

**UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA  
FACULTATEA DE FIZICA**

**TRANSPORT ANOMAL  
IN PLASMA  
(Rezumatul tezei de doctorat)**

**Doctorand  
Iulian PETRISOR**

**Conducator stiintific  
Prof.dr. Radu BALESCU**

**2006**

# Cuprins

- 1 Introducere
  - 2 Ecuatiile Langevin si ecuatia cinetica hibrid
    - 2.1 Ecuatiile Langevin
    - 2.2 Ecuatia cinetica hibrid
  - 3 Metoda decorelarii traiectoriilor
  - 4 Camp magnetic stochastic
    - 4.1 Campul magnetic stochastic cu shear
      - 4.1.1 Ecuatiile Langevin pentru liniile de camp magnetic
      - 4.1.2 Metoda DCT pentru difuzia liniilor de camp magnetic
      - 4.1.3 Traiectorii de decorelare
      - 4.1.4 Coeficienti de difuzie
    - 4.2 Campul magnetic stochastic anizotrop cu shear
      - 4.2.1 Traiectorii de decorelare si coeficienti de difuzie
    - 4.3 Concluzii
  - 5 Camp stochastic electrostatic
    - 5.1 Difuzia centrului de ghidaj in camp electrostatic stochastic combinat cu un camp magnetic cu shear
    - 5.2 Ecuatiile de miscare pentru particula test
    - 5.3 Ecuatiile de miscare pentru electron
    - 5.4 Traiectorii de decorelare pentru electron
    - 5.5 Coeficienti de difuzie radiali si poloidali obtinuti prin metoda DCT
    - 5.6 Coeficienti de difuzie radiali si poloidali obtinuti prin simulari numerice directe
    - 5.7 Concluzii
  - 6 Structuri zonale
    - 6.1 Introducere
    - 6.2 Ecuatiile Langevin pentru cvasiparticule
    - 6.3 Metoda DCT pentru structuri zonale
    - 6.4 Traiectorii de decorelare
    - 6.5 Coeficienti de difuzie pentru cvasiparticula
    - 6.6 Influenta numarului Kubo diamagnetic
    - 6.7 Concluzii
  - 7 Concluzii finale
  - 8 Anexa: Coduri utilizate in calculele numerice
    - 8.1 Anexa pentru Capitolul 4
    - 8.2 Anexa pentru Capitolul 5
    - 8.3 Anexa pentru Capitolul 6
- Bibliografie

Intelegerea fenomenelor de transport a materiei si energiei in plasmе puternic magnetizate aflate la temperaturi foarte inalte constituie o problema importanta si actuala in programul de fuziune nucleara termonucleara controlata prin confinarea magnetica a plasmei. Este binecunoscut faptul ca rezultatele obtinute in aceasta directie si care sunt bazate pe mecanismele "clasice" care tin cont de ciocnirile intre particulele individuale sunt in discrepanta majora cu rezultatele experimentale din plasma de fuziune obtinute in dispozitive de tip stelator sau tokamak. Aceste mecanisme clasice constituie obiectul **Teoriei transportului clasic**. Ulterior, s-a luat in considerare si influenta geometriei campului magnetic in problema transportului de particule si energie in cazul plasmei confinate magnetic (de exemplu in cazul tokamakului s-a tinut cont de geometria toroidala), in acest fel luand nastere Teoria transportului neoclasic, teorie ale carei rezultate, in anumite situatii particulare, sunt in concordanta cu rezultatele experimentale. Exista insa suficiente procese fizice si rezultate experimentale care nu pot fi explicate nici in cadrul **Teoriei transportului neoclasic**. Tinindu-se cont de fenomenele colective care au loc in plasma de fuziune si care sunt datorate razei mari a interactiilor de tip Coulomb s-a dezvoltat o abordare calitativa si cantitativa, diferita de teoria clasica si neoclasica si anume **Teoria transportului anomal**. Din cauza existentei fenomenelor colective, in plasma apar miscari organizate care se manifesta prin aparitia unor unde (sau moduri) de mai multe tipuri, a caror interactie cu particulele individuale sau a interactiei mutuale pot determina evolutia plasmei: plasma poate evolua spre o stare stabila sau spre o stare turbulenta (care este o stare departe de o stare de echilibru termic) in functie de amplitudinea acestor moduri. Studiul proceselor de neechilibru intr-o stare departe de echilibru (care se mai numeste si stare turbulenta) constituie obiectul teoriei transportului anomal.

In cazul teoriei transportului, fie el clasic, neoclasic sau anomal, suntem interesati in obtinerea coeficientilor de transport (de obicei se urmareste obtinerea coeficientului de difuzie  $D$ ), coeficienti care sunt determinati tinand cont de efectul combinat al ciocnirilor din plasma si al nivelului turbulentei (sau in anumite cazuri doar de starea turbulenta a plasmei). Acesti coeficienti sunt numiti in literatura de specialitate "coeficienti de transport anomal".

Starea turbulenta a plasmei poate fi descrisa intr-o maniera statistica, aplicand metodele specifice mecanicii statistice, evident adaptate la problema curenta. De obicei, se construiesc un ansamblu de realizari al marimilor fluctuante cum ar fi potentialul fluctuant electrostatic sau campul magnetic stochastic trebuind a priori precizate proprietatile statistice ale marimilor fluctuante. Precizarea din punct de vedere statistic a fluctuatiilor se bazeaza pe un numar de presupuneri ce vor fi verificate (justificate) a posteriori. Folosindu-se aceasta abordare statistica, functia de distributie devine o marime stochastica spre deosebire de functia de distributie din teoria cinetica ordinara care era solutia unei ecuatii cinetice deterministe. Dezvoltarea unei teorii a transportului anomal bazat pe o ecuatie cinetica este dificila. Analiza se incepe pornind de la identificarea ecuatiilor de miscare pentru particula test aflata intr-un "camp de viteze" fluctuant a carui expresie depinde de problema

fizica concreta. Ecuatiile de miscare pentru particula test care se misca intr-un camp extern fluctuant impreuna cu definitia statistica a campului conduc la ecuatii diferentiale stochastice de tip Langevin.

Doa tipuri de stari turbulente sunt prezente in plasma de fuziune. Turbulenta electrostatica este unul dintre acestea si este asociata cu instabilitatile de frecventa mica, instabilitati care genereaza un camp electric cu un anumit grad de turbulenta in plasma. Acesta la randul sau produce o crestere a driftului de tip  $E \times B$  al particulelor si in acest fel creeaza o perturbatie a vitezei radiale a particulei in tokamak si in consecinta produce o crestere a pierderilor de particule din zona confinata. Acest tip de pierdere este echivalenta cu aparitia unui transport anomal de particule. In general, o cauza imposibil de evitat a generarii fluctuatiilor electrostatice o reprezinta undele de drift care la randul lor sunt determinate de existenta gradientilor de densitate si/sau temperatura din plasma de fuziune. Al doilea tip de turbulenta este turbulenta magnetica. In mod normal configuratia campului magnetic din tokamak este formata din suprafete magnetice concentrice netede iar liniile de camp magnetic sunt tangente la aceste suprafete, particulele care compun plasma deplasandu-se urmarind aceste linii de camp. Din pacate, in plasma de fuziune, exista instabilitati (perturbatii de scala mica) care distrug aceste suprafete magnetice iar particulele vor efectua deplasari radiale din cauza existentei acestei deformari a campului magnetic. Si aceste deplasari genereaza un transport anomal de particule. Pe tot parcursul tezei am utilizat pentru descrierea turbulentei de orice natura modelarea prin procese stochastice. Aceasta metoda este o metoda generala de abordare pentru diferite probleme din fizica si in particular este folosita si pentru descrierea proceselor de transport anomal in plasma.

In aceasta teza am abordat in principal aspecte legate de difuzia particulelor fara ciocniri in diverse configuratii de campuri stochastice caracteristice plasmei de fuziune, de difuzia liniilor de camp magnetic stochastic si de difuzia cvasiparticulelor corespunzatoare generarii de structuri zonale in plasma caracterizata de turbulenta electrostatica.

Aceste modele au fost abordate prin studiul ecuatiilor diferentiale stochastice de tip Langevin in sensul determinarii coeficientilor de difuzie in cadrul metodei decorelarii traiectoriilor; iar unele aspecte au fost abordate si prin simulari numerice directe si in acest din urma caz am evidentiat faptul ca prin metoda decorelarii traiectoriilor se pot studia si sisteme de ecuatii de tip Langevin neomogene. Structura acestei teze este urmatoarea.

In **Capitolul 2** am prezentat pe scurt teoria ecuatiilor diferentiale stochastice Langevin (paragraful 2.1) care sunt de fapt ecuatiile caracteristice ale ecuatiei cinetice hibrid, concept de asemenea prezentat in acest capitol (paragraful 2.2). Ambele abordari ale proceselor stochastice din fizica plasmei de fuziune sunt extrem de actuale si un numar mare de lucrari referitoare la aceste doua metode este prezent in bibliografia tezei.

In **Capitolul 3** este prezentata pe scurt o metoda de calcul al coeficientilor de difuzie chiar si in cazul turbulentei relativ mari si anume *metoda decorelarii traiectoriilor* (DCT). Am aplicat aceasta metoda

semianalitica in toate modelele pe care le-am abordat in aceasta teza (prezentate capitolele 4-6).

In **Capitolul 4** am studiat prin metoda DCT difuzia liniilor de camp magnetic stochastic izotrop si anizotrop, calculand in final coeficientii de difuzie ai liniilor de camp magnetic cu shear si fara shear in tokamak. Am considerat un model simplificat pentru campul magnetic din tokamak, camp care prezinta linii de camp care sunt "rasucite" (shear). Existenta shearului (preferam sa utilizam notiunea de "shear" in loc de "rasucire") influenteaza lungimea unei linii de camp intre doua puncte fixe date de coordonata  $z$  (unde  $z$  este coordonata carteziana pe directia campului magnetic de referinta). Am aratat ca shearul magnetic si numarul Kubo magnetic au o influenta importanta asupra difuziei liniilor de camp magnetic fluctuant. Problema de studiu este simplificata daca se considera campuri magnetice stochastice cu amplitudinea fluctuatiilor relativ mica si/sau lungime de corelatie perpendiculara pe directia campului magnetic de referinta pentru care corespunzator numarul Kubo magnetic este relativ mic (turbulenta magnetica relativ mica). Cea mai importanta contributie din acest capitol consta in analiza influentei shearului magnetic asupra difuziei liniilor de camp magnetic fluctuant in ambele situatii posibile, de turbulenta relativ mica, respectiv mare. S-a evidentiat prezenta unei clase foarte largi de comportamente pentru coeficientii de difuzie ai liniilor de camp magnetic. Modificarea parametrilor joaca un rol foarte important in generarea efectelor de captura a punctelor geometrice care apartin liniilor de camp si care in modelul acesta joaca practic rolul unei particule test.

In **Capitolul 5** am abordat difuzia unui electron intr-un ansamblu de campuri combinate, si anume un camp electrostatic fluctuant si un camp magnetic neperturbat cu shear. Modelul utilizat in cele ce urmeaza este similar celui de tip Langevin care descrie miscarea centrului de ghidaj in aproximatia de ordinul unu in parametrul de drift electrostatic. Proprietatile statistice ale campului electrostatic stochastic sunt extrase din rezultatele bazate pe observatiile experimentale din tokamak iar miscarea paralela cu campul magnetic de referinta este neglijata, in acest fel miscarea devenind bidimensionala. Utilizand doua metode diferite: *metoda DCT* si *simularile numerice directe* s-a pus in evidenta in cadrul modelului nostru efectul shearului asupra capturii particulelor, competitia dintre numarul Kubo de shear si numarul Kubo electrostatic. S-a obtinut o prima confirmare calitativa a rezultatelor semi-analitice obtinute prin DCT, prin intermediul simularilor numerice directe, aceasta confirmare demonstrand valabilitatea aplicarii metodei decorelarii traiectoriei chiar si in cazul sistemelor dinamice neomogene, cum este cel studiat in acest capitol.

In **Capitolul 6** am studiat difuzia cvasiparticulelor in cazul generarii de structuri zonale in plasma de fuziune. In acest capitol, am analizat in amanunt coeficientii de difuzie (atat cei dependenti de timp cat si cei asimptotici) pentru cvasiparticule (pachete de unde de drift) intr-un camp electrostatic stochastic si anizotrop. Analiza a fost realizata in spatiul fizic  $\mathbf{x}$  si spatiul vectorilor de unda  $\mathbf{k}$ , incluzand in model anizotropia campului. Analiza generarii structurilor

zonale care ia in considerare influenta neliniara a anizotropiei stochastice si a numerelor Kubo nu a mai fost facuta pana acum, aceasta analiza avand un caracter original.

Am calculat analitic apoi numeric expresiile tensorului corelatiilor Lagrange si ale tensorului de difuzie pentru un numar foarte mare de diferiti parametri implicati in analiza numerica. Astfel, s-a realizat un studiu complet al influentei parametrilor asupra conditiilor favorabile sau nefavorabile generarii de structuri zonale.

Contributia principala a acestui studiu consta in calculul si analiza detaliata a componentelor tensorului de difuzie.

In **Capitolul 7** sunt prezentate concluziile finale.

In **Anexa** am prezentat cateva repere legate de codurile numerice originale pe care le-am utilizat pentru calculele legate de coeficientii de difuzie pentru diferitele modele fizice studiate in teza.

O mare parte din rezultatele originale prezentate in aceasta teza au fost publicate sau sunt in curs de publicare in unele din cele mai importante reviste internationale consacrate plasmii de fuziune.

## BIBLIOGRAFIE SELECTIVA

1. M. Negrea, **I. Petrisor**, R. Balescu, Intrinsic trapping of stochastic sheared magnetic field lines, *Phys. Rev.* **E70** (2004) 046409
2. R. Balescu, **I. Petrisor** and M. Negrea, Anisotropic electrostatic turbulence and zonal flow generation, *Plasma Phys. Control. Fusion* **47** (2005) 2145
3. **I. Petrisor**, M. Negrea and B. Weyssow, Electron diffusion in a sheared unperturbed magnetic field and an electrostatic stochastic field, *Phys. Scr.* **75** (2007) 1-12
4. M. Negrea, **I. Petrisor** and B. Weyssow, Role of stochastic anisotropy and shear on magnetic field lines diffusion, *Plasma Phys. Control. Fusion* **49** (2007) 1767–1781
5. M. Negrea, N. Pometescu, **I. Petrisor**, The numerical analysis for the nonsymmetrical components of the diffusion tensor in fluctuating magnetic configurations, *Romanian Reports in Physics* **53**, No. 1-2, (2001) 47-52
6. M. Negrea, D. Constantinescu, **I. Petrisor** and N. Pometescu, On the perturbation of the q-profile, *Physics AUC* **10** (2000) 66-69
7. M. Negrea, D. Constantinescu, **I. Petrisor** and N. Pometescu, On the non-symmetric diffusion tensor components, *Physics AUC* **10** (2000) 70-74
8. M. Negrea, **I. Petrisor**, On the motion of charged particles in a perturbed toroidal magnetic field, *Physics AUC* **12** (2002) 99-104
9. **I. Petrisor**, M. Negrea, On the stochastic sheared magnetic field, *Physics AUC* **12** (part II) (2002) 18-31
10. **I. Petrisor**, M. Negrea, On the collisional particle motion in a stochastic sheared magnetic field, *Physics AUC* **12** (part II) (2002) 1-17
11. **I. Petrisor**, M. Negrea, Collisionless particle in a 2-D electrostatic turbulence and a sheared unperturbed magnetic field, *Physics AUC* **13** (2003) 100-109

12. M. Negrea, **I. Petrisor**, On the stochastic anisotropic sheared magnetic field lines diffusion, *Physics AUC* **14** (2004) 32-46
13. M. Negrea, **I. Petrisor**, Electron diffusion in a sheared unperturbed magnetic field and a relatively high electrostatic turbulence, *Physics AUC* **15** (2005) 58-66