

Fizika plazme i njezina uloga u procesima nuklearne fuzije

Balen, Tara

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Chemistry and Technology / Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:167:872346>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-23**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of chemistry and technology - University of Split](#)



SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

**FIZIKA PLAZME I NJEZINA ULOGA U PROCESIMA NUKLEARNE
FUZIJE**

ZAVRŠNI RAD

TARA BALEN

Matični broj: 488

Split, rujan 2024.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET
PRIJEDIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
KEMIJA

FIZIKA PLAZME I NJEZINA ULOGA U PROCESIMA NUKLEARNE
FUZIJE

ZAVRŠNI RAD

TARA BALEN

Matični broj: 488

Split, rujan 2024.

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY
UNDERGRADUATE UNIVERSITY STUDY
CHEMISTRY

**PLASMA PHYSICS AND ITS ROLE IN NUCLEAR FUSION
PROCESSES**

BACHELOR THESIS

TARA BALEN

Parent number: 488

Split, September 2024

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

ZAVRŠNI RAD

Sveučilište u Splitu
Kemijsko - tehnološki fakultet
Prijediplomski sveučilišni studij - Kemija

Znanstveno područje: Prirodne znanosti
Znanstveno polje: Fizika
Mentor: doc. dr. sc. Mirko Marušić

FIZIKA PLAZME I NJEZINA ULOGA U PROCESIMA NUKLEARNE FUZIJE

Tara Balen (488)

Sažetak:

Plazma se najjednostavnije definira kao ionizirani plin. S obzirom da svaki plin ne može biti plazma, opisani su najvažniji fenomeni, uvjeti i fizikalne veličine koje karakteriziraju plazmu kao zasebno agregatno stanje. U usporedbi s postojećim energetske izvorima, navodi se da nuklearna fuzija ima velike prednosti u kontekstu sigurnosti, zalihama goriva, ekološke prihvatljivosti i količini proizvedene energije. Reakcija deuterija i tricija trenutno se najviše istražuje za korištenje u prvim komercijalnim fuzijskim elektranama. S obzirom da Zemlja nema uvjete za postizanje nuklearne fuzije kao što imaju zvijezde, potrebno je plinove zagrijati na ekstremno visoke temperature prevodeći ih u stanje plazme koja se potom mora ograničiti u uređaju čiji materijal može podnijeti takve temperature dovoljno dugo da dođe do reakcije fuzije, a sve pri uvjetima da reakcija fuzije bude samoodrživa. Navedene su fizikalne veličine i uvjeti koje opisuju vjerojatnost postizanja reakcije fuzije, optimalni doprinos korisne proizvedene energije fuzijom te postizanje samoodržive fuzijske reakcije. Dvije glavne metode ograničavanja plazme su magnetsko i inercijalno s naglaskom na magnetsko ograničenje. ITER (eng. International Thermonuclear Experimental Reactor) je trenutno vodeći projekt izgradnje eksperimentalne električne elektrane na fuzijski pogon. Nasljedni projekt ITER-a se zove DEMO (eng. Demonstration power plant) s ciljem integracije svih rješenja opisanih izazova fuzije u industrijsku elektranu koja će nam omogućiti eksploataciju energije fuzije za svjetsku proizvodnju energije.

Ključne riječi: plazma, fizika plazme, nuklearna fuzija, ograničenje plazme, tokamak, ITER

Rad sadrži: 47 stranica, 16 slika, 30 literaturnih referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Sastav Povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

1. Doc. dr. sc. Maša Buljac	predsjednik
2. Doc. dr. sc. Martina Perić Bakulić	član
3. Doc. dr.sc. Mirko Marušić	mentor

Datum obrane:

Rad je u tiskanom i elektroničkom (PDF) obliku pohranjen u Knjižnici Kemijsko-tehnološkog fakulteta u Splitu, Ruđera Boškovića 35, u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice u Splitu te u javnoj internetskoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice.

BASIC DOCUMENTATION CARD

BACHELOR THESIS

University of Split
Faculty of Chemistry and Technology
Undergraduate university study - Chemistry

Scientific Area: Natural sciences

Scientific Field: Physics

Supervisor: Assistant professor Mirko Marušić, PhD

PLASMA PHYSICS AND ITS ROLE IN NUCLEAR FUSION PROCESSES

Tara Balen (488)

Abstract:

Plasma is simply defined as an ionized gas. Since not every gas is plasma, the most important phenomena, conditions, and physical quantities that characterize plasma as a distinct state of matter are described. Compared to existing technology, nuclear fusion is argued to have significant advantages in terms of safety, fuel supply, environmental friendliness, and the amount of produced energy. The deuterium-tritium reaction is currently the most researched reaction to utilize in the first commercial fusion power plants. Since Earth does not have the conditions for achieving nuclear fusion like stars do, gases must be heated to extremely high temperatures, converting them into a plasma state that must then be confined within a device whose material can withstand such temperatures long enough for the fusion reaction to occur, all under the condition that the fusion reaction becomes self-sustaining. The physical quantities and conditions describing the probability of achieving fusion, the net produced fusion energy, and the self-sustaining fusion reaction are outlined. The two main methods of plasma confinement are magnetic and inertial, with an emphasis on magnetic confinement. ITER (abb. International Thermonuclear Experimental Reactor) is currently the leading project for the construction of an experimental fusion-powered electric plant. The successor project of ITER is called DEMO (abb. Demonstration power plant) with the aim of integrating all solutions to the described fusion challenges into an industrial power plant enabling us to exploit fusion energy for global energy production.

Keywords: plasma, plasma physics, nuclear fusion, plasma confinement, tokamak, ITER

Thesis contains: 47 pages, 16 figures, 30 references

Original in: Croatian

Defense committee for evaluation and defense of bachelor thesis:

- | | |
|---------------------------------------------------|-------------|
| 1. Assistant professor Maša Buljac, PhD | chairperson |
| 2. Assistant professor Martina Perić Bakulić, PhD | member |
| 3. Assistant professor Mirko Marušić, PhD | supervisor |

Defense date:

Printed and electronic (PDF) form of thesis is deposited in Library of Faculty of Chemistry and Technology in Split, Ruđera Boškovića 35, in the public library database of the University of Split Library and in the digital academic archives and repositories of the National and University Library.

Završni rad je izrađen u Zavodu za fiziku Kemijsko-tehnološkog fakulteta u Splitu pod mentorstvom doc. dr. sc. Mirka Marušića i na Fakultetu Kemije u Gdanjsku u razdoblju od veljače do rujna 2024. godine.

Zahvala

Svim profesorima, suradnicima i znanstvenicima mojeg i drugih fakulteta te institucija koji su direktno ili indirektno uložili svoje vrijeme, trud i pažnju u stvaranju mojih znanja i vještina; koji su svojim djelima, znanjem i osobinama meni bili primjer; koji su pomogli kada sam trebala pomoć; koji su me usmjerili kada sam tražila put; koji su mi bili podrška kada sam ju trebala; koji su prepoznali i podržavali moje ambicije te uz koje je studiranje bilo srcu drago.

Svim kolegama mojeg i drugih fakulteta te udruga bez kojih ne bi bilo aktivnosti, susreta i druženja u kojima sam stekla nova poznanstva, vještine, suradnje i uspomene, te koji su pružili osjećaj zajedništva i međusobnog poštovanja.

Svim prijateljima koji su mi bili podrška; koji su mi svaki dan studiranja činili ljepšim i bili mi kao druga obitelj.

Svom osoblju Studentskog doma Spinut i „Bruno Bušić“ u kojemu sam svoje godine studiranja provela osjećajući se kao doma.

Posebno hvala inspirativnoj izv. prof. dr. sc. Magdy Lučić-Lavčević koja me neiscrpno naučila fizici i svojim impresivnim znanjem katalizirala moj interes i ljubav prema istoj; mentoru doc. dr. sc. Mirku Marušiću na njegovom nesebičnom trudu i strpljenju bez kojeg ovog rada ne bi bilo te profesoricama Katedre za matematiku, doc. dr. sc. Sanji Tipurić-Spužević i mr. sc. Branki Gotovac, v. pred., koje su pretvorile moju tvrdoglavu averziju prema matematici u afinitet.

Srdačno vaša,

Tara Balen

Ovaj rad prezentiran je na međunarodnoj konferenciji 3rd European Congress on Chemistry and Applied Sciences u Amsterdamu 25. lipnja 2024. godine.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

1. Definirati osnovne principe plazme.
2. Objasniti proces nuklearne fuzije.
3. Objasniti ulogu plazme u procesu nuklearne fuzije.
4. Analizirati metode i uvjete ograničenja plazme.
5. Priložiti uvid u najnovija tehnološka dostignuća.

SAŽETAK

Plazma se najjednostavnije definira kao ionizirani plin. S obzirom da svaki plin ne može biti plazma, opisani su najvažniji fenomeni, uvjeti i fizikalne veličine koje karakteriziraju plazmu kao zasebno agregatno stanje. U usporedbi s postojećim energetske izvorima, navodi se da nuklearna fuzija ima velike prednosti u kontekstu sigurnosti, zalihama goriva, ekološke prihvatljivosti i količini proizvedene energije. Reakcija deuterija i tricija trenutno se najviše istražuje za korištenje u prvim komercijalnim fuzijskim elektranama. S obzirom da Zemlja nema uvjete za postizanje nuklearne fuzije kao što imaju zvijezde, potrebno je plinove zagrijati na ekstremno visoke temperature prevodeći ih u stanje plazme koja se potom mora ograničiti u uređaju čiji materijal može podnijeti takve temperature dovoljno dugo da dođe do reakcije fuzije, a sve pri uvjetima da reakcija fuzije bude samoodrživa. Navedene su fizikalne veličine i uvjeti koje opisuju vjerojatnost postizanja reakcije fuzije, optimalni doprinos korisne proizvedene energije fuzijom te postizanje samoodržive fuzijske reakcije. Dvije glavne metode ograničavanja plazme su magnetsko i inercijalno s naglaskom na magnetsko ograničenje. ITER (eng. International Thermonuclear Experimental Reactor) je trenutno vodeći projekt izgradnje eksperimentalne električne elektrane na fuzijski pogon. Nasljedni projekt ITER-a se zove DEMO (eng. Demonstration power plant) s ciljem integracije svih rješenja opisanih izazova fuzije u industrijsku elektranu koja će nam omogućiti eksploataciju energije fuzije za svjetsku proizvodnju energije.

Ključne riječi: plazma, fizika plazme, nuklearna fuzija, ograničenje plazme, tokamak, ITER

ABSTRACT

Plasma is simply defined as an ionized gas. Since not every gas is plasma, the most important phenomena, conditions, and physical quantities that characterize plasma as a distinct state of matter are described. Compared to existing technology, nuclear fusion is argued to have significant advantages in terms of safety, fuel supply, environmental friendliness, and the amount of produced energy. The deuterium-tritium reaction is currently the most researched reaction to utilize in the first commercial fusion power plants. Since Earth does not have the conditions for achieving nuclear fusion like stars do, gases must be heated to extremely high temperatures, converting them into a plasma state that must then be confined within a device whose material can withstand such temperatures long enough for the fusion reaction to occur, all under the condition that the fusion reaction becomes self-sustaining. The physical quantities and conditions describing the probability of achieving fusion, the net produced fusion energy, and the self-sustaining fusion reaction are outlined. The two main methods of plasma confinement are magnetic and inertial, with an emphasis on magnetic confinement. ITER (abb. International Thermonuclear Experimental Reactor) is currently the leading project for the construction of an experimental fusion-powered electric plant. The successor project of ITER is called DEMO (abb. Demonstration power plant) with the aim of integrating all solutions to the described fusion challenges into an industrial power plant enabling us to exploit fusion energy for global energy production.

Keywords: plasma, plasma physics, nuclear fusion, plasma confinement, tokamak, ITER

Sadržaj

UVOD.....	1
1. SVOJSTVA PLAZME	2
1.1. Fizikalni opis	2
1.2. Stupanj ionizacije i temperatura	3
1.3. Debyjevo zasjenjenje	4
1.4. Parametri plazme	5
1.5. Oscilacije plazme.....	6
1.6. Valovi plazme	7
2. NUKLEARNA FUZIJA	7
2.1. Prednosti i nedostaci	8
2.1.1. Izračun dobivene energije.....	10
2.2. Proizvodnja tricija.....	10
2.3. Coulombova barijera.....	12
2.4. Uvjeti za fuziju	13
2.4.1. Mikroskopske veličine	13
2.4.2. Stopa reakcije i gustoća snage	14
2.4.3. Kvantno-mehanički efekti	15
3. SAMOODRŽIVOST FUZIJSKE REAKCIJE.....	15
3.1. Faktor pojačanja	17
4. MAGNETSKO OGRANIČENJE PLAZME.....	18
4.1. Procjena magnetskog polja	18
4.2. Zrcalni cilindrični sustav.....	19
4.3. Toroidalni sustav.....	21
4.4. Tokamak uređaji	21
4.4.1. Nestabilnosti plazme	22

4.4.2. Problemi tokamaka	23
4.4.3. Razvoj i perspektiva tokamaka	23
4.5. Grijanje magnetski ograničene plazme	24
4.5.1. Theta stezanje	25
5. INERCIJALNO OGRANIČENJE PLAZME	25
6. MEĐUNARODNI PROJEKT ITER	26
7. BUDUĆNOST NUKLEARNE FUZIJE	28
ZAKLJUČAK	29
POPIS KRATICA I SIMBOLA	30
LITERATURA	32
POPIS SLIKA	34

UVOD

Kvaliteta današnjeg života rezultat je, ali i funkcija utroška električne energije koja mora biti po razumnoj cijeni. Globalno se suočavamo s rastućom potražnjom električne energije koja se ne može zadovoljiti na ekonomski izvediv i ekološki prihvatljiv način s trenutnom tehnologijom dobivanja električne energije. Osim što će se s vremenom iscrpiti prirodne zalihe fosilnih goriva, najveći je problem utjecaj proizvodnje električne energije na okoliš. Klimatske promjene i ekološke posljedice koje su nam ostavljene upotrebom fosilnih goriva stoljećima unazad dovoljno su se akumulirale da su postale izraženije s vremenom. Znanstveni pothvati istraživanja ekonomski isplativog i ekološki prihvatljivog načina dobivanja električne energije podređeni su glavnom uvjetu smanjenja proizvodnje stakleničkih plinova. U usporedbi s postojećim energetske izvorima, pokazalo se da nuklearna fuzija ima velike prednosti u kontekstu sigurnosti, zaliha goriva i ekološke prihvatljivosti. Također bi trebala osigurati značajno veće količine električne energije na siguran i pouzdan način. Jedina prepreka koja nas dijeli od komercijalnog implementiranja ovakvog načina dobivanja energije su vrlo zahtjevni znanstveni i inženjerski izazovi svojstveni procesu fuzije.¹

Prirodni proces nuklearne fuzije je promatran u zvijezdama. Uslijed iznimno visoke temperature i gravitacijske sile zvijezda, atomi vodika se prevode u stanje plazme pri čemu im se jezgre sudaraju i međusobno spajaju stvarajući teže kemijske elemente te oslobađajući pritom energiju. S obzirom da Zemlja nema navedene uvjete za postizanje nuklearne fuzije, potreban je drugačiji pristup - plinovi se moraju zagrijati na ekstremno visoke temperature prevodeći ih u stanje plazme, a sama plazma mora se zadržati u uređaju čiji materijal može podnijeti takve temperature dovoljno dugo da dođe do reakcije fuzije. Kako bi ovakva reakcija bila optimizirana, potrebno je postići uvjete pri kojima će reakcija biti samoodrživa. Posljednji izazov je sjedinjenje svih tehnoloških i znanstvenih rješenja izazova fuzije u elektranu koja će nam omogućiti eksploataciju energije fuzije za svjetsku proizvodnju energije.¹

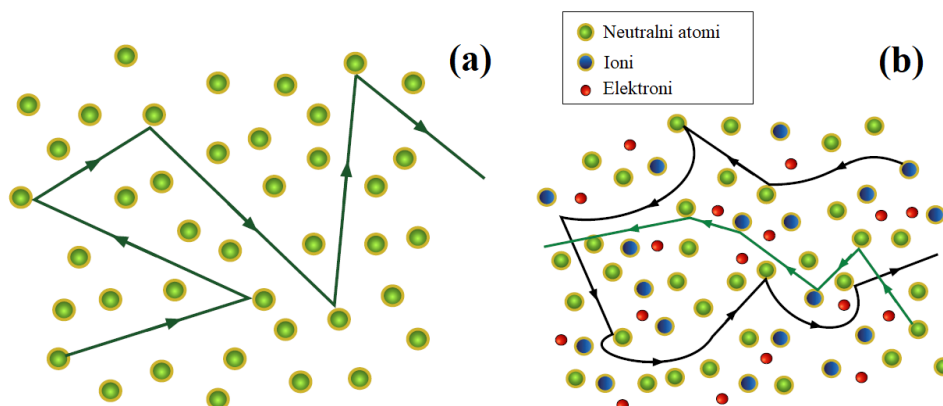
Poštujući formu, ovaj rad napravljen je kao sažeti uvod u osnovne koncepte fizike plazme koji služe kao okvir pri istraživanju dobivanja energije nuklearnom fuzijom u fuzijskim reaktorima.

1. SVOJSTVA PLAZME

1.1. Fizikalni opis

Plazma je najjednostavnije definirana kao ionizirani plin. Međutim, kako svaki plin posjeduje mali stupanj ionizacije, netočno je sve plinove smatrati plazmom. Takva površna definicija ne naglašava specifična svojstva koja plazma posjeduje u odnosu na druga agregatna stanja. Zato je preciznije plazmu definirati kao kvazi-neutralni plin nabijenih i neutralnih čestica koje podliježu kolektivnom međudjelovanju.²

Kvazi-neutralnost je matematički pojam koji opisuje stanje u kojemu je gustoća ioniziranih atoma i elektrona u sustavu približno jednaka, odnosno, takva da makroskopski čini plazmu električki neutralnom, ali ne dovoljno da prevladavajuće elektromagnetske sile iščeznu. To znači da, iako se plazma kao cjelina čini električki neutralnom, njezini lokalni dijelovi su i dalje električki nabijeni.³



Slika 1. Shematski prikaz: (a) Brownovo gibanje neutralnih molekula u standardnom plinu; (b) nasumično gibanje električki nabijenih čestica i molekula ioniziranog plina.⁹

Gibanje molekula u standardnom plinu opisano je kinetičkom teorijom „nasumičnog“ ili Brownovog gibanja koja govori da se molekule gibaju pravocrtno pod utjecajem sudara (Slika 1a), a utjecaj sila zanemaruje. U sustavu plazme, uz molekule, susrećemo i električki nabijene čestice koje svojim gibanjem uzrokuju lokalne gustoće pozitivnog i negativnog naboja čija električna i magnetska polja utječu na gibanje i ponašanje ostalih čestica u sustavu (Slika 1b). Razlog tomu je veliki doseg elektromagnetskih sila. Navedene lokalne ravnotežne promjene plazme predstavljaju prethodno spomenuto svojstvo kolektivnog međudjelovanja.^{2, 8, 9}

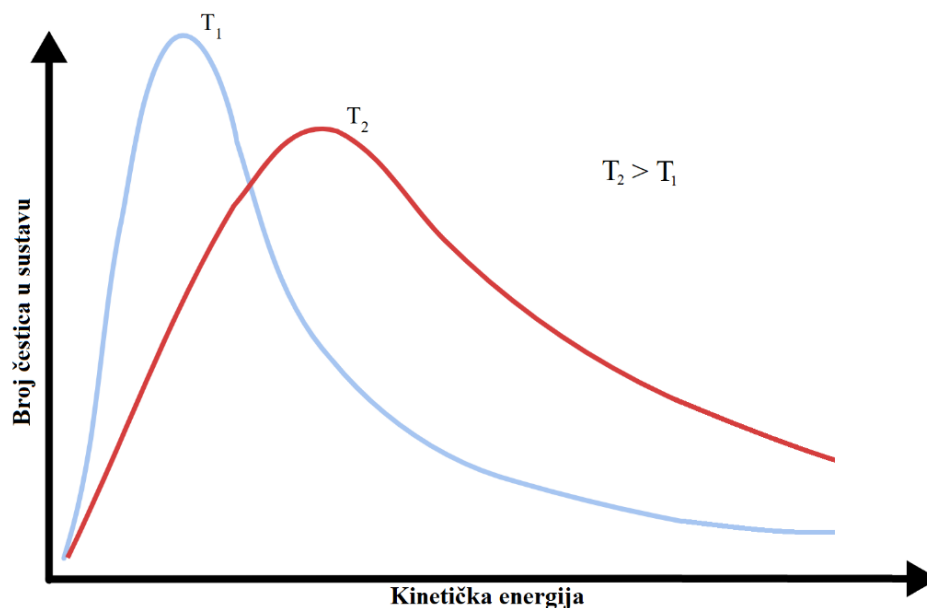
1.2. Stupanj ionizacije i temperatura

Stupanj ionizacije, α , predstavlja udio ioniziranih molekula u odnosu na ukupni broj molekula i iona u plazmi:⁸

$$\alpha = \frac{N_i}{N} \quad (1)$$

gdje je N_i broj iona u plazmi, a N ukupni broj molekula i iona u plazmi.

Plazma se smatra slabo ioniziranom kada je stupanj ionizacije puno manji od 1 ($\alpha \ll 1$), djelomično ioniziranom kada je stupanj ionizacije manji od 1 ($\alpha < 1$) te potpuno ioniziranom pri maksimalnoj vrijednosti stupnja ionizacije ($\alpha = 1$).⁹



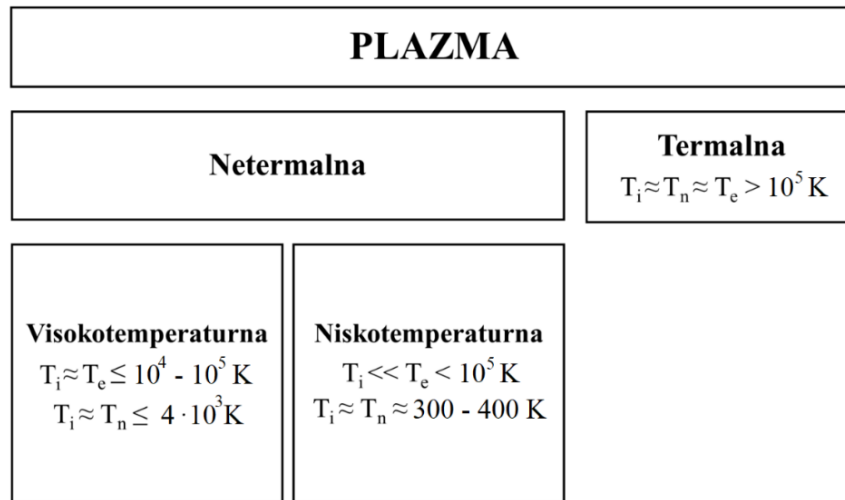
Slika 2. Maxwell-Boltzmannova distribucija čestica prema kinetičkoj energiji.²⁷

Temperatura plina predstavlja prosječnu kinetičku energiju njezinih konstituirajućih čestica. Kako svaka čestica plina u toplinskoj ravnoteži ima različitu brzinu gibanja, koristi se model Maxwell-Boltzmannove distribucije koji daje statistički najvjerojatniju raspodjelu brzina svih čestica u sustavu (Slika 2). Širina krivulje Maxwellove distribucije ovisna je o temperaturi. Isto vrijedi i za sustav plazme s razlikom u tome da plazma može istovremeno imati nekoliko temperatura do te mjere da ioni i elektroni imaju odvojene Maxwellove distribucije brzina s različitim temperaturama.^{2, 8}

Prosječna kinetička energija čestica za Maxwell-Boltzmannovu distribuciju po stupnju slobode dana je relacijom (2):²

$$\bar{E}_k = \frac{1}{2}kT \quad (2)$$

gdje je k Boltzmannova konstanta ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K) i T temperatura čestica (K).

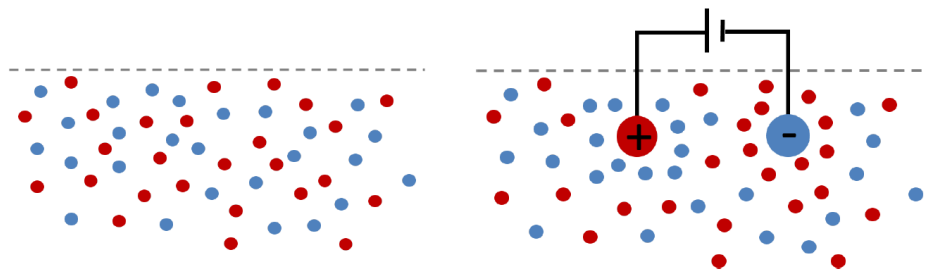


Slika 3. Podjela plazme s obzirom na temperaturu.⁵

S obzirom na temperaturu, plazme dijelimo na termalne i netermalne (Slika 3). Termalne plazme su visoko ionizirane koje zadovoljavaju uvjete lokalne termodinamičke ravnoteže što znači da su prosječne kinetičke energije čestica plazme, koje odgovaraju njihovim temperaturama, približno jednake. Netermalne plazme su djelomično ionizirani plinovi koji ne zadovoljavaju uvjete lokalne termodinamičke ravnoteže te čije su prosječne kinetičke energije elektrona niže od odgovarajuće temperature u iznosu od 10^5 K.⁵

1.3. Debyevo zasjenjenje

Karakteristika plazme, koja proizlazi iz njezine kvazi-neutralnosti, je sposobnost smanjenja lokalnih poremećaja u električnom potencijalu. Taj fenomen naziva se Debyevo zasjenjenje. Poremećaji električnog potencijala mogu nastati zbog samog gibanja naboja u plazmi tvoreći lokalne gustoće naboja ili primjenom vanjskog električnog polja.^{2, 8}



Slika 4. Debyjevo zasjenjenje nabijenih kugli umetnutih u plazmu.³

Zamislimo da smo umetanjem pozitivno i negativno nabijene kugle stvorili lokalni poremećaj električnog potencijala u plazmi (Slika 4). Svaka kugla privlačit će određenu količinu nabijenih čestica koje nastoje vratiti lokalni sustav u ravnotežu. Tako nastale gustoće naboja nalaze se na takozvanoj Debyjevoj duljini ili Debyjevom polumjeru¹, λ_D , koja ovisi o temperaturi i gustoći plazme. Povećanjem gustoće nabijenih čestica, λ_D se smanjuje, a raste s povećanjem temperature.^{2, 8}

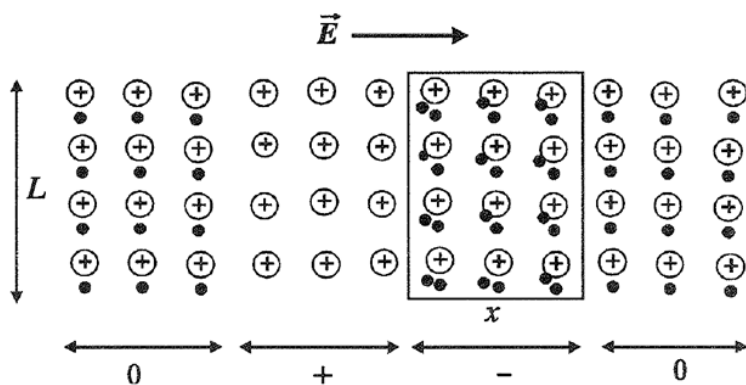
1.4. Parametri plazme

Kako bi se sustav mogao smatrati plazmom, a ne plinom ili drugim agregatnim stanjem, postoje tri temeljna parametra koja moraju biti zadovoljena:^{2, 8}

1. Debyjeva duljina, λ_D , mora biti puno manja od dimenzije sustava L . Tada plazma ima dovoljno veliku gustoću naboja da poremećaji električnog potencijala ne narušavaju kvazi-neutralnost sustava.
2. Broj nabijenih čestica unutar Debyjeve duljine, λ_D , mora biti dovoljno velik da nabijene čestice međudjeluju u fenomenu Debyjevog zasjenjenja.
3. Frekvencija osciliranja elektrona mora biti puno veća od frekvencije sudara elektrona i neutralnih čestica kako se kvazi-neutralnost sustava ne bi narušila.

¹[Peter Joseph William Debye (24.3.1884. – 2.11.1966.); nizozemsko-američki fizičar i fizikalni kemičar] Debyjeva duljina ili Debyjev polumjer predstavlja doseg električnog polja nekog naboja u plazmi.¹⁴

1.5. Oscilacije plazme



Slika 5. Raspodjela naboja i električno polje pri oscilacijama plazme.¹⁴

Pri remećenju kvazi-neutralnosti plazme, stvaraju se neuravnotežene gustoće naboja koje potiču mobilne elektrone van svojih ravnotežnih položaja (Slika 5). Kada se elektroni izbace iz svojih ravnotežnih položaja, na njih tada djeluju Coulombove sile u suprotnom smjeru od smjera gibanja elektrona. Zbog svoje kinetičke energije, elektroni će prilikom promjene smjera gibanja premašiti ravnotežni položaj i oscilirati oko iona karakterističnom frekvencijom - frekvencijom plazme (ω_p). Na taj način plazma održava svoju makroskopsku električnu neutralnost na prosječnoj razini budući da je zbroj naboja tijekom jednog perioda tih oscilacija nula. Ove oscilacije su toliko brze da teški ioni ne mogu pratiti brzinu elektronskih oscilacija zbog čega se njihovo kretanje često zanemaruje.¹⁰

Frekvencija plazme, ω_p , izražava se relacijom (3) uz pretpostavke: (1) da su magnetsko polje i toplinsko gibanje odsutni, (2) da je plazma beskonačnog opsega, (3) da su ioni fiksirani u prostoru u uniformnoj distribuciji te (4) da su gibanja elektrona samo u jednoj dimenziji:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e \cdot e^2}{\epsilon_0 \cdot m_e}} \quad (3)$$

gdje je n_e gustoća elektrona u ravnoteži (m^{-3}), e elementarni naboj ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C), ϵ_0 dielektrična permitivnost vakuumu ($8,85 \cdot 10^{-12}$ C²/N·m²) i m_e masa elektrona ($9,11 \cdot 10^{-31}$ kg).

Zbog male mase elektrona, frekvencija plazme, koja je inače vrlo visoka, ovisna je samo o gustoći elektrona u ravnoteži.¹⁰

U ovisnosti o prisutnosti magnetskog polja u sustavu, osciliranje elektrona može biti elektrostatičko ili elektromagnetsko. U ovisnosti o smjeru vektora brzina elektrona s električnim poljem, oscilacije mogu biti longitudinalne ili transverzalne.¹⁰

1.6. Valovi plazme

Za razliku od oscilacija plazme, valovi plazme su makroskopske, koherentne oscilacije koje propagiraju cijelim sustavom. Matematički se opisuju Maxwellovim jednadžbama rotacije električnog i magnetskog polja u prostoru čija su rješenja ravni valovi. Minimalna valna duljina plazme mora biti puno veća od Debyeve duljine.^{2, 11}

Valovi plazme se mogu podijeliti na različite načine s obzirom na svojstva i uvjete sustava. S obzirom na njihovu značajnu međusobnu različitost, trenutno ne postoji univerzalna podjela. S obzirom na frekvenciju, dijele se na niskofrekventne i visokofrekventne valove, a s obzirom na prisutnost oscilirajućeg magnetskog polja, dijele se na elektrostatičke i elektromagnetske valove.¹⁴

2. NUKLEARNA FUZIJA

Nuklearna reakcija uzrokuje promjene u strukturi jezgre atoma mijenjajući atom jednog elementa u atom drugog. Energija oslobođena u nuklearnoj reakciji uvijek je većeg reda veličine u usporedbi s kemijskom reakcijom. Razlog tomu su jake nuklearne sile koje sudjeluju u nuklearnim reakcijama, a ne elektromagnetske sile kao u kemijskim reakcijama.¹

Reakcija fuzije može biti izazvana gađanjem lakih jezgri nabijenim česticama uporabom akceleratora čestica ili povećanjem temperature plina na dovoljno visoku temperaturu pri kojoj se pokreće sama reakcija. Međutim, nisu sve reakcije fuzije energetske iskoristive. Neutroni, koji služe za pokretanje lančane reakcije fisije, ne mogu se koristiti za pokretanje fuzijske reakcije jer zahtijeva primjenu vanjskih izvora neutrona koji nisu dostupni. Ideja je zamijeniti neutrone s drugim lakim jezgrama, odnosno, ostvariti nuklearnu reakciju sudarom dviju lakih jezgri. Fuzijske reakcije pogodne za proizvodnju energije uključuju jezgre deuterija, tricija i izotopa helija, helij-3.¹

Reakcija dviju jezgri deuterija naziva se D-D reakcijom. S obzirom da je deuterij lako dostupan, najpoželjnija je reakcija s gotovo neograničenom opskrbom jeftinim gorivom. Međutim, ovu reakciju je najteže pokrenuti. D-D reakcija ima dvije moguće reakcije, dane relacijama (4) i (5), od kojih se svaka događa s približno jednakom vjerojatnošću:¹



Reakcija deuterija s izotopom helija-3, dana relacijom (6), naziva se D-³He reakcija. Ovu reakciju je također teško postići, ali nešto lakše nego D-D reakciju. S inženjerskog stajališta, reakcija je poželjna jer su svi konačni produkti nabijene čestice koje, za razliku od brzih neutrona, značajno smanjuju probleme aktivacije materijala i oštećenja uslijed zračenja. Najveći je problem što zahtijeva izotop helij-3 čijih prirodnih zaliha na Zemlji nema.¹



Fuzijska reakcija u središtu pozornosti svjetskog istraživanja je reakcija između deuterija i tricija, takozvana D-T reakcija, dana relacijom (7). U odnosu na prethodno opisane fuzijske reakcije, najlakša je reakcija za pokretanje. Problem ove reakcije je velika proizvodnja neutrona i potreba za kontinuiranom opskrbom tricija. Tricij je radioaktivan i nema prirodne zalihe. Neovisno o tome, reakcija proizvodi značajnu količinu nuklearne energije.¹



2.1. Prednosti i nedostatci

Tri su glavne prednosti korištenja fuzije kao izvor energije: rezerve goriva, ekološka prihvatljivost i sigurnost.

Dvije su glavne reakcije od interesa – D-D i D-T reakcije. Deuterij se prirodno nalazi u morskoj vodi te se može lako izdvojiti po vrlo niskoj cijeni. Tricij se proizvodi iz izotopa ⁶Li kojeg se može pronaći u zemljinoj kori. Međutim, geološke procjene ukazuju da na Zemlji postoji zaliha izotopa ⁶Li za oko 20 000 godina sudeći prema trenutnoj stopi svjetske potrošnje energije. Pretpostavlja se da će, prije nego što se rezerve ⁶Li iscrpe, tehnologija biti razvijena za D-D reaktore koji zahtijevaju uporabu samo deuterija.¹

Nadalje, fuzijske reakcije ne proizvode ugljikov dioksid, stakleničke plinove ili druge štetne kemikalije. Najveći ekološki problem fuzijskih reakcija je sporedni produkt obje reakcije - visokoenergetski neutroni. Ti se neutroni nastoje uhvatiti raznim metodama i materijalima kako ne bi predstavljali prijetnju za postrojenje i osoblje.¹

Posljednje, način rada reaktora čini fuzijske reakcije bezopasnima. Lančane reakcije u fuzijskim reaktorima ne ovise o velikoj količini goriva kao što je slučaj u fisijskim reaktorima. Gorivo se mora kontinuirano unositi u reaktor takvom brzinom kojom se gorivo troši po potrebi. Time je u konačnici masa goriva u fuzijskom reaktoru vrlo mala u bilo kojem danom trenutku. Upravo ta mala masa goriva čini taljenje jezgre u fuzijskom reaktoru nemogućim.¹

Nedostaci fuzijskih reakcija uključuju znanstvene, tehnološke i ekonomske izazove. Tako je za sagorijevanje D-T goriva potrebna temperatura veća od one u središtu Sunca. Nakon što je gorivo zagrijano, mora se osmisliti metoda kojom bi se nastala plazma mogla održati dovoljno dugo na dovoljno visokoj temperaturi kako bi se proizvela korisna energija.¹

Za postizanje ekstremno visokih temperatura, potrebno je razviti nove tehnologije za zagrijavanje plazme. Nadalje, potrebno je razviti materijale koje mogu izdržati neutronske i toplinske opterećenje fuzijske plazme. Također je potrebno razviti velike visokotlačne supravodljive magnete s velikim magnetskim poljem pomoću kojih bi se efikasno magnetski ograničila plazma.¹

Posljednji nedostatak je ekonomičnost. Fuzijski reaktor je kompleksan objekt. Budući da se strukturni materijal aktivira zbog visokoenergetskih neutrona, potreban je sustav daljinskog rukovanja za montažu i demontažu tijekom redovitog održavanja uz zaštitu od zračenja. Ovi osnovni tehnološki zahtjevi impliciraju da će kapitalni troškovi fuzijskog reaktora biti veći od troškova elektrane na fosilna goriva i vrlo vjerojatno veći od troškova nuklearne elektrane. To bi moglo povećati troškove električne energije za potrošače. Niskim troškovima goriva i zaštite okoliša smanjuju se troškovi električne energije za potrošače.¹

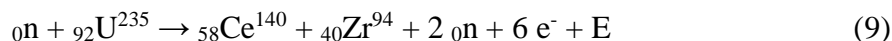
2.1.1. Izračun dobivene energije

Promotrimo slučaj sagorijevanja benzina. S obzirom da je benzin smjesa ugljikovodika, pretpostavit ćemo da je dominantna komponenta oktan, C_8H_{18} . Kemijska reakcija koja opisuje potpuno sagorijevanje benzina dana je reakcijom (8):¹



Prosječna dobivena energija iznosi 0,9 eV po atomu, odnosno, 40 MJ energije po kilogramu benzina.¹

Uobičajeni način dobivanja energije fisijom je gađanje atoma ^{235}U sporim neutronom. Ako je tipična konačna reakcija raspada ^{235}U dana reakcijom (9):¹



oslobođena energija iznosi 0,88 MeV po nukleonu² ${}_{92}U^{235}$, odnosno, $84 \cdot 10^6$ MJ po kilogramu uranijevog goriva. To je milijun puta više energije u usporedbi sa sagorijevanjem benzina.¹

Ako promotrimo reakciju deuterija i tricija za dobivanje energije fuzijom u relaciji (10):¹



dobivena energija iznosi 3,52 MeV po nukleonu, odnosno, $338 \cdot 10^6$ MJ po kilogramu D-T goriva.¹

2.2. Proizvodnja tricija

Jedan od glavnih zahtjeva elektrana za proizvodnju fuzijske energije koje se temelje na D-T reakcijama je kontinuirana proizvodnja, odnosno, obnavljanje tricija. Rješenje ovog zahtjeva je dobivanje tricija iz litija pomoću neutrona.¹²

Litij je dostupan kao mineral u Zemljinoj kori, a još veće količine mogu se izdvojiti iz morske vode. Prirodni litij se sastoji od dva izotopa, 92,6% izotopa 7Li i 6,4% izotopa 6Li , pa tako postoje dvije moguće reakcije:¹²



² Nukleoni su čestice koje tvore atomsku jezgru (nukleus) – protoni i neutroni.

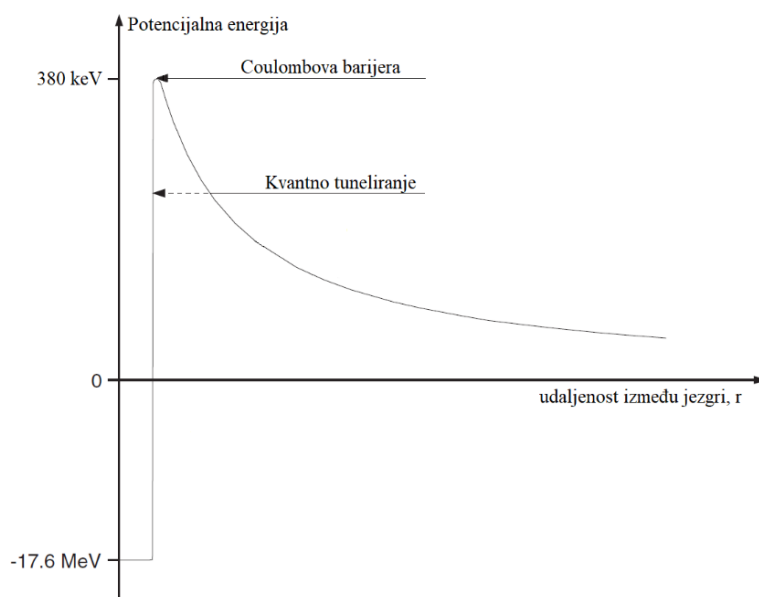
Reakcija ${}^6\text{Li}$ sa sporim neutronima u reakciji (11) je egzotermna, oslobađajući 4,8 MeV energije. Reakcija ${}^7\text{Li}$ s brzim neutronima u reakciji (12) je endotermna, apsorbirajući 2,5 MeV energije što ju u ovom slučaju čini energetske neiskoristivom.¹²

U nekim fisionim reaktorima, male količine tricija se proizvode kao međuprodukt koje se mogu iskoristiti za pokretanje fuzionih reakcija pri čemu svaka fuzionih elektrana neophodno mora imati sustav za proizvodnju vlastitih zaliha tricija.¹²

Inženjersko rješenje ovog problema je sloj litija (eng. *tritium-breeding blanket*) u čvrstom ili tekućem obliku. U čvrstom obliku, litij je u obliku keramičkih pločica ili praha koji se koriste kao premaz unutar reaktorske komore, a u tekućem obliku može se koristiti i kao dio rashladnog sustava. Osnovna je ideja da se litij izloži neutronske snopu, koji se javlja tijekom fuzionih reakcija, pri čemu će se neutroni apsorbirati i reagirati stvarajući tricij koji se potom izdvaja iz sloja različitim metodama i vraća u središnji sloj goriva.¹²

Pod efikasnom proizvodnjom tricija podrazumijeva se dobivanje jednog atoma tricija za svaki potrošeni s obzirom da svaka D-T reakcija proizvodi samo jedan neutron. Stopa dobivanja tricija neznatno veća od jedinice, primjerice 1,01, bila bi dovoljna za samoodržano dobivanje tricija pod uvjetom da se tricij brzo reciklira. Tipični dizajn sloja litija u reaktoru koristi raspon stope dobivanja tricija između 1,05 i 2,00.¹²

2.3. Coulombova barijera



Slika 6. Shematski prikaz potencijalne energije dvije jezgre kao funkcije njihove udaljenosti.¹³

Glavna prepreka pri postizanju reakcije fuzije je činjenica da su jezgre električki nabijene zbog čega se snažno odbijaju uslijed Coulombove sile. Kako se jezgre međusobno približavaju, tako raste elektrostatičko odbijanje do maksimalne vrijednosti - Coulombove barijere (Slika 6). Visina Coulombove barijere određuje koliko je energije potrebno uložiti da se dvije jezgre privuku i prevladaju elektrostatičke odbijajuće sile prije nego što mogu reagirati. Dubina ponora pri savladavanju Coulombove barijere ovisna je o energiji koja se otpušta pri fuziji dviju jezgri kao posljedica gubitka mase prema Einsteinovoj relaciji ekvivalencije mase i energije^{3, 13, 17}.

Za uspješno prevladavanje Coulombove barijere potrebna je velika kinetička energija čestica koja se u praksi može postići vrlo visokom temperaturom i gustoćom plazme. Međutim, moguće je postići fuziju pri temperaturama daleko ispod Coulombove barijere zbog kvantno-mehaničkih efekata.¹³

³ $E = m \cdot c^2$ [J]; gdje je m masa (kg) i c brzina svjetlosti u vakuumu (299 792 458 m/s).

2.4. Uvjeti za fuziju

Kako bi se postigla kontrolirana termonuklearna reakcija fuzije u reaktorima, potrebno je zadovoljiti tri glavna uvjeta:¹⁷

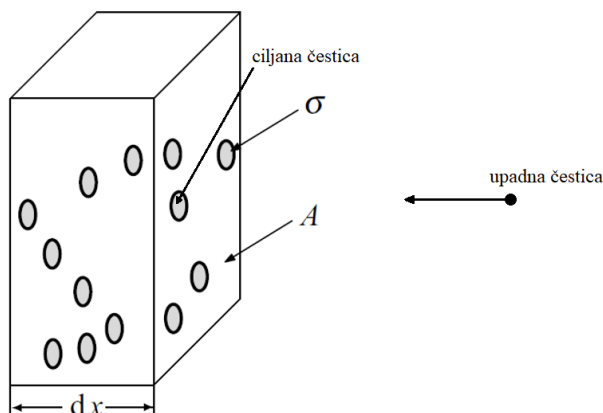
1. Visoka temperatura radi savladavanja Coulombove barijere i učestalosti sudara.
2. Visoka gustoća plazme radi postizanja dovoljne stope fuzijskih reakcija.
3. Dovoljno dugo vrijeme zadržavanja kako bi se izbjeglo hlađenje plazme i smanjenje vjerojatnosti sudara.

Cilj je zagrijati plazmu, odnosno, dovesti na temperaturu „paljenja“ pri kojoj bi nastala toplina mogla održavati temperaturu plazme.⁷ Kako bi se osiguralo da se čestice plazme pri ekstremno visokoj temperaturi ne rasprše toliko da sudari postanu malo vjerojatni, potrebno je održavati dovoljnu gustoću plazme da se stopa sudara ne smanji. Međutim, ako plazma postane previše gusta, dolazi do sudara jezgri i elektrona pri čemu se oslobađa velika količina zakočnog zračenja⁴ koja oduzima energiju plazmi i smanjuje vjerojatnost postizanja fuzijskih reakcija.¹

2.4.1. Mikroskopske veličine

Mikroskopske fizikalne veličine koje opisuju vjerojatnost postizanja nuklearnih reakcija su mikroskopski udarni presjek, slobodni put i frekvencija sudara.¹ Navedene veličine odnose se i na fisiju i na fuziju.

⁴ Zakočno, kočno ili bijelo zračenje (eng. *Bremsstrahlung or braking radiation*) je vrsta elektromagnetskog zračenja koje nastaje kada se brze nabijene čestice usporavaju uslijed zakretanja njihove putanje elektromagnetskim poljem druge nabijene čestice ili pri sudaru s drugim česticama gdje se izgubljena kinetička energija očituje kao zračenje.



Slika 7. Shematski prikaz mikroskopskog poprečnog presjeka σ ciljane čestice na makroskopskom poprečnom presjeku A materijala debljine dx .¹

Mikroskopski udarni presjek kvantitativno opisuje vjerojatnost da će par jezgri postići nuklearnu reakciju. Zamislimo da na poprečnom presjeku A materijala debljine dx imamo projekciju sfernog polja nuklearne sile ciljane čestice poprečnog presjeka σ (Slika 7). Ako upadna čestica prođe kroz σ ciljane čestice, tada je sila koju vrši ciljana čestica na upadnu česticu dovoljno jaka da dođe do nuklearne reakcije.¹

Mikroskopski udarni presjek povezan je s vjerojatnošću postizanja nuklearne reakcije konceptom slobodnog puta. Slobodni put je prosječna udaljenost koju upadna čestica mora prijeći prije nego što se sudari s ciljanom česticom. Obrnuto je proporcionalan gustoći ciljnih čestica i mikroskopskom udarnom presjeku što znači da pri velikoj gustoći ciljnih čestica i/ili velikom mikroskopskom udarnom presjeku upadna čestica ne mora prolaziti veliki put prije nego što se sudari, odnosno, povećava se broj sudara jezgri u vremenu.¹

Frekvencija sudara predstavlja broj sudara u jedinici vremena. Ova fizikalna veličina opisuje dinamiku promatranog sustava i procjenjuje uspješnost postizanja nuklearne reakcije.¹

2.4.2. Stopa reakcije i gustoća snage

Stopa reakcije je makroskopska fizikalna veličina koja opisuje broj sudara po jedinici volumena u jedinici vremena, odnosno, broj sudara po kubičnom metru u sekundi. Ako svaki sudar proizvodi energiju, tada ukupna energija proizvedena po jedinici volumena po sekundi odgovara gustoći snage fuzije izraženoj u vatima po kubičnom metru. Važno je

naglasiti da nastala energija može odgovarati ukupnoj energiji fuzije, energiji alfa čestica ili energiji neutrona ovisno u kojem se kontekstu računa gustoća snage.¹

2.4.3. Kvantno-mehanički efekti

Točan mikroskopski udarni presjek uzima u obzir kvantno-mehaničke efekte. Jedan od najvažnijih efekata je dvojna priroda čestica. Svojstva valova koje imaju čestice, u ovom slučaju jezgra, izmjenjuju klasični model čvrstih sfera na tri načina:¹

1. Efekt „tuneliranja“ koji je posljedica valne prirode čestica i Heisenbergovog principa neodređenosti⁵. Zbog kvantno-mehaničkih efekata, minimalna udaljenost između dvije jezgre nije fiksna vrijednost određena energijom kako je prikazano (Slika 6) već postoji konačna vjerojatnost da se jezgre približe, i na kraju "tuneliraju" kroz Coulombovu prepreku što doprinosi većoj vjerojatnosti reakcije fuzije. Što je veća energija jezgri, veća je vjerojatnost da tuneliraju kroz Coulombovu barijeru.
2. Drugi efekt naglašava činjenicu da dvije jezgre mogu proći jedna kroz drugu. To je zato što se nuklearna reakcija može zamisliti kao interakcija dva slična vala. Ako je relativna brzina čestica (valova) velika, vrijeme dostupno za interakciju je vrlo kratko čime se smanjuje vjerojatnost sudara. Time bi se mikroskopski udarni presjek trebao smanjivati što je veća relativna brzina jezgri.
3. Treći efekt je rezonancija. Pri određenim uvjetima, potencijalne energije dvije sudarajuće jezgre se mogu kombinirati i rezonirati. Rezultat je da se pod takvim uvjetima povećava vjerojatnost nuklearnih reakcija što odgovara povećanom mikroskopskom udarnom presjeku.

3. SAMOODRŽIVOST FUZIJSKE REAKCIJE

Kako bi se postigla stabilna i samoodrživa fuzijska reakcija, potrebno je odrediti tlak, gustoću, temperaturu i vrijeme zadržavanja plazme kako bi se optimizirali uvjeti i dobila korisna snaga. Traženi uvjeti mogu se kvantitativno procijeniti relacijom (13) ako uzmemo u obzir sve energetske zahtjeve unutar reaktora:¹

⁵[Werner Heisenberg (5.12.1901. – 1.2.1976.); njemački fizičar] Heisenbergov princip neodređenosti tvrdi da se položaj i količina gibanja čestice ne mogu istovremeno mjeriti s potpunom preciznošću, odnosno, što je preciznije mjerenje jednog parametra, to je manje precizno mjerenje drugog parametra.

$$S_{\alpha} + S_h = S_B + S_{\kappa} \quad (13)$$

gdje je S_{α} snaga koju proizvode alfa čestice nastale kao produkt nuklearne fuzije, S_h svi gubici energije u plazmi koji nisu povezani s kočnim zračenjem ili kondukcijom, S_B gubitak energije u plazmi zbog kočnog zračenja i S_{κ} gubitak energije u plazmi kondukcijom.

Idealan slučaj, opisan relacijom (14) zanemaruje gubitke topline kondukcijom i ne zahtijeva vanjsko zagrijavanje. To znači da snaga koju proizvode alfa čestice tijekom fuzijske reakcije mora nadmašiti neizbježne gubitke energije uslijed kočnog zračenja.¹

$$S_{\alpha} = S_B \quad (14)$$

Rješenje relacije (14) je minimalna temperatura idealne plazme u fuzijskom reaktoru s magnetskim zadržavanjem koja iznosi $T \geq 51\,059\,910\text{ K}$.¹

Realniji slučaj, opisan relacijom (15), pretpostavlja da je u ravnotežnom stanju snaga alfa čestica dovoljno velika da izbalansira gubitke uslijed kočnog zračenja i kondukcije bez potrebe za vanjskim izvorom energije.¹

$$S_{\alpha} = S_B + S_{\kappa} \quad (15)$$

Rezultat relacije (15) je produkt $p\tau_E$ kao funkcija temperature:¹

$$p \cdot \tau_E = 2 \cdot T \cdot (n \cdot \tau_E) \quad (16)$$

gdje je p tlak plazme (Pa), τ_E vrijeme zadržavanje energije (s), T temperatura plazme (K) i $n\tau_E$ Lawsonov kriterij⁶.

Relacija (16) je matematički izraz koji se koristi za kvantificiranje parametara plazme u odnosu na Lawsonov kriterij kako bi se moglo procijeniti ispunjava li plazma uvjete za stabilnu i samoodrživu fuziju. Produkt $p\tau_E$ često se piše kao $nT\tau_E$ kako bi se naglasila tri temeljna parametra plazme - gustoća n , temperatura T i vrijeme zadržavanja energije τ_E .

⁶ [John David Lawson (4.4.1923. – 15.1.2008.); britanski inženjer i fizičar] Lawsonov kriterij je prag vrijednosti umnoška gustoće plazme n i vremena zadržavanja energije τ_E koje plazma mora prijeći da bi fuzijska reakcija bila samoodrživa.

Za fuzijski reaktor s magnetskim zadržavanjem minimalna vrijednost produkta $p\tau_E$ za dobivanje korisne energije i odgovarajuće radne temperature plazme iznosi: ¹

$$T_{min} = 174\,067\,875\,K \quad (17)$$

$$(p\tau_E)_{min} = 8,3\,atm \cdot s \quad (18)$$

3.1. Faktor pojačanja

Kako bismo procijenili energetska iskoristivost fuzijske reakcije, uvodi se bezdimenzijska veličina omjera snage proizvedene fuzijskim reakcijama i snage potrebne za vanjsko zagrijavanje plazme, faktor pojačanja Q relacijom (19): ¹

$$Q = \frac{P_{neto}}{P_{in}} \quad (19)$$

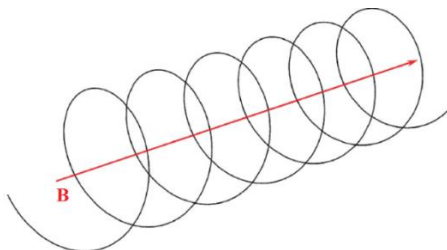
gdje je P_{neto} korisna snaga, odnosno, snaga proizvedena fuzijskim reakcijama i P_{in} ulazna snaga, odnosno, snaga potrebna za vanjsko zagrijavanje plazme.

Vrijednost faktora pojačanja definirana je kao $0 < Q < \infty$.¹ Ako bi faktor pojačanja bio $Q = 0$, to bi značilo da nema proizvedene snage fuzijskim reakcijama ($P_{neto} = 0$), odnosno, da uopće nema prisutnih fuzijskih reakcija. Faktor pojačanja u vrijednosti $Q = \infty$ teorijski označava stanje „paljenja“, odnosno, postignute samoodržive fuzijske reakcije jer tada ne bi bilo potrebe za ulaznom snagom, a proizvodila bi se korisna snaga ($P_{in} = 0$; $P_{neto} = \infty$).

Energetska iskoristivost se u teoriji postiže kada je $Q > 1$ jer je pri $Q = 1$ ulazna snaga jednaka proizvedenoj. Što je faktor pojačanja veći, to je reaktor energetski učinkovitiji i ekonomski isplativiji za korištenje kao izvor energije. Međutim, što je faktor pojačanja veći, teže ga je eksperimentalno postići. Uzimajući u obzir realne uvjete rada postrojenja, procjenjuje se da se tek pri $Q \approx 5$ snaga proizvedena fuzijskim reakcijama izjednačava s ulaznom snagom. Dakle, u realnim uvjetima se tek pri $Q > 5$ može postići energetski iskoristiva fuzijska reakcija. ¹

4. MAGNETSKO OGRANIČENJE PLAZME

Magnetsko ograničenje plazme (eng. *Magnetic confinement*) je tehnika zadržavanja plazme u određenom geometrijskom prostoru pomoću snažnog magnetskog polja.



Slika 8. Shema Larmorovog ili ciklotronskog gibanja po silnici magnetskog polja B.²⁸

Razumijevanje ove tehnike znači razumjeti gibanje nabijenih čestica u danim uvjetima. Na električki nabijenu česticu u homogenom magnetskom polju djeluje Lorentzova sila okomito na smjer gibanja čestice i magnetskog polja. Lorentzova sila uzrok je kružnog gibanja čestice oko silnica magnetskog polja koje se naziva ciklotronsko ili Larmorovo gibanje (Slika 8). Kako bi se smanjilo raspršivanje naboja, oko cijevi uređaja je namotana električki vodljiva zavojnica koja vlastitim magnetskim poljem inducira struju u plazmi i magnetsko polje suprotnog smjera. Rezultat je izjednačavanje sila koje zadržavaju plazmu u određenom volumenu.

Razlikujemo ugrubo dva koncepta uređaja za magnetsko ograničenje plazme – otvorene i zatvorene. U otvorenim konfiguracijama, magnetske silnice napuštaju područje plazme, a u zatvorenim konfiguracijama ostaju. Poznato tehnološko rješenje otvorene konfiguracije je zrcalno cilindrični sustav, a zatvorene konfiguracije tokamak i stellarator. Trenutno je vodeća izvedba uređaja za magnetsko ograničenje plazme tokamak.

4.1. Procjena magnetskog polja

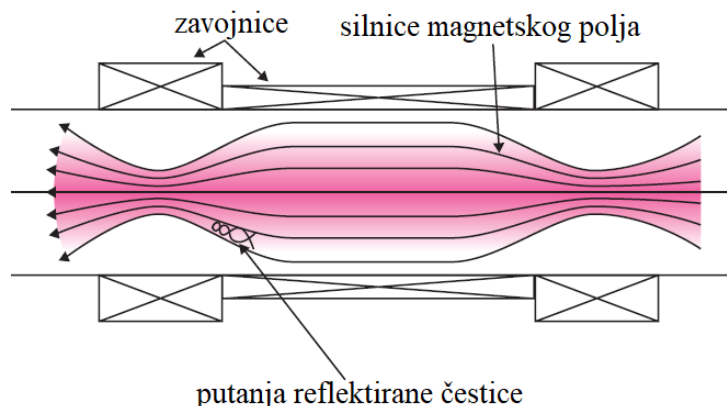
Mjera učinkovitosti kojom vanjsko magnetsko polje ograničava plazmu naziva se β vrijednost, a iskazuje se relacijom (20) kao omjer tlaka plazme p i gustoće magnetske energije w_m :^{1, 10}

$$\beta = \frac{p}{w_m} = 2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot nkT}{B^2} \quad (20)$$

gdje je μ_0 magnetska permeabilnost vakuuma ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m), n gustoća čestica plazme (m^{-3}), k Boltzmannova konstanta ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K), T temperatura plazme (K) i B magnetska indukcija (T).

Visoka β vrijednost označava viši tlak plazme u odnosu na silu magnetskog polja. Viši tlak plazme znači veću gustoću snage, veću stopu fuzijskih reakcija i veći energetske doprinos. Za ekonomski isplative reaktore je, dakle, poželjna visoka β vrijednost. Međutim, visoku β vrijednost je teško eksperimentalno postići zbog nestabilnosti plazme koje rastu s gustoćom snage plazme. Nisku β vrijednost je lakše postići uz posljednicu slabijeg magnetskog ograničenja plazme.^{1, 10}

4.2. Zrcalni cilindrični sustav



Slika 9. Skica zrcalnog cilindričnog sustava.¹²

Jedan od prvih rješenja problema raspršenja nabijenih čestica na krajevima cijevi je bio zrcalni cilindrični sustav (Slika 9). Oko cijevi i blizu njezinih krajeva postavljene su dodatne zavojnice s ulogom povećanja magnetskog polja pri čemu su se naboji reflektirali.

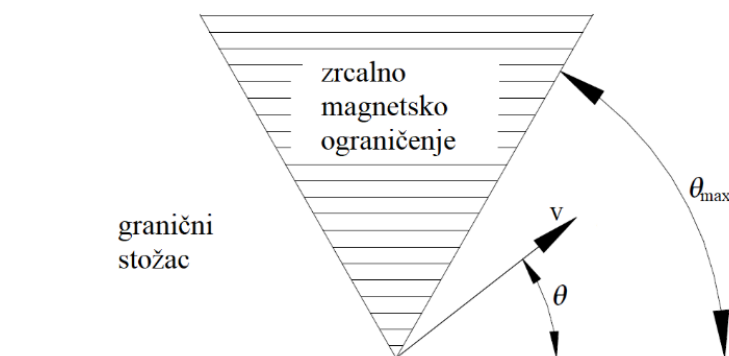
Paralelna komponenta brzine čestice, opisana relacijom (21), ovisna je o kinetičkoj energiji čestice, magnetskom momentu i jakosti magnetskog polja. U odsutnosti električnog polja, kinetička energija čestice i magnetski moment su konstanti zbog čega će se paralelna brzina čestice mijenjati ovisno o jačini magnetskog polja u kojem se giblje.¹⁹

$$\frac{m_e \cdot v_{||}^2}{2} = E_k - \mu \cdot H \quad (21)$$

gdje je m_e masa nabijene čestice (kg), v_{\parallel} paralelna komponenta brzine nabijene čestice (m/s), E_k kinetička energija nabijene čestice (J), μ magnetski moment nabijene čestice (Am^2) i H jakost magnetskog polja u kojem se čestica giba (A/m).

Kako se čestica giba iz područja slabog magnetskog polja u područje jakog magnetskog polja, vrijednost vanjskog magnetskog polja raste zbog čega joj paralelna komponenta brzine v_{\parallel} opada. Kada je magnetsko polje dovoljno jako na suženju zrcalnog sustava, paralelna brzina joj postaje nula uslijed čega se čestica reflektira prema području slabog magnetskog polja. Čestica je tako zarobljena između dva magnetska ogledala. Ovaj efekt naziva se „zrcalnim efektom“ (eng. *mirror effect*) na temelju kojeg su izgrađene i proučavane prve linearne magnetske izvedbe za ograničavanje plazme.¹⁹

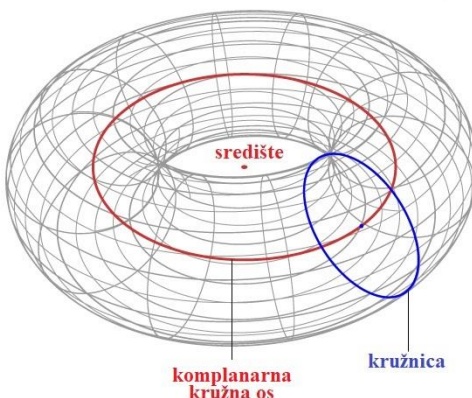
Međutim, ovaj efekt ne funkcioniše za sve čestice. Općenito, čestice s manjom kinetičkom energijom od umnoška magnetskog momenta i magnetskog polja ostat će zarobljene, a one s većom kinetičkom energijom će se usporiti, ali ne i reflektirati, što doprinosi gubitku čestica.¹⁹



Slika 10. Stožac gubitka u prostoru brzine u magnetskom zrcalu.¹⁸

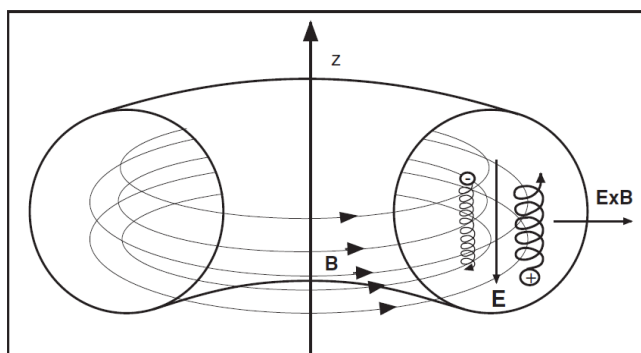
Distribucijska funkcija u obliku stošca, takozvani stožac gubitka (eng. *loss-cone*), određuje pri kojim kutovima u prostoru se čestica može gibati bez da iščezne iz plazme (Slika 10). Sve čestice plazme čiji je kut gibanja θ veći od graničnog kuta θ_{\max} su zarobljene, a ostale su raspršene.¹⁸

4.3. Toroidalni sustav



Slika 11. Oblik torusa.²⁹

Magnetsko ograničenje u zrcalnim cilindričnim sustavima nije bilo zadovoljavajuće jer su Coulombovi sudari kontinuirano raspršivali čestice plazme.¹¹ Rješenje ovog nedostatka bilo je savijanje ravnih magnetskih silnica u torusni oblik (Slika 11) s nedostatkom homogenosti polja.¹³

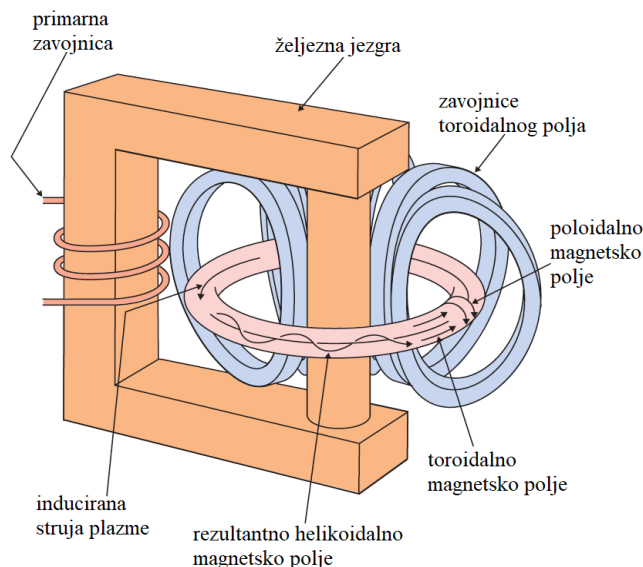


Slika 12. Gibanje električki nabijenih čestica u toroidnom nehomogenom magnetskom polju.¹³

Međutim, u nehomogenom i zakrivljenom magnetskom polju, nabijene čestice se gibaju (eng. *drift*) u smjeru okomitom na magnetsko polje i koncentracijski gradijent (Slika 12). Tako nastalo odvajanje naboja uzrokuje vertikalno električno polje E odgovorno za drugo gibanje čestica radijalno prema van što je činilo zadržavanje plazme nemogućim.^{11, 13}

4.4. Tokamak uređaji

Problem vertikalnog gibanja čestica (eng. *drift*) kompenzirao se dizajnom tokamaka. Tokamak je uređaj koji koristi snažna magnetska polja kako bi ograničilo plazmu za kontrolirane reakcije fuzije.¹¹



Slika 13. Shematski prikaz struja i magnetskih polja u tokamaku.¹²

Uvijanjem toroidalnih magnetskih silnica, usmjerene duž toroidne osi, pomoću poloidnog magnetskog polja, okomitog na toroidno polje, dobiveno je helikoidalno magnetsko polje koje se nakon nekoliko revolucija oko glavne osi nađe u unutrašnjosti torusa (Slika 13).^{11, 12}

4.4.1. Nestabilnosti plazme

Nestabilnosti plazme su sve nepravilnosti ili promjene u svojstvima plazme uslijed kojih dolazi do gubitka energije i poteškoća u kontroliranju plazme. Mogu nastati na različite načine zbog čega trenutno ne postoji jedinstvena teorija koja bi ih sve obuhvatila. Umjesto toga, postoji mnoštvo različitih teorija i metoda za proučavanje različitih aspekata nestabilnosti plazme ovisno o specifičnim uvjetima i kontekstu.

S obzirom na vremenske i prostorne razmjere u kojima se pojavljuju, razlikujemo makroskopske i mikroskopske nestabilnosti. Makroskopske nestabilnosti plazme djeluju na cijeli sustav zbog čega se smatraju najopasnijim vrstama nestabilnosti. Mikroskopske nestabilnosti nastaju na vrlo malim, lokalnim veličinama sustava. Poznavanje i teorijski opis ovih nestabilnosti ključno je za razvijanje metoda kojima će se uspješnije postići kontrolirana fuzija.¹

4.4.2. Problemi tokamaka

Jedan od glavnih problema tokamaka je potreba za velikim toroidalnim magnetskim poljem. Velika toroidalna magnetska polja su inženjerski ostvariva, ali povećavaju tehnološku složenost i troškove izgradnje reaktora. Kako ne bi bilo potrebe za velikim toroidalnim magnetskim poljima, trenutno se proučavaju supravodljivi magneti kao njihova zamjena.¹

Također, reaktor će morati kontinuirano biti u pogonu. Takav režim rada zahtjeva vanjski pogon struje koji uključuje skupe visokotehnološke izvore čija učinkovitost nije velika.¹

U tokamaku, uslijed sudara čestica, nastaje prirodno inducirana struja (eng. „*bootstrap current*“) koja ne zahtijeva vanjske izvore struje. Kako bi izvedba reaktora bila prihvatljiva, dogovorom je određeno da udio prirodno inducirane struje za pogon reaktora mora biti više od 75%.¹

4.4.3. Razvoj i perspektiva tokamaka

Prva eksperimentiranja s toroidalnim konfiguracijama za ograničenje plazme započela su u SSSR-u 1950-ih godina. Prvi tokamak u povijesti, T-1, konstruiran je u Moskvi 1958. godine po čijem su uzoru konstruirani tokamaci diljem svijeta koji su s vremenom ostvarivali rekordne rezultate. Europski tokamak JET, izgrađen 1983. godine u Ujedinjenom Kraljevstvu, postigao je prvu kontroliranu fuzijsku reakciju u svijetu 1991. godine. Sovjetski tokamak T-15, u pogonu između 1988. i 1995. godine, bio je prvi industrijski prototip fuzijskog reaktora koji koristi supravodljive magnetne za ograničenje plazme. Američki tokamak TFTR, izgrađen oko 1980. godine, postigao je rekordnu temperaturu plazme od 510 milijuna Celzijevih stupnjeva 1994. godine. Japanski tokamak JT-60, izgrađen oko 1985. godine, postigao je najveću vrijednost produkta τ_E 1997. godine. Francuski tokamak Tore Supra, izgrađen 1988. godine, postavio je rekord za najduže vrijeme zadržavanja plazme, 6 minuta i 30 sekundi, 2003. godine. Europski tokamak JET je 2022. godine postigao prvu održivu i visoko-ograničenu plazmu koristeći iste materijale i mješavinu goriva koje će koristiti ITER.²⁰

Eksperimentalni rezultati više od 300 sagrađenih tokamaka doprinijeli su dizajnu i konstruiranju današnjeg ITER-a koji će služiti kao temelj svih budućih fuzijskih projekata. Dizajn ITER-ovog tokamaka uključuje glavne ishode:

1. Postizanje plazme iz smjese deuterij-tricij goriva čija će se temperatura uglavnom održavati toplinom iz fuzijskih reakcija.
2. Ostvariti fuzijsku snagu plazme koja odgovara faktoru pojačanja $Q = 10$.
3. Demonstrirati integraciju tehnologija eksperimentalnih fuzijskih uređaja manjeg opsega i demonstracijskih fuzijskih elektrana velikog opsega.
4. Testiranje proizvodnje tricija iz izotopa ${}^6\text{Li}$ unutar vakuuma.
5. Demonstrirati kontrolu nad plazmom i fuzijskim reakcijama sa zanemarivim posljedicama za okoliš.^{22, 26}

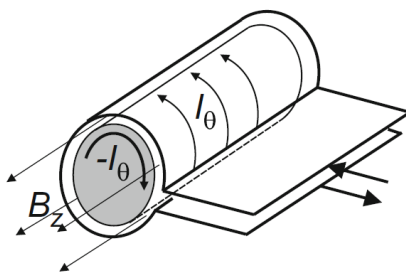
4.5. Grijanje magnetski ograničene plazme

Kao što je opisano u poglavlju 3, ako vrijednosti tlaka i vremena zadržavanja maksimalno umanjimo, potrebna temperatura za rad reaktora iznosi $T = 174\ 067\ 875\ \text{K}$. Postizanje radne temperature je višestupanjski proces što znači da se koristi nekoliko tehnika zagrijavanja:^{1, 15}

1. Ohmsko ili otporno grijanje koje nastaje kada struja prolazi kroz plazmu i sudara se s električki nabijenim česticama pri čemu se čestice ubrzavaju i mijenjaju smjer gibanja što dovodi do trenja i stvaranja topline.^{1, 15, 16}
2. Injektiranje brzih neutralnih čestica. Ioni, istovjetni onima u plazmi (vodik ili deuterij), se ubrzavaju izvan tokamaka i neutraliziraju elektronima. Formirani neutralni atomi imaju znatno veće energije od iona u plazmi i nisu pod utjecajem magnetskog polja uslijed čega neometano prolaze magnetskim poljem u reaktor gdje ih plazma ponovno ionizira.^{1, 15, 16}
3. Mikrovalno grijanje apsorpcijom elektromagnetskih valova visoke frekvencije koji ulaze u reaktor gdje se raspršuju i apsorbiraju.^{1, 15, 16}
4. Proizvedene α čestice, koje sadrže 20% oslobođene fuzijske energije, oslobađaju energiju termalizacijom s ionima plazme kako bi održavale stalnu temperaturu plazme.^{1, 15}

4.5.1. Theta stezanje

Postoji posebna metoda zagrijavanja magnetski ograničene plazme koja se temelji na takozvanom efektu „stezanja“ (eng. *pinch-effect*). Efekt stezanja plazme događa se kada se plazma izloži određenoj geometriji magnetskog polja pri čemu magnetsko polje vrši silu na nabijene čestice u plazmi.

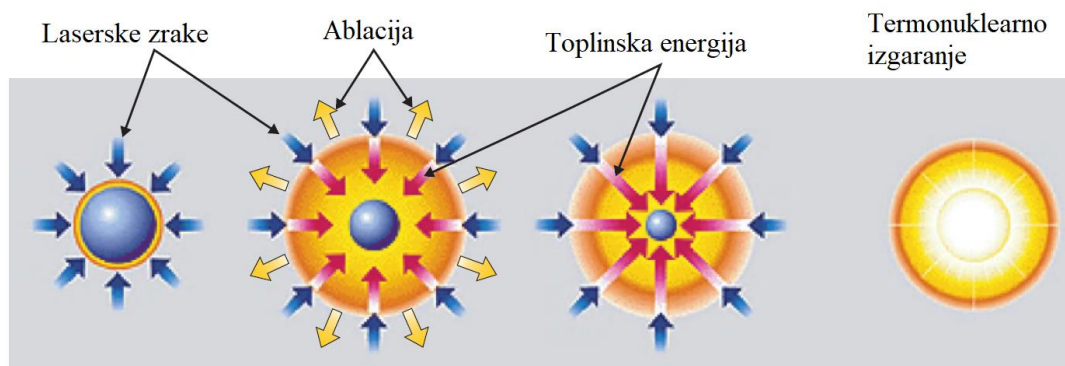


Slika 14. Shema uređaja za radijalno stezanje.¹¹

Kada se na cilindrične metalne cijevi nalik kondenzatoru priključi visoki napon, struja I_0 proizvedena u metalnim cijevima proizvodi magnetsko polje B_z duž plazme koja teče cijevima (Slika 14). Magnetsko polje inducira struju u plazmi suprotnog smjera od struje u metalnoj cijevi. Nastala magnetska sila radijalno tlači plazmu prema unutra pri čemu se gustoća i temperatura plazme povećava. Tlak plazme djeluje kao protusila magnetskoj sili, a resultantna sila ograničava plazmu unutar određenog radijusa R .¹⁰

5. INERCIJALNO OGRANIČENJE PLAZME

Inercijalno ograničenje plazme (eng. *Inertial confinement*) je tehnika iniciranja fuzijske reakcije. Za razliku od tehnike magnetskog ograničenja, tehnika inercijalnog ograničenja koristi suprotnu metodu - visoku gustoću plazme i kratko vrijeme zadržavanja. Princip je da se smjesa D-T goriva u obliku peleta zagrijavanjem toliko brzo stlači da dosegne uvjete za fuzijsku reakciju, a istovremeno da sagori prije nego se nastala plazma značajno proširi.¹¹ Inercija samog goriva sprječava njezino širenje zbog čega je tehnika i dobila ime.¹²



Slika 15. Shema četiri faze pokretanja fuzije inercijskim zadržavanjem.¹²

Peleti goriva, male sferične kuglice ili kapsule promjera nekoliko milimetara, simetrično se zagrijavaju laserskim snopovima ili snopovima česticama koje dovode do ablacije materijala peleta (Slika 15). Vanjski sloj peleta vrlo brzo isparava, a gorivo se, uslijed očuvanja količine gibanja, gura prema unutra stvarajući imploziju. Tako stvoreni tlak zagrijava pelet na ekstremno visoke temperature. Vrijeme zadržavanja odgovara vremenu potrebnom da čestice napuste centar implozije.¹³

Jedan od problema pri kompresiji peleta je taj što se često peleti iskrive i raspadnu prije nego što dosegnu uvjete za fuzijsku reakciju. Ravnomjerno zagrijavanje zahtijeva posebne laserske zrake od kojih svaka mora biti vrlo visoke optičke kvalitete i jednoliko raspoređene oko površine kapsule.¹² Tehničke prepreke nestabilnosti peleta goriva i učestalosti njihove proizvodnje razlog su zašto prve komercijalne fuzijske elektrane nisu temeljene na ovoj tehnici.¹³

6. MEĐUNARODNI PROJEKT ITER

ITER (eng. *International Thermonuclear Experimental Reactor*) je najveći i najnapredniji međunarodni istraživački i inženjerski projekt izgradnje električne elektrane na fuzijski pogon. Projekt je zamišljen kao posljednji eksperimentalni korak u dokazivanju izvedivosti fuzije kao velikog izvora energije bez proizvodnje stakleničkih plinova.

Glavni cilj ITER-a je postizanje stabilne plazme s faktorom povećanja $Q = 10$ koja traje dovoljno dugo da se postigne kvazi-stabilno stanje reaktora. Drugi je cilj postizanje samoodržive fuzijske reakcije metodom induciranja struje u plazmi bez oslanjanja na

vanjske izvore električne energije. Do danas, u projektu sudjeluje EU, SAD, Japan, Indija, Kina i Južna Koreja koji zajedno rade na konstrukciji elektrane.²²

Projekt koji je prethodio ITER-u bio je INTOR (eng. *International Tokamak Reactor*) krajem 1970-ih. Već se tada javila potreba izgradnje eksperimentalnog pogona za istraživanje fuzijske tehnologije kako bi se uspješno mogao dizajnirati prvi fuzijski reaktor. Usprkos vrlo uspješnoj međunarodnoj suradnji i temeljima za buduća istraživanja, tehnološki nedostaci onemogućili su istraživačima predviđanje vremena zadržavanja i energije „paljenja“ plazme zbog čega se nikada nisu izgradili prvobitni dizajni fuzijskih reaktora.^{1,21}

U studenom 1985. godine na Ženevskom skupu, pokrenuta je nova međunarodna suradnja između SSSR-a i SAD-a s ciljem dizajniranja i izgradnje fuzijskog reaktora nove generacije - ITER. U listopadu 1986. godine u Reykjaviku, projektu su se priključila Europska Unija, putem Europske zajednice za atomsku energiju (Euratom), i Japan.²¹

Prvi korak u projektu bio je razvoj konceptualnog dizajna. Konačni konceptualni dizajn tokamaka je, nakon 12 godina financijskih, političkih i znanstvenih poteškoća, odobren u srpnju 2001. godine. Projektu su se naknadno priključila Kina i Južna Koreja u siječnju 2003. godine te Indija u prosincu 2005. godine. Nakon intenzivnih političkih pregovora o lokaciji izgradnje ITER-ovog postrojenja, u srpnju 2005. godine, postignut je međunarodni sporazum za izgradnju postrojenja na jugu Francuske u regiji Cadarache. Konačni sporazum potpisan je u Parizu 21. studenog 2006. godine nakon čega je pokrenuta službena izgradnja.²¹

Tijekom 2007. i 2009. godine radovi su započeli iskopavanjem i pripremom terena. U kolovozu 2010. godine započinje priprema mjesta za reaktor te izgradnja ostalih dijelova postrojenja i objekata. Između 2011. i 2014. godine izgrađeni su temelji za reaktor nakon čega je uslijedila konstrukcija reaktorskog kompleksa. Dijelovi reaktora izgrađeni su, testirani i transportirani iz država-članica projekta na lokaciju izgradnje postrojenja. Prvih 12 dijelova reaktora dostavljeni su na gradilište u prosincu 2015. godine. U srpnju 2020. godine započelo je sastavljanje mašinerije reaktora. U rujnu 2023. godine završeni su civilni radovi na reaktorskom kompleksu dok je sastavljanje dijelova mašinerije još u tijeku.²¹

U 2022. godini, izvršni direktor je pokrenuo reformu koja je uključivala izmjene u hodogramu projekta zbog kašnjenja u radu uzrokovanih pandemijom koronavirusa i tehničkim poteškoćama.²⁴ Prema trenutnom prijedlogu, iznesenom na 34. ITER-ovom vijeću u lipnju 2024. godine, početak rada postrojenja odgodio bi se s 2025. godine na 2034. godinu uz dodatne troškove i izmjene u dizajnu reaktora. Postrojenje bi se pogonilo isključivo deuterijevim gorivom dok se eksperimentalno ne postigne uspješna struja plazme oko 2036. godine nakon čega bi se reaktor prenamijenio za pogon na deuterij-tricij gorivo čiji bi radovi trebali započeti 2039. godine.²³



Slika 16. Tlocrt ITER-ovog postrojenja.³⁰

7. BUDUĆNOST NUKLEARNE FUZIJE

ITER je uglavnom eksperimentalni objekt dizajniran u znanstveno-istraživačke svrhe. U neposrednoj je budućnosti cilj izgraditi i upravljati ITER-om. Nakon što ITER postane funkcionalni prototip fuzijskog reaktora, prijeći će se na sljedeći korak razvoja fuzijske elektrane – DEMO.¹

Demonstracijska elektrana ili, skraćeno, DEMO je program dizajniranja industrijske fuzijske elektrane s ciljem proizvodnje električne energije, ali ne na razini komercijalnih elektrana. Dosadašnji eksperimenti osmišljeni su prvobitno za istraživanje fizike plazme. DEMO će morati demonstrirati kontinuirani rad u punoj snazi na siguran, pouzdan i održiv način. Dizajn takve elektrane će morati uzeti u obzir fizičke zahtjeve te inženjerska i tehnološka ograničenja.²⁵ Program DEMO će provoditi EUROfusion, krovna organizacija europskih laboratorija za istraživanje fuzije, za razliku od ITER-a kojeg provodi vlastita istoimena organizacija.

Ukoliko se DEMO program pokaže uspješnim, posljednji je korak komercijalno fuzijsko energetska postrojenje. Zbog svoje složenosti, kapitalni troškovi fuzijskog energetska postrojenja vjerojatno će biti visoki. Međutim, troškovi goriva i operativni troškovi trebali bi biti niski. Kao rezultat toga, ukupni troškovi električne energije iz fuzijskog energetska postrojenja mogli bi biti konkurentni s drugim izvorima energije kada fuzijska postrojenja postanu dostupna.¹

ZAKLJUČAK

Premda je plazma odavno prisutna u modernim tehnološkim inovacijama, njezina primjena u razvoju fuzijske energije može se smatrati najvažnijom. S obzirom na svjetsku potražnju električne energije, koja će u budućnosti nastaviti rasti, istraživanje plazme i fuzijske energije od velikog je značaja i prioriteta. Razumijevanje fizike plazme, u znanstvenom smislu, također daje prostor za povezivanje fenomena, svojstava i zakonitosti s drugim fizikalnim sustavima što bi moglo pridonijeti razumijevanju svijeta oko nas.

Spomenuta problematika u razvoju komercijalnih fuzijskih energetska postrojenja implicira da se radi o jednom od, ako ne i najzahtjevnijem, znanstvenom i tehnološkom pothvatu modernog doba. U kontekstu zaštite okoliša, koja je prethodnih desetljeća goruće političko, društveno i ekonomsko pitanje, pruža mogućnost minimaliziranja posljedica industrije na prirodu istovremeno zadovoljavajući energetske potrebe svjetske potrošnje. Integriranjem nove tehnologije dobivanja energije, neizbježna je prilagodba i preoblikovanje znanosti, industrije i ekonomije. S obzirom na pozitivne ishode koje znanstvena zajednica ostvaruje s vremenom, očekuje se komercijalizacija fuzijskog energetska postrojenja sredinom do, zasigurno, kraja ovog stoljeća.

POPIS KRATICA I SIMBOLA

α	stupanj ionizacije
β	mjera učinkovitosti kojom vanjsko magnetsko polje ograničava plazmu
B	magnetska indukcija (T)
c	brzina svjetlosti u vakuumu (299 792 458 m/s)
DEMO	(eng.) Demonstration power plant
e	elementarni naboj ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C)
ϵ_0	dielektrična permitivnost vakuuma ($8,85 \cdot 10^{-12}$ C ² /N·m ²)
E_k	kinetička energija čestice (J)
$\overline{E_K}$	prosječna kinetička energija čestica (J)
H	jakost magnetskog polja u kojem se čestica giba (A/m)
ITER	(eng.) International Thermonuclear Experimental Reactor
INTOR	(eng.) International Tokamak Reactor
JET	(eng.) Joint European Torus
JT-60	(eng.) Japan Torus-60
k	Boltzmannova konstanta ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)
m_ϵ	masa čestice (kg)
m_e	masa elektrona ($9,11 \cdot 10^{-31}$ kg)
μ_0	magnetska permeabilnost vakuuma ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m)
μ	magnetski moment nabijene čestice (Am ²)
N	ukupni broj molekula i iona u plazmi
N_i	broj iona u plazmi
n	gustoća plazme (m ⁻³)

n_e	gustoća elektrona u ravnoteži (m^{-3})
n	neutron
ω_p	frekvencija plazme (s^{-1})
P_{neto}	snaga proizvedena fuzijskim reakcijama (W)
P_{in}	snaga potrebna za vanjsko zagrijavanje plazme (W)
p	tlak plazme (Pa)
p^+	proton
λ_D	Debyjeva duljina (m)
Q	faktor pojačanja
S_α	snaga koju proizvode alfa čestice nastale kao produkt nuklearne fuzije (J)
S_h	svi gubitci energije u plazmi koji nisu povezani s kočnim zračenjem ili kondukcijom (J)
S_B	gubitak energije u plazmi zbog kočnog zračenja (J)
S_κ	gubitak energije u plazmi kondukcijom (J)
σ	mikroskopski poprečni presjek (m^2)
T	temperatura čestica (K)
θ	kut gibanja čestica plazme ($^\circ$)
θ_{max}	granični kut gibanja čestica plazme ($^\circ$)
τ_E	vrijeme zadržavanje energije (s)
TFTR	(eng.) Tokamak Fusion Test Reactor
$v_{ }$	paralelna komponenta brzine čestice (m/s)
w_m	gustoća magnetske energije (J/m^3)

LITERATURA

1. *J. P. Friedberg*, Plasma Physics and Fusion Energy, Cambridge University Press, 2007., str. 3-4, 16-18, 22-29, 37-51, 60-73, 86-89, 111-113, 333-335, 380-385, 534-537, 540-544, 551-557, 564-565, 633-643
2. *F. F. Chen*, Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion, 3rd Edition, Springer, 2016., str. 1-11, 75-82, 355-359, 393-398
3. *B. Holzer*, Introduction to Plasma Physics, Proceedings of the 2014 CAS-CERN Accelerator School: Plasma Wake Acceleration, Volume 1, CERN, 2016., str. 51-52, doi: <https://doi.org/10.5170/CERN-2016-001.51> (11.03.2024.)
4. *N. Xiros*, Plasma Definition and Classification. In: Mathematical Magnetohydrodynamics: Synthesis Lectures on Mechanical Engineering, Springer, Cham, 2018. str. 1-2, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-79601-2_1 (11.03.2024.)
5. *D. Mance*, Primjena plazme u medicini i stomatologiji, Medicina Fluminensis: časopis Hrvatskoga liječničkog zbora, Vol. 53, br. 2, 2017., str. 180 – 181
doi: https://doi.org/10.21860/medflum2017_179756 (11.03.2024.)
6. URL: <https://euro-fusion.org/fusion/fusion-on-earth/> (08.03.2024.)
7. URL: <https://euro-fusion.org/fusion/fusion-conditions/> (04.04.2024.)
8. URL: <https://www.uniba.it/it/docenti/favia-pietro/attivita-didattica/chim-ind-inorg-processi-industriali-via-plasma/2-fundamentals-of-plasmas.pdf> (12.03.2024.)
9. *L. Conde*, An Introduction to Plasma Physics and its Space Applications, Volume 1, Morgan & Claypool Publishers, 2018., str. 1-1, 2-1, 2-2, 4-12, 4-13
10. *J. A. Bittencourt*, Fundamentals of Plasma Physics, 4th Edition, Springer, 2018., str. 9-10, 269-273, 319-322, 325
11. *A. Piel*, Plasma Physics: An Introduction to Laboratory, Space, and Fusion Plasmas, 2nd Edition, Springer, 2017., str. 24-25, 46-47, 63-65, 107, 131, 140-145
12. *G. McCracken, P. Stott*, Fusion. The Energy of the Universe, Academic Press, 2012., str. 33, 47, 53, 67-68, 76-78, 92-94, 185-186
13. *A. Dinklage, T. Klinger, G. Marx, L. Schweikhard* (ur.), Plasma Physics: Confinement, Transport and Collective Effects, Springer, 2005., str. 147-149, 445-448, 455-457

14. *B. Vršak*, Temelji fizike plazme, Školska knjiga, 1996., str. 9, 65, 96-97
15. *J. J. Basdevant, J. Rich, M. Spiro*, Fundamentals in Nuclear Physics from Nuclear Structure to Cosmology, Springer, 2005., str. 332, 342-346
16. *R. L. Murray, K. E. Holbert*, Nuclear Energy: An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes, 7th Edition, Elsevier, 2015., str. 482-483
17. URL: <https://www.iaea.org/topics/energy/fusion/background> (04.04.2024.)
18. *P. M. Bellan*, Fundamentals of Plasma Physics, Cambridge University Press, 2008., str. 84-87
19. *R. J. Goldston, P. H. Rutherford*, Introduction to Plasma Physics, IOP Publishing Ltd, 1995., str. 39-40
20. URL: <https://www.iter.org/sci/BeyondITER> (07.08.2024.)
21. URL: <https://www.iter.org/proj/itermilestones> (09.08.2024.)
22. URL: <https://www.iter.org/proj/inafewlines> (09.08.2024.)
23. URL: <https://www.iter.org/newsline/-/4056> (09.08.2024.)
24. URL: <https://physicsworld.com/a/iter-fusion-reactor-hit-by-massive-decade-long-delay-and-e5bn-price-hike/> (09.08.2024.)
25. URL: <https://euro-fusion.org/programme/demo/> (10.08.2024.)
26. URL: <https://www.iter.org/sci/Goals> (11.08.2024.)
27. URL: <https://psiberg.com/maxwell-boltzmann-distribution/> (29.7.2024.)
28. URL: https://www.researchgate.net/figure/Helical-motion-of-a-charged-particle-around-a-magnetic-field-line_fig7_262364216 (16.04.2024.)
29. URL: <https://mathmonks.com/torus> (18.04.2024.)
30. URL: <https://www.iter.org/doc/all/content/com/gallery/construction/assemblyoverview/worksites-assembly.jpg> (09.08.2024.)

POPIS SLIKA

Slika 1. Shematski prikaz: (a) Brownovo gibanje neutralnih molekula u standardnom plinu; (b) nasumično gibanje električki nabijenih čestica i molekula ioniziranog plina. ⁹	2
Slika 2. Maxwell-Boltzmannova distribucija čestica prema kinetičkoj energiji. ²⁷	3
Slika 3. Podjela plazme s obzirom na temperaturu. ⁵	4
Slika 4. Debyejevo zasjenjenje nabijenih kugli umetnutih u plazmu. ³	5
Slika 5. Raspodjela naboja i električno polje pri oscilacijama plazme. ¹⁴	6
Slika 6. Shematski prikaz potencijalne energije dvije jezgre kao funkcije njihove udaljenosti. ¹³	12
Slika 7. Shematski prikaz mikroskopskog poprečnog presjeka σ ciljane čestice na makroskopskom poprečnom presjeku A materijala debljine dx . ¹	14
Slika 8. Shema Larmorovog ili ciklotronskog gibanja po silnici magnetskog polja B . ²⁸	18
Slika 9. Skica zrcalnog cilindričnog sustava. ¹²	19
Slika 10. Stožac gubitka u prostoru brzine u magnetskom zrcalu. ¹⁸	20
Slika 11. Oblik torusa. ²⁹	21
Slika 12. Gibanje električki nabijenih čestica u toroidnom nehomogenom magnetskom polju. ¹³	21
Slika 13. Shematski prikaz struja i magnetskih polja u tokamaku. ¹²	22
Slika 14. Shema uređaja za radijalno stezanje. ¹¹	25
Slika 15. Shema četiri faze pokretanja fuzije inercijskim zadržavanjem. ¹²	26
Slika 16. Tlocrt ITER-ovog postrojenja. ³⁰	28