# Analýza deformace okraje tokamakového plazmatu

Školitel: RNDr. Pavel Cahyna, Ph.D.
E-mail: cahyna@ipp.cas.cz
Telefon: +420 2 6605 3564

# Zadání práce

Základní tvar plazmatu tokamaku je toroidálně symetrický prstenec, díky čemuž je možné nahlížet na plazma jako na v zásadě dvourozměrný objekt. Mnohé jevy v tokamaku však tuto symetrii narušují a vyžadují určitou míru trojrozměrného přístupu. Jedním z nich je řízené narušení symetrie pomocí magnetických cívek, vytvářejících perturbace magnetického pole sloužící ke kontrole určitých typů nestabilit, známých jako okrajové módy (edge localized modes, ELMs). Mechanismus kontroly těchto módů není zatím objasněn, předpokládá se však, že může souviset s deformací tvaru plazmatu vyvolanou působením řídících cívek. Tato deformace (jakési zkroucení prstence plazmatu) by ale také mohla vést k problémům na tokamaku ITER, pokud by způsobila, že by se horké plazma dotklo míst stěny, která nejsou na značné tepelné toky uzpůsobena.

Vzhledem ke značné výpočetní náročnosti trojrozměrných simulací je nanejvýš vhodné uchylovat se k analytickým aproximacím, jejichž správnost je ovšem nutno kontrolovat srovnáním s přesnějšími numerickými modely. Analytické aproximace pro analýzu magnetických perturbací typicky vycházejí z metod teorie chaosu (invariantní variety, Melnikovův integrál, souřadnicové transformace, integrabilní a neintegrabilní dynamické systémy a integrály pohybu atd.). Popis deformace okraje plazmatu pomocí těchto metod je právě cílem této práce. Z experimentů i numerických simulací je známo, že k deformaciokraje plazmatu působením magnetických perturbací dochází. Jeden druh této deformace – tzv. štěpení invariantních variet a jim odpovídající lalokovité struktury pozorované na kraji plazmatu, viz Fig. 1 – má již známý matematický popis. Experimenty však ukazují, že reálná deformace tvaru plazmatu je výraznější než by odpovídalo tomuto typu deformace, musí tedy být způsobena další složkou. Tuto deformaci ukazují numerické modely které berou v potaz i reakci plazmatu na vnější perturbaci, např. kódy MARS-F, MARS-Q, ANIMEC či JOREK. V ideálním MHD modelu (za předpokladu dokonalé vodivosti vysokoteplotního plazmatu) dokonce ke štěpení invariantních variet nemůže dojít, přesto však je plazma deformované.

Fig. 1 Invariantní variety definující okraj perturbovaného plazmatu tokamaku.

Cílem práce je určit deformaci okraje plazmatu ve výsledcích vhodného numerického modelu (např. MARS-F) na vhodném příkladu (např. pokusy na tokamaku MAST) a pokusit se celkovou deformaci vysvětlit jako součet dvou složek: ideální deformace a deformace způsobené štěpením invariantních variet. Pokud by se ukázalo, že je celkovou deformaci možné takto popsat, významně by to zjednodušilo výpočet deformací pro složitější konfigurace řídících cívek.

V rámci řešení práce se student nejprve seznámí s teorií ideální a rezistivní magnetohydrodynamiky a s metodami teorie chaosu používanými pro popis magnetických perturbací. Dále se seznámí s numerickými metodami určení kraje plazmatu (separatrix) v perturbovaném magnetickém poli a do stávajících programů pro výpočet kraje plazmatu doplní magnetické pole z numerického modelu reakce plazmatu. Pomocí těchto programů spočte deformaci v numerickém modelu za předpokladu ideální MHD a deformaci způsobenou štěpením variet v numerickém modelu za předpokladu rezistivní MHD. Spočte deformaci odpovídající součtu těchto složek a porovná s celkovou deformací v rezistivním MHD. Tímto srovnáním bude zodpovězena základní otázka bakalářské práce. Případně bude určeno zda jsou nesrovnalosti rázu spíše kavantitativního či kvalitativního.

Práce je vhodná zejména pro studenta se zájmem o abstraktnější matematické metody v dynamice a zároveň o jejich aplikace na konkrétních fyzikálních příkladech. K řešení je třeba základní znalost numerického programování či schopnost si je doplnit (programy jsou psány v jazyce FORTRAN a předpokládá se analýza a zobrazování výsledků v jazycích Python či MATLAB). Použité numerické metody však nejsou složité (jedná se v podstatě o přepis analytických vzorců do zdrojového kódu, integrace ODE metodou Runge-Kutta či výpočet určitých integrálů). Nepředpokládá se aktivní používání numerických MHD modelů, pouze využití hotových výstupů.

V tématu je dále možné pokračovat směrem k simulacím (vlastní simulace pomocí MHD modelů, zahrnutí více modelů, případně jejich rozšiřování, výpočty pro konkrétní konfigurace tokamaku ITER) či k experimentu (analýza deformací na datech z tokamaku COMPASS, srovnání s modely) podle případného zájmu.

# Literatura

J. Freidberg: Ideal magnetohydrodynamics
Stephen Wiggins: Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos
T. E. Evans et al. (2005), *J. Phys. Conf. Ser*. **7** 174
I. Chapman et al. (2012), *Plasma Phys. Control. Fusion* **54** 105013
P. Cahyna et al. (2013), Method for comparison of tokamak divertor strike point data with magnetic perturbation models, *Nucl. Fusion*, accepted.
P. Cahyna et al. (2013), in *Proc. 24th Int. Conf*., San Diego, 2012, TH/P4-27 <http://www-naweb.iaea.org/napc/physics/FEC/FEC2012/papers/577_THP427.pdf>