

Posudek školitele disertační práce Mgr. Pavla Cahyny : Difuze částic z tokamaku vlivem stochastizace magnetických siločar

Disertační práce Pavla Cahyny se zabývá studiem stochastizace magnetických siločar a dynamikou částic v magnetických polích a jejími aktuálními aplikacemi v současných tokamacích.

Možnost stochastizace magnetických siločar v rámci deterministického chaosu v hamiltonovských systémech byla zřejmě poprvé zmíněna Rosenbluthem, Sagdejevem, Taylorem a Zaslavskym v roce 1966 a podrobněji Filoněnkem, Sagdejevem a Zaslavskym v roce 1967. Je založena na formální analogii rovnic, určujících magnetické siločáry v toroidálních systémech a kanonických rovnic hamiltonovské dynamiky.

Již první úvahy o důsledcích generace chaosu magnetických siločar vedly k diskusi možnosti perturbací magnetických rovnovážných ploch v tokamacích právě vlivem stochastičnosti magnetických siločar.. Zdá se však, že nejaktuálnějšími aplikacemi je v současné době idea ergodického divertoru a možnost stabilizace generace módů na okraji plazmatu tokamaku (ELM). Tato metoda stabilizace nebo aspoň potlačení těchto módů (v literatuře označované jako RMP- resonant magnetic perturbation) je založena na rezonanční generaci dvou řad magnetických ostrovů v tokamaku; ty pak mohou vytvořit pro magnetické siločáry ergodickou vrstvu..

Mgr. Cahyna navázal v disertaci na svou diplomovou práci, která se zabývala právě stochastickou interakcí dvou řad magnetických ostrovů. Předpokládalo se, že doktorská práce vyústí v návrhu ergodického divertoru, který vyžaduje zmíněnou generaci dvou řad magnetických ostrovů.

Během doby se však ukázalo, že pro ústav je podstatně aktuálnější studium generace a vlivu RMP. Je to nejen vlivem publicity RMP v plazmatické komunitě, ale i proto, že Ústavem fyziky plazmatu získaný tokamak COMPASS přímo předpokládá studium působení RMP na plazma tokamaku. V tokamaku byly již zabudovány vnější cívkky, které zmíněné ostrovy generují.

I když vliv RMP na stabilizaci lokalizovaných módů na kraji plazmatu tokamaku byl dostatečně prokázán na tokamaku DIII, na některých tokamacích se tento vliv prokázal s jistými pochybnostmi, a na některých tokamacích se tento vliv vůbec nezjistil. Bylo zřejmé, že se mechanismu stabilizace pomocí RMP vůbec nerozumí.

Mezi důvody, které tuto nejistotu provázejí, lze zařadit doposud naprosto nejasné procesy v transportu plazmatu uvnitř ergodické vrstvy, a okolnost, že magnetické pole RMP, generované vnějšími cívkami bude v plazmatu jiné, než v prostředí mimo plazma. Práce Pavla Cahyny se právě těmito otázkami zabývá.

Disertační práce v úvodních kapitolách nejdříve připomíná ty nejdůležitější partie fyziky plazmatu, které jsou spojeny s konstrukcí tokamaku a které se objevují i v problematice, kterou Cahyna řeší. V dodatcích pak uvádí nedůležitější partie z teorie deterministického chaosu, úzce související s hlavní původní částí disertace.

Po těchto rešeršních kapitolách pak přechází k původní metodice a výsledkům, které jsou jádrem disertační práce a které řeší některé velmi aktuální otázky, spojené s nejzřejmějšími nestabilitami v současných tokamacích a výhledově i v ITERu.

První část práce s původními výsledky je věnována interakci částic s ergodickou vrstvou, tvořenou dvěma řadami magnetických ostrovů v režimu „overlapping“, kde dochází ke stochastizaci magnetických siločar. Původní idea o vlivu ergodické vrstvy spočívá v jednoduchém předpokladu, že částice driftově „kloužou“ po stochastické pavučině podél magnetických siločar. Práce Cahynovy (v toroidálním systému s kruhovým poloidálním řezem) ukázaly jako jedny z prvních, že v případě toroidálních systémů tomu tak nemusí být a že trajektorie částic nemusí souhlasit s magnetickými siločarami.

Smysluplné pokračování práce v tomto směru vyžadovalo opustit toroidální geometrii s kruhovým průřezem, a užít nekruhové průřezy současných tokamaků. To je však už o řád komplikovanější úloha, neboť zde místo analytických úvah je nutno vše simulovat numericky.

To je předmětem druhé části práce. Ta už je věnována plánovaným experimentům na ústavním tokamaku COMPASS, kde bude mimo jiné studován vliv RMP na zmíněné nestability.

V rámci rozsáhlého studia zde Cahyna se spoluautory posoudil možnost overlappingu magnetických ostrovů generovaných vnějšími cívkami na širokou škálu rovnovážných konfigurací COMPASSu. Nekruhový poloidální průřez COMPASSu vyžadoval počítačově komplikovaná řešení ergodických vrstev dvou řad magnetických ostrovů pro realistické tvary rovnovážných ploch tokamaků. Cahyna našel optimální rozložení rezonančních magnetických spekter pro tokamak COMPASS. Teprve v tomto optimálním tvaru ergodické vrstvy bude možno hlouběji proniknout k mechanismům, které v ergodické vrstvě probíhají –

zejména k transportu plazmatu a jeho důsledkům. To bude jistě předmětem dalšího teoretického i experimentálního studia.

Další významná aktivita doktoranda se soustředila na jednu ze základních otázek, spojených s metodou RMP, totiž, do jaké míry je vypočtené vakuové magnetické pole cívek RMP ovlivněno plazmatem tokamaku a jak lze toto stínění detekovat. Toto stínění by právě mohlo být příčinou rozdílností působení RMP v různých tokamacích; ukazuje se, že detekci efektu stínění lze provést pomocí metody otisků siločar na divertoru a je proto nutné nalézt způsob detekce stínění. Teoretický základ této metody autor prokázal v práci která je v tisku ve významném časopise *Journal of Nuclear Materials*.

Důležitou aplikací, ve které se studuje přímá interakce částic s ergodickou vrstvou, jsou jevy, experimentálně nalezené v tokamaku JET a související s existencí relativistických elektronů. Zde se studovala otázka, zdali nelze pomocí ergodické vrstvy nebo magnetické perturbace, způsobené existencí tzv. ripplů (způsobené nezbytně diskretní povahou generace toroidálního magnetického pole) urychlit radiální difuzi relativistických elektronů. Autor s kolegy ukázal, že relativistické elektrony v podstatě existenci ergodické vrstvy nebo perturbaci danou ripply přehlížejí a že jejich trajektorie je dána pouze základním magnetickým polem tokamaku. Tento výsledek pomohl vysvětlit chování relativistických elektronů v tokamaku JET.

Lze namítnout, že by tato část měla být zařazena už za první výpočty interakcí částic s ergodickou vrstvou. Nicméně, vzhledem k tomu, že už užívá nekruhový průřez magnetických ploch a tím i nutně cele přejímá metodiku výpočtu magnetických polí v moderních tokamacích, je vlastně tato část jakýmsi prekurzorem studií transportu částic v ergodické vrstvě COMPASSu.

Jak je zřejmé i z tohoto stručného přehledu, autorovi se podařilo zapojit se do nejaktuálnější oblasti výzkumu tokamaku. Svědčí to nejen o jeho snaze nalézt těžiště své práce v hlavním proudu výzkumu tokamaků, ale i o rozsáhlých znalostech, získaných z literatury a v diskusích s kolegy u nás i v zahraničí. Autor tak velmi rychle pochopil význam mezinárodní spolupráce a získal tam překvapující publicitu.

Mgr. Pavel Cahyna pracoval převážně samostatně, měl realistický odhad komplikovanosti různých přístupů a zvolil ty, které byl schopen v dohledné době užít. Spoluprací s vědeckými pracovníky větších tokamaků získal solidní přehled o aktivitě teoretiků, zabývajících se klíčovými problémy budoucího ITERu; ta mu pak pomohla lépe konkretizovat problematiku, odpovídající zadání práce do vysoce aktuální a realistické formy.

Výsledkem jeho pětileté aktivity v tomto směru je mimořádně kvalitní disertační práce . Své původní výsledky prezentoval v disertaci přímo otisky svých prací. Ty byly vhodně zařazených do textu disertace, takže disertace působí homogenně. Práce je napsána kultivovaně a ve stručném stylu, který je autorovi vlastní. Podle mého názoru disertace představuje uzavřený celek, do kterého je však možno opět vstoupit.

Má jen několik spíše formálních menších nedostatků, neovlivňujících získané výsledky. Jedná se o přílišnou skoupost v počtu obrázků v úvodních kapitolách – zejména v částech, popisujících tokamak a magnetické ostrovy. Zde by dva či tři další obrázky podstatně lépe umožnily sledovat doprovodný text. V diskusi, týkající se vlivu ergodické vrstvy na relativistické elektrony by bylo jistě zajímavé uvést Poincarého řezy ještě jen pro magnetické siločáry.

To jsou však jen malé vady na kráse. Disertační práce Mgr. Pavla Cahyny je významnou vědeckou publikací a je pro autora vynikající vstupenkou do vědecké komunity.

Vřele proto doporučuji - po úspěšném obhájení práce - udělení odpovídajících akademických titulů.

V Praze dne 9. listopadu 2010.

Doc. Ing. Ladislav Krlín, DrSc.

Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta
Studijní oddělení
Ing. Jana Jágrová

Ke Karlovu 3, 121 16 Praha 2.

V Praze dne 9. 11. 2010.

V příloze zasílám svůj posudek školitele disertační práce Mgr. Pavla Cahyny:
“Difuze částic v tokamaku vlivem stochastizace magnetických siločar”.

S pozdravem

Doc. Ing. Ladislav Krlín, DrSc
Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i.

Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta
Studijní oddělení, Ing. Jana Jágrová

Ke Karlovu 3, 121 16 Praha 2.