

Posudek na doktorskou dizertační práci p. Jakuba Seidla: „Anomalous diffusion of plasma in tokamak edge region“.

Předkládaná práce je tematicky velmi rozsáhlá. Spočívá v numerickém modelování okrajového plazmatu ve velkých tokamacích s divertorem, kde je možný tzv. H-mód, o kterém se předpokládá, že je perspektivní z hlediska budoucího nastartování termonukleární fúze v tomto zařízení. Numerické výsledky jsou důsledně srovnávány s experimentem, hlavně sondovými měřeními, jejichž metodice a zpracování je v práci věnována nezanedbatelná část. Název práce budí dojem, že původní zadání asi bylo jednodušší, tj. zpracování netriviálního pohybu iontů plazmatu (vodíku či deuteria) v modelovém elektrickém potenciálu, buď ve tvaru jednoduchého maxima či periodické struktury maxim třeba ve tvaru vaječného plata, určení charakteru příčné difúze částic v takovém modelovém případě a výpočtem difúzního koeficientu v rámci jednočásticového modelu. Již takové zadání, jehož výsledky jsou ve skutečnosti obsaženy až v poslední kapitole, představuje dost obtížný problém sám o sobě. Je třeba pro celou oblast počátečních podmínek řešit soustavu dosti složitých pohybových rovnic a výsledky rovnat do tzv. Poincarého řezů. Tato metoda prozradí, zda je pohyb iontů plazmatu regulární či chaotický, tj. odpovídající difúzi. Modelový potenciál pak představuje situaci, kdy se na okraji plazmatu šíří příčná elst vlna, jejíž potenciál předpokládaná struktura modeluje. Tyto okrajové, většinou elst módy šířící se po okraji plazmatu v radiálním a poloidálním směru, jsou většinou známy pod zkratkou ELM a vyskytují se právě ve zmíněném H-módu, kdy plazmové veličiny prodělávají v okrajové vrstvě strmý přechod od vyšších středových hodnot k nízkým hodnotám hraničícím s divertorovým polem. Strmé gradienty v této relativně úzké oblasti okrajového plazmatu se pokládají za jednu z příčin vzniku oscilací ELM.

Práce však neobsahuje jen tento druh analýzy. Její rozsah je mnohem ambicióznější. Předkladatel totiž přikročil i k samotné teorii okrajového plazmatu a v něm se šířících poruch ELM navíc v silně nelineárním režimu. Tomu je věnována první část práce a nepochopil jsem, zdali opravdu teorie nestabilního okrajového plazmatu patřila k původnímu zadání dizertace nebo zdali si předkladatel tímto postupem dobrovolně práci na ní podstatně ztížil. Každopádně první část práce představuje hydrodynamické modelování okrajového plazmatu 2D programem ESEL, který je dokonce v další části rozšířen o 3. dimenzi spojením s programem SOLF1D popisujícím situaci podél mg siločar a doplňující tak vhodně modelové disipativní členy v ESEL, které jsou v původní verzi představovány pouze podobnostními aproximacemi. P. Seidl sice není autorem programu ESEL, ale z textu lze vyčíst, že program sám, upravoval, částečně paralelizoval a navíc měl nápad s jeho vylepšením spojením s rovněž vypůjčeným SOLF1D. Hydrodynamická aproximace, v prostředí strmých gradientů a za přítomnosti zakřiveného mg pole ve složité geometrii okraje tokamaku s divertorem není, samozřejmě, možno řešit v naprosté obecnosti. Program ESEL je omezen na nízkofrekvenční nestability v driftové aproximaci, nicméně je natolik obecný a flexibilní, že umožňuje zapojování různých, zejména disipativních mechanismů, kde následné srovnání výsledků jednotlivých případů s experimentem umožňuje posoudit jejich vzájemnou váhu a vliv. To patří k podstatným výsledkům této první části práce a výstupem tam nejsou jen průběhy plazmových veličin (hustoty, rychlosti proudění, teploty atd.) ve stacionárním stavu, ale i šíření poruch, tj. již zmíněných ELM v silně nelineárním režimu. Zajímavé je, že za příčinu ELM se pokládá buď žlábková nestabilita v místech, kde má mg pole na vnějším okraji tokamakového toru nepříznivou křivost nebo nestabilita typu driftové rezistivní nestability. Obě tyto nestability mají tu vlastnost, že podél mg pole se nešíří buď vůbec nebo jen zanedbatelně a jsou proto dobrými kandidáty pro ELM, kde jde o 2D šíření v radiálním a poloidálním směru.

Vstupní část práce je podrobným popisem a odvozením základních rovnic modelu řešeného programem ESEL. Je to nepochybně velice užitečná část jak pro čtenáře, tak i pro samotného autora, protože důkladný vhled do fyziky popisovaných procesů umožňuje nejen jejich porozumění, ale je i podstatou

hledání příčin případných neshod mezi výsledkem modelování a experimentálními výsledky, které jsou dosud k dispozici. Autor dokázal zpracovat a porovnat s experimentem situaci několika velkých tokamaků, často v docela dobré shodě mezi experimentem a teorií. Ocenil jsem velice, že na konci práce je slovníček používaných zkratek, který neobyčejně usnadňuje život ne zcela zasvěcenému čtenáři. Co je ale velkou komplikací při čtení práce je zlozvyk užívat k označení úplně jiných fyzikálních veličin stejné písmenko. Namátkou jmenuji malé „q“, které je na str. 33 použito pro elektrický náboj iontů, pak bez jakéhokoliv komentáře na str. 47 pro „safety factor“ a nakonec na str. 61 představuje obecnou bezrozměrnou proměnnou veličinu v popisu použité numerické metody. Jiná písmenka jsou skromněji použita jen pro dvě různé veličiny např. malé „p“ pro skalární tlak a pak už jen pro souřadnici v poloidálním směru. Někdy se dokonce v takovém případě pisatel nad čtenářem smiluje a upozorní ho, že od daného místa se mění smysl dotyčného označení na jiné, viz str. 58 nahoře. Zajisté není třeba dodávat, že podobná úspěšnost v označení čtení práce neusnadňuje.

Za vyvrcholení práce bych považoval ukázky Poincareho analýzy pohybu iontů vlastního plazmatu i nečistot v realistickém elektrickém poli poruch analyzovaných v první části práce. To je jistě velmi pěkný původní výsledek, který je v práci podrobně a přesvědčivě prezentován. K tomu je potřeba přidat i uvedenou samotnou podrobnou analýzu šíření ELM v podobě okrajové turbulence. A v neposlední řadě též kritické zamyšlení nad výsledky sondových měření. Zde předkladateli odpouštím, že jsem nikde nenalezl vysvětlení, co je to na mnoha místech se vyskytující výraz „reciprocal probe“. Z fyzikálních dotazů bych prosil vysvětlit následující. V jednodušších modelech chaotického pohybu iontů se často pozoruje zejména za předpokladu o tvaru potenciálu ve tvaru vaječného plata (tj. přísně dvojperiodického) neklasická difúze prezentovaná např. jako „Levi walk“. Zdá se mi ale, že takový druh difúze by měl být vázán právě jen na takový periodický potenciál, protože ten umožňuje přeskoky mezi potenciálními minimy. Pozoruje se alespoň náznak něčeho podobného při použití realistického potenciálu turbulence ELM, jak vychází z programu ESEL nebo eventuálně vyplývá z experimentálních dat?

Práce je psána dobrou angličtinou, pár nalezených překlepů jsem opravil tužkou rovnou do své verze textu. Považuji ji za velmi solidní a rozsáhlé zpracování daného problému s řadou pěkných původních a zajímavých fyzikálních výsledků. Navrhuji proto, aby byla přijata k obhajobě jako doktorská dizertační práce.

V Praze 22/3 2013-03-22

RNDr. Karel Rohlena, CSc.

Fyzikální ústav AV ČR