

Computer modelling of plasma processes and transport for selected applications

Disertační práce Mgr. E. Havlíčkové „*Computer modelling of plasma processes and transport for selected applications*“, která byla vytvořena na Katedře povrchů a fyziky plazmatu MFF UK v letech 2005-2009. Zabývá numerickým modelováním vybraných fyzikálních procesů v plazmatu.

První část práce je věnována modelování interakce nízkoteplotního plazmatu s povrchem pevné fáze v doutnavém výboji, který je reprezentován Langmuírovou sondou. Tato tematika se studuje na katedře. K modelování jsou využity dvě rozdílné metody: simulace typu Particle-in-cell (PIC) ve dvou dimenzích a fluidní simulace, rovněž ve dvou dimenzích. V numerickém kódu PIC se berou v úvahu pružné srážky. V PIC simulaci lze rovněž zahrnout i vliv vnějšího magnetického pole, který se demonstruje na obr. 4.4. protažením vrstvy "pre-sheath" ve směru siločar magnetického pole. Ve fluidním modelování stejného problému se využívá model, který oproti standardnímu přístupu, který se většinou zmiňuje v literatuře, řeší úplnou pohybovou rovnici. Rozdíly ve výsledcích dosažených oběma výše zmíněnými technikami jsou pečlivě diskutovány v Kapitole 6. Přednosti a nevýhody obou přístupů k modelování nízkoteplotního plazmatu jsou shrnuty v Kapitole 7.

Druhá část práce (kapitoly 8-13) se zaměřuje na modelování procesu v okrajové vrstvě plazmatu v tokamacích. Tato tematika se experimentálně studuje v Ústavu fyziky plazmatu, AV ČR v oddělení tokamak jehož jsem zaměstnancem a proto se věnuji posouzení druhé části disertační práce podrobněji.

Nejprve je třeba zdůraznit, že vlastnosti vrstvy plazmatu, která se formuje mezi stěnou komory tokamaku a posledním uzavřeným magnetickým povrchem (Scrape-Off Layer, SOL) hrají velmi důležitou roli pro globální udržení plazmatu v tokamacích a pro vzájemnou interakci plazma-stěna během výboje. Parametry plazmatu v SOL závisí jak na parametrech plazmatu uvnitř prstence, tak i na geometrii a stavu povrchu komory tokamaku. Proto je nutné studovat SOL na každém jednotlivém experimentálním zařízení typu tokamak. Předkládaná práce se zaměřuje na numerické modelování parametrů této vrstvy. Většina výsledků se dá aplikovat pro tokamak COMPASS, který se v současné době uvádí do provozu v ÚFP AV ČR a jehož vědecký program je právě zaměřen na detailní experimentální studium okrajového plazmatu v různých výbojových režimech. Teoretický základ těchto experimentálních studií doposud neexistuje, modelování SOL se neprovádělo ani během předechozího provozu tokamaku COMPASS v Culham Laboratory, VB. *Proto pokládám zvolenou tematiku za vysoce aktuální.*

Těžiště práce spočívá v numerickém modelování SOL pomocí jednodimenzionálního fluidního modelu. Nejprve však autorka analyzuje vlastnosti SOL pomocí jednoduchého (0-rozměrného) analytického modelu (Kapitola 10). Hlavním cílem této části práce je nalézt výbojový režim, v němž se formuje relativně husté, avšak chladné přístěnné plazma. Při tom se podstatně redukuje tok nabitých částic na komoru tokamaku (zejména na tzv. divertorové desky) a přitom se podstatně snižuje hustota dopadajícího výkonu, rozprašování stěn, atd. Tento režim se v literatuře označuje jako "detachment". Je ukázáno, že tohoto stavu lze dosáhnout na tokamaku COMPASS ve výbojovém režimu s vysokou hustotou plazmatu při vysokém toroidálním magnetickém poli a proudu plazmatem. V práci je názorně ukázáno, že práh přechodu do režimu "detachment" lze podstatně snížit vstříkem atomů příměsí, např. Neonu.

Hlavní část práce je věnována modelování transportu v SOL v jedné dimenzi, tj. podél siločar magnetického pole (Kapitola 11). Numericky se řeší transportní rovnice formulované v paragrafu 11.2.1. Zdrojové členy, transportní koeficienty a úloha neutrální komponenty se

specifikují v paragrafech 11.2.2 až 11.2.4. Výsledkem modelování jsou profily parametrů plazmatu v SOL ve směru podél siločar magnetického pole, které jsou, jak se přesvědčivě ukázalo, silně ovlivněny přítomností neutrální komponenty. Zahrnutím neutrální komponenty se kvalitativně mění profil hustoty a podstatně klesá podélná rychlost plazmatu. Tyto výsledky modelování bude možné na tokamaku COMPASS potvrdit experimentálně.

Za velmi zajímavý výsledek pokládám zjištění, že iontová teplota v SOL je podstatně vyšší nežli teplota elektronová. To odpovídá řadě nedávných měření na několika tokamacích (TORE Supra, CASTOR, ASDEX, ...). Tento experimentální fakt se obvykle interpretuje jako anomálně rychlé ochlazování elektronové teploty v SOL. Uvítal bych kdyby Mgr E. Havlíčková buď tuto interpretaci potvrdila, nebo nabídla jiné vysvětlení pomocí analýzy výsledků svého 1D numerického modelu.

Výše zmíněné simulace se týkají modelování *steady-state* procesů probíhajících v okrajovém plazmatu tokamaků. Poslední část práce (paragraf 11.6) ve věnuje zcela nové a velmi zajímavé problematice. Zde se doktorandka zabývá využitím svého 1D transportního kódu pro výpočet paralelního transportu částic a energie během *transientních* jevů v okrajovém plazmatu. Jedná ze zejména o paralelní relaxaci turbulentních struktur typu "blobs", které se modelovali v široké mezinárodní spolupráci pomocí kódu ESEL a pozorují se rovněž v experimentech. V původním kódu ESEL se pro paralelní transport používá zjednodušený model, který nelze v řadě případů aplikovat. Aplikací 1D fluidního modelu se podařilo některé nejasnosti odstranit. V budoucnu se počítá s přímým spojením obou kódů v jeden celek (viz odst. 11.6.3). Je zřejmé, že tato část práce byla vytvořena v poslední fázi doktorandského studia a tudíž není ještě publikována. Rád bych na tomto místě Mgr. Evu Havlíčkovou povzbudil k co nejrychlejšímu publikování dosažených výsledků.

Kapitola 12 podává přehled existujících 2D kódů pro modelování okrajového plazmatu v tokamacích. Vybraný kód bude aplikován na experimentální uspořádání tokamaku COMPASS a jeho výsledky (zejména radiální profily hustoty a teploty) budou srovnávány s experimentem.

Nakonec tedy konstatuji:

- Předložená práce je do jisté míry pionýrská, neboť modelováním přístěnného plazmatu v tokamacích se doposud nikdo v ČR nezabýval.
- Práce představuje kvalitní základ pro pokročilejší modelování procesů na okraji plazmatu pomocí 2D kódů a pro pozdější porovnání výsledů simulací s experimenty na tokamaku COMPASS.
- Za nejdůležitější výsledek práce pokládám využití 1D fluidního modelu pro popis paralelní dynamiky během turbulentních jevů.
- V práci jsou formulovány otevřené problémy a zároveň jsou navrženy možné způsoby jejich řešení (kombinace 1D fluidního kódu s turbulentního kódu ESEL).
- Práce je napsána přehledně a dobrou angličtinou. Až na nepodstatné momenty je její grafická úprava je „textbook quality“.
- Dosažené výsledky byly prezentovány na řadě mezinárodních konferencích a publikovány v čtyřech vědeckých článcích. Lze tedy konstatovat, že prošly oponenturou na mezinárodní úrovni.

Podle mého názoru Mgr Eva Havlíčková plně prokázala schopnost samostatné vědecké práce. Předložená práce splňuje bezesbytku všechny požadavky kladené na kvalitní disertační práci.

V Praze dne 5. listopadu 2009

Ostav fyziky plazmatu AV ČR

Dodatek

Poznámky oponenta, které by mohly/měly diskutovat během obhajoby

1. Str. 76. Jedno-dimenzionální model předpokládá transport energie a částic v SOL pouze *podél* siločar magnetického pole. Nedávné experimenty však naznačují, že i transport napříč siločar SOL by mohl hrát důležitou roli následkem transientních turbulentních jevů, které se v literatuře obvykle nazývají "blobs, streamer, ..." (viz. Paragraf 11.6). Bylo by možné zahrnout anomálně rychlý přenos energie a částic napříč magnetickým polem nějakým dodatečným členem do 1D transportních rovnic řešících stacionární situaci?
2. Str. 77. Bylo by žádoucí upřesnit během obhajoby závislost rychlostního koeficientu pro výměnu náboje na teplotě, který je znázorněn na obr 11.2.
3. Str. 79. Model pro neutrální částice: Při simulacích se nepředpokládá externí zdroj neutrálních atomů. V experimentální realitě se však do komory tokamaku vstříkují neutrální atomy pracovního plynu pomocí impulsního ventilu aby se tím kompenzovaly ztráty nabitých částic, ke kterým dochází důsledkem jejich konečné doby života. Část toku těchto neutrálních atomů se nepochybně ionizuje v SOL, a tudíž tento tok představuje zdrojový člen by se mohl vzít v úvahu při dalším numerickém modelování.
4. Str. 79. Model pro neutrální částice předpokládá, že teplota rychlých neutrálních atomů v SOL je totožná s iontovou teplotou. Tento předpoklad je nepochybně splněn v centrálních oblastech plazmatu. Během obhajoby by měla autorka posoudit, do jaké míry to platí i v SOL. Neboli, za jakých podmínek je charakteristická doba pro výměnu náboje srovnatelná s dobou života iontů v SOL.?