



Universitatea „Alexandru Ioan Cuza” din Iași
Facultatea de Fizică



Diagnoza plasmelor magnetizate prin metode experimentale și numerice

Rezumatul tezei de abilitare

elaborată de Conf. univ. dr. Claudiu COSTIN
în vederea obținerii atestatului de abilitare în domeniul Fizică

Conf. univ. dr. Claudiu COSTIN

Iași, 2021

În această teză de abilitare am sintetizat cele mai importante rezultate științifice pe care le-am obținut în cei 16 ani care au trecut de la susținerea tezei de doctorat. Subiectul general al cercetărilor pe care le-am întreprins este diagnoza plasmelor magnetizate, fiind împărțit pe două direcții: studii experimentale și simulări numerice. Teza conține patru capitole în care am descris pe rând o scurtă evoluție profesională, rezultatele cercetărilor experimentale și numerice și planul de dezvoltare a carierei.

În **capitolul I** am prezentat informații despre educație, activitatea didactică, activitatea de cercetare și alte activități conexe. Am făcut studiile de licență, masterat și doctorat la Facultatea de Fizică a Universității „Alexandru Ioan Cuza” din Iași (UAIC), fiind specializat în Fizica plasmei. Din septembrie 1999 și până în prezent am fost angajat la Facultatea de Fizică a UAIC, pe post de asistent asociat, lector și conferențiar. Am desfășurat activități didactice într-un spectru destul de larg din domeniul fizicii, de la discipline fundamentale, cu adresabilitate largă, precum *Fizică generală* și *Mecanică* (seminar și lucrări practice), până la discipline specializate, specifice studiilor de master, precum *Surse de plasmă și aplicații*, *Probleme actuale ale fizicii plasmei* și *Fenomene de transfer* (curs și lucrări practice). În plus, am susținut și activități didactice cu caracter interdisciplinar, precum *Biomecanică* și *Ecosistem și interacția materiei cu organismele vii*.

Am coordonat peste 20 de lucrări de licență și peste 25 de lucrări de disertație, atât pe parte experimentală cât și pe parte de modelare/simulare numerică. Am contribuit la susținerea și dezvoltarea relațiilor de colaborare internațională cu laboratoare din diverse instituții didactice și de cercetare din Franța, Olanda, Cehia, Austria, Republica Belarus. Am fost invitat să susțin prelegeri de fizica plasmei în Republica Belarus, Republica Cehă, la școli de vară și în cadrul programului de doctorat în co-tutelă organizat între Universitatea „Alexandru Ioan Cuza” din Iași și Universitatea Shizuoka din Japonia.

În cadrul activității științifice de modelare/simulare numerică am dezvoltat mai multe coduri numerice pe baza următoarelor tehnici de simulare: Monte Carlo, Monte Carlo Flux, modelul Particle-In-Cell (PIC), modelul de fluid al plasmei și modelul colizional radiativ. Am aplicat aceste coduri numerice pentru a studia funcția de distribuție a electronilor în plasmă slab ionizată nemagnetizată, pentru a descrie plasma descărcării magnetron, plasma descărcării cu barieră dielectrică, pentru a studia interacțiunea unei sonde electrice cu o plasmă magnetizată etc.

Pe lângă activitatea de modelare/simulare numerică am fost implicat și în studii experimentale ale plasmelor magnetizate, fie plasmă de laborator precum descărcarea magnetron, fie plasmă de interes termionuclear precum cele din instalațiile tokamak (CASTOR și COMPASS) sau din dispozitive liniare cu confinare magnetică (Pilot-PSI și Magnum-PSI). În cadrul acestor experimente m-am

ocupat în principal de diagnoza electrică a plasmei cu ajutorul diferitor tipuri de sonde. Am beneficiat de două contracte de cercetător post-doctorat în țară și unul în Franța. Am participat activ la evenimente de promovare a Facultății de Fizică și a fizicii în general și am fost implicat în organizarea de evenimente științifice (conferințe, școli de vară, workshopuri).

În **capitolul al II-lea** am detaliat principalele rezultate pe care le-am obținut în activitatea de cercetare experimentală. Pentru diagnoza plasmelor de interes termonuclear am colaborat cu Institutul de Fizica Plasmei al Academiei Cehe de Științe din Praga, Republica Cehă și am abordat trei subiecte: studiul fenomenului de difuzie a particulelor încărcate cu sarcini electrice, măsurarea directă a potențialului plasmei și măsurarea temperaturii ionilor. Toate măsurătorile au fost realizate în instalația tokamak CASTOR. Fenomenul de difuzie a particulelor încărcate cu sarcini electrice a fost studiat cu o tehnică nouă, dezvoltată pe baza unei idei propuse de profesorul G. Popa, ce folosește măsurători de sondă de tip *ball-pen* și presupune analiza atenuării spectrului de putere al turbulențelor într-o anumită geometrie. Potențialului plasmei a fost măsurat direct cu o sondă de tip Katsumata, iar temperatura ionilor cu o sondă de tip tunel segmentat și o sondă de tip Katsumata. Principala concluzie privind măsurătorile de temperatură este că electronii și ionii au aproximativ aceeași temperatură la limita externă a miezului tokamakului, dar au temperaturi diferite în regiunea de margine a tokamakului.

O altă colaborare a fost cu *FOM Institute for Plasma Physics Rijnhuizen* (FOM-IPP) din Nieuwegein, Olanda, care ulterior s-a transformat în *Dutch Institute for Fundamental Energy Research* (DIFFER). Am realizat diagnoza electrică a coloanei de plasmă din instalațiile liniare cu confinare magnetică Pilot-PSI și Magnum-PSI, folosind sisteme cu un număr mare de sonde (peste 60 dispuse în plan). Rezultatele noastre sunt unice în ceea ce privește diagnoza plasmei din Magnum-PSI. Am măsurat distribuția pe suprafața țintei a potențialului flotant și a fluxurilor de particule încărcate cu sarcini electrice ce vin din coloana de plasmă, pentru un domeniu larg de condiții de lucru. Am arătat că în partea centrală a coloanei de plasmă, potențialul flotant local este mai negativ decât potențialul flotant al țintei, iar la periferia coloanei de plasmă situația este inversată. Ca urmare, ținta flotantă culege un flux dominat de electroni în centru și un flux dominat de ioni pe margine. Din acest motiv și pentru ca suprafața conductoare să-și păstreze natura echipotențială, trebuie să existe un flux de electroni în interiorul țintei flotante. Am pus în evidență modul în care se modifică ponderea ionilor și electronilor în distribuțiile spațiale de flux atunci când ținta este polarizată. De asemenea, am pus în evidență o proprietate surprinzătoare a instalației Magnum-PSI în ceea ce privește parametrii coloanei de plasmă: pentru diferite combinații ale curentului de descărcare și ale câmpului magnetic, se poate obține aceeași distribuție radială a potențialului flotant, dar cu distribuții diferite ale curentului ionic de saturație, sau pot fi obținute distribuții ale curentului ionic de saturație aproape similare, dar cu

distribuții foarte diferite ale potențialului flotant. Printr-o analiză de corelație a fluctuațiilor curenților ionici măsurăți de sonde am pus în evidență rotația coloanei de plasmă, rotație care este determinată de driftul electric $E \times B$, rezultatele fiind în acord cu distribuția spațială a câmpului electric radial în coloana de plasmă. Astfel, am furnizat pentru instalația Magnum-PSI informații esențiale ce trebuie să se afle la baza oricărui studiu de interacțiune a plasmei cu suprafața.

În privința descărcării magnetron m-am focalizat pe diagnoza modului de operare în pulsuri de mare putere, descărcare cunoscută în literatură sub denumirea de *High Power Impulse Magnetron Sputtering* (HiPIMS). Această tehnologie a deschis noi perspective în producerea de materiale avansate sub formă de straturi subțiri datorită obținerii unui grad ridicat de ionizare a materialului pulverizat în descărcare. Am investigat descărcarea magnetron pulsată prin metoda fotografierii rapide. Spre deosebire de măsurătorile optice de emisie, tehnica fotografierii rapide permite discernerea între dinamica spațială și cea temporală a densității locale a speciilor excitate din descărcare. Pentru a crește rata de depunere în modul HiPIMS, am înlocuit alimentarea descărcării magnetron în pulsuri simple cu alimentarea în trenuri de pulsuri, obținând rezultate foarte bune.

Pentru diagnoza plasmei cu sonde electrice, am propus două metode de obținere a caracteristicii curent-tensiune a unei sonde electrice prin măsurarea unui singur parametru variabil în timp, fie intensitatea curentului electric cules de sondă, fie potențialul sondei. Cel de al doilea semnal se obține prin calcul. Metodele se numesc *integrală* și *diferențială*, în funcție de formula de calcul utilizată. Cele două metode propuse au fost validate prin măsurători experimentale atât în descărcări magnetizate, de interes pentru fuziune, cât și în descărcări ne-magnetizate de laborator. Ambele metode au avantajul măsurării unui singur semnal, dar au dezavantajul trasării caracteristicii în doi pași. Metodele propuse sunt potrivite pentru experimente cu un număr mare de sonde întrucât numărul necesar al canalelor de achiziție este egal cu numărul de sonde. De asemenea, metodele sunt foarte promițătoare pentru instalațiile de fuziune în care plasma este confinată magnetic și în care, de multe ori, se utilizează doar ramura ionică a caracteristicii pentru diagnoza plasmei. În astfel de cazuri, metodele propuse se vor aplica într-un singur pas.

În **capitolul al III-lea** am prezentat rezultatele studiilor numerice pe care le-am realizat. Simularea numerică a devenit o componentă importantă a cercetării științifice, uneori fiind la fel de utilă ca cea experimentală sau teoretică. Am studiat procesul de pulverizare a unei ținte metalice într-o descărcare magnetron de curent continuu, cu ajutorul modelului plasmei ca două fluide dezvoltat în timpul doctoratului. Profilul radial al fluxului de energie al ionilor gazului care bombardează ținta, calculat din modelul de fluid, a fost corelat cu profilul de eroziune a

țintei și cu profilul intensității luminoase globale emise de plasmă. Tot cu modelul de fluid am studiat influența presiunii gazului de lucru asupra distribuției spațiale a speciilor neutre de oxigen într-o descărcare magnetron produsă în amestec de gaze argon-oxigen. La presiuni ridicate (3-4 Pa), densitatea moleculelor de oxigen aflate în stare fundamentală are un minim bine definit situat în zona de plasmă densă (regiunea inelului de plasmă ce corespunde luminii negative), acolo unde densitatea speciilor excitate de oxigen prezintă un maxim. La presiuni mai joase (~1 Pa), speciile de oxigen prezintă un comportament non-local, pierzând memoria termenului sursă reprezentat de ciocnirile electronice care sunt precis localizate în zona de plasmă densă.

Pentru a simula plasma descărcării magnetron pulsate (HiPIMS), am dezvoltat împreună cu prof. T. Minea un program PIC-MCC în două dimensiuni. Aceasta a fost prima simulare spațio-temporală a descărcării HiPIMS raportată în literatură, descriind evoluția parametrilor plasmei pe durata unui puls ultra-scurt (aprox. 2 μ s): potențialul plasmei, densitatea electronilor și ionilor, funcția de distribuție a electronilor după energie etc.

Pentru a înțelege originea și evoluția fenomenelor rotaționale de tip *spoke*, am utilizat tehnica *a posteriori* Monte Carlo. Termenul *spoke* desemnează o structură de plasmă densă ce se rotește azimutal în descărcările caracterizate de prezența driftului electric $E \times B$. Rezultatele simulărilor sprijină teoria conform căreia în interiorul structurilor *spoke* se dezvoltă atât un câmp electric azimutal ce împiedică alungirea structurii în direcție azimutală, cât și un câmp electric axial ce contribuie la reducerea câmpului electric creat de plasmă, având ca rezultat diminuarea vitezei de drift azimutale. Aceeași tehnică *a posteriori* Monte Carlo mi-a permis să studiez transportul electronilor într-o descărcare magnetron pulsată, calculând doi coeficienți de transport: viteza de drift și coeficientul de difuzie.

Am dezvoltat un cod Monte Carlo pentru a studia rolul suportului ceramic al unei sonde electrice plasate într-o plasmă magnetizată asupra curentului de sondă, în cazul unei caracteristici de sondă cu pantă negativă. Ideea a pornit de la faptul că regiunea cu pantă negativă apare pe caracteristică de la o anumită valoare de prag a inducției câmpului magnetic în sus.

Zona cu pantă negativă se datorează unei creșteri suplimentare a curentului electronic atunci când sonda este polarizată la un potențial pozitiv în raport cu potențialul plasmei, prin captarea de către sondă a electronilor reflectați de potențialul flotant negativ al suportului ceramic (material dielectric) care înconjoară sonda. Prezența suportului ceramic al sondei și ciocnirile cu atomii neutri explică creșterea suplimentară a curentului electronic față de curentul de saturație, dar nu explică și regiunea cu pantă negativă a caracteristicii de sondă în care curentul electronic revine la valoarea curentului de saturație. Subiectul rămâne încă deschis unor investigații viitoare.

Am realizat un studiu asupra funcțiilor de distribuție utilizate frecvent în literatură pentru simularea particulelor care provin de la o suprafață ce mărginește o plasmă. Am definit distribuțiile unghiulare izotropă și cea de tip cosinus și am indicat algoritmi pentru generarea lor. Am combinat distribuțiile unghiulare cu trei tipuri de distribuții după energie și am comparat funcțiile de distribuție ce rezultă. Am dat exemple și de funcții de distribuție ce sunt definite greșit în literatură.

Pentru a umple golul existent în literatură, am realizat un studiu asupra procesului de emisie electronică secundară într-un câmp magnetic oblic. Folosind metoda de simulare Monte Carlo, am analizat efectele produse asupra coeficientului relativ de emisie electronică secundară de către: valoarea inducției și înclinarea câmpului magnetic, intensitatea câmpului electric din fața suprafeței, reflexia electronilor, energia de emisie și distribuția unghiulară a electronilor secundari. Pe baza analizei rezultatelor numerice am propus o formulă analitică pentru coeficientul relativ de emisie electronică secundară.

În **capitolul al IV-lea** am descris obiectivele planului de dezvoltare a carierei. Lista obiectivelor didactice conține: actualizarea și completarea materialelor suport în format electronic pentru cursuri și lucrări practice; alcătuirea unui îndrumar de lucrări practice de fizica plasmei în limba engleză; îndrumarea continuă de lucrări de licență și disertație; coordonarea de studenți doctoranzi; actualizarea laboratorului de fizica plasmei; desfășurarea de activități de tutoriat; alcătuirea unei culegeri de probleme rezolvate de fizica plasmei. În cercetare mi-am stabilit următoarele obiective: formarea unui grup de modelare/simulare în fizica plasmei; simularea procesului de obținere a depunerilor nano-structurate; simularea numerică a descărcării magnetron pulsate; aprofundarea aspectelor teoretice și practice privind diagnoza plasmelor magnetizate cu ajutorul sondelor electrice; diagnoza optică a plasmelor de interes termonuclear; investigarea fenomenelor de transport în plasmă de interes termonuclear; dezvoltarea de noi instrumente de diagnoză a plasmelor dense; întărirea colaborărilor internaționale.