

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Marin Vukšić

Analiza čestica fuzijske prašine

Diplomski rad

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
FIZIKA; SMJER ISTRAŽIVAČKI

Marin Vukšić

Diplomski rad

Analiza čestica fuzijske prašine

Voditelj diplomskog rada: dr. sc. Tonči Tadić

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2017.

Teško je nakon šest godina sjetiti se svih ljudi koji su zaslužni za ovaj rad i moje preživljavanje do i tokom faksa, a zaslužni su zaista mnogi. Najbolje je krenuti kronološki unatrag.

Hvala mom mentoru, dr. sc. Tončiju Tadiću, na strpljenju i razumijevanju za bedasta pitanja i povremene periode mog "nestajanja", za sve upute tokom izrade ovoga rada i rješenja u zadnji čas, no prije svega hvala što je nakon predavanja u prosincu 2013. na Fizičkom odsjeku pristao na razgovor s nekim studentom kojeg je interesirala fuzija. Nekoliko godina kasnije, evo i diplomskog.

Hvala cijelom Laboratoriju za interakcije ionskih snopova na Institutu Ruđer Bošković, jer svi su imali udjela u nekom dijelu moga boravka na Van de Graaffu: hvala Stjepku koji me podučio analizi čestica, Ivani koja me podučavala osnovama "simre", Damiru i Natku koji su vozili veliku mašinu i uvijek imali vremena za sva pitanja, Andru na tokarenju, Ivančici što mi je našla stol, Milku koji je dozvolio da radim i stvari koje nisu bile dio diplomskog, Periši koji je vozio malu mašinu (i naučio me promijeniti gumicu na sifonu), Ivanu na razgovorima, Wataruu koji nas je spasio od neutronske zračenja, Zdravku na ugljičnim folijama, Milanu na internetu... stvarno se nadam da nekoga nisam ispustio.

Hvala svim profesorima, učiteljici, nastavnicima i tetama u vrtiću koji su me dopratili do faksa kroz sve obične, neobične i muzičke škole, a pogotovo profesorima i čistačicama iz Privatne klasične gimnazije: ovo je i za vas. Hvala i svima iz Akademskog zbora Ivan Goran Kovačić koji je jedna sasvim drugačija škola; ne bih ostao normalan da nije bilo vas.

Hvala ti, Leo, na 20+ godina prijateljstva, Aniću, Cebo, Begiću, Vidoviću, Juračiću, Timone i Pietro na zajedničkom odrastanju; hvala Vandi, Zdenkici, Bronzi, Malešu, Faberici, Bobi i Šekiju, to je davno prešlo profesorsku "dužnost"; a gdje su još Saša, Nebojša, AMD, Rea, Bojan, Matej, Nataša, Grga, Gašić i ekipa... previše ljudi me podržavalo tokom studiranja. Na koncu, hvala Šitum na tvojim kavama i cigaretama tokom kojih sam bio najproduktivniji prilikom pisanja diplomskog.

Hvala cijeloj mojoj obitelji, u Zagrebu, Biogradu i Šibeniku: teta Frana i tetak Marinko, Beba i Boris, Mario, Franka, Bruno i Anamarija, Sabina, Goran, Blaža i Pere, Mate, Petra i Marta, Ivan i Ivana, Vala, Andrej, Klara i Marko, Tino, Andrea, Mia, Hrvoje i Nina, Neno i Gorana, Pave i Doriana, Luka, Martina, Roko i Rita, baka Janja, baka Zlata i deda Vito. Rade i dida Ive, više niste ovdje, ali ovo je i vaše "maslo".

Na kraju, najviše hvala mojoj mami i tati, burazu i seki; što su oni podržali i istrpili, nitko drugi ne bi mogao. "I kaj sad?" - ne znam, ali vi bute svuda uz mene, bez obzira na "kaj sad".

Sažetak

Čestice fuzijske prašine iz tokamaka JET analizirane su snopom iona helija-3 energije 4 MeV. Kako bi se našli tragovi fuzijskog goriva korištene su analitičke metode NRA i PIXE. Poseban naglasak je stavljen na geometriju eksperimenta zbog velikog prostornog kuta NRA detektora. Analiza je pokazala da su čestice fuzijske prašine sačinjene od volframa, inkonela (nikla, željeza, kroma, niobija, molibdena), deuterija, berilija, dušika itd. Većina čestica je podrijetlom iz dijelova reaktorske komore koji su izloženi plazmi, no dio ih je nefuzijskog podrijetla. Potonje su vjerojatno nastale kontaminacijom tokom održavanja.

Ključne riječi: nuklearna mikroproba, NRA, PIXE, JET, fuzija, čestice fuzijske prašine

Analysis of fusion dust particles

Abstract

Fusion dust particles from the JET tokamak were analyzed using a 4 MeV helium-3 microbeam. NRA and PIXE methods were used with the aim of finding residual fusion fuel (deuterium) in fusion dust particles. Particular emphasis has been put on the geometry of the experiment due to the large solid angle of the surface barrier detector used in the analysis. The analysis has shown that the particles are comprised of tungsten, inconel (nickel, iron, chromium, niobium, molybdenum), deuterium, beryllium, nitrogen, etc. While the most of the particles are a result of plasma interacting with plasma-facing components, some of them are clearly non-fusion in origin. The latter particles are most probably the result of maintenance procedures.

Keywords: nuclear microbeam, NRA, PIXE, JET, fusion, fusion dust particles

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Nuklearna fuzija	3
2.1	Magnetsko zatočenje	4
2.1.1	Tokamak	5
2.2	JET	6
2.3	Prašenje u fuzijskim reaktorima	8
3	Analiza tvari ubrzanim ionima	9
3.1	RBS	10
3.2	NRA	11
3.3	PIXE	12
4	Eksperimentalni postav	13
4.1	Ionski izvor	13
4.2	Akcelerator	14
4.3	Nuklearna mikroproba	15
4.4	Komora	17
4.4.1	Detektori	17
4.4.2	Nosač uzoraka	18
5	Rezultati	20
5.1	Procjena skenirane površine	20
5.2	Određivanje prostornog kuta NRA/RBS detektora	21
5.2.1	Debela folija titanija	21
5.2.2	Debela folija nikla	22
5.3	Kalibriranje kanala	23
5.4	Čestice iz JET-a	24
5.4.1	Čestica 163	24
5.4.2	Čestica 166	26
5.4.3	Čestica 177	28
5.4.4	Čestica 180	30
5.4.5	Čestica 194	32

5.5 Pregled rezultata	34
6 Zaključak	37
Dodaci	38
A - Pretvaranje udjela	38
B - Neodređenost u kutu NRA detektora	39
C - Težinski koeficijenti po kutovima	40
D - Nuklearne reakcije	42
D.1 Deuterij	42
D.2 Berilij	42
D.3 Ugljik	42
D.4 Dušik	43
Literatura	44

1 Uvod

Jedan od najvećih izazova čovječanstvu je problem globalnog zatopljenja. Osim povišenja prosječne temperature diljem kugle zemaljske, globalno zatopljenje uzrokuje i povećan broj ekstremnih klimatskih pojava (npr. suše, poplave, toplinski udari), povišenje razine mora i oceana zbog otapanja ledenih površina, geopolitičku nestabilnost uslijed milijunskih migracija i nesigurnosti u opskrbi hranom te niz drugih nedaća. Znanstvena zajednica se gotovo u potpunosti slaže da su ljudi gotovo siguran uzrok globalnog zatopljenja [1]. Globalnom zatopljenju najviše doprinosi *efekt staklenika* uzrokovan emisijom stakleničkih plinova. Jedan od stakleničkih plinova je i CO₂ koji se oslobađa korištenjem fosilnih goriva i biomase za dobivanje energije. Obzirom da se preko 90% ukupne svjetske proizvodnje energije (560 000 PJ, odnosno 1 570 PWh) temelji na izgaranju fosilnih goriva (nafta, ugljen, zemni plin) i biomase, smanjenje emisija CO₂ je prioritet br. 1 u borbi protiv globalnog zatopljenja [2].

Kako bi se smanjio intenzitet sveopćih promjena koje zahvaćaju jedini nam planet, Ujedinjeni narodi su proteklih desetljeća organizirali mnogo konvencija s ciljem dogovaranja mjera za međunarodnu borbu protiv globalnog zatopljenja. Konvencija održana 12. prosinca 2015. u Parizu je rezultirala *Pariškim sporazumom o klimatskim promjenama* (franc. *Accord de Paris*) kojim se zemlje potpisnice obvezuju na ograničavanje rasta prosječne globalne temperature na 2°C u odnosu na predindustrijsko razdoblje, smanjenjem emisija stakleničkih plinova, prije svega CO₂ [3]. Sporazum su potpisale i Kina, SAD i Indija koje su izvor više od 40% svjetskih emisija CO₂.

Iako Pariški sporazum ograničava emisije stakleničkih plinova, ne smije ograničiti svjetski ekonomski napredak. Postavlja se pitanje kako u isto vrijeme smanjiti emisije stakleničkih plinova, a zadovoljiti svjetsku potrebu za energijom koja raste iz dana u dan. Odgovor je u tzv. alternativnim izvorima energije koji će bitno manje utjecati na okoliš od postojećih fosilnih izvora energije, prije svega manjom emisijom CO₂. Najčešći alternativni izvori energije su geotermalni izvori, solarne elektrane, hidroelektrane, vjetroturbine i (fisijske) nuklearne elektrane. Jedan od izvora energije u koji se polažu velike nade jest nuklearna fuzija. Uobičajene fisijske nuklearne elektrane stvaraju radioaktivni otpad kojemu trebaju mnoga tisućljeća za raspad do sta-

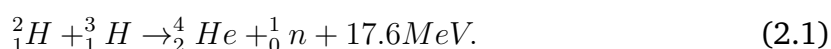
bilnih jezgri. Fuzijske nuklearne elektrane bi stvarale bitno manje radioaktivnog materijala s mnogo kraćim poluživotom, stoga se ekonomski najjači dio svjetske zajednice okrenuo razvijanju prve fuzijske nuklearne elektrane kroz projekt *Međunarodnog termonuklearnog reaktora* (eng. *International thermonuclear reactor*, ITER; lat. *iter*, -is, n. - put).

Međunarodni termonuklearni reaktor, ITER, je zajednički projekt EU, SAD, Kine, Rusije, Indije, Japana i Južne Koreje usmjeren ka razvoju prve fuzijske nuklearne elektrane. Sam ITER neće biti elektrana, već je to zadnji korak prije gradnje prve, demonstracijske, fuzijske elektrane (eng. *Demonstration Power Station*, DEMO). Kollaboracija tako velikih zemalja se temelji na uzajamnom dijeljenju znanja i tehnologija nužnih za gradnju ITER-a, pri čemu se cijeli projekt podijelio na manje dijelove, tzv. *radne pakete* (eng. *workpackages*). Obzirom da se fuzijska tehnologija ne može koristiti za razvijanje oružja, uklonjena je bitna prepreka međunarodnoj suradnji. Na koncu projekta bi sve strane trebale posjedovati znanja za gradnju vlastitih fuzijskih nuklearnih elektrana. Kratica ITER nije slučajno odabrana - ITER nije samo put u čišću i energetski stabilniju budućnost, već je ITER i put prema svjetskom miru.

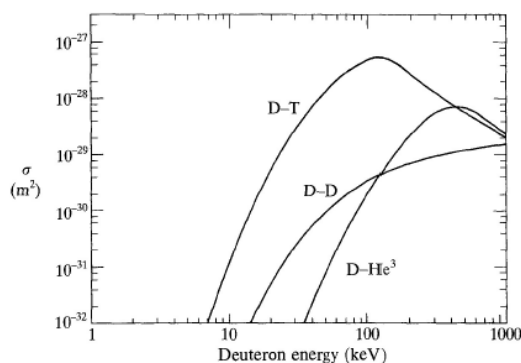
Fuzijska strategija EU, sažetu u dokumentu „EFDA Roadmap to Fusion Electricity“ ili EU Fusion Roadmap, smatra ITER ključnim uređajem za dobivanje fuzijske energije. Za provedbu Fusion Roadmapa osnovan je Konzorcij EUROfusion, koji provodi istoimeni Obzor2020 objedinjeni projekt fuzijskih istraživanja u članicama EU, u vezi s konstrukcijom ITER-a i fuzijske elektrane DEMO. ITER-u je po veličini najbliži europski tokamak JET (Zajednički europski torus, eng. *Joint European Torus*) u Culhamu u Ujedinjenom Kraljevstvu. Na JET-u se testiraju modeli upravljanja deuterij-tricij (DT) plazmom u uvjetima sličnim onima kakvi će biti na ITER-u. Jedan od radnih paketa u sklopu Obzor2020 projekta EUROfusion je WPJET2 u kojem se proučava međudjelovanje DT fuzijske plazme sa stijenkom tokamaka JET, složenoj po umanjenom mjerilu ITER-a, tj. stijenkama nalik na ITER-ove (eng. *ITER-like wall*, ILW). Posljedica tih međudjelovanja je proizvodnja fuzijske prašine, o čijem sastavu ovisi siguran rad ITER-a i buduće fuzijske elektrane DEMO.

2 Nuklearna fuzija

Nuklearna fuzija (lat. *fusio*, *-onis*, *n.* - stapanje, spajanje) jest proces u kojem se dvije lakše jezgre stapaju u jednu težu jezgru, uz moguć nastanak lakših nusprodukata. To su procesi koji "pogone" zvijezde, pa tako i naše Sunce, stoga se fuzijska elektrana ponekad naziva i "Suncem u kutiji". Poznato je da se fuzijom do srednje teških jezgara (^{56}Fe) oslobađa energija, a reakcija koja posebice obećava je stapanje jezgara deuterija (D) i tricija (T) u jezgru helija-4 (^4He) energije 3.5 MeVa uz oslobađanje neutrona energije 14.1 MeVa [4]:



Ta reakcija se prema reaktantima naziva DT reakcijom te je poznata još od 1930-ih godina. Posebno je pogodna jer je jedan od dvaju potrebnih izotopa, deuterij, lako dobiti iz vode (udio deuterija u izotopima vodika jest 0.0156% [5]), dok se radioaktivni tritij, s poluživotom 12.262 ± 0.004 godina [6], najčešće proizvodi ozračivanjem litija neutronima [7]. Što se produkata reakcije tiče, nabijena α -čestica se magnetiskim poljima zadržava u plazmi i predaje joj energiju u sudarima, a neutron izlijeće iz plazme [8].



Slika 2.1: Udarni presjeci za neke fuzijske reakcije s deuterijem. DT reakcija ima najveći udarni presjek i to pri nižoj temperaturi od maksimuma udarnih presjeka ostalih reakcija. Preuzeto iz [8].

Kako bi se dvije jezgre spojile, potrebno je nadvladati kulonsku barijeru, tj. potrebno je ugrijati čestice do temperature 10^8 K (kinetička energija pojedine čestice mora biti reda veličine 10 keV). Na toj temperaturi sve poznate tvari prelaze u stanje plazme, tj. stanje nalik plinu u kojem se elektronski oblaci odvajaju od jezgara. Prema Maxwell-Boltzmannovoj distribuciji, određeni dio čestica plazme će tu tem-

peraturu imati i kad je prosječna temperatura plazme bitno niža. Obzirom da se energija oslobađa prilikom spajanja jezgara, kada se čestice koje se nalaze na "repu" Maxwell-Boltzmannove distribucije krenu stapati dovoljnom frekvencijom da ugriju ostatak plazme, temperatura potrebna za postizanje samoodrživosti plazme se smanji za faktor 2.

2.1 Magnetsko zatočenje

Prevladavajući pristup u gradnji fuzijskih reaktora je zatočiti plazmu magnetskim poljima kako ista ne bi došla u dodir sa stijenkama reaktorske komore. U fuzijskim reaktorima, nastala plazma se poput plina širi uslijed vlastitog tlaka. Opišemo li plazmu s i komponenti jednadžbom idealnog plina, tlak i -te komponente, p_i , širi plazmu te je dan u ovisnosti o gustoći n_i te komponente:

$$p_i = n_i k_B T. \quad (2.2)$$

Tom tlaku, kojeg se ponekad naziva kinetičkim, se suprotstavlja magnetski tlak, p_m :

$$p_m = \frac{\mathbf{B}^2}{2\mu_0} \quad (2.3)$$

koji plazmu sažima (izvod u [4]). Da bi se fuzija održala, magnetski tlak mora biti veći od ukupnog kinetičkog tlaka svih komponenti plazme, stoga je korisna veličina omjer suprotstavljenih tlakova, β :

$$\beta = \frac{p}{p_m} = \frac{2\mu_0 n k_B T}{\mathbf{B}^2}. \quad (2.4)$$

Taj omjer za uspješnu fuziju mora biti manji od 1.

Ako se fuzija odvija u cijevi, longitudinalno širenje plazme prestaje biti problemom ako se krajevi cijevi spoje te nastane torus. Lateralno širenje se može ograničiti magnetskim poljima uslijed razdvajanja atoma na nabijene objekte - pozitivno nabijene jezgre i negativno nabijene elektrone. Magnetsko polje se dobiva magnetskim zavojnicama razmještenim oko torusa. Obzirom da su zavojnice gušće namotane s unutarnje strane torusa nego s vanjske, polje nije homogeno te naboji "cure" van iz plazminog središta. Zadržavanje plazme u sredini torusa se postiže različitim oblicima reaktorskih posuda i sustava magneta, od kojih je najčešći tokamak. U takvom

dizajnu se koristi divertor, tj. metalne ploče u koje donji dio plazme (eng. *scrape-off layer*, SOL) udara, kako bi se ciljano uhvatili ioni koji "cure" iz plazme.

2.1.1 Tokamak

Grupa sovjetskih znanstvenika je pedesetih godina prošloga stoljeća osmislila tokamak - toroidalnu komoru s magnetskim zavojnicama (rus. **toroidal'naya kamera s magnitnymi katushkami**). Komora u obliku torusa kroz rupu u središtu ima postavljen jaram primara koji inducira struju u plazmi unutar toroidalne komore. Oko samog torusa se nalaze supravodljivi magneti koji stvaraju toroidalno magnetsko polje čiji je cilj plazmu održati u središtu komore. Uz toroidalno polje, nužno je i poloidalno polje koje sprječava "curenje" nabijenih čestica okomito na toroidalno polje. Ono se stvara poloidalnim zavojnicama oko toroidalne komore i poljem koje plazma stvara sama (uslijed razdvajanja pozitivno nabijenih jezgara i negativno nabijenih elektrona). Rezultantno gibanje čestica u plazmi je zavojito oko središnjeg toroidalnog polja.

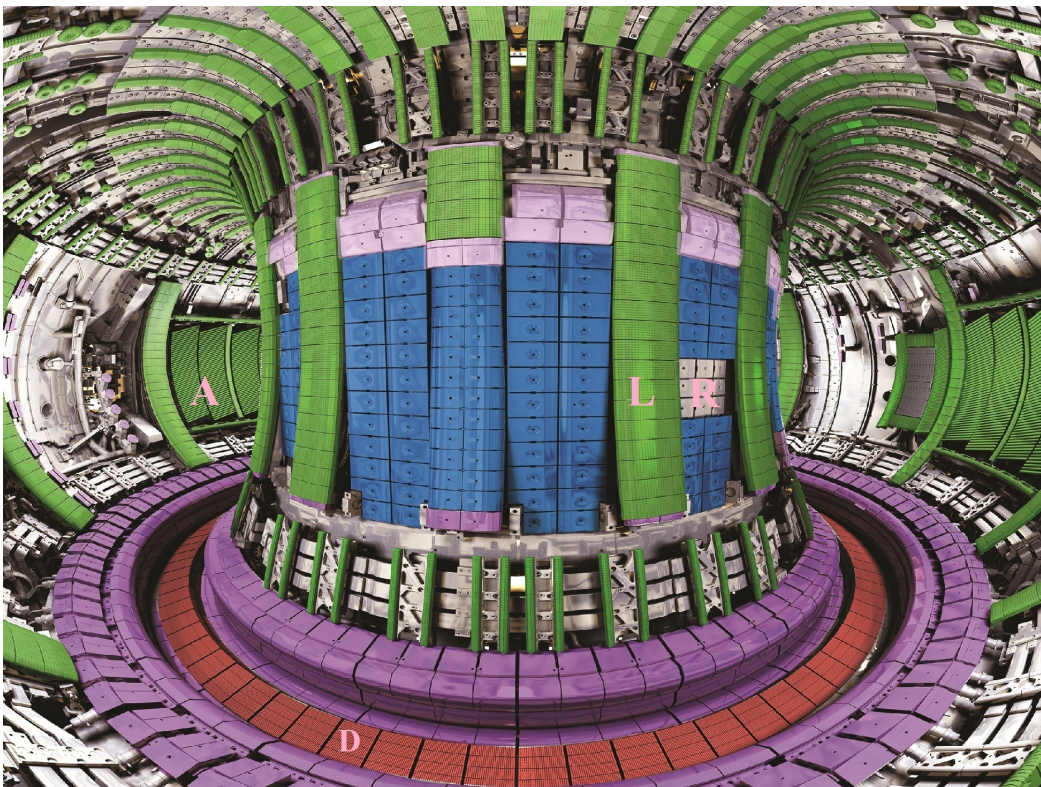
Kako se uopće plazma u tokamaku stvara? Električki kvazineutralna (ukupnog naboja 0, ali lokalno razdvojene pozitivno i negativno nabijene komponente) plazma se stvara grijanjem neutralnog plina u reaktorskoj komori. To se ostvaruje injekcijom snopova neutralnih atoma i radiofrekventnim zagrijavanjem. Injekcija snopova neutralnih atoma grije neutralni plin tako da se prvo odabrani atomi ioniziraju te se novonastali ioni ubrzavaju i sudaraju s plinom neutralnih atoma; iz tih sudara izlijeću neutralni atomi koji se potom sudaraju s plinom u reaktoru i tako mu prenose energiju (griju ga). Radiofrekventno zagrijavanje funkcionira na istom principu kao i svakidašnja mikrovalna pećnica. Visokofrekventno izmjenično električno polje pogađa rezonantnu frekvenciju kruženja nabijenih čestica u plazmi te tako povećava njihovu (kinetičku) energiju, tj. povećava im temperaturu [10].

Jednom kada se stvori plazma, zagrijavanje se i dalje vrši putem injekcije snopova neutralnih atoma i radiofrekventnog zagrijavanja, no, uslijed razdvajanja atoma na jezgre i elektrone, u plazmi se stvara električna struja koju pokreće puls primara središnjeg jarma. Plazma se ponaša kao sekundar transformatora te se stvara električna struja. Obzirom da plazma nije supravodljiva, njena temperatura se podiže i omskim zagrijavanjem te dalje dolazi do fuzije onako kako je opisano na početku poglavlja [10].

Sama plazma se ponaša kao sekundar transformatora te puls kroz primar (središte torusa) uzrokuje promjenu struje u plazmi. Obzirom da plazma nije supravodljiva, omski otpor ugrijava plazmu [10].

U DT reakciji, većinu energije fuzijske energije odnose nastali neutroni (relacija 2.1). Obzirom da su električki neutralni, magnetsko polje ih ne zadržava u središnjem dijelu reaktorske komore te oni izlijeću iz plazme.

2.2 JET



- | | | |
|--|--|---|
| ■ Berilij | ■ CFC premazan volframom | ■ Inkonel premazan volframom |
| ■ Volfram | ■ Inkonel premazan berilijem | |

Slika 2.2: Prikaz materijala u reaktorskoj komori JET-a. CFC je kompozitni materijal od ugljikovih vlakana (eng. *carbon fiber composite*). Preuzeto s [11].

Obzirom da efikasnost nuklearne fuzije raste i s porastom volumena plazme, znanstvene institucije unutar Europske zajednice su se odlučile na izgradnju najvećeg dotadašnjeg tokamaka, Zajedničkog europskog torusa (eng. *Joint European Torus*, JET), zapremnine 100 m³. Odlučeno je da JET bude smješten blizu Culhama u Ujedinjenom Kraljevstvu te je s radom započeo 1983. Od tada je provedeno mnogo eksperimenata, uključujući i onaj u kojem je postavljen rekord za energiju proizvedenu

fuzijom (16 MW) te eksperimentalno prvo korištenje daljinski upravljanih robotskih ruku za zamjenu komponenata unutar reaktorske komore [12]. U periodu 2009. - 2011. rad u JET-u je privremeno obustavljen kako bi se JET modificirao da bude što sličniji dizajnu ITER-a: snaga zagrijavanja je povećana za 50% te su unutar reaktorske komore postavljene ploče s volframom i berilijem kako bi stijenke komore JET-a bile nalik na ITER-ove (eng. ITER-like wall, ILW).

Glavne komponente reaktorske komore JET-a vidimo na slici 2.2.

Slovom "D" je označen divertor čije se središnje ploče prave od volframa zbog visoke temperature tališta (3422 °C) kao i zbog visokog atomskog broja što divertor čini otpornijim na eroziju uslijed udara plazme. Rubovi divertora su građeni od CFC-a premazanog volframom. Između divertora i plazme se upumpava sloj dušika koji služi kao jastuk za ublažavanje udara plazme o divertor [13].

Graničnici (eng. *limiters*) su označeni slovom "L". Oni služe kao prva obrana od dodira plazme sa stijenkama reaktorske komore. Berilij je odabran zbog male retencije tricija, što je bitno zbog iskoristivosti goriva i radiološke sigurnosti (poluživot tricija je 12.3 godine), i visoke temperature tališta (1287 °C). Graničnici su, dakle, građeni od materijala s bitno nižom temperaturom tališta od divertora, no to je zato što plazma neće udarati ni približno često u graničnike kao u divertor.

Slovo "R" označava kasetu od bakra i inkonela u koju ciljaju neutralni snopovi koji služe za zagrijavanje plazme (kao što je opisano u potpoglavlju 2.1.1).

U stražnjem dijelu slike, označene slovom "A", vidimo antene za radiofrekventno zagrijavanje plazme (također opisano u potpoglavlju 2.1.1). Površina im je pre-svučena berilijem zbog istih razloga kao i graničnici.

Glavni strukturni materijal na kojem se temelji gotovo cijela komora je inkonel, tzv. čelična superlegura koja se pretežito sastoji od nikla i kroma, s niskim udjelom željeza i tragovima drugih metala (sumpor, silicij, niobij, molibden, kobalt, tantal). Inkonela postoji više vrsta, a inkonel 600 (72% nikla, 15% kroma, 8% željeza te niobij, silicij i sumpor u tragovima) je najzastupljeniji u JET-u. Inkonel 625 i 700 su izdržljiviji od inkonela 600, no zbog svoje cijene ih se koristi samo na dijelovima reaktorske komore koji su izloženi posebno jakim naprezanjima [14].

2.3 Prašenje u fuzijskim reaktorima

Jedan od radnih paketa koji treba izvršiti prije gradnje ITER-a jest i modeliranje prašine unutar glavne vakuumske komore. U fuzijskim reaktorima zadržavanje plazme nije savršeno, tj. povremeno se dogode izboji plazme koji udare u stijenke reaktorske komore. Prilikom udara plazme o stijenke, plazma izbija djeliće stijenki koji se skupljaju na dnu reaktorske posude u obliku fine prašine. Čestice prašine su najčešće promjera manjeg od $150\mu\text{m}$ [15].

Ovisno o mjestu udara plazme u stijenke, stružu se različiti materijali čija prašina ima različita svojstva po pitanju toksičnosti (berilij), eksplozivnosti (stvaranje vodika), onečišćenja plazme, oštećenja dijagnostičkih uređaja unutar reaktorske komore i utjecaja na okoliš [16]. Plazma na kraju kruženja u tokamaku dolazi u kontakt i s divertorom, gdje se talože nečistoće i produkti reakcija. Čak se 43% "vrućeg" materijala plazme u području divertora pretvara u prašinu na JET-u [17]. Iako se prilikom jednogodišnjeg rada JET-a s reakcijama D-T prikupi svega 1.5 g fuzijske prašine, na ITER-u se očekuje stvaranje oko 18 kilograma prašine po eksperimentalnom ciklusu na vrućim površinama divertora, a pretpostavlja se da će od toga oko 5% otpasti na prašinu s berilijem. Naime volumen ITER-a je bitno veći (800 m^3 u ITER-u u odnosu na 80 m^3 u JET-u), dok će pulsevi plazme biti bitno duži (20-30 minuta u ITER-u u odnosu na 20-25 sekundi u JET-u). Stoga je analiza i modeliranje stvaranja prašine u postojećim tokamacima, a posebno u JET-u, važna za razumijevanje (i dizajniranje) tokamaka u ITER-u.

Analiza čestica prašine iz fuzijskih reaktora se vrši različitim eksperimentalnim tehnikama koje uključuju analizu mikroskopom atomske sile (eng. *atomic force microscopy*, AFM), analizu nuklearnom mikroprobom, rendgensku fluorescenciju (eng. *X-ray fluorescence*, XRF), analizu rendgenskom difrakcijom (eng. *X-ray diffraction*, XRD), scintilografiju, analizu skenirajućim transmisijskim elektronskim mikroskopom (eng. *scanning transmission spectroscopy*, STM)... Unatoč tome, jedino se nuklearnim analitičkim metodama može detektirati prisutnost lakih elemenata poput berilija, dušika i ugljika, odnosno fuzijskog goriva (deuterija i tricija), u česticama fuzijske prašine iz JET-a.

Za potrebe ovoga rada, analiziran je sastav čestica prašine iz tokamaka JET, tj. čestica prašine nastalih od udara plazme u stijenke nalik na ITER-ove (ILW), s posebnim naglaskom na potragu za tvarima iz fuzijskog goriva (deuterij, tricij).

3 Analiza tvari ubrzanim ionima

Sastav materijala te koncentracija pojedinih elemenata na određenim dubinama uzorka se može odrediti u eksperimentima s ubrzanim ionima upotrebljavajući mnogo analitičkih metoda, od kojih su najučestalije:

- analiza detekcije elastičnih odboja (eng. *elastic recoil detection analysis*, ERDA)
- spektrometrija mase sekundarnih iona (eng. *secondary ion mass spectrometry*, SIMS)
- detekcija emisije gama-zračenja inducirane česticama (eng. *particle-induced gamma emission*, PIGE)
- detekcija X-zraka induciranih česticama (eng. *particle-induced X-ray emission*, PIXE)
- promatranje Rutherfordovog raspršenja unatrag (eng. *Rutherford backscattering*, RBS)
- analiza nuklearnih reakcija (eng. *nuclear reaction analysis*, NRA)

Za svaku od ovih analitičkih metoda potreban je snop iona koji će na neki način interagirati s uzorkom koji se želi analizirati. Za oblikovanje i usmjeravanje snopa iona prije udara u metu potrebni su izvor iona, akcelerator te optomagnetički sustav.

Analitičke metode koje su se koristile za eksperimentalni dio ovoga rada su RBS, NRA te PIXE. Dok je PIXE metoda korištena za opažanje težih elemenata u česticama fuzijske prašine (W, Ni, Mo, Fe i sl.), NRA i RBS su korišteni za opažanje lakih elemenata u česticama. Budući je opažanje fuzijskog goriva (deuterija i tricija) od posebne važnosti za analizu sastava čestica fuzijske prašine, u ovom radu naglasak je dan na NRA metodu, posebno vodeći računa o nužnim korekcijama uzrokovanim geometrijom eksperimenta.

3.1 RBS

Za korištenje analitičke metode RBS, potrebno je ubrzati ione do MeVskih energija. Ubrzani ioni se potom usmjeravaju prema meti na čijim se jezgrama, težim od iona, ioni elastično raspršuju unatrag. Elastično raspršenje je posljedica Coulombovog odbijanja između jezgri. U RBS spektroskopiji se ne opažaju atomi u meti koji su lakši od ubrzanih iona. Detaljniji opis RBS metode se može naći u [18], a prva mjerenja ovom metodom su između 1908. i 1913. izvršili Hans Geiger i Ernest Marsden pod budnim okom Ernesta Rutherforda.

U elastičnim raspršenjima iona kinetičke energije E_i^{prije} i mase m_i na jezgri mase m_a , bitan je kinematički faktor K , definiran kao omjer kinetičke energije iona prije (E_i^{prije}) i poslije ($E_i^{poslije}$) sudara:

$$K = \frac{E_i^{prije}}{E_i^{poslije}}. \quad (3.1)$$

Obzirom da su u elastičnom raspršenju sačuvani ukupna kinetička energija, ukupna količina gibanja te mase pojedinih jezgara, kinematički faktor K možemo zapisati i kao (v. [19]):

$$K = \left(\frac{\sqrt{1 - \left(\frac{m_i}{m_a} \sin\theta\right)^2} + \frac{m_i}{m_a} \cos\theta}{1 + \frac{m_i}{m_a}} \right)^2, \quad (3.2)$$

gdje je θ kut pod kojim se ion odbio, mjereno u odnosu na smjer brzine prije raspršenja. Koristeći ovu relaciju, iz poznatih kuta θ , mase iona m_i te kinetičke energije iona prije raspršenja E_i^{prije} , uz mjerenu kinetičku energiju iona poslije raspršenja $E_i^{poslije}$, možemo saznati masu atoma, m_a , u meti. Za uzorak s atomima dviju različitih mase, m_a i m_b , koje se razlikuju za dm , ioni će se odbiti s dvjema različitim energijama koje će se razlikovati za dE [24]:

$$dE = E_i^{prije} \frac{\partial K}{\partial m} dm. \quad (3.3)$$

Za kutove raspršenja $\theta \approx \pi$, derivacija postaje [24]:

$$\frac{\partial K}{\partial m} \approx [4 - (\pi - \theta)^2] \frac{m_i}{m_a^2} \quad (3.4)$$

Vidimo da je razlučivanje jezgri različitih masa tim bolje što je energija iona prije raspršenja veća, što je razlika masa atoma uzorka veća te što su ioni teži.

3.2 NRA

Analitička metoda NRA je slična metodi RBS po tome što se temelji na interakciji atomskih jezgara. Razlika je u tome što u NRA metodi promatramo produkte nuklearnih reakcija, tj. ioni se ubrzavaju na energije dovoljne da savladaju Coulombovu barijeru te je interakcija između jezgri određena jakim nuklearnom silom, stoga udarni presjeci takvih nuklearnih reakcija više nisu opisani Rutherfordovom formulom. Interakcija između jezgri može dovesti do stvaranja novih jezgri, emisije nukleona [20] i gama zraka [21]... Udarni presjeci reakcija između iona i jezgre su manji od udarnih presjeka za Rutherfordovo raspršenje, a ovise o energiji iona i unutarnjim svojstvima jezgre [22]. Grubo pravilo za (energijski) prag reakcije je opisano sljedećom relacijom:

$$E > \frac{zZ}{a^{1/3} + A^{1/3}} MeV, \quad (3.5)$$

gdje je E energija ubrzanog iona, a i Z su protonski i maseni brojevi ubrzanog iona, odnosno jezgre mete. Za snop iona deuterija i helija-3 na lakim metama, moguće su reakcije i s nižom energijom iona od one opisane relacijom 3.5, ali to za ovaj rad nije potrebno: minimalna energija iona helija-3 za interakciju s jezgrama deuterija je 0.69 MeV, odnosno 2.27 MeV za interakciju s jezgrama berilija, a radilo se s ionima helija-3 ubrzanim na 4 MeV. Kako bi se spriječila detekcija elastično odbijenih iona, ispred detektora se postavlja folija koja usporava (eng. *straggling*) takve ione do iznimno niskih energija, stoga ih detektor ne detektira. Folija usporava i jezgre koje su produkt nuklearnih reakcija, stoga folija ujedno smanjuje i rezoluciju detektora.

Obzirom da je riječ o inelastičnim procesima, masa više nije očuvana te se pretvara u energiju koju označavamo slovom Q . Udarni presjeci nuklearnih reakcija nisu dani analitičkim izrazom, stoga se utvrđuju eksperimentalno za pojedine reakcije na različitim energijama i kutovima. Može ih se pronaći u bazama podataka na mreži, npr. na stranicama Međunarodne agencije za atomsku energiju (odjeljak *Ion beam analysis nuclear data library* - IBANDL [23]).

3.3 PIXE

Prilikom sudara s atomima mete, ubrzani ioni mogu izbiti elektrone. Ukoliko je izbijeni elektron bio u energetski nižoj atomskoj ljusci, njegovo se mjesto popunjavam elektronom iz više ljuske uz emisiju fotona u X dijelu spektra, Augerovih elektrona ili Coster-Kronigovim prijelazima. Svaki element ima nekoliko karakterističnih X-zraka koje emitira prilikom relaksacije, stoga se detekcijom tih zraka može odrediti sastav uzorka ("otisak prsta" svakog elementa se može provjeriti na stranicama NIST-a). Intenzitet detektiranih X-zraka je ovisan o koncentraciji pojedinog elementa te o dubini na kojoj se promatrani atom nalazi u uzorku. Obzirom da su X-zrake posljedica promjena u elektronskom oblaku atoma, PIXE metoda nije pogodna za analizu izotopskog sastava uzorka. Detektori su najčešće poluvodički dopirani nekim elementom, npr. litijem (uobičajene oznake Si(Li)) [24].

Udarni presjek za emisiju X-zraka dan je izrazom:

$$\sigma = \sigma^I * \omega \quad (3.6)$$

gdje je σ^I udarni presjek za ionizaciju elektronskog oblaka, a ω vjerojatnost da se stvorena šupljina popuni elektronom iz više ljuske uz emisiju X-zrake. Ionizacija je posljedica dvaju osnovnih procesa: direktne ionizacije, prilikom koje ubrzani ioni Coulombovim međudjelovanjem izbijaju elektrone iz atoma mete, te uhvata elektrona, gdje ubrzani ioni "preuzimaju" elektrone iz atoma mete. Ovisno o brzini ubrzanih iona i omjeru atomskih brojeva iona i atoma mete, za opis ionizacije se koriste različite teorije (PWBA, PSS, MO...) [24].

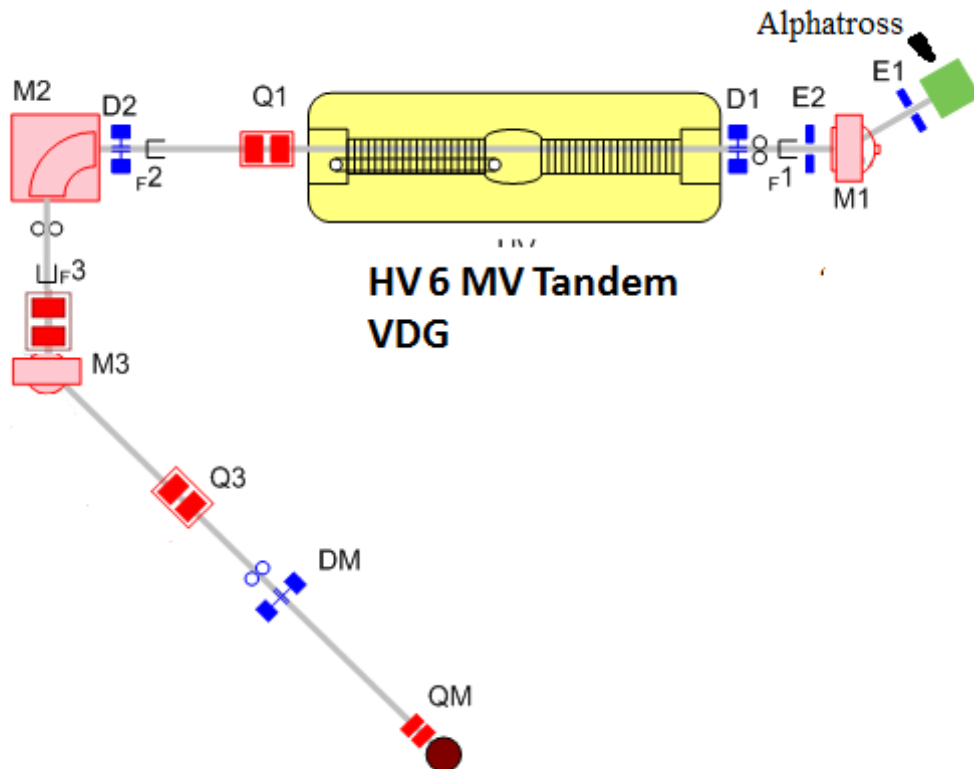
Atenuacija X-zraka na putu od mjesta emisije u uzorku do detektora je posljedica fotoelektričnog i Comptonovog efekta. Intenzitet X-zraka emitiranih na određenoj dubini d (izraženoj u g/cm^2) opisan je izrazom:

$$I = I_0 * e^{(-d \frac{\mu}{\rho})} \quad (3.7)$$

gdje je I_0 intenzitet X-zraka u trenutku emisije, ρ gustoća uzorka, a μ je maseni koeficijent apsorpcije koji se mijenja ovisno o materijalu i energiji (porastom energije, pada vjerojatnost apsorpcije X-zrake, s izuzetkom apsorpcijskih rubova) [24].

4 Eksperimentalni postav

Eksperimentalni postav je prikazan na slici 4.1. Postav se sastoji od ionskog izvora (alphantrossa), HVEC EN Tandem Van de Graaffovog akceleratora, elektrostatskih leća, magnetskih dipola i kvadrupola, analizatorskih magneta te vakuumske komore s uzorkom. Cijeli postav se nalazi u Laboratoriju za interakcije ionskih snopova (LIIS) na Zavodu za eksperimentalnu fiziku Instituta Ruđer Bošković.



Slika 4.1: Prikaz eksperimentalnog postava u LIIS-u.

4.1 Ionski izvor

Prvi u eksperimentalnoj liniji je izvor iona helija, alphantross. U glavnu komoru alphantrossa se upušta plin helija pod visokim tlakom. Ispred glavne komore alphantrossa se nalazi ionizacijska komora ispod koje je grijani spremnik s cezijem. Spremnik s cezijem se grije sve dok potonji ne počne isparavati u ionizacijsku komoru. Plin helija prolazi kroz ionizacijsku komoru gdje preuzima elektrone s elektropozitivnih para cezija. Tako plin helija postaje negativno nabijen te ga počinje privlačiti pozitivno nabijen terminal van de Graaffovog akceleratora. Pri dolasku do pozitivnog terminala

akceleratora, plin ioniziranog helija se lateralno sabija pomoću elektrostatskih leća i magnetskih dipola te ulazi u analizatorski magnet prije ulaza u ionski akcelerator.

Cijela se eksperimentalna linija prvo podešava plinom helija-4 (^4He), a tek potom se u liniji helij-4 mijenja helijem-3 (^3He) zbog izrazito visoke cijene potonjeg. Zamjena izotopa nije odveć komplicirana zbog sličnog rigiditeta helijevih izotopa.

4.2 Akcelerator

Ioni se ubrzavaju HVEC-ovim EN Tandem Van de Graaffovim akceleratorom nominalnog radnog napona 6 MV. Na ulazu u akcelerator se nalazi analizatorski magnet koji je kalibriran za različite negativne ione (H^- , He^- , Li^- , C^- , O^-), a potrebni ionsko-optički parametri se nalaze programom MAG40. Obzirom da se veći intenzitet snopa na izlazu iz akceleratora (veća transmisija) postiže većom energijom iona na ulazu u akcelerator, ionski izvor je u mogućnosti raditi na bitno višim radnim naponima [24].

Nakon ubrzavanja na niske energije, snop negativnih iona ($q = -1$) u središnjem visokonaponskom terminalu akceleratora prolazi kroz tzv. *stripper* kanal. U *stripper* kanalu se naboj iona mijenja iz negativnog u pozitivni, nakon niza sudara s atomima razrijeđenog plina dušika. Pozitivni naboj iona nakon kanala nije jednoznačan ($q = +1, +2, \dots$) jer ima srednju vrijednost ovisnu o energiji negativnog iona prije kanala te o atomskom rednom broju iona i njegovoj atomskoj masi. Vrijednosti naboja oko ravnotežne približno su opisane Gaussovom razdiobom čija širina ovisi o atomskom rednom broju iona. Uz to, nakon ubrzavanja pozitivnih iona u visokoenergijskom dijelu akceleratora, konačna energija iona izražena u MeVima je $q + 1$ puta veća od napona visokonaponskog terminala akceleratora [24].

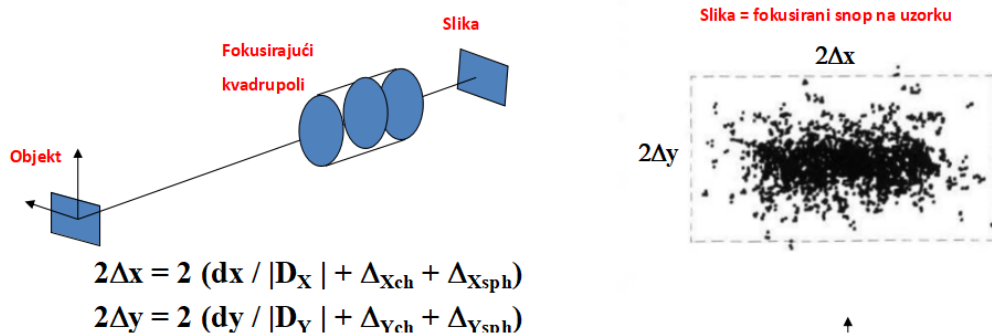
Nakon izlaska iz akceleratora, ionski snop se optimizira uz pomoć elektrostatskih leća te magnetskih dipola i kvadrupola te ulazi u analizatorski magnet koji ubrzane pozitivne ione zakreće za 90° . Kako bi se dobio najveći intenzitet ionskog snopa tražene energije, programom MAG90 se traži najpovoljnija kombinacija naboja iona te ionsko-optičkih parametara elemenata eksperimentalne linije. Program MAG90 je razvijen na temelju semiempiričkih izraza H. D. Betza [25] i B. Delaunayja [26] te tako ugođen snop ima energiju definiranu s točnošću od 0.2%. Selektirani su ioni helija-3 ubrzani do energije od 4 MeVa [24].

4.3 Nuklearna mikroproba

Nuklearna mikroproba je snop iona male struje kojim se skenira uzorak. Najvažniji dio mikroprobe je niz kvadrupolnih leća koji služi za pomicanje i fokusiranje ionskog snopa do submikrometarskih veličina, ovisno o vrsti ubrzanih iona, njihovoj struji i energiji. Jedna kvadrupolna leća snop može stisnuti u jednu ravninu (npr. xz), stoga je za dobivanje točkastog snopa na uzorku potrebno koristiti barem dvije kvadrupolne leće. Polja u kvadrupolima se računalno mijenjaju kako bi ionski snop "skenirao" površinu uzorka. Na taj način se može odrediti koncentracija različitih elemenata na različitim mjestima na uzorku, tj. položaj ionskog snopa na uzorku je jednoznačno povezan sa signalima u detektoru.

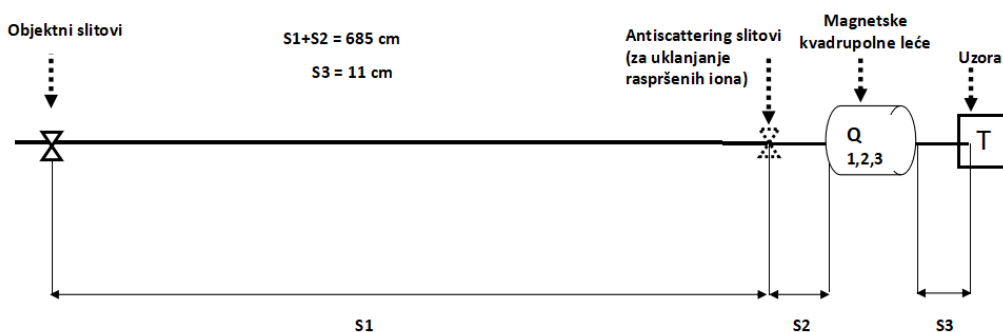
Snop iona fokusira se u nuklearnoj mikroprobi pomoću elemenata ionske optike, tj. magnetnim kvadrupolnim lećama. "Objekt" kod ionske optike u nuklearnoj mikroprobi je definiran pomoću procjepa između objektnih slitova, čija je dimenzija prikazana u formulama uz sliku 4.2 kao dx i dy . Kod nuklearnih mikroproba ključna je što bolja demagnifikacija u obje osi snopa, tj. Dx i Dy . U idealnom slučaju fokusirajući kvadrupoli stvaraju "sliku" na površini uzorka, tj. fokusirani snop iona dimenzija dx/Dx i dy/Dy . Međutim u realnim uvjetima uvijek dolazi do razmazivanja fokusiranog snopa na uzorku čija je konačna dimenzija Δx i Δy . Dva su glavna uzroka razmazivanja točkastog snopa na uzorku: površina poprečnog presjeka snopa po izlasku iz objektnih slitova te energetski i kutni rasap ionskog snopa su prvi uzrok, a aberacije koje na energetski nedefiniranim snopovima uzrokuju kvadrupolne leće, drugi [22]. Površina snopa se može smanjiti jačom demagnifikacijom kvadrupolnih leća, međutim to zahtjeva veća magnetska polja koja nije trivijalno proizvesti i često uzrokuje dodatne aberacije. Obzirom da svaki realni ionski snop nije savršeno definirane energije (energijski rasap snopa je reda veličine 0.1%), različite komponente snopa će se fokusirati u različite točke na uzorku; to je tzv. *kromatska aberacija*. *Sferične aberacije* su posljedica fokusiranja, tj. rubnih uvjeta Laplaceove jednadžbe primijenjene na idealnu leću. To rezultira drugačijim silama na ione koji se gibaju po različitim kutovima u odnosu na os leće. Posljednja je *ekscitacijska aberacija* koja je posljedica blagim "plesanjem" struje u kvadrupolima zbog čega se pomiče i fokus magnetske leće [22].

Nuklearna mikroproba u LIIS-u može raditi s tri ili pet magnetskih kvadrupolnih leća. U eksperimentima opisanim u ovom radu korištene su tri (tzv. triplet konfigu-

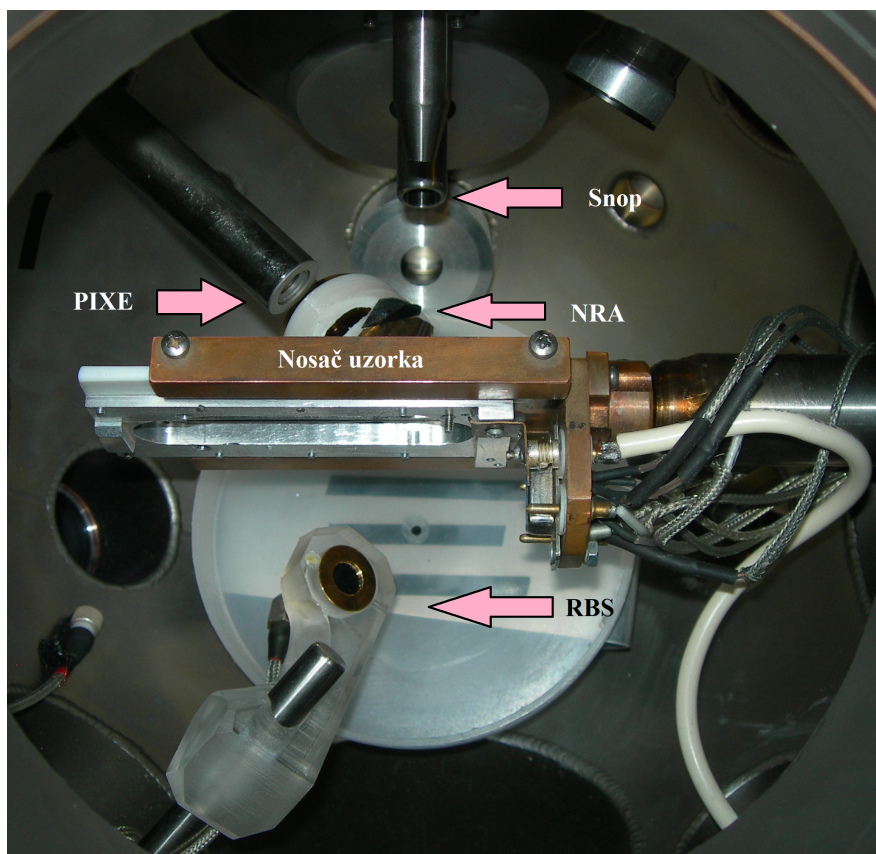


Slika 4.2: Prikaz utjecaja aberacija na konačnu sliku. Δ_{sph} i Δ_{ch} su, redom, sferična i kromatska aberacija, a D je demagnifikacija. Indeksi X i Y označavaju os na koju se određena veličina odnosi.

racija). Polja u kvadrupolima se računalno mijenjaju kako bi ionski snop "skenirao" površinu uzorka. Najmanja duljina koju u idealnim uvjetima mikroproba u LIIS-u može razlučiti je 250 nm. U analizi čestica fuzijske prašine snop iona ^3He energije 4 MeVa bio je fokusiran na promjer $5 \mu\text{m}$. Struja iona dostupna u LIIS-u varira od nekoliko stotina fA do nekoliko nA [27], a u ovome radu je struja iona ^3He energije 4 MeVa bila nekoliko stotina pA. Naime, treba imati u vidu da bolja prostorna razlučivost nuklearne mikroprobe znači uži procjep na objektnim slitovima mikroprobe, odnosno manju struju iona na analiziranom uzorku. Budući su očekivane vrlo male koncentracije elemenata od interesa u česticama fuzijske prašine, izabrana je veća struja iona ^3He energije 4 MeVa unatoč nešto lošijoj prostornoj razlučivosti nuklearne mikroprobe. Na slici 4.3 vidimo relevantne udaljenosti na mikroprobi u LIIS-u.



Slika 4.3: Osnovne udaljenosti na mikroprobi u LIIS-u.



Slika 4.4: Komora s postavljenim detektorima i nosačem uzorka.

4.4 Komora

U komoru su postavljeni PIXE i NRA detektori te nosač uzorka s Faradayevom čašicom i uzorcima za analizu iza kojeg se nalazio RBS detektor. Komora je evakuirana do tlaka od 10^{-6} mbara (10^{-4} Pa), prvo mehaničkom te potom turbomolekularnom pumpom. Nosač uzorka je smješten na pomičnu metalnu šipku kojom se moglo namještati područje ozračivanja. Unutar komore je također smješten izvor svjetlosti te kamera s mikroskopom kojom se može promatrati područje ozračivanja uzorka. Komora je vidljiva na slici 4.4.

4.4.1 Detektori

U vakuumskoj komori su postavljeni silicijevi detektori za analitičke metode NRA i PIXE. Oba detektora su postavljena pod kutom od 135° .

PIXE detektor je od silicija dopiranog litijem (Si(Li)), aktivne površine 30 mm^2 , ispred kojeg je berilijski prozor debljine $12.5 \text{ }\mu\text{m}$. Prostorni kut PIXE detektora je u prethodnim eksperimentima određen te iznosi 0.0176 steradijana.

Za nuklearne reakcije je korišten ORTECov silicijev detektor s površinskom barijerom (eng. *silicon surface barrier detector*, SSB detector) BA-022-300-2000. Područje osiromašenja detektora je minimalno 2000 μm , aktivna površina 300 mm^2 (keramičkom maskom je aktivna površina sužena na 230 mm^2 radi bolje definicije kutova). Ispred detektora su postavljene dvije folije: prva od mylara ($\text{H}_{0.364}\text{C}_{0.455}\text{O}_{0.181}$) debljine 12.5 μm i druga od titanija debljine 9 μm . Te folije apsorbiraju gotovo sve ione helija-3 iz snopa koji se odbiju od mete. Prostorni kut RBS/NRA detektora procijenjen je na 343 mSr, a precizno je određen putem analize standarda.

4.4.2 Nosač uzoraka

Na nosač uzorka su montirani kvarcni kristal, bakrena mrežica te nosači s prašinom.

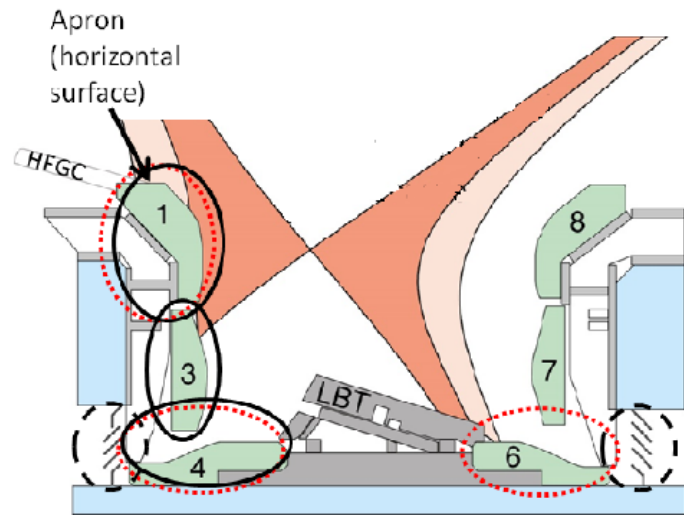
Kvarcni kristal služi kako bi se podesio fokus ionskog snopa kojim se tuče o uzorak. Fokusiraniji snop pada na manju površinu uzorka te time omogućava veću prostornu preciznost mjerenja. Bakrenom mrežicom se provjerava razlučivost ionske mikroprobe, tj. cilj je dobiti što oštrij slika bakrene mrežice skeniranjem fokusiranih iona preko nje i detektiranjem emitiranih X-zraka u PIXE detektoru. Korištena je fina bakrena mrežica, s periodom $\approx 25 \mu\text{m}$, te je skenirano područje procijenjeno na otprilike 250 x 250 μm^2 .



Slika 4.5: Čestice prašine iz JET-a na nosačima (stubovima).

Analizirani uzorci čestica prašine iz tokamaka JET su u LIIS pristigli u višestruko zaštićenom hermetički zatvorenom paketu zbog toksičnosti i reaktivnosti elementarnog berilija. U najdubljem sloju paketa su se nalazile dvije plastične ampule od kojih svaka sadrži po jedan nosač s ugljičnom ljepljivom trakom (eng. *carbon tape*) kojom su prikupljene čestice prašine s različitih ploča iz tokamaka. Na slici 4.5 lijevo je

nosač broj 14, a desno nosač broj 4. Nosač broj 4 je na sebi imao čestice prašine s donjeg dijela ploče broj 3 (okomiti dio divertora s unutarnje strane reaktorske komore), a nosač broj 14 čestice prašine s ploče broj 6 (dno vanjske strane divertora), v. sliku 4.6.



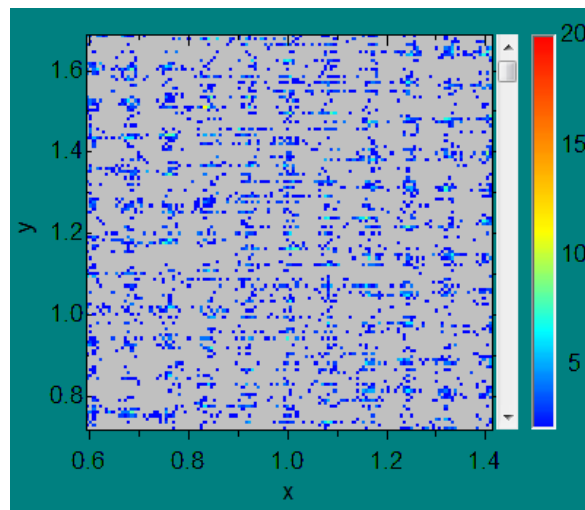
Slika 4.6: Porijeklo analiziranih čestica prašine iz JET-a. Narančasta boja prikazuje plazmu, a roza površinski sloj plazme s nečistoćama nastalim međudjelovanjem sa stijenjkama reaktorske komore (eng. *scrape-off layer*, SOL). Preuzeto iz [28].

5 Rezultati

Čestice fuzijske prašine na nosačima uzoraka od ljepljive ugljične trake ozračivane su skenirajućim snopom iona ^3He energije 4 MeVa, fokusiranim na oko $5\ \mu\text{m}$, te su emitirane X-zrake i produkti nuklearnih reakcija prikupljeni odgovarajućim detektorima. Svaka čestica fuzijske prašine fotografirana je pod mikroskopom prije analize. Svi podaci dobiveni mjerenjima su obrađeni programima SIMNRA (v. 6.06), za NRA i RBS spektre, i GUPIXWIN (v. 2.2.0), za PIXE spektre, kako bi se dobile koncentracije pojedinih elemenata u određenim dijelovima uzoraka. Prvo su obrađeni standardi poznatih kemijskih sastava kako bi se kalibriralo programe, odredilo površinu skeniranog područja i odredilo prostorni kut NRA/RBS detektora, a potom se prešlo na čestice fuzijske prašine. Prilikom mjerenja za određivanje prostornog kuta NRA/RBS detektora skinute su folije od titanija i mylara koje su se nalazile ispred detektora.

5.1 Procjena skenirane površine

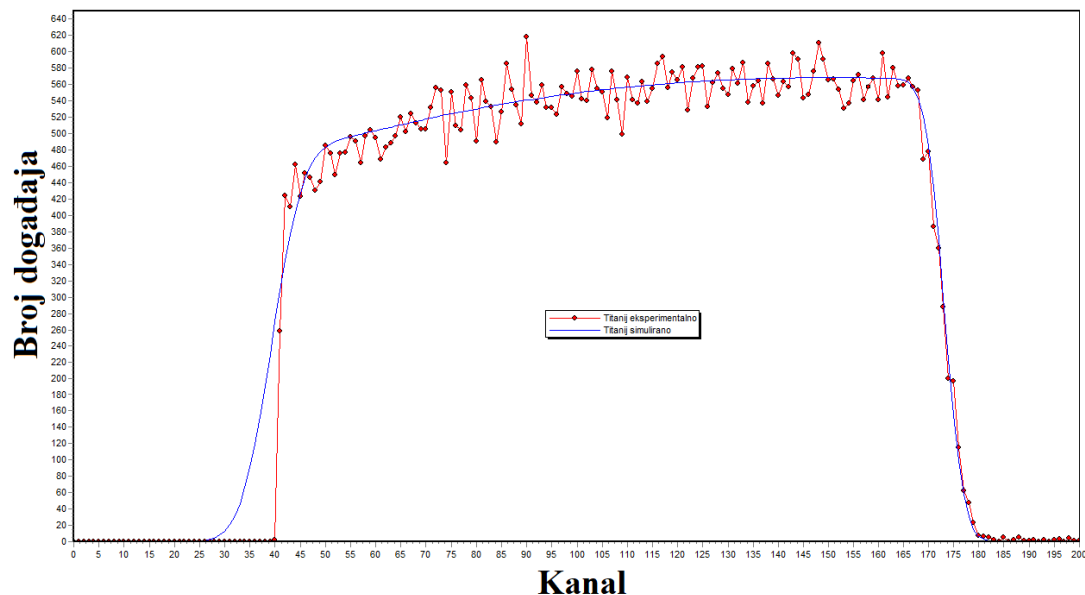
Fina bakrena mrežica, s periodom $\approx 25\ \mu\text{m}$, je analizirana prva. Vidi se mreža s 10×10 kvadratnih polja iz čega se skenirano područje procjenjuje na otprilike $250 \times 250\ \mu\text{m}^2$.



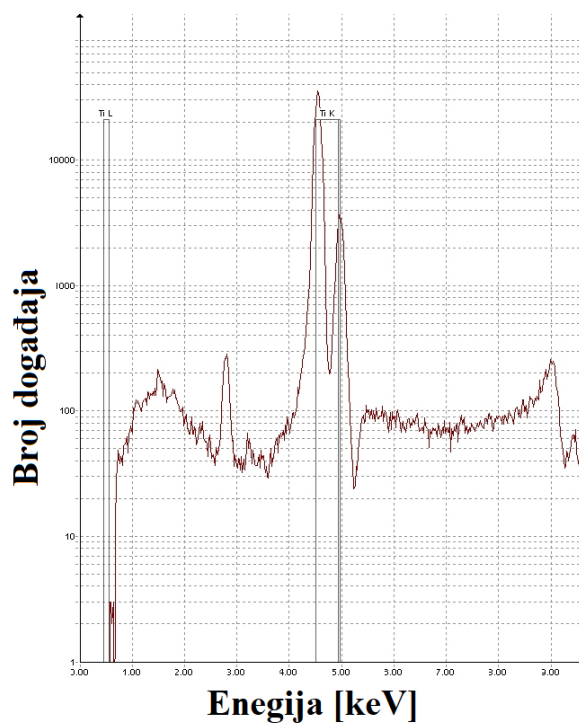
Slika 5.1: Rezultati kratkog skeniranja nuklearnom mikroprobom po bakrenoj mrežici [29].

5.2 Određivanje prostornog kuta NRA/RBS detektora

5.2.1 Debeli folija titanija



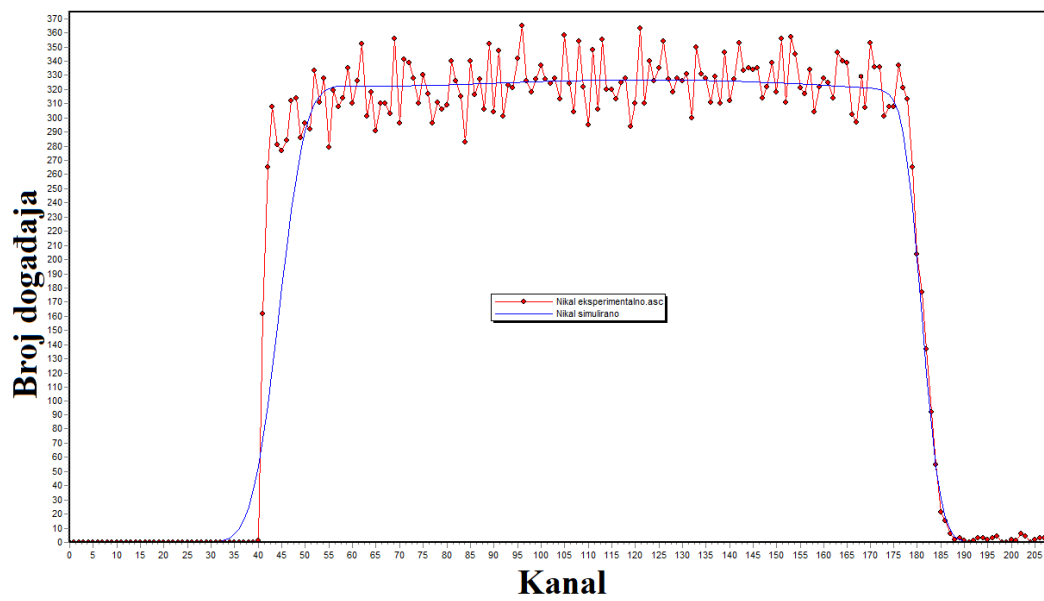
Slika 5.2: RBS spektar debele folije od titanija.



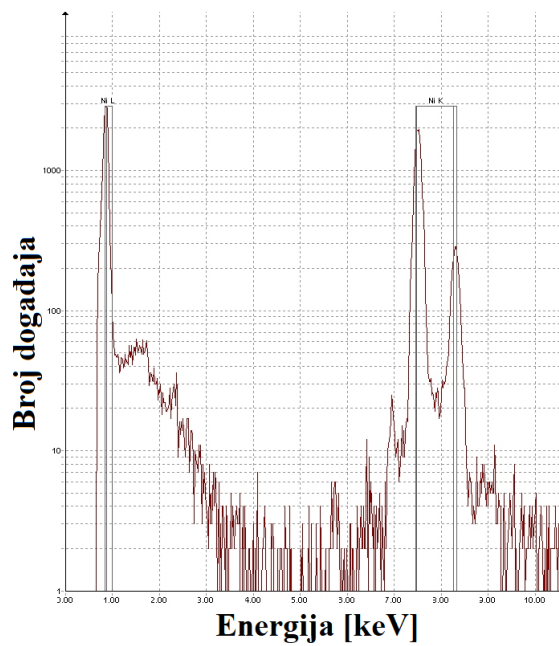
Slika 5.3: PIXE spektar debele folije od titanija.

Debljina folije od titanija je dobivena fitanjem na eksperimentalne podatke i iznosi $3.537 \mu\text{m}$.

5.2.2 Debeli folija nikla



Slika 5.4: RBS spektar debele folije od nikla.



Slika 5.5: PIXE spektar debele folije od nikla.

Debljina folije od nikla je dobivena fitanjem na eksperimentalne podatke i iznosi $2.129 \mu\text{m}$.

Prostorni kut NRA/RBS detektora računa se i pomoću PIXE spektra jer je mjerenje naboja Faradayevom čašicom nepouzđano zbog emisije sekundarnih elektrona. Prvo se u programskom paketu GUPIXWIN fitao naboj dok se koncentracija elementa od kojeg je sačinjena folija ne bi pribrižila 100% (čistoća nije savršena). Iz dobivenog naboja bi se potom izračunao broj elementarnih naboja. Sljedeći korak je fitanje simuliranog spektra na eksperimentalne podatke u programskom paketu SIMNRA. Fitiranje bi dalo umnožak broja čestica i prostornog kuta te se na koncu, iz poznatog broja čestica i spomenutog umnoška, izračunao prostorni kut NRA/RBS detektora.

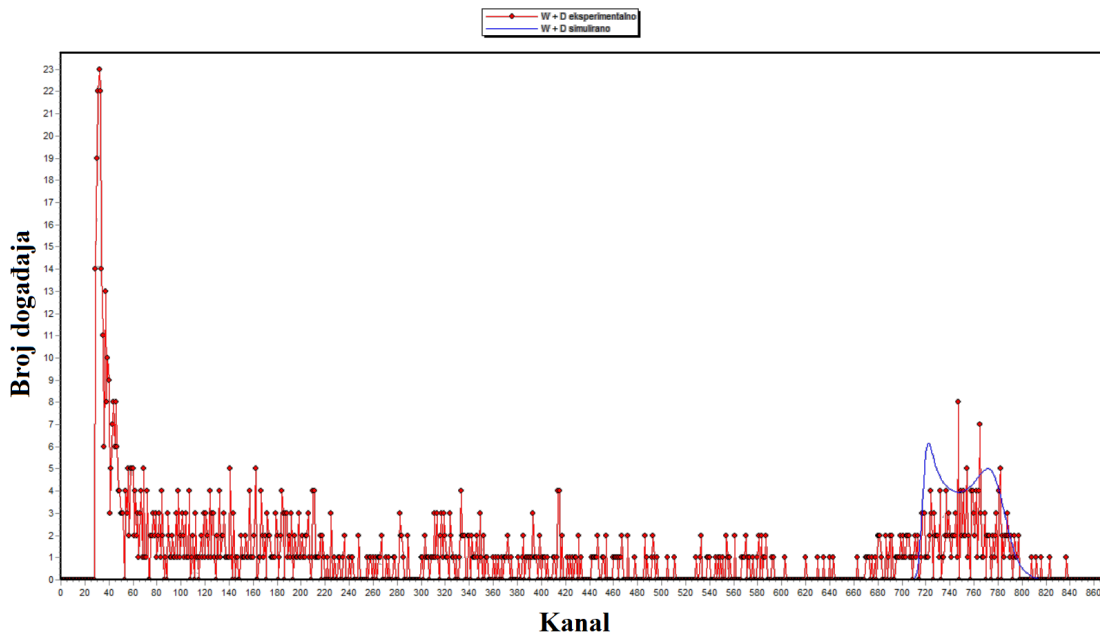
Prostorni kut NRA/RBS detektora je određen kao srednja vrijednost rezultata za obje debele folije te iznosi (0.485 ± 0.003) sr.

5.3 Kalibriranje kanala

Iz uzorka poznatog sastava (otprilike 99% volframa i 1% deuterija), kalibriran je program SIMNRA. Vidimo da će se signal deuterija nalaziti između 660. i 820. kanala. Energija (u keVima) se dobiva iz broja kanala kao:

$$E[keV] = 16.6 \frac{keV}{kanal} * x - 4.3keV \quad (5.1)$$

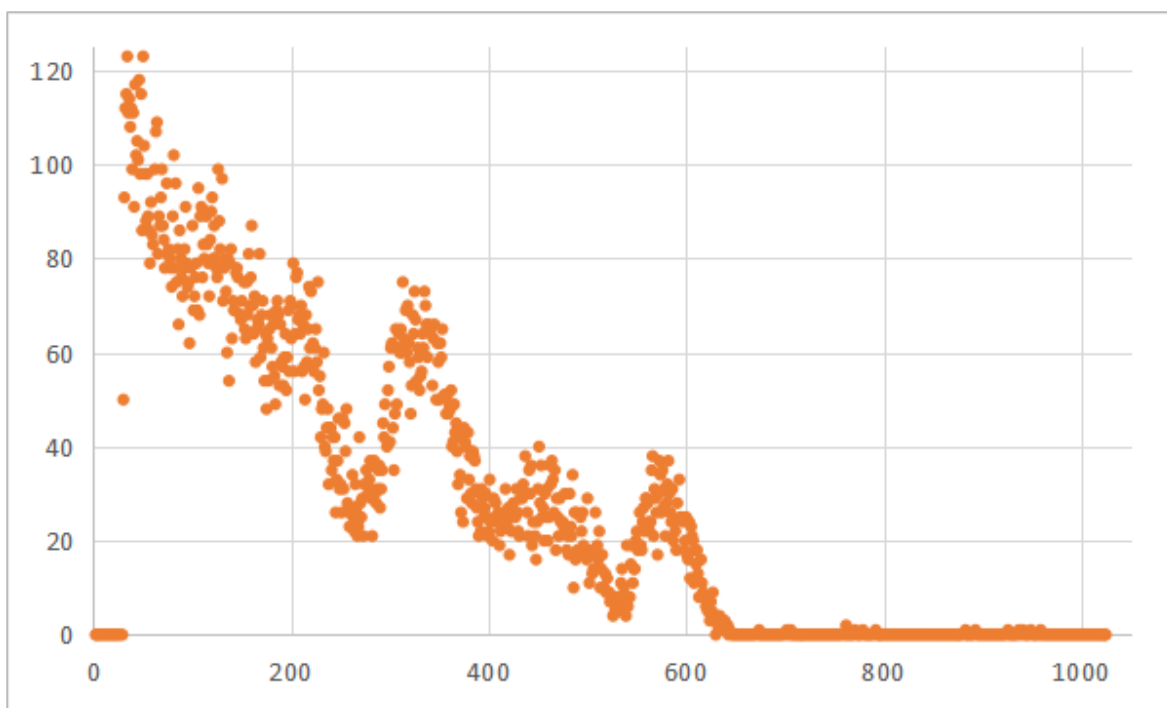
gdje je x broj kanala. U daljnjoj obradi podataka će vrijednosti koeficijenata blago fluktuirati zbog temporalne nestabilnosti napona i struje u mjernim instrumentima.



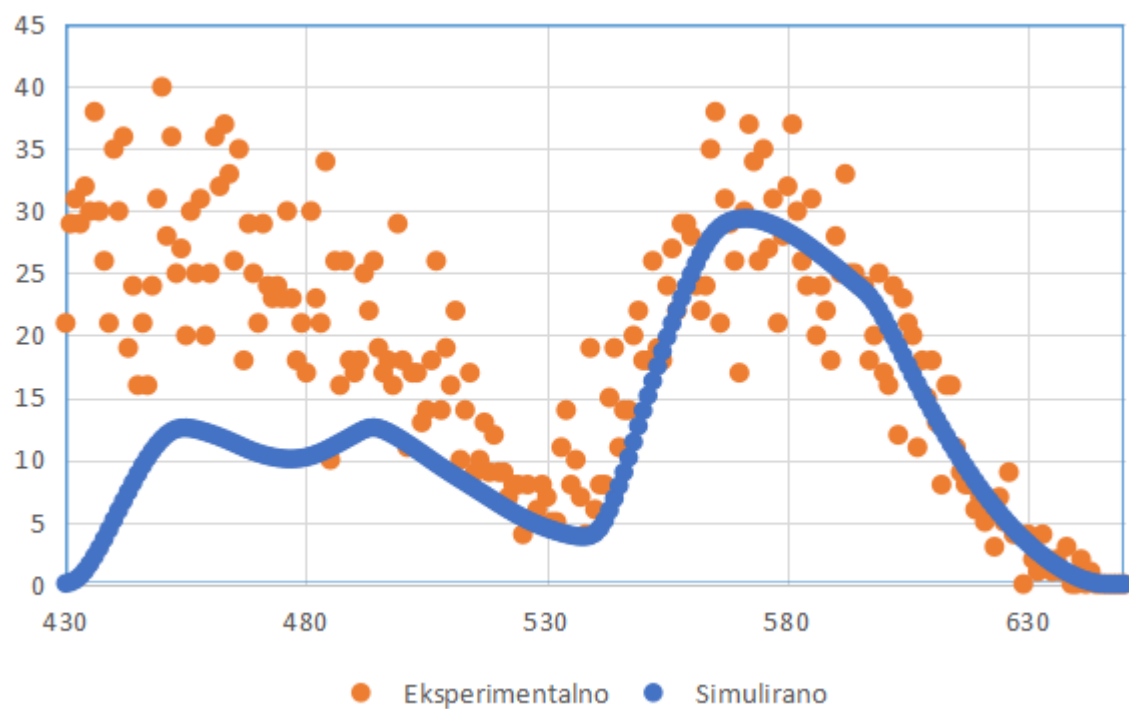
Slika 5.6: NRA spektar deuterija na volframu.

5.4 Čestice iz JET-a

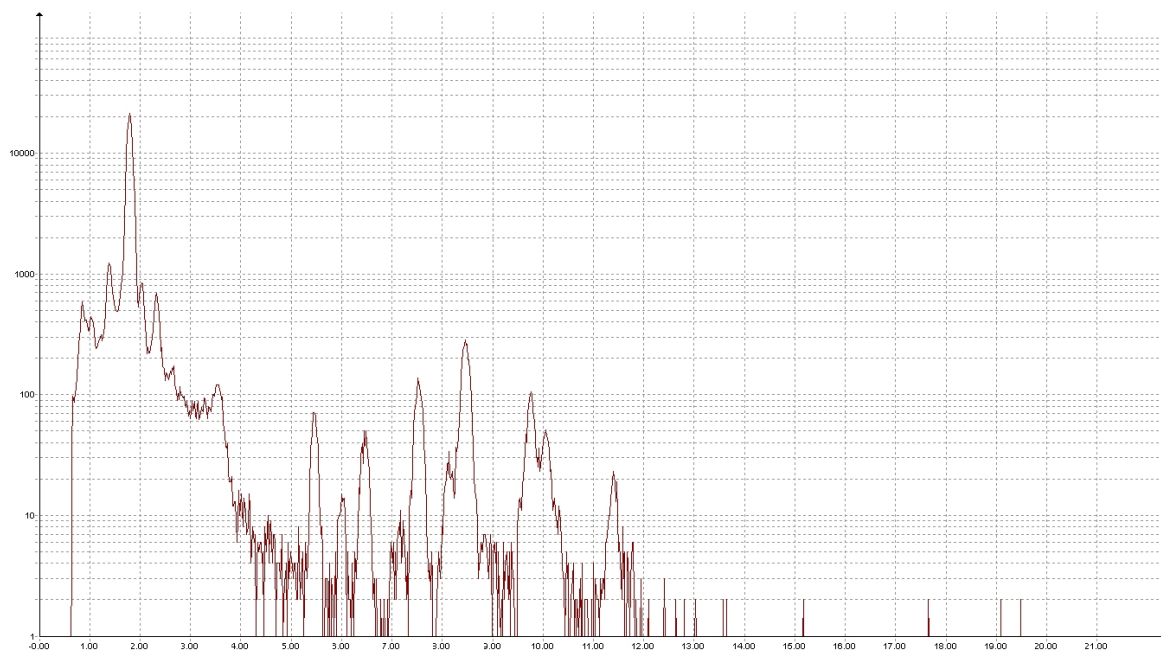
5.4.1 Čestica 163



Slika 5.7: NRA spektar čestice 163.

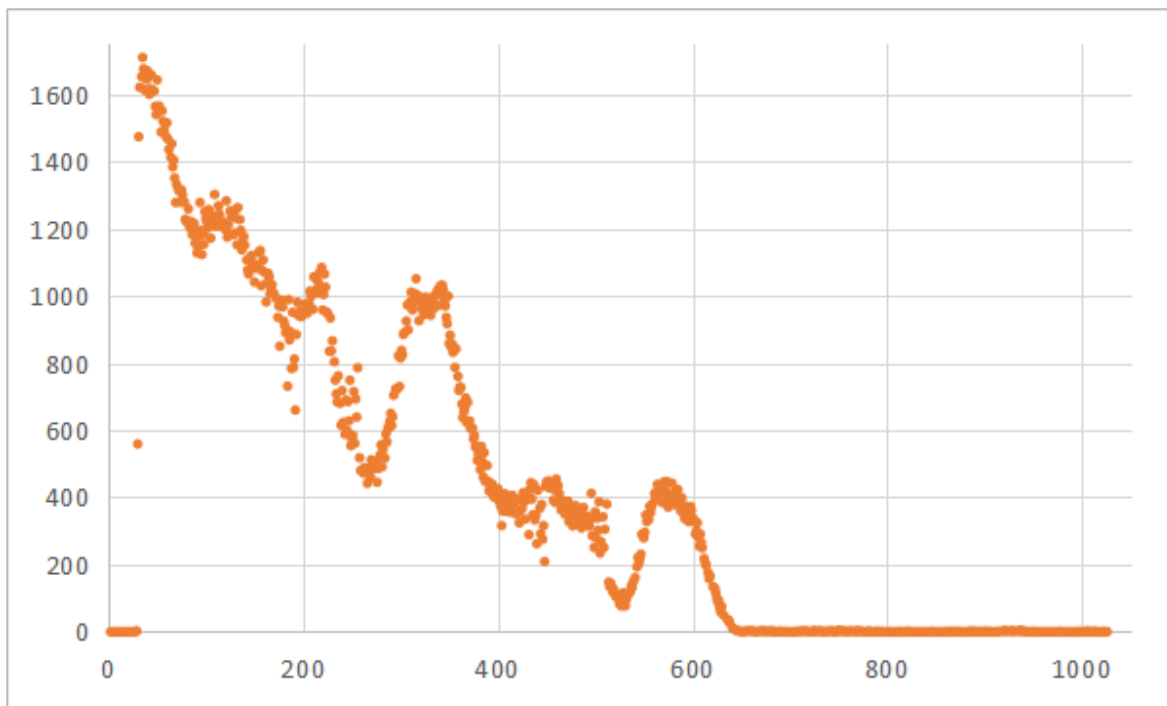


Slika 5.8: NRA spektar čestice 163 - područje interesa.

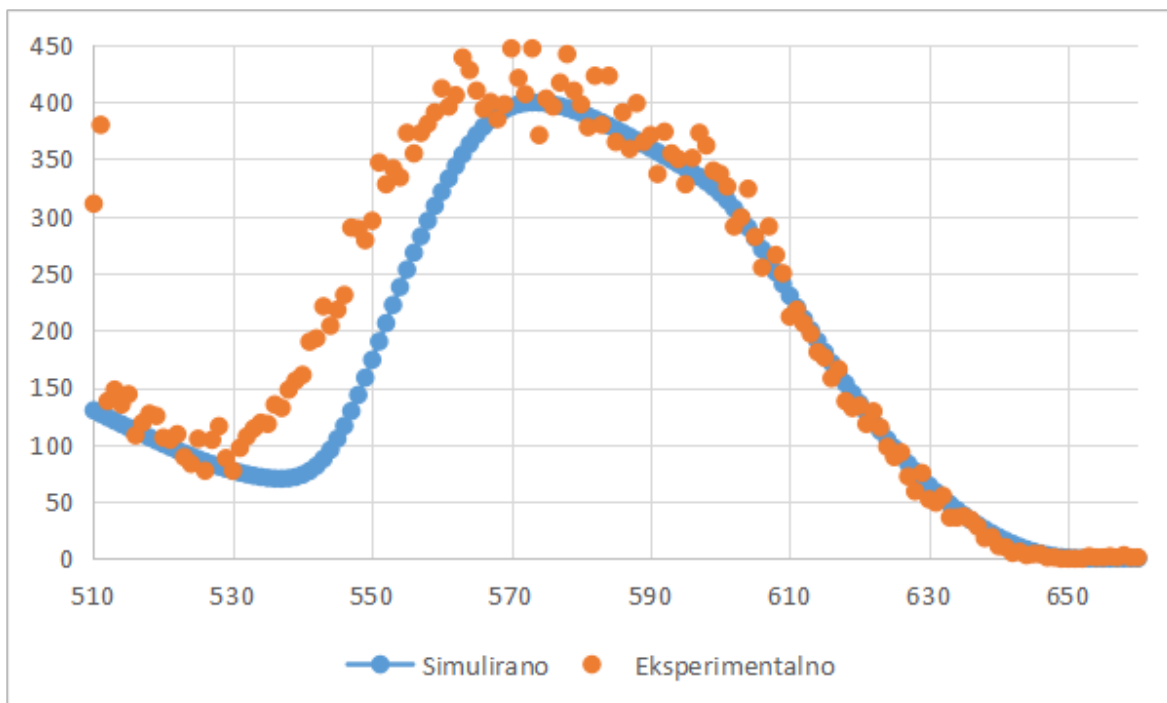


Slika 5.9: PIXE spektar čestice 163.

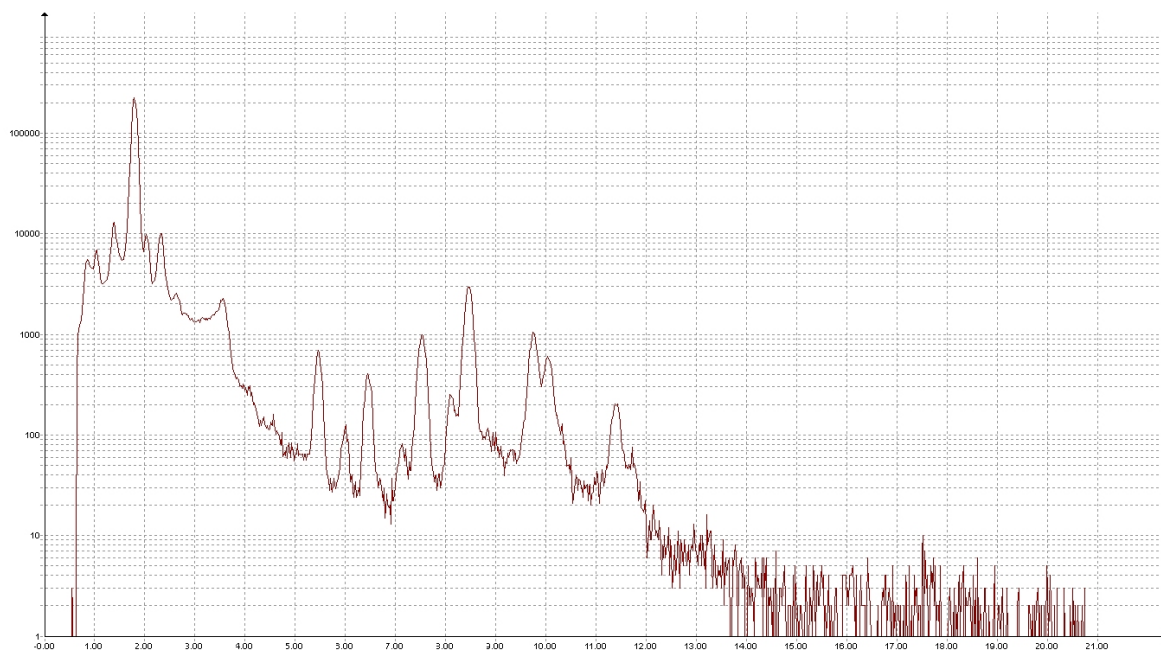
5.4.2 Čestica 166



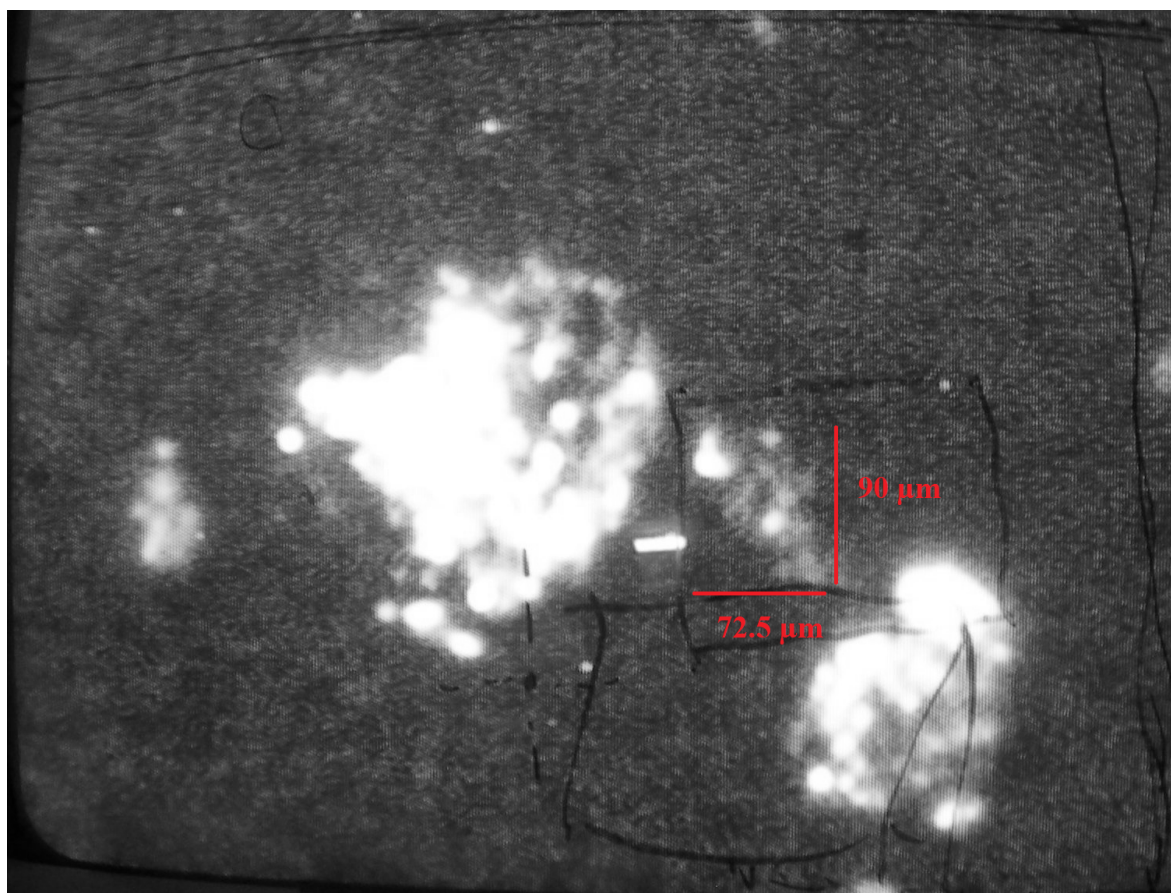
Slika 5.10: NRA spektar čestice 166.



Slika 5.11: NRA spektar čestice 166 - područje interesa.

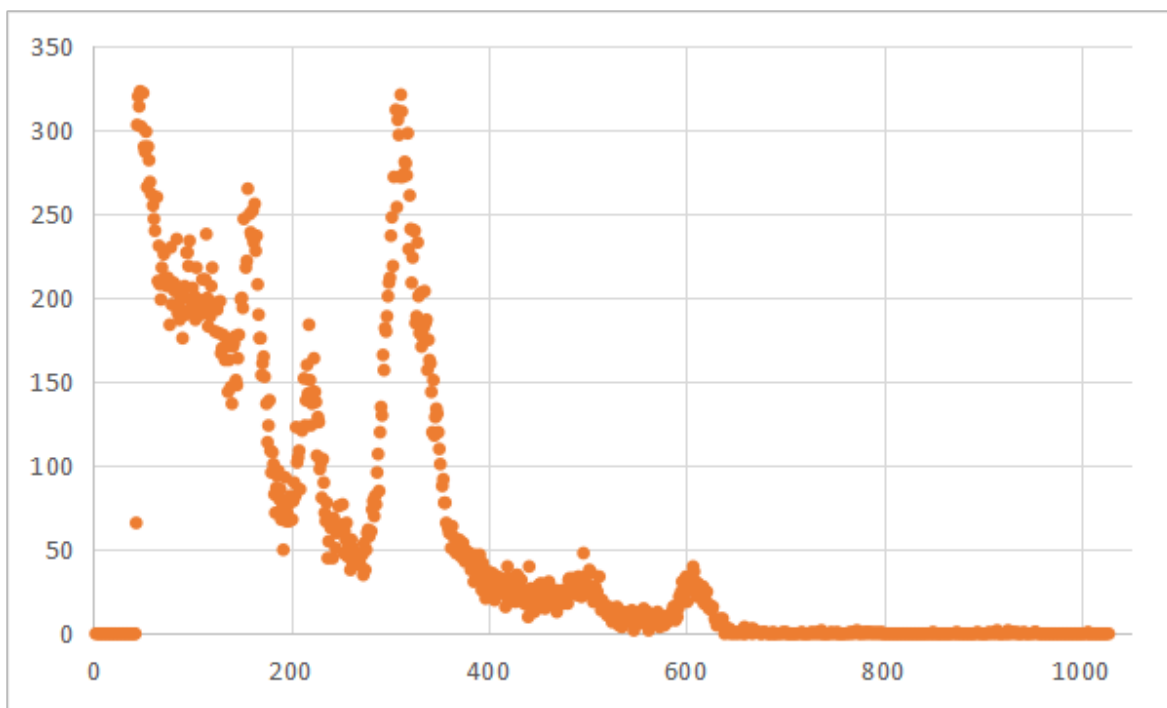


Slika 5.12: PIXE spektar čestice 166.

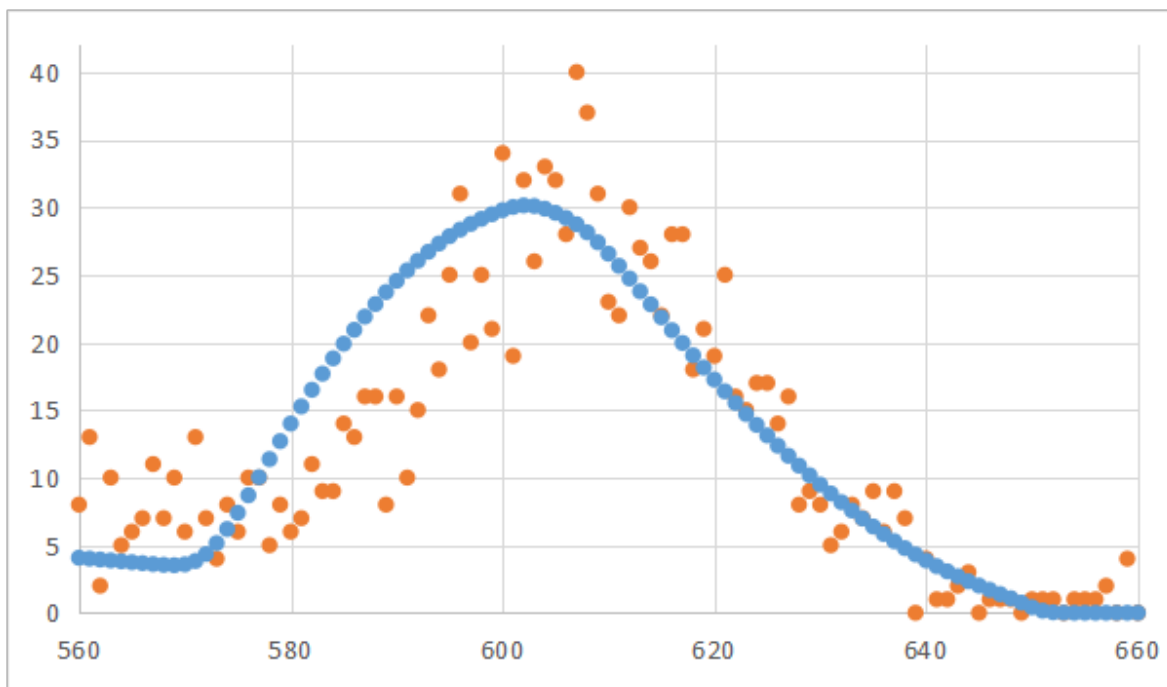


Slika 5.13: Čestica 166 slikana na mikroskopu. Procjena veličine čestice je dana u crvenom.

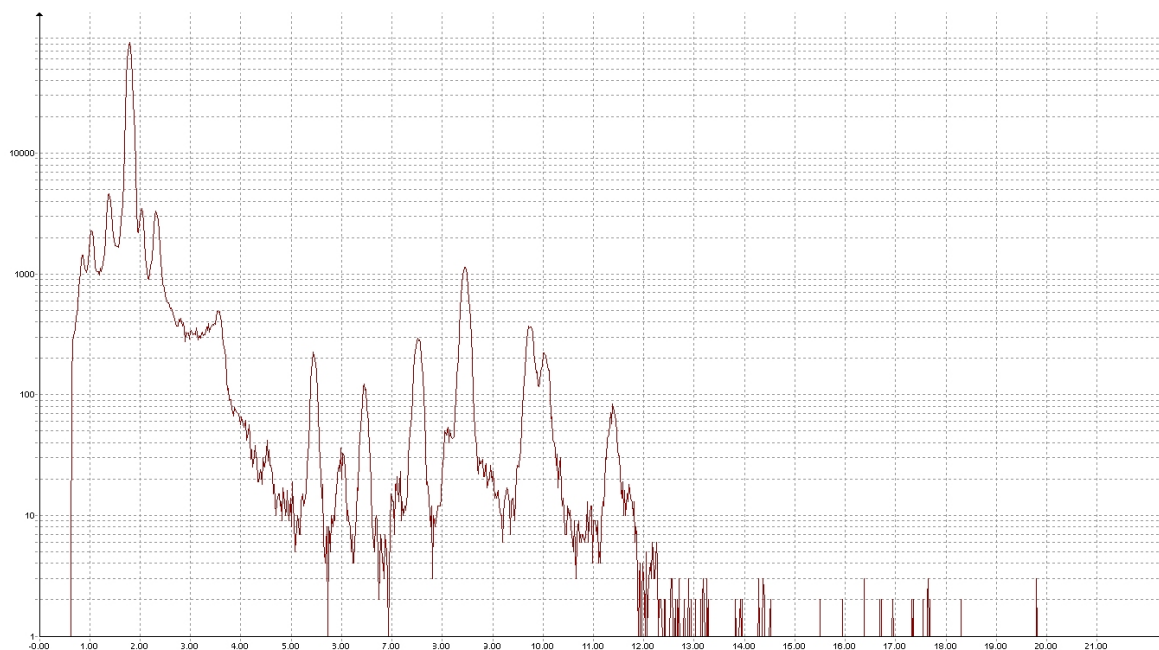
5.4.3 Čestica 177



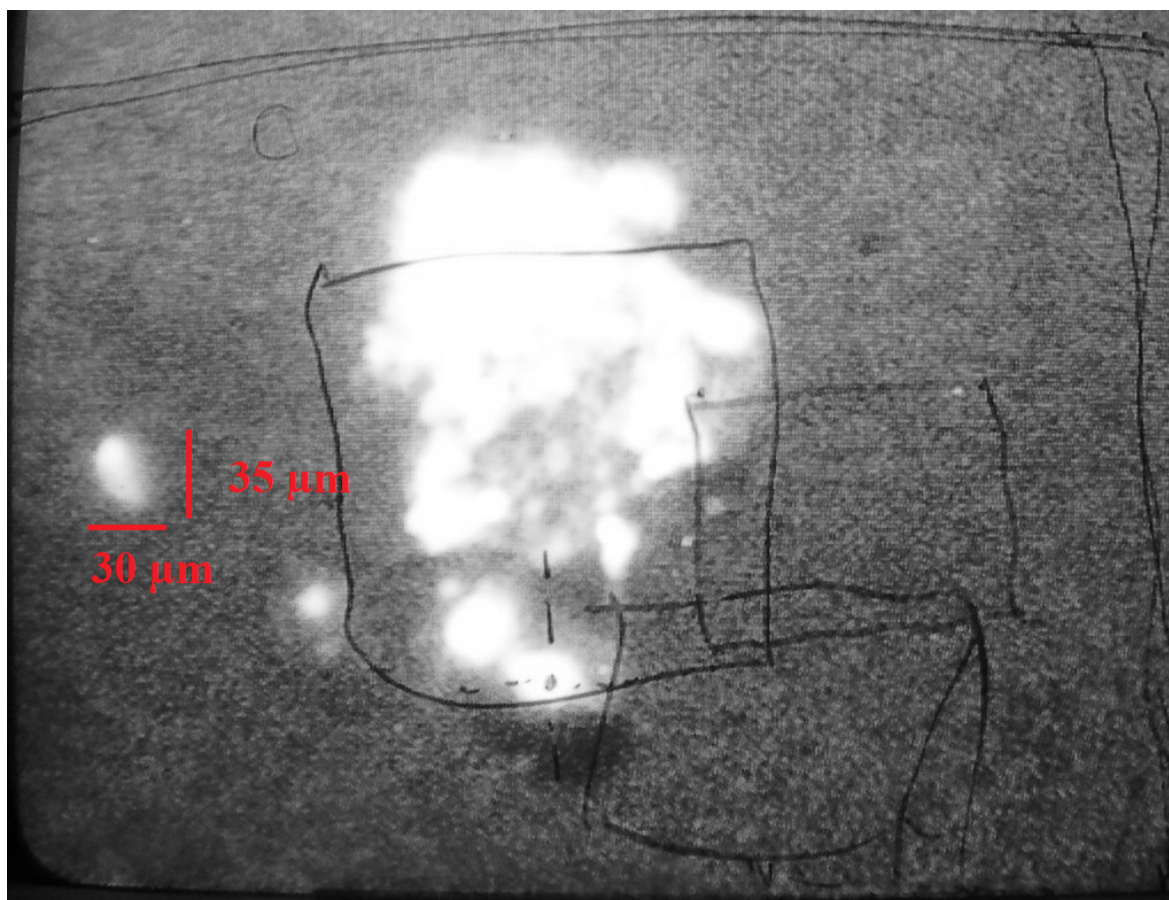
Slika 5.14: NRA spektar čestice 177.



Slika 5.15: NRA spektar čestice 177 - područje interesa.

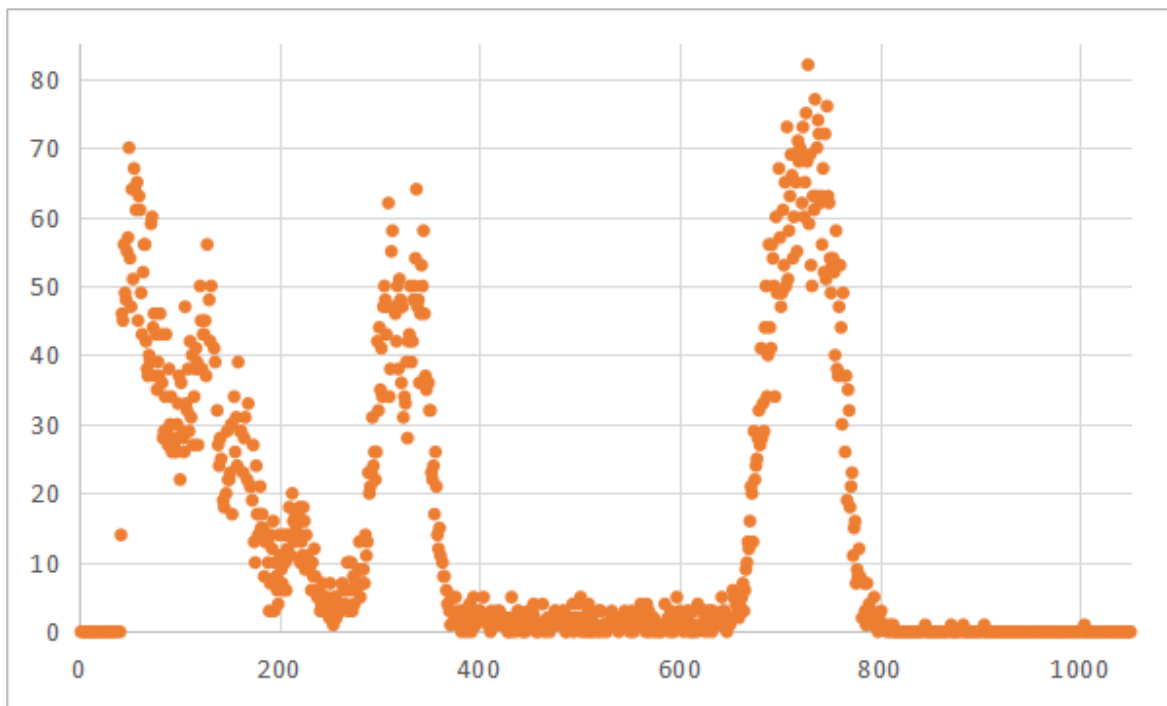


Slika 5.16: PIXE spektar čestice 177.

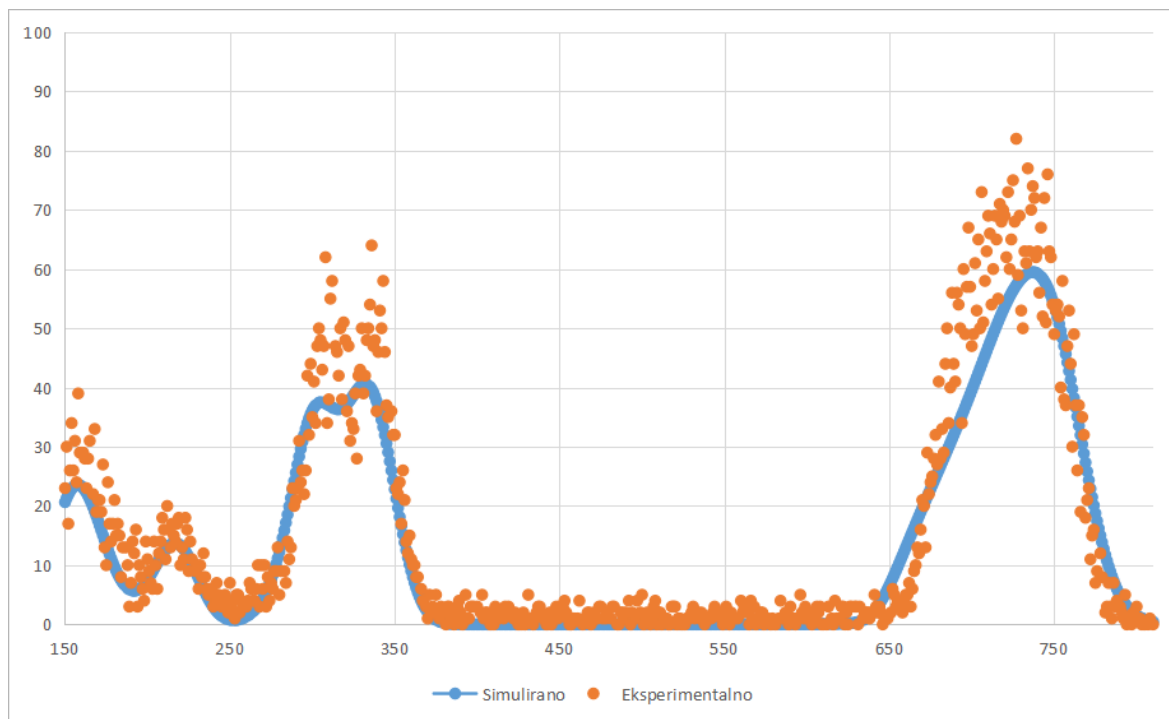


Slika 5.17: Čestica 177 slikana na mikroskopu. Procjena veličine čestice je dana u crvenom.

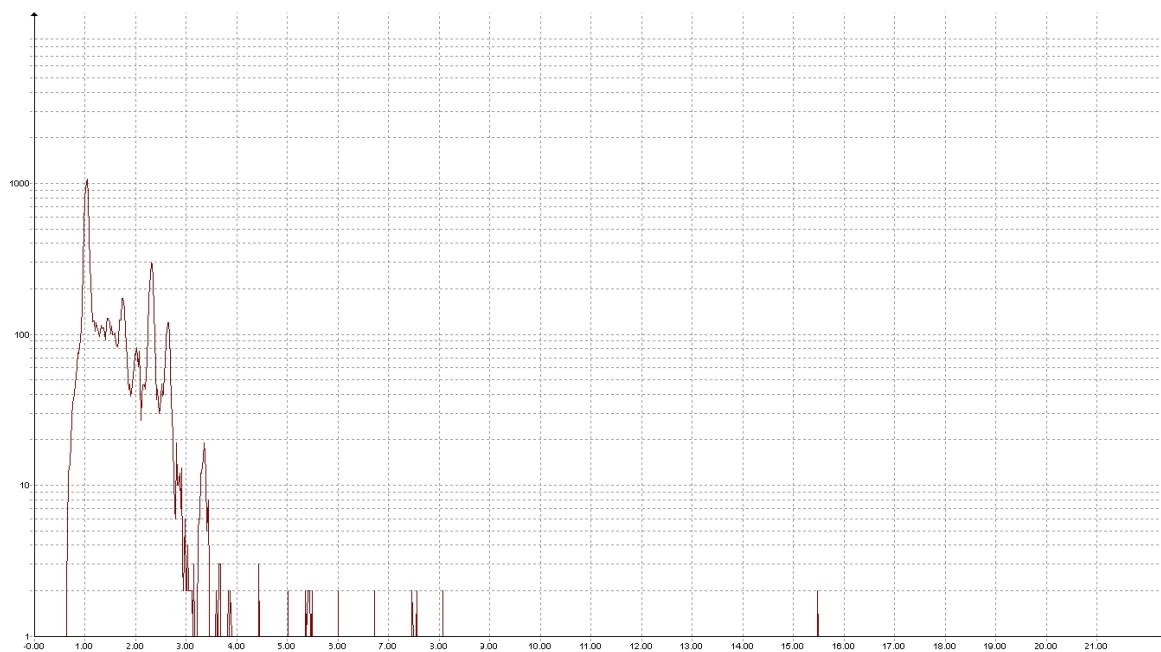
5.4.4 Čestica 180



Slika 5.18: NRA spektar čestice 180.

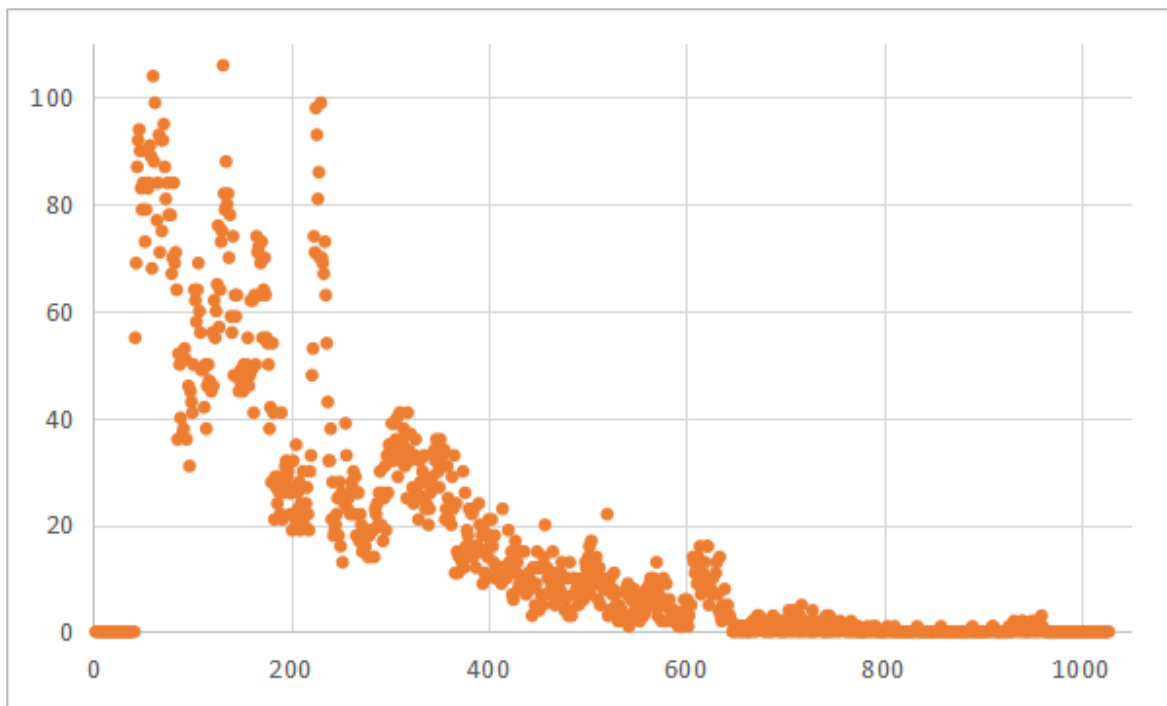


Slika 5.19: NRA spektar čestice 180 - područje interesa.

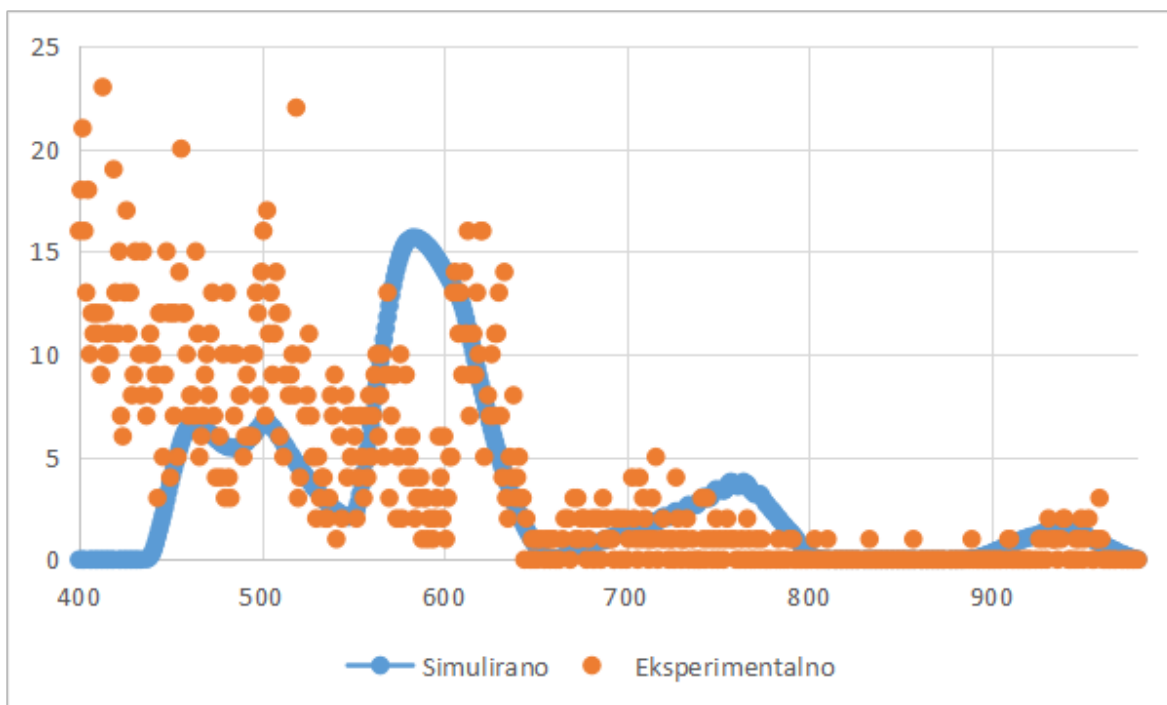


Slika 5.20: PIXE spektar čestice 180.

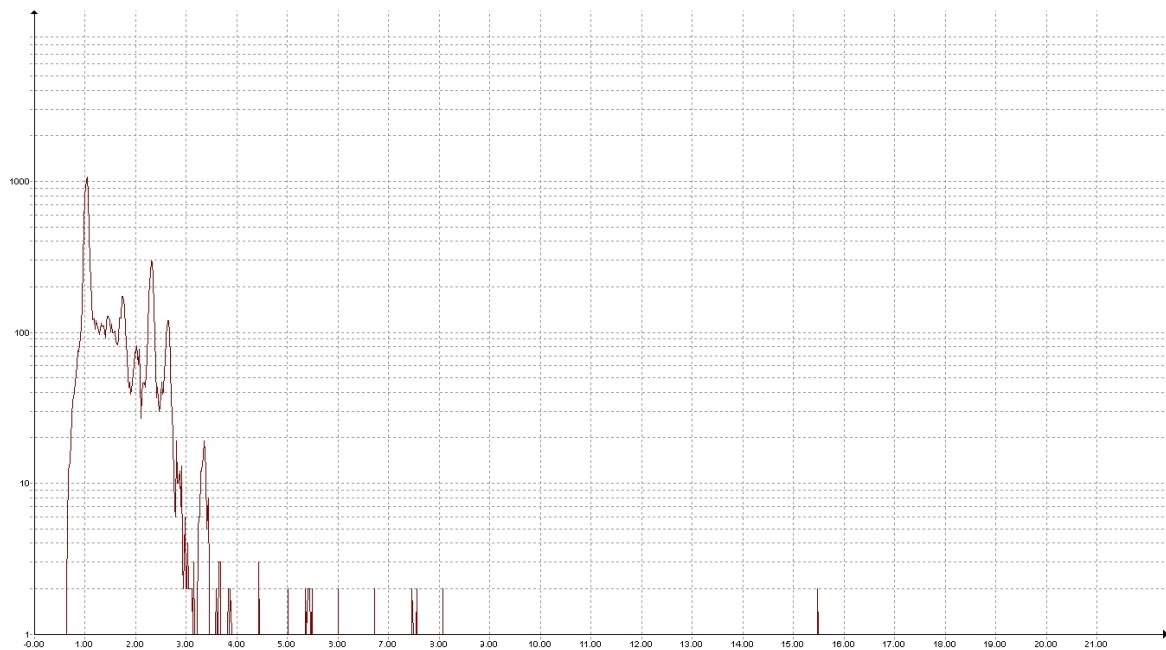
5.4.5 Čestica 194



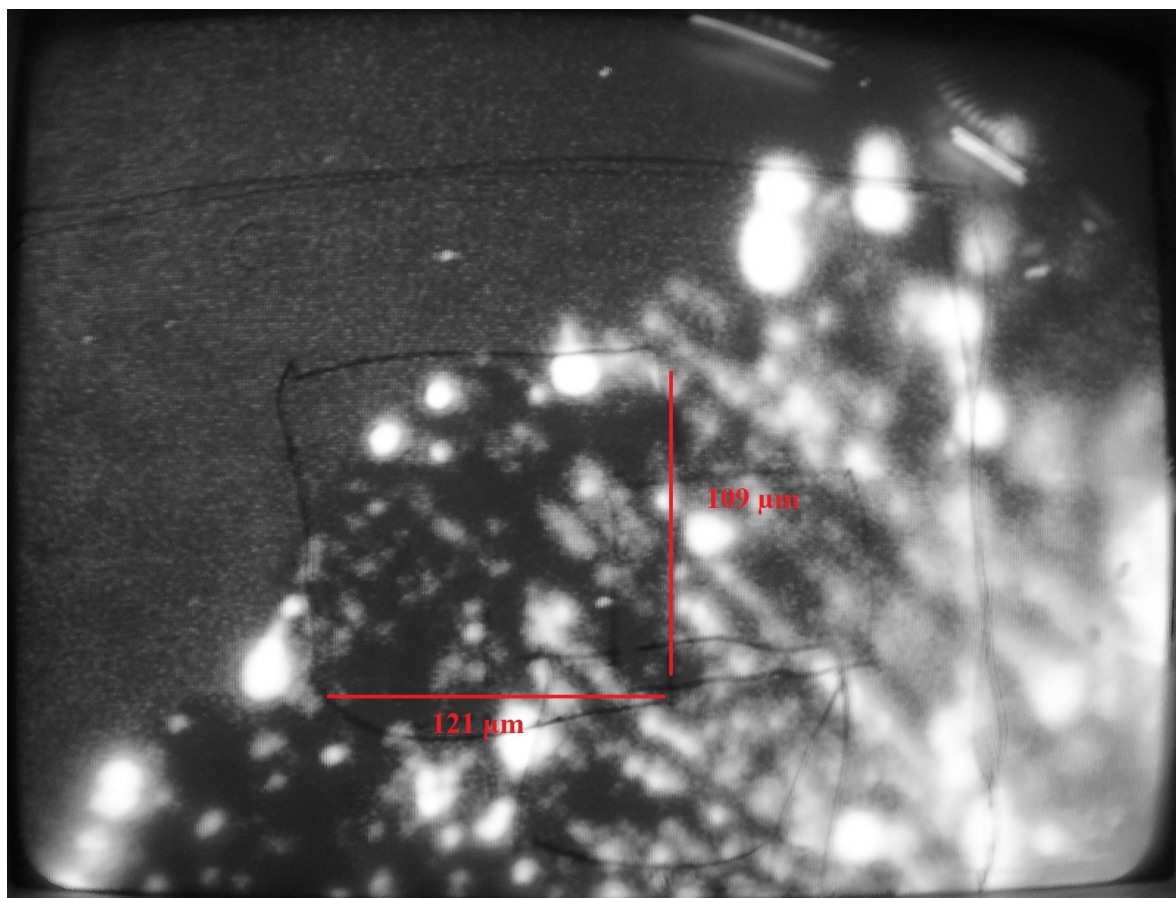
Slika 5.21: NRA spektar čestice 194.



Slika 5.22: NRA spektar čestice 194 - područje interesa.

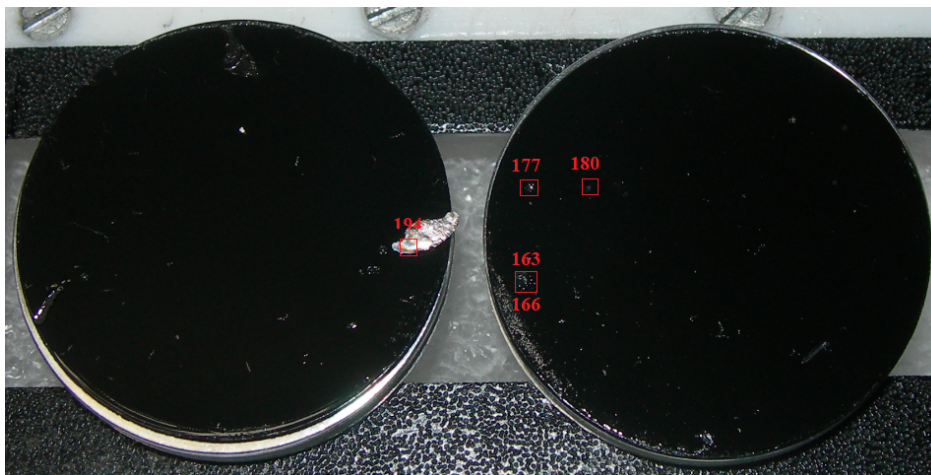


Slika 5.23: PIXE spektar čestice 194.



Slika 5.24: Čestica 194 slikana na mikroskopu. Procjena veličine čestice je dana u crvenom.

5.5 Pregled rezultata



Slika 5.25: Položaji analiziranih čestica.

Obzirom na nemogućnost preciznog mjerenja naboja s uzorka, NRA i PIXE spektri su obrađeni semikvantitativno, iterativnom analizom programskim paketima SIMNRA i GUPIXWIN. Prvo je gruba procjena težinskih udjela težih elemenata dobivena uz neki naboj u GUPIXWIN-u te je potom taj udio pretvoren u atomski i uz isti naboj postavljen u SIMNRA (v. dodatak A). Nakon toga se u SIMNRA prilagođava atomski udio lakših elemenata i fita se naboj koji se pak onda postavlja kao novi početni naboj u GUPIXWIN-u. Ovaj postupak je ponavljan dok varijacija težinskih koncentracija ne bi postala manja od 1%.

Zbog zadane neodređenosti u kutu NRA detektora (na detektor mogu upasti i produkti nuklearnih reakcija koji nisu usmjereni samo pod 135° , već $\pm 16^\circ$, v. dodatak B), prilikom analize u programskom paketu SIMNRA su za svaku česticu simulirani udarni presjeci pod kutovima od 117° do 154° te je kao konačan rezultat uzet zbroj svih simulacija, uz pridavanje određenog težinskog faktora određenog geometrijom svakoj simulaciji (detaljniji opis u dodatku C). Na taj je način dobiven NRA spektar svake čestice. Nuklearne reakcije korištene pri analizi u programskom paketu SIMNRA navedene su u dodatku D.

Od mnogih čestica prašine koje su analizirane, odabrane su tri tipične po sastavu (163, 166 i 177) čestice te dvije "egzotične" (180 i 194). Njihovi položaji na nosačima uzoraka označeni su na slici 5.25.

	163	166	177	180	194
D		0.01%		3.61%	?
Be	56.38%	38.43%	?		?
C				94.15%	
N		10.03%			?
Na				1.97%	
Si				0.03%	
P				0.01%	
S				0.13%	
Cl				0.07%	
K				0.02%	
Ti					0.73%
Cr	0.67%	0.62%	1.58%		19.03%
Fe	0.71%	0.68%	1.27%		14.22%
Ni	3.46%	2.82%	4.60%		55.32%
W	38.78%	47.45%	92.55%		
Nb					4.91%
Mo					5.79%

Tablica 5.1: Elementarni sastav analiziranih čestica dan po težinskim udjelima pojedinih elemenata.

Vidljivo je u tablici 5.1 da se čestica 163 sastoji pretežito od berilija (56.38%) i volframa (38.78%), uz nikel kao treći najzastupljeniji element te tragove željeza (0.71%) i kroma (0.67%). Iz toga se s velikom vjerojatnošću može reći da je ova čestica aglomeracija sićušnih čestica prašine porijeklom s berilijskih ploča, divertora i inkonela premazanog berilijem ili volframom (v. sliku 2.2).

Čestica 166 je sličnoga sastava: dva najzastupljenija elementa su volfram (47.45%) i berilij (38.43%), nikel je udjela sličnoga kao u čestici 163 (2.82%), međutim dušik je treći najzastupljeniji element (10.03%). I ovo je čestica koja je vrlo vjerojatno aglomeracija čestica s berilijskih ploča, divertora i inkonela premazanog berilijem ili volframom, no čestica je "kontaminirana" dušikom. Mala koncentracija deuterija upućuje na nisku retenciju goriva u komori. Izgledno podrijetlo dušika u tokamaku JET je dušični "jastuk" koji se upumpava između divertora i plazme.

Čestica 177 berilija ima samo u tragovima, stoga nije bilo moguće izvršiti iterativnu analizu. Analiza čestice u GUPIXWIN-u pokazuje da se čestica sastoji pretežito od volframa (92.55%) i elemenata iz inkonela - 4.60% nikla, 1.27% željeza te 1.58% kroma. Podrijetlo tih elemenata valja potražiti u sudarima plazme s divertorom (volfram) te pločama stijenki od inkonela premazanog volframom. Prisustvo deuterija ukazuje na malu retenciju deuterija u čestici.

Čestica 180 je zanimljiva po svom sastavu jer jedina sadrži visok postotak ugljika. Uz malen doprinos deuterija (3.61%), za kojeg se može pretpostaviti da se adsorbirao na površinu ugljične ljepljive trake, elementarni sastav čestice 180 (natrij, silicij, fosfor, sumpor, klor i kalij u iznimno malim koncentracijama) upućuje na to da je riječ o trunu kompozita od ugljičnih vlakana na ugljičnoj ljepljivoj traci. Deuterij je vjerojatno zarobljen u tome trunu prilikom dodira plazme s pločom CFC-a.

Čestica 194 sadrži uobičajeni elementarni potpis inkonela (55.31% nikla, 14.22% željeza, 19.03% kroma), tragove deuterija, berilija i dušika kojima zbog iznimno malog udjela nije bilo moguće odrediti udio, ali i udjele dosad neviđenih elemenata: titanija (0.73%), niobija (4.91%) i molibdena (5.79%). Zadnja tri elementa se javljaju u nekim legurama inkonela te se na temelju njihova prisustva može zaključiti da je plazma pogodila uzak pojas reaktorske komore građen od inkonela 625. Iz NRA spektra se može dobiti međusoban odnos udjela dušika, berilija i deuterija: otprilike 140:19:5.

U analizi NRA spektara svih čestica nije bilo moguće koristiti udarne presjeke odgovarajućih reakcija pri 135° , stoga su korišteni podaci o reakcijama pod kutovima najbližim 135° . Korištene nuklearne reakcije su navedene u dodatku D.

6 Zaključak

Jedan od načina dobivanja energije u koji se polažu velike nade (dugoročno gledano, gotovo sve) jest nuklearna fuzija. Obzirom da fotonaponske ćelije, a dijelom i vjetro turbine (vjetrovi kao posljedica različitih temperatura na Zemlji), energiju skupljaju iz Sunčeve svjetlosti, ideja je napraviti zemaljsko Sunce i strpati ga "u kutiju". Od nekoliko vrsta tih "kutija", pred šezdesetak godina je konstruirana kutija one vrste koja zasad najviše obećava, tokamak. Tokamak će biti oblik "kutije" koji je u temelju svjetskog projekta, ITER-a, koji stremi iznaći način kako nuklearnom fuzijom dobiti više energije negoli se u započinjanje reakcije uloži.

ITER će biti najveći svjetski tokamak, zapremnine veće od 800 m^3 , no osmišljavanje njegovih dijelova i modeliranje sve hidroeletromagnetodinamike se vrši u postojećim tokamacima od kojih je najveći JET. Jedna od iznimno bitnih stavki u pripremi za izgradnju reaktorske komore ITER-a je određivanje ponašanja i sastava prašine koja nastaje prilikom udara plazme o stijenke same komore: prašina može biti eksplozivna, toksična, zadržavati preveliku količinu deuterija što smanjuje efikasnost reakcije... iz tih razloga ju je bitno dobro analizirati.

Analiza čestica fuzijske prašine iz tokamaka JET je vršena nuklearnom mikroprobom u Laboratoriju za interakcije ionskih snopova na Institutu Ruđer Bošković. U analizi NRA i PIXE spektara analiziranih čestica prašine određeno je da plazma najčešće udara o ploče inkonela premazane berilijem i volframom kao i u divertor, koji je zato i građen od volframa. Visoka koncentracija berilija u dvama uzorcima upućuje na potrebu za osmišljavanjem efikasnog odstranjivanja berilija iz reaktorske posude ITER-a te njegovo skladištenje na odgovarajuć način. U jednom uzorku su nađene indikacije sudara plazme s kompozitom od ugljikovih vlakana te, u najneobičnijem uzorku, tragovi titanija, niobija i molibdena. U mnogim uzorcima (tri od pet prikazanih) je pronađen deuterij, što upućuje na retenciju fuzijskog goriva, međutim količine deuterija u uzorcima su uvijek bile male, stoga to ne predstavlja razlog za zabrinutost s aspekta ITER-a. Za kraj treba napomenuti kako su za kvalitetniju analizu NRA spektara čestica fuzijske prašine potrebni bolji podaci o udarnim presjecima nuklearnih reakcija pod kutom od 135° za elemente koji čine prašinu. U ovome radu su korišteni mnogi koji su stari po nekoliko desetljeća i pod kutovima i do 25° manjim ili većim od željenog.

Dodaci

Dodatak A - Pretvaranje udjela

Prilikom iterativne analize bilo je potrebno pretvoriti masene udjele, koji su rezultat analize u GUPIXWIN-u, u atomske, koji se koriste prilikom analize u SIMNRA, i obratno. Maseni udio je definiran u školskim udžbenicima kemije, međutim atomski nije, kao ni pretvorba iz jednih u druge, iako je trivijalna.

Maseni udio sastojka i u smjesi je definiran kao:

$$w_i = \frac{m_i}{m}, \quad (\text{A.1})$$

gdje je m_i masa sastojka, a m masa smjese, a atomski udio sastojka i u smjesi je definiran kao:

$$at\% = \frac{N_i}{N}, \quad (\text{A.2})$$

gdje je N_i broj atoma sastojka i , a N broj atoma u cijeloj smjesi. Podijeli li se brojnik i nazivnik jednadžbe A.2 ukupnom masom smjese te uzme li se u obzir da je masa pojedinog atoma jednaka umnošku unificirane atomske jedinice mase i njegove relativne atomske mase, rezultat je:

$$at\% = \frac{N_i}{N} = \frac{\frac{m_i}{m_{i,at}} : \sum_j m_j}{\sum_j \frac{m_j}{m_{j,at}} : \sum_j m_j} = \frac{\frac{w_i}{A_{r,i}}}{\sum_j \frac{w_j}{A_{r,j}}} = \frac{\frac{w_i}{A_{r,i}}}{\sum_j \frac{w_j}{A_{r,j}}}. \quad (\text{A.3})$$

Slično vrijedi i u drugom smjeru. Krenuvši od definicije masenog udjela (jednadžba A.1), ukupna masa smjese se zapiše kao sumu masa sastojaka te se masu svakog sastojka prikaže kao umnožak broja atoma određenog sastojka i mase jednog atoma istog sastojka; potom se brojnik i nazivnik podijele s ukupnim brojem atoma smjese (kako bi se dobio atomski udio) i unificiranom atomskom jedinicom mase (kako bi se dobila relativna atomska masa) te se dobije relacija koja povezuje maseni udio sastojka s atomskim:

$$w_i = \frac{m_i}{m} = \frac{N_i m_{i,at} : N_{uk} \mathcal{X}}{\sum_j N_j m_{j,at} : N_{uk} \mathcal{X}} = \frac{at\%_i A_{r,i}}{\sum_j at\%_j A_{r,j}} \quad (\text{A.4})$$

Dodatak B - Neodređenost u kutu NRA detektora

Sredina NRA detektora je postavljena pod kutom od 135° u odnosu na smjer upadnog snopa iona. Obzirom da snop ima širinu i određenu neodređenost u energiji (v. pododjeljak 4.2) te da sam detektor ima otvor određene širine, NRA detektor zapravo detektira produkte nuklearnih reakcija pod kutovima koji odstupaju od 135° (v. pododjeljak 5.5).

U pojednostavljenoj analizi, uzima se da je udaljenost između središta detektora i središta uzorka jednaka, L , puno veća od promjera ionskog snopa ($2r_s$) na površini uzorka, odnosno od promjera otvora detektora ($2r_d$). Aproksimacija $L \gg r_s$ i $L \gg r_d$ omogućava da se svaka točka na detektoru tretira jednako udaljenom svakoj točki na uzorku (L).

Kutna širina snopa koji s uzorka upada na detektor dana je kao $2\theta_m = 2\frac{r_d}{L}$. Treba izračunati kvadrat standardne devijacije (varijancu) σ_θ kako bi se mogao izračunati FWHM kutne nepouzdanosti ($\delta\theta_d = 2.355 \sigma_{d\theta}$):

$$\sigma_{d\theta}^2 = \int_{-\theta_m}^{+\theta_m} \theta^2 f(\theta) d\theta, \quad (\text{B.1})$$

uz poznavanje funkcije gustoće vjerojatnosti, $f(\theta)$.

Ako detektor ima zaslon s kružnim otvorom polumjera r_d , funkcija gustoće vjerojatnosti postaje

$$f(\theta) = \frac{2}{\pi \theta_m^2} \sqrt{\theta_m^2 - \theta^2} \quad (\text{B.2})$$

odakle $\sigma_{d\theta}^2 = \frac{\theta_m^2}{4}$. Sada je FWHM kutne nepouzdanosti

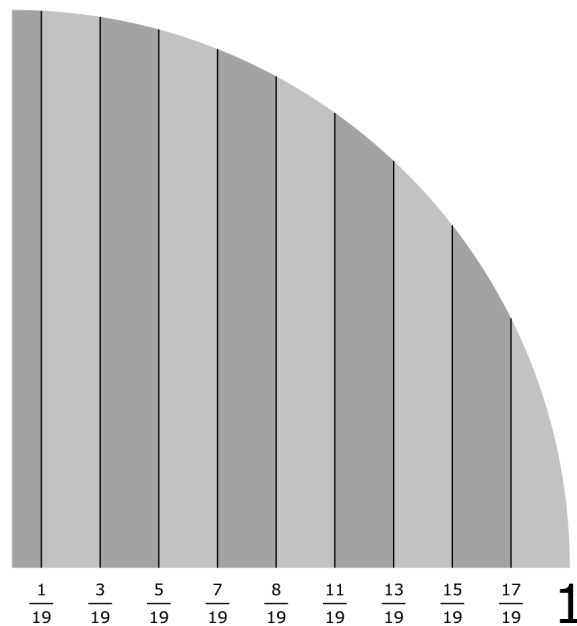
$$\delta\theta_d = 1.177\theta_m = 1.177\frac{r_d}{L}. \quad (\text{B.3})$$

Na temelju prethodnih izraza, za NRA detektor korišten u ovom radu ($r_d = 8.5\text{mm}$, $L = 25\text{mm}$) vrijedi $\delta\theta_d \approx 19^\circ$ [24].

Dodatak C - Težinski koeficijenti po kutovima

Težinski koeficijenti spomenuti u potpoglavlju 5.5 su geometrijski faktori koji se u prvoj aproksimaciji računaju tako da se površina kruga podijeli na 19 traka jednake širine (v. sliku C.1). Svaka traka odgovara rasapu kutova pod kojim je detektiran produkt nuklearne reakcije u iznosu od 2° . Težinski koeficijent pridan pojedinoj traci je dan kao omjer površine te trake i površine središnje trake ($134 - 136^\circ$).

Račun je napravljen za polovicu kruga jer se težinski koeficijenti odnose na simetrične trake, npr. težinski koeficijent za traku $116 - 118^\circ$ je jednak onomu za traku $152 - 154^\circ$. Svaka traka se može podijeliti na gornju i donju polovicu pa se račun svodi na integral ispod kružnog luka (četvrt kruga).



Slika C.1: Prikaz podjele jedinične kružnice na trake. Dostupno na [30].

Površina polovice jedne trake je:

$$P = \int_{x_1}^{x_2} y(x) dx = \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{r^2 - x^2} dx, \quad (\text{C.1})$$

gdje su x_1 i x_2 točke u kojima rubovi trake sijeku x-os, a funkcionalna je ovisnost y-koordinate točke na kružnici o njenoj x-koordinati posljedica Pitagorina poučka (r predstavlja radijus kružnice). Zamijene li se Kartezijeve koordinate polarnima, integral postaje:

$$P = r^2 \int_{\arcsin \frac{x_1}{r}}^{\arcsin \frac{x_2}{r}} \cos^2 \theta d\theta. \quad (\text{C.2})$$

Površina svake trake, izuzev središnje, se dobiva množeći prethodni integral faktorom 2 te, uz korištenje trigonometrijskih identiteta, postaje:

$$P_{traka} = 2 r^2 \int_{\arcsin \frac{x_1}{r}}^{\arcsin \frac{x_2}{r}} \frac{1 + \cos 2\theta}{2} d\theta = r^2 \left(\theta + \frac{\sin 2\theta}{2} \right) \Big|_{\arcsin \frac{x_1}{r}}^{\arcsin \frac{x_2}{r}}. \quad (\text{C.3})$$

Površina središnje trake ima dodatnu simetriju koja utječe na granice integracije i predfaktor:

$$P_{sred.traka} = 4 r^2 \int_0^{\arcsin \frac{1}{19}} \frac{1 + \cos 2\theta}{2} d\theta = r^2 \left(\theta + \frac{\sin 2\theta}{2} \right) \Big|_{\arcsin \frac{x_1}{r}}^{\arcsin \frac{x_2}{r}}. \quad (\text{C.4})$$

Težinski koeficijenti su dani u tablici C.1.

Kutovi / °	Težinski koeficijent
116 - 118	0.301150586
118 - 120	0.536559948
120 - 122	0.674872922
122 - 124	0.774675761
124 - 126	0.849929472
126 - 128	0.906835717
128 - 130	0.948726608
130 - 132	0.97754526
132 - 134	0.994434033
134 - 136	1
136 - 138	0.994434033
138 - 140	0.97754526
140 - 142	0.948726608
142 - 144	0.906835717
144 - 146	0.849929472
146 - 148	0.774675761
148 - 150	0.674872922
150 - 152	0.536559948
152 - 154	0.301150586

Tablica C.1: Tablica težinskih koeficijenata za određene kutove u SIMNRA analizi.

Dodatak D - Nuklearne reakcije

Slijedi popis nuklearnih reakcija korištenih prilikom analize čestica fuzijske prašine u programskom paketu SIMNRA. Za svaku reakciju je, uz izvor, naveden kut pod kojim je izmjerena.

D.1 Deuterij



V. Kh. Alimov et al. [31], 135°.

D.2 Berilij



E. A. Wolicki et al. [32], 150°.



B. Bilwes et al. [33], 125°.

D.3 Ugljik



Kuan et al. [34], 159.4°.



Kuan et al. [34], 159.4°.





Illsley et al. [35], 150°.

D.4 Dušik



S. Gorodetzky et al. [36], 150°.

Literatura

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. 1st ed. Cambridge & New York : Cambridge University Press, 2013. Dostupno na http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf, 20.4.2017.
- [2] UN DESA. Energy statistics yearbook 2014. 1st ed. New York : United Nations Reproduction Section, 2017. Dostupno na <https://unstats.un.org/unsd/energy/yearbook/default.htm>, 20.4.2017.
- [3] Paris Agreement - Status of Ratification, http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php, 20.4.2017.
- [4] Furić, Miroslav. Moderne eksperimentalne metode, tehnike i mjerenja u fizici. 1. izd. Zagreb : Školska knjiga, 1992.
- [5] Deuterium, Encyclopaedia Britannica, <https://www.britannica.com/science/deuterium>, 17.6.2017.
- [6] W. M. Jones; Half-Life of Tritium. // Phys. Rev. Vol. 100, 1 (1955), str. 124 - 125
- [7] R. Dierckx; Direct tritium production measurement in irradiated lithium. // Nuclear Instruments and Methods. Volume 107, 2 (1973), str. 397 - 398.
- [8] Wesson, J. Tokamaks. 3rd ed. Oxford : Clarendon Press, 2004.
- [9] Concept planning, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, <https://www.ipp.mpg.de/2815232/konzeptentwicklung>, 8.8.2017.
- [10] Heating, <https://www.euro-fusion.org/heating/>, 25. 9. 2017.
- [11] An internationalised JET for ITER, EUROfusion, <https://www.euro-fusion.org/2016/07/an-internationalised-jet-for-iter/>, 8.8.2017.
- [12] All-the-World's Tokamaks, <http://www.tokamak.info/>, 2.8.2017.
- [13] Rapp, J. et al; ELM mitigation by nitrogen seeding in the JET gas box divertor. // Plasma Phys. Control. Fusion. Volume 44, 6 (2002), str. 639 - 652.

- [14] Inconel 600, EUROfusion, <https://www.euro-fusion.org/2012/01/inconel-600/>, 19.9.2017.
- [15] De Temmerman, G. et al. Issues with dust production for ITER. Prezentacija za EUROfusion radionicu na temu prašine u tokamacima, održanu 8.2.2017.
- [16] Rubel, M. Dust in tokamaks : Introduction to Science Meeting. Uvodna prezentacija za EUROfusion radionicu na temu prašine u tokamacima, održanu 8.2.2017.
- [17] Baron-Wiechec, A. et al. Global erosion and deposition patterns in JET with the ITER-like wall. // Nucl. Mater. Vol. 463 (2015), str. 157 - 161.
- [18] eds. Wang, Y., Nastasi, M.: Handbook of Modern Ion Beam Materials Analysis. 2nd ed. Warrendale : Materials Research Society, 2009.
- [19] Kinematic factor derivation, <http://www.caiciss.co.uk/kinematic.pdf>, 20.9.2017.
- [20] McMillan, J. W. et al. Recent developments in nuclear microprobe analysis, particularly the determination of beryllium distributions in metals. // Nucl. Instrum. Methods Vol. 149, 1-3 (1978), str. 83 - 91.
- [21] Dieumegaard, D. et al. Microanalysis of Fluorine by nuclear reactions: I. $^{19}\text{F}(p, \alpha_0)^{16}\text{O}$ and $^{19}\text{F}(p \alpha \gamma)^{16}\text{O}$ reactions. // Nucl. Instrum. Methods Vol. 168, 1-3 (1980), str. 93 - 103.
- [22] Breese, M. B. H. et al. The Nuclear Microprobe. // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. Vol. 42 (1992), str. 1 - 38.
- [23] Ion Beam Analysis Nuclear Data Library, <https://www-nds.iaea.org/iband1/>, 11.8.2017.
- [24] Tadić, T. Dubinsko profiliranje koncentracije dopanata ubrzanim ionima ugljika u siliciju i oksidnim filmovima. Doktorski rad. Zagreb : Prirodoslovno-matematički fakultet, 1995.
- [25] Betz, H. D. Charge States and Charge-Changing Cross Sections of Fast Heavy Ions Penetrating Through Gaseous and Solid Media. // Rev. Mod. Phys. Vol. 44, 3 (1972), str. 465 - 539.

- [26] Delaunay, B. Heavy-ion stripping. // Nucl. Instr. and Meth. Vol. 146, 1 (1977), str. 101 - 113.
- [27] Nuclear microprobe, Institut Ruđer Bošković, <http://www.irb.hr/Research/Divisions/Division-of-Experimental-Physics/Laboratory-for-ion-beam-interactions/Nuclear-microprobe>, 8.8.2017.
- [28] Coad J. P. et al. Surface analysis of tiles and samples exposed to the first JET campaigns with the ITER-like wall. // Physica Scripta. Vol. 2014, T159 (2014), str. 014012 - 014026.
- [29] Interni izvještaj dr. sc. Stjepka Fazinića za radnu skupinu EUROfusiona koja se bavi analizom fuzijske prašine iz tokamaka JET (EUROfusion Report on Activities carried out by RBI for WPJET2 in 2017).
- [30] Podjela četvrtine kruga na trake za račun težinskih faktora pomoću površina tih traka, <http://www.minimum.hr/permanent/povrsine-traka-kruznih-odsjecaka-za-racun-tezinskih-faktora.svg>, 25. 9. 2017.
- [31] Alimov, V. Kh. et al. Differential cross-section of the $D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$ nuclear reaction and depth profiling of deuterium up to large depths. // Nucl. Instr. Meth. B. Vol. 234, 3 (2005), str. 169 - 175.
- [32] Wolicki, E. A. et al. Differential Cross Sections for the $^9\text{Be}(^3\text{He}, p)^{11}\text{B}$ Reaction. // Phys. Rev., Vol. 116, 6 (1959), str. 1585 - 1591.
- [33] Bilwes, B. et al. Mécanisme de la réaction $^9\text{Be}(^3\text{He}, \alpha)^8\text{Be}$ et résonances géantes isoscalaires du ^{12}C . // Jour. de Physique, Vol. 39, 8 (1978), str. 805 - 814.
- [34] Kuan, H. M. et al. An investigation of the $^{12}\text{C} + ^3\text{He}$ reactions at bombarding energies between 1.8 and 5.4 MeV. // Nucl. Phys., Vol. 51, 1 (1964), str. 481 - 517.
- [35] Geer Illsley, E. et al. Differential Cross Sections for the $^{13}\text{C}(^3\text{He}, p)^{15}\text{N}$ Reaction. // Phys. Rev., Vol. 107, 2 (1957), str. 538 - 539.
- [36] Gorodetzky, S. et al. Étude de la réaction $^{14}\text{N}(^3\text{He}, p)^{16}\text{O}$ entre 2.5 et 5.5 MeV. // Nucl. Phys., Vol. 43, 1 (1963), str. 92 - 102.