeli učenike u manje skupine kako bi kooperativno rješavali zadatke.

Zadatak 3.

Fuzijom deuterija i tricija nastaje helij. Koliko se atoma helija nalazi u jednom gramu tvari? Koliko se energije oslobodi stvaranjem jednog grama helija? Masa



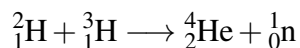
Slika 7.9: Skice zadataka (a) Skica trećeg zadatka i označavanje varijabli (b) Skica četvrtog zadatka i označavanje varijabli

deuterija je 2,014102 u, masa tricija je 3,016030 u, masa helija je 4,002604 u, masa neutrona 1,008665 u.

- SKICIRAJ I OZNAČI

Skica zadatka se nalazi na slici 7.9.

- MODELIRAJ I PRIKAŽI



- MATEMATIČKI OPIŠI

$$m_{\text{prije}} = m({}^2_1\text{H}) + m({}^3_1\text{H})$$

$$m_{\text{poslije}} = m({}^4_2\text{He}) + m({}^1_0\text{n})$$

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

$$\frac{N}{N_A} = \frac{m}{M} \longrightarrow N = \frac{m N_A}{M}$$

$$E_{\text{ukupna oslobođena energija}} = N \cdot \Delta E$$

- RIJEŠI I PROMISLI

$$m_{\text{prije}} = 5,030132\text{u}$$

$$m_{\text{poslije}} = 5,011269\text{u}$$

$$\Delta m = 0,018863\text{u}$$

$$\Delta E = 0,018863 \cdot 931,5022 \text{MeV}$$

$$\Delta E = 17,570926 \text{MeV}$$

$$N = \frac{1 \text{g} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \text{mol}^{-1}}{4 \text{g} \cdot \text{mol}^{-1}}$$

$$N = 1,5055 \cdot 10^{23}$$

$$E = 1,5055 \cdot 10^{23} \cdot 17,570926 \text{MeV}$$

$$E = 2,65 \cdot 10^{24} \text{MeV}$$

Red veličina broja čestica je zadovoljavajući, kao i oslobođene energije. Mjerna jedinica je zadovoljavajuća.

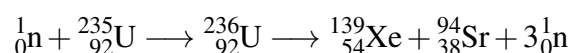
Zadatak 4.

Izračunaj koliko se energije oslobodi prilikom sljedeće fisije jednog grama urana ^{235}U ? Masa neutrona je 1,008665 u, masa urana ^{235}U je 234,99193 u, masa ksenona je 138,88874 u, masa stroncija 93,89457 u.

- SKICIRAJ I OZNAČI

Skica zadatka se nalazi na slici 7.9.

- MODELIRAJ I PRIKAŽI



- MATEMATIČKI OPIŠI

$$m_{\text{prije}} = m({}^1_0\text{n}) + m({}^{236}_{92}\text{U})$$

$$m_{\text{poslije}} = m({}^{139}_{54}\text{Xe}) + m({}^{94}_{38}\text{Sr}) + 3 \cdot m({}^1_0\text{n})$$

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

$$\frac{N}{N_A} = \frac{m}{M} \longrightarrow N = \frac{m N_A}{M}$$

$$E_{\text{ukupna oslobođena energija}} = E = N \cdot \Delta E$$

• RIJEŠI I PROMISLI

$$m_{\text{prije}} = 236,000595\text{u}$$

$$m_{\text{poslije}} = 235,809305\text{u}$$

$$\Delta m = 0,1966\text{u}$$

$$\Delta E = 0,1966 \cdot 931,5022\text{MeV}$$

$$\Delta E = 183,133\text{MeV}$$

$$N = \frac{1\text{g} \cdot 6,022 \cdot 10^{23}\text{mol}^{-1}}{235\text{g mol}^{-1}}$$

$$N = 2,563 \cdot 10^{21}$$

$$E = 2,563 \cdot 10^{21} \cdot 183,133\text{MeV}$$

$$E = 2,5626 \cdot 10^{21}\text{MeV}$$

Red veličina broja čestica je zadovoljavajući, kao i oslobođene energije. Mjerna jedinica je zadovoljavajuća.

Nakon što su učenici u skupinama riješili ova dva zadatka, nastavnik im postavi pitanje: **U kojem procesu dobivamo više energije?**

Učenici raspravljaju na temelju dobivenih rezultata. Nastavnik pomoću dodatnih pitanja usmjerava raspravu.

Što mislite koje su pozitivne, a koje negativne strane nuklearne energije?

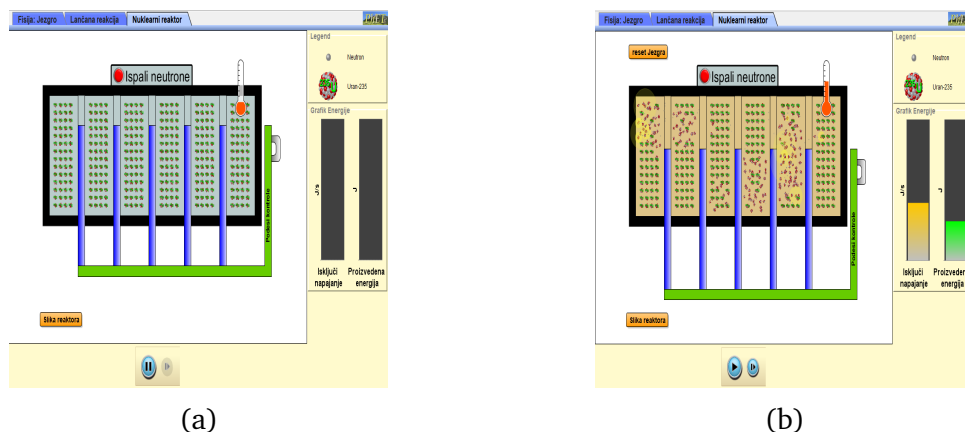
Na kraju nastavnog sata, nastavnik bi zadao učenicima zadatak da do idućeg nastavnog sata istraže kako funkcioniraju elektrane te koje su pozitivne i negativne strane nuklearnih elektrana i energije. Ovim zadatkom nastavnik bi kod učenika poticao istraživački duh, kritičko razmišljanje o podacima koje pronađu na internetu (zbog površnih i neprovjerenih podataka) te na samom satu argumentiranu i činjeničnu raspravu.

Također učenici bi dobili određene linkove kao polaznu točku za vlastita istraživanja. Internetske stranice se nalaze u tablici 7.1.

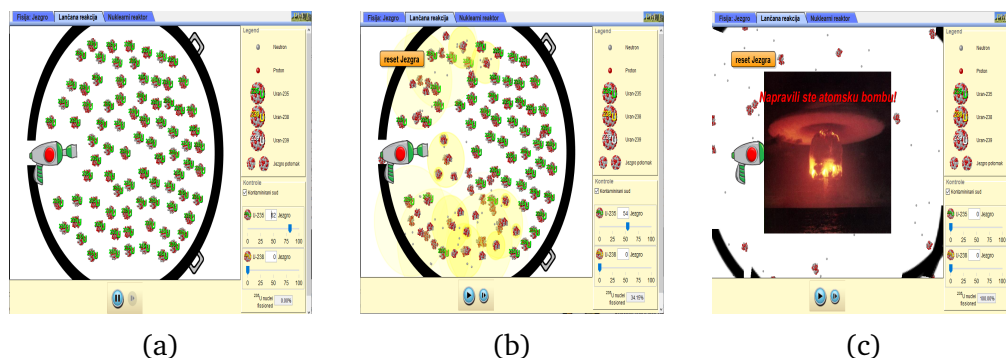
Jedan učenik bi dobio dodatni zadatak da istraži Phetovu simulaciju nuklearnog reaktora i pomoću pitanja navede svoje kolege u razredu da konstruiraju vlastiti reaktor, dok bi drugi učenik imao zadatak da pomoću iste simulacije „napravi“ nuklearnu

Nuclear Energy Explained: How does it work? 1/3 https://www.youtube.com/watch?v=rc0FV4y5z8c	The Nuclear Waste Problem https://www.youtube.com/watch?v=uU3kLBo_ruo
3 Reasons Why Nuclear Energy Is Terrible! 2/3 https://www.youtube.com/watch?v=HEYbgyL5n1g&t=10s	Fusion Power Explained – Future or Failure https://www.youtube.com/watch?v=mZsaaturR6E
3 Reasons Why Nuclear Energy Is Awesome! 3/3 https://www.youtube.com/watch?v=pVbLlnmXtBY	How Close Are We to Fusion Energy? https://www.youtube.com/watch?v=ZW_YCWLYv6A
Nuclear Reactor-Understanding how it works — Physics Elearnin https://www.youtube.com/watch?v=5j2D7UrYUms	What Caused the Catastrophic Nuclear Accident in Chernobyl? https://www.youtube.com/watch?v=tFo_0eEt1IY
How Does an Atom Bomb Work? And why don't more countries have it? https://www.youtube.com/watch?v=NrjW-11Y9sY	How Nuclear Power Plants Work / Nuclear Energy (Animation) https://www.youtube.com/watch?v=_UwexvaCMWA
How Close Are We to Fusion Energy? Fusion Energy Explained https://www.youtube.com/watch?v=N4yWhA1mVxA	How do nuclear power plants work? - M. V. Ramana and Sajan Saini https://www.youtube.com/watch?v=R7WPEYGr1Vs
4 Fusion Breakthroughs From The Last Year — Answers With Joe https://www.youtube.com/watch?v=1Ra798QVEFQ	What If We Detonated All Nuclear Bombs at Once? https://www.youtube.com/watch?v=JyECrGp-Sw8
Nuclear Energy Explained: Risk or Opportunity https://www.youtube.com/watch?v=d7L081L4Ai4	

Tablica 7.1: Popis internetskih stranica koje su polazna točka učeničkih istraživanja



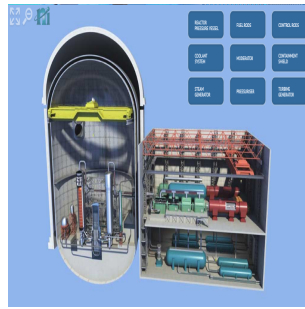
Slika 7.10: Prikaz četvrte simulacije [74] (a) Početno stanje nuklearnog reaktora (b) Pokrenuti proces kontrolirane lančane reakcije u nuklearnom reaktoru



Slika 7.11: Prikaz pete simulacije [74] (a) Početni stadij nuklearne bombe (b) Pokrenut proces nekontrolirane lančane reakcije (c) Simulirana nuklearna bomba



(a)



(b)



(c)

Slika 7.12: Prikaz simulacije [77] (a) Prikaz simulacije nuklearne elektrane (b) Prikaz jezgre nuklearnog reaktora (c) Prikaz gorivnih šipki

bombu. Prikaz simulacije konstruiranja rada reaktora je prikazan na slici 7.10, a simulacije principa rada nuklearne bombe je prikazan na slici 7.11.

Kao provjeru znanja, nastavnik bi s učenicima interaktivno mogao proći kroz reaktor na web stranici [77]. Određeni isječci s internetske stranice su prikazane na slici 7.12. Također, jedan učenik bi dobio zadatak da istraži kako radi fuzijski reaktor i da prouči simulaciju na stranici [72]. Novostečeno znanje učenik bi drugim učenicima prikazao kao malo istraživanje.

Bibliography

- [1] IEA, (17.04.2019.), Key Electricity Trends 2018 <https://www.iea.org/newsroom/news/2019/april/key-electricity-trends-2018.html>, 7.8.2019.
- [2] Europsko vijeće, Vijeće Europske unije, Pariški sporazum o klimatskim promjenama, <https://www.consilium.europa.eu/hr/policies/climate-change/timeline/>, 19.8.2019.
- [3] Obzor 2020, Što je Obzor 2020.? <http://www.obzor2020.hr/obzor2020/sto-je-obzor-2020>, 26.5.2019.
- [4] Vukšić, M. Analiza čestica fuzijske prašine. Diplomski rad. Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet, 2017.
- [5] Forbes, (20.10.2019.), Russia's Floating Nuclear Power Plant Has Great Potential For Decarbonization Trends, <https://www.forbes.com/sites/rrapier/2019/10/20/floating-nuclear-power-plants-could-save-numerous-lives/#134bc68312b1>, 12.1.2020.
- [6] Nuklearna energija - mistika i stvarnost, Utjecaj nesreće u Fukushima na razvoj nuklearne energetike i povećanje sigurnosti postojećih nuklearnih elektrana, <http://www.nemis.hr/index.php/energetske-svrhe.html>, 12.1.2020.
- [7] Taipei times, Plant weathered Japan quake well: IAEA <http://www.taipeitimes.com/News/world/archives/2012/08/12/2003540105>, 12.1.2020.
- [8] Reuters, (20.10.2011.), Japanese nuclear plant survived tsunami, offers clues, <https://www.reuters.com/article/us-japan-nuclear-tsunami/japanese-nuclear-plant-survived-tsunami-offers-clues-idUSTRE79J0B420111020>, 12.1.2020.
- [9] Woody Epstein, (7.5.2012.), Not losing to the rain, <https://woody.com/blog/2012/05/07/not-losing-to-the-rain/>, 12.1.2020.
- [10] Harvard business review, How the Other Fukushima Plant Survived, <https://hbr.org/2014/07/how-the-other-fukushima-plant-survived>, 12.1.2020.

- [11] World nuclear news, (14.5.2011.), Cold shutdowns at Fukushima Daini, http://www.world-nuclear-news.org/RS_Cold_shutdowns_at_Fukushima_Daini_1403112.html, 12.1.2020.
- [12] National Aeronautics and Space Administration, Coal and Gas are Far More Harmful than Nuclear Power, https://www.giss.nasa.gov/research/briefs/kharecha_02/, 26.5.2019.
- [13] Andričević, P. R. Prilagodba energije ubrzanih iona za ozračavanje materijala od interesa za fuzijske reaktore. Diplomski rad. Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet, 2015.
Dobiveno odobrenje autora za objavu slika. Autorska prava se ne prenose.
- [14] ITER, WHAT IS ITER?, <https://www.iter.org/proj/inafewlines>, 26.7.2019.
- [15] Hrvatska enciklopedija, Nuklearni reaktor, <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=44384>, 4.2.2020.
- [16] Hrvatska enciklopedija, Fuzija, <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=20912>, 4.2.2020.
- [17] Encyclopædia Britannica, (05.07.2019.), Conn R.W., Nuclear fusion, <https://www.britannica.com/science/nuclear-fusion>, 12.01.2020.
- [18] Young, H. D.; Freedman; R. A. Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics. 13th ed. San Francisco : Pearson Education, Inc., publishing as Addison-Wesley, 2008.
- [19] Mass number, number of protons, name of isotope, mass [MeV/c²], binding energy [MeV] and binding energy per nucleus [MeV] for different atomic nuclei Calculated for Einstein Online <http://www.einstein-online.info>, using data from the Atomic Mass Data Center, http://www.nndc.bnl.gov/amdc/web/nubase_en.html, July 2005, https://web.archive.org/web/20070912054602/http://www.einstein-online.info/en/spotlights/binding_energy/binding_energy/index.txt, 20.9.2019.
- [20] EUROfusion, History of fusion <https://www.euro-fusion.org/fusion/history-of-fusion/>, 4.2.2020.

- [21] ITER, Who "invented" fusion?, <https://www.iter.org/mag/3/29>, 4.02.2020.
- [22] Povh, B.; Rith, K.; Scholz, C.; Zetsche F. *Particles and Nuclei An Introduction to the Physical Concepts*. Springer, 2008.
- [23] Encyclopædia Britannica, (12.12.2018.), Najmabadi, F.; Prager, S.C., Fusion reactor, <https://www.britannica.com/technology/fusion-reactor>, 6.9.2019.
- [24] Wesson, J.: The Science of JET, <http://www.euro-fusionscipub.org/wp-content/uploads/2014/11/JETR99013.pdf>, 20.12.2019.
- [25] Encyclopædia Britannica, (5.02.2018.), Cross section, <https://www.britannica.com/science/cross-section-physics>, 12.01.2020.
- [26] Milin, M. i Frišćić, I., Vježbe iz nuklearne fizike, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilišta u Zagrebu, verzija: 14. svibnja 2013, http://www.phy.pmf.unizg.hr/~ifriscic/nf_skripta_8.pdf, 7.8.2019.
- [27] Reaching to a featured formula to deduce the energy of the heaviest particles producing from the controlled thermonuclear fusion reactions - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Fusion-reaction-cross-sections-as-a-function-of-the-incident-particle-energy-for-the_fig1_325355687, 1.9.2019.
- [28] Ongena, J.: Fusion Principles, https://www.sif.it/static/SIF/resources/public/files/va2014/Ongena_I.pdf, 20.12.2019.
- [29] Encyclopædia Britannica, (23.02.2018.), Deuterium, <https://www.britannica.com/science/deuterium>, 2.9.2019.
- [30] Encyclopædia Britannica, (19.07.2019.), Tritium, <https://www.britannica.com/science/tritium>, 2.9.2019.
- [31] ITER, Gallery, https://www.iter.org/doc/all/content/com/gallery/media/7%20-%20technical/tkmandplant_2016_72dpi.jpg, 17.1.2020.
- [32] Hindawi, Li S., H. Jiang H.; Ren Z.; Xu C., Optimal Tracking for a Divergent-Type Parabolic PDE System in Current Profile Control <https://new.hindawi.com/journals/aaa/2014/940965/fig1/>, DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/940965>, 17.01.2020.

- [33] Encyclopædia Britannica, (14.04.2017.), Tobias, C.A.; Canfield Upton, A. i drugi, Radiation, <https://www.britannica.com/science/radiation>, 12.01.2020.
- [34] Yong-Su Na, Introduction to Nuclear Fusion (409.308A, 3 Credits), <http://ocw.snu.ac.kr/sites/default/files/NOTE/6845.pdf>, 20.12.2019.
- [35] Vukšić, M. Irradiation of fusion materials. Seminar I. Ljubljana: Mednarodna podiplomska škola Jožefa Stefana, 2019., interni materijal
- [36] Encyclopædia Britannica, (20.07.1998.), Range, <https://www.britannica.com/science/range-particle-radiation>, 17.01.2020.
- [37] Tadić, T. Dubinsko profiliranje koncentracije dopanata ubrzanim ionima ugljika u siliciju i oksidnim filmovima. Disertacija. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, 1995.
- [38] Wikimedia Commons, (16.2.2010.), File:Dose Depth Curves.svg, Autor: Cepheiden, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dose_Depth_Curves.svg, 10.2.2020. Autorska prava se ne prenose.
- [39] Wikimedia Commons, (14.2.2007.), File:Electronic nuclear stopping Al in Al.png, Electronic and nuclear stopping power for Al ions in Al, Autor: HPaul, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electronic_nuclear_stopping_Al_in_Al.png, 10.2.2020. Autorska prava se ne prenose.
- [40] Bohr, N.: The penetration of atomic particles through matter // Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk. 18, No.8 (1948), str. 1. - 144.
- [41] Sigmund, P.; Winterborn, K. B.: Small-angle multiple scattering of ions in the screening Coulomb region // Nucl. Instr. and Meth. 119 (1974), str. 541. - 557.
- [42] Meyer, L.: Plural and multiple scattering of low-energy heavy particles in solids // Phys. Stat. Sol. 44 (1971), str. 253. - 268.
- [43] Marwick, A.D.; Sigmund P.: Small-Angle Multiple Scattering of Ions in the Screened-Coulomb Region. II. Lateral Spread // Nucl. Instr. and Meth. 126 (1975), str. 317. - 323.
- [44] Tadić, T. Single and dual beam ion irradiation at RBI, EUROfusion, IREMEV, Atena, 27.-29.11.2019., interni materijal

- [45] Institut Ruđer Bošković, 1.0 i 6.0 MV Tandem akceleratori, <https://www.irb.hr/Istrazivanja/Kapitalna-oprema/1.0-i-6.0-MV-Tandem-akceleratori>, 21.8.2019.
- [46] Spectroscopy, (1.11.2011.), Detecting Ions in Mass Spectrometers with the Faraday Cup, <http://www.spectroscopyonline.com/detecting-ions-mass-spectrometers-faraday-cup>, 21.8.2019.
- [47] ImageJ, Analyze Menu, <https://imagej.nih.gov/ij/docs/menus/analyze.html>, 20.07.2019.
- [48] Schroeder, C.; Scott, T.; Tolson, H.; Huang, T.; Lee, Y. (2007.) A meta-analysis of national research: Effects of teaching strategies on student achievement in science in the United States. // Journal of Research in Science Teaching, 40(10), 1436-1460
- [49] Planinić, M.: Istraživački usmjerena nastava fizike-kako je približiti školskoj zbilji? // XII: Hrvatski simpozij o nastavi fizike: Povezivanje nastave fizike i istraživanja, zbornik radova (2015.), str. 8.- 14.
- [50] Planinić, M.; Sušac, A.; Ivanjek, L.; Jeličić K.; Matejak Cvenić, K.: Učenički istraživački pokusi i znanstveno zaključivanje // XIV. Hrvatski simpozij o nastavi fizike, zbornik radova (2019.), str. 32.- 36.
- [51] Jeličić K.; Planinić, M.; Sušac, A.; Matejak Cvenić, K.: Oblikovanje i priprema istraživački usmjerenog nastavnog sata // XIV. Hrvatski simpozij o nastavi fizike, zbornik radova (2019.), str. 125.- 127.
- [52] Planinić, M.: Interaktivni način poučavanja fizike // Deveti hrvatski simpozij o nastavi fizike: Interaktivna nastava fizike, zbornik radova 2009, str. 17. - 23.
- [53] Spetić, L.; Pećina, P.: Učenička istraživanja tijekom sata // XIV. Hrvatski simpozij o nastavi fizike, zbornik radova (2019.), str. 149.- 153.
- [54] Labor, J. Fizika 4, udžbenik za 4.razred gimnazije, Alfa, Zagreb, 2008.
- [55] Paar, V. Fizika 4, udžbenik za četvrti razred gimnazije; Školska knjiga, Zagreb, 2006.

- [56] Labor, J. Fizika 4, udžbenika za 4. razred srednjih strukovnih škola s četverogodišnjim programom fizike, Alfa, Zagreb, 2009.
- [57] Andreis, T.; Plavčić, M.; Simić, N. Fizika 4, udžbenik za 4. razred gimnazija i srodne škole s četverogodišnjih programa fizike (varijanta „B“); Profil, Zagreb, 2006.
- [58] Horvat, D.; Hrupec, D. Fizika 4 pojmovi i koncepti, udžbenik s multimedijским sadržajem za 4. razred četverogodišnjih strukovnih škola s četverogodišnjim učenjem fizike, Neodidacta, Zagreb, 2010.
- [59] Paar, V. Fizika 4, udžbenik za četvrti razred gimnazije A-inačica programa; Školska knjiga, Zagreb, 2002.
- [60] Paar, V.; Šips, V. Fizika 4, zbirka riješenih zadataka, Školska knjiga; Zagreb, 2005.
- [61] Krsnik, R. Fizika 4, udžbenik za 4.razred gimnazije B inačica programa; Školska knjiga, Zagreb, 2000.
- [62] Brković, N. Fizika 4, udžbenik za 4. razred gimnazija A inačica programa, Luk, Zagreb, 2001.
- [63] Brković, N.; Pećina, P. Fizika u 24 lekcije, priručnik za pripremu državne mature, Element, Zagreb, 2013.
- [64] Brković, N. Zbirka zadataka iz fizike, III.dio; Luk d.o.o., Zagreb, 2001.
- [65] Krsnik, R. Fizika 4, metodički priručnik za nastavnike; Školska knjiga, Zagreb, 2003.
- [66] Center for Nuclear Science and Technology Information, Fission Demonstration <http://nuclearconnect.org/in-the-classroom/for-teachers/what-is-fission>, 20.05.2019.
- [67] Center for Nuclear Science and Technology Information, Nuclear Chain Reaction Using Dominoes, <http://nuclearconnect.org/in-the-classroom/for-teachers/nuclear-chain-reaction-using-dominoes>, 20.05.2019.

- [68] Youtube, (9.6.2014.), Piled Higher and Deeper (PHD Comics): Fusion Energy Explained, Autor: Jorge Cham, <https://youtu.be/N4yWhA1mVxA?t=69>, 4.5.2019.
- [69] Youtube, (19.12.2012.), ChadCLI, Fission Reaction (HD Rework) - Bellevue University, Video je u vlasništvu Bellevue University, <https://youtu.be/Ezbyg2iNdQs?t=9>, 4.5.2019.
Dobiveno odobrenje za objavu slika. Autorska prava se ne prenose.
- [70] eduMedia, Nuclear fusion, <https://www.edumedia-sciences.com/en/media/588-nuclear-fusion>, 4.5.2019.
- [71] Wikimedia Commons, (6.6.2015.), File:ReidForce2.jpg, Autor: Bdushaw, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ReidForce2.jpg>, 6.2.2020.
Autorska prava se ne prenose.
- [72] PhD comics, What is fusion?, <http://phdcomics.com/comics.php?f=1716>, 4.5.2019.
- [73] Youtube, (12.11.2017.), Thomas Schwenke, Nuclear Fission (Animation), <https://www.youtube.com/watch?v=zyE-PVQh3Wc>, 4.5.2019.
- [74] PhET Interactive Simulations for science and math, <https://phet.colorado.edu/>, Nuclear Fission, <https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/nuclear-fission>, 4.5.2019.
- [75] Youtube, (28.11.2018.), Arvin Ash, How Does an Atom Bomb Work? And why don't more countries have it?, <https://www.youtube.com/watch?v=NrjW-11Y9sY>, 4.5.2019.
Dobiveno odobrenje autora za objavu slika. Autorska prava se ne prenose.
- [76] Youtube, (18.12.2012.), Elearnin, Physics - Nuclear Fission reaction explained - Physics, <https://www.youtube.com/watch?v=mBdVK4cqiFs>, 4.5.2019.
- [77] The nuclear institute, Nuclear Reactor Simulator, <https://www.nuclearinst.com/Nuclear-Reactor-Simulator>, 4.5.2019.
Dobiveno odobrenje za objavu slika. Autorska prava se ne prenose.