

Participarea Romaniei la EUROfusion WPMST1 si cercetari complementare

Efectul fenomenului de amplificare a campurilor magnetice rezonante asupra perturbatiilor de tip tearing neoclasice

In cadrul programului de lucru Medium-Size Tokamak 1 Campaign (WPMST1 2015) au avut loc doua campanii experimentale al caror scop declarat a constat in intelegerea mecanismelor si scenariilor experimentale ale aparitiei si dinamicii modurilor neoclasice de forfecare (NTM), pe de o parte, si in descrierea interactiunii dintre NTM si perturbatiile magnetice rezonante, pe de alta parte. Prima campanie, "Advanced NTM Physics", avand codul de identificare TCV15-1.4-4, a fost realizata folosind instalatia tokamak TCV (20 descarcari), apartinand de EPFL Lausanne, Elvetia. A doua campanie, "Interaction between resonant magnetic perturbations and NTM stability", avand codul AUG15-1.4-3, s-a desfasurat in urma a 7 descarcari in tokamak-ul ASDEX-Upgrade din Garching bei Munchen, Germania. Au fost efectuate doua vizite, a cate o saptamana fiecare, pentru a participa la campaniile experimentale descrise mai sus la EPFL-CRPP Lausanne si IPP Max-Planck Garching bei Munchen. Sarcina noastra a constat in descrierea dinamicii NTM astfel incat modelarea teoretica sa poata fi comparata calitativ cu datele culese experimental, privitoare la efectul RFA si al campurilor magnetice-eroare asupra comportamentului NTM.

A fost imbunatatit semnificativ un model matematic propriu preexistent, care descrie convenabil regimul liniar al dinamicii modurilor de forfecare, model suficient de acoperitor pentru a surprinde dinamica data de catre asa numitul prag al latimii insulelor magnetice, dedus din teoria liniara a perturbatiilor de forfecare. Latimea insulei fiind limitata, nu este necesara descrierea fenomenologiei interne a insulei, ci e nevoie doar de expresia saltului perturbatiei magnetice prin insula, calculat in exteriorul acesteia. Imbunatatirea noului model este substantiala si marcheaza trecerea la regimul liniar de variatie a insulei magnetice ce ia in considerare dinamica fenomenelor intrinseci acesteia. Ecuatiile dinamice ale perturbatiilor din interiorul insulei au fost rezolvate iar solutia dependenta de timp a fost obtinuta in mod explicit, analitic. Cu alte cuvinte dinamica insulei este acum descrisa de o solutie obtinuta in interiorul acesteia, pornind de la saltul perturbatiei prin insula, salt ce ia in calcul si dinamica perturbatiei inafara insulei, aceasta din urma satisfacand ecuatiile fizice ale perturbatiilor din afara insulei, prin urmare nefiind doar o simpla functie test pentru deducerea solutiei din interiorul insulei.

Avand la indemana expresia dependenta de timp, a perturbatiei magnetice calculate, i.e. a NTM-lui, ca o functie explicita de parametrii plasmei, de spectrul perturbatiilor campurilor magnetice-eroare, obtinerea dinamicii efectelor ce fac obiectul proiectului de fata a fost simpla. A fost aratat in mod clar si explicit efectul destabilizator al campurilor magnetice-eroare rezonante asupra amplitudinii NTM. A fost dedus pragul temporal de la care, pentru o rotatie joasa a plasmei, perturbatiile externe duc la aparitia unei cresteri abrupte a perturbatiei neoclasice, punandu-se in evidenta efectul RFA la timpi foarte mici. A fost pus in evidenta cu claritate impactul destabilizator al cuplajului perturbatiei NTM si cu spectrul non-rezonant al campurilor magnetice-eroare, dand masura efectului destabilizator al cuplajului inter-modal asupra perturbatiei NTM centrale.

Stagiul stiintific din 2016 din cadrul campaniei experimentale Medium-Size Tokamak 1 Campaign (WPMST1 2015) a avut ca obiectiv studiul influentei perturbatiilor magnetice (MP) asupra evolutiei modurilor de forfecare neoclasice (NTM), prin intermediul experimentului realizat in instalatia tokamak ASDEX-Upgrade (AUG), avand denumirea "Interactiunea dintre perturbatiile magnetice and stabilitatea NTM (2/2)" si indicativul AUG15-1.4-3. Adiacent acestui studiu, efectul perturbatiilor vecine perturbatiei NTM centrale constituie un subiect important, ce a fost tratat in cadrul acestui proiect principal. Referitor la cazul cuplajului rezonant dintre perturbatii, rezultatele prezentate in cadrul proiectului sunt menite a fi aplicate instalatiei AUG, avand constructia specifica a structurilor externe coloanei de plasma, in mod special a asa-numitelor

spire de tip B, i.e. un set de doua randuri a cate opt spire, dispuse pe directie toroidala, de o parte si de alta a planului median al coloanei de plasma.

Ecuatia generalizata a lui Ohm in structurile externe plasmei si ecuatiile perturbate in vacuum s-au modificat si, in consecinta, solutiile calculate ale ecuatiilor perturbate in afara insulei magnetice corespunzatoare NTM au fost recalculate. Inaintea estimarii efectului de cuplaj magnetic asupra evolutiei insulei magnetice insasi, e obligatoriu a fi verificat efectul asupra dinamicii NTM, deoarece marimea amplitudinii NTM ca urmare a efectului de cuplaj cu perturbatiile externe nu influenteaza automat dinamica insulei. Aceasta din urma depinde de rata de crestere temporala a perturbatiei si de saltul indicelui de stabilitate al perturbatiei prin insula magnetica. Un regim de amplitudine crescuta a NTM datorata interactiunii cu MP poate pastra rata de crestere temporala initiala a NTM, dinaintea pornirii spirelor de tip B, generatoare de MP. Modelul tridimensional construit si prezentat aici a oferit rezultate analitice clare privind marimea tariei cuplajului magnetic dintre NTM si perturbatiile rezonante, pe de o parte, si a celor vecine, adiacente, pe de alta parte, cu scopul de a verifica si calcula efectul acestora asupra NTM-ului. Desi marimea amplitudinii NTM nu e direct responsabila de cresterea grosimii insulei magnetice corespunzatoare, ea poate afecta local rotatia plasmei via cuplurile de torsiune electromagnetice locale ce se dezvoltă la nivelul insulelor magnetice. Caderea rotatiei plasmei afecteaza in mod direct si neechivoc evolutia insulelor magnetice.

A fost calculata influenta perturbatiilor rezonante (RMP), generate de catre spirele de tip B ale AUG, asupra perturbatiilor NTM. Aceasta etapa de cercetare reprezinta o parte a contributiei personale in cadrul campaniilor experimentale ale Pachetului de Lucru Eurofusion MST1 in 2016 si anume: AUG15-1.4-3 "Interactiunea dintre perturbatiile magnetice rezonante si stabilitatea NTM" si TCV15-1.4-4 "Fizica avansata a perturbatiilor NTM".

Perioada de desfasurare: 2014-2020

Obiective:

- Constructia unui model teoretic multimodal tridimensional care sa descrie comportamentul modurilor tearing in asa-numitul regim liniar de evolutie, model ale carui rezultate sa se pleze pe datele experimentale obtinute prin participarea la Campania experimentală AUG14-1.4-4 "Dinamica NTM si perturbatiile magnetice", din cadrul programului EUROfusion WPMST1.
- Intelegerea mecanismelor si scenariilor experimentale ale aparitiei si dinamicii modurilor neoclasice de forfecare (NTM), pe de o parte, si in descrierea interactiunii dintre NTM si perturbatiile magnetice rezonante, pe de alta parte. Imbunatatirea model teoretic existent este substantiala si marcheaza trecerea la regimul liniar de variatie a insulei magnetice ce ia in considerare dinamica fenomenelor intrinseci acesteia.
- Efectul tariei cuplajului dintre modul de perturbatie central si modurile de perturbatie adiacente asupra marimii amplitudinii, ratei temporale de crestere si evolutiei celui dantai, i.e. perturbatia de forfecare neoclasica. Determinarea spectrului cel mai favorabil al componentelor perturbatiilor vecine, in sensul unei destabilizari minime a modului central de perturbatie.
- Efectul rezonantei dintre perturbatiile magnetice externe, generate de catre spirele de tip B ale AUG si NTM, asupra stabilitatii celui din urma.

Etape:

- Modelarea liniara tridimensionala a comportamentului perturbatiilor de tip tearing ideale. Efectul modurilor resistive de perete si al rotatiei plasmei asupra dinamicii perturbatiilor de tip tearing ideale.
- Efectul amplificarii campurilor rezonante (RFA)/cuplajului cu spectrul rezonant al campurilor magnetice-eroare asupra ratei de crestere a NTM.
- Efectul cuplajului cu modurile de perturbatie adiacente asupra perturbatiei neoclasice

- Modelarea dinamica a interactiunii rezonante dintre perturbatiile magnetice si efectul acesteia asupra stabilitatii perturbatiilor NTM.

Parteneri externi:

- IPP Max-Planck, Garching bei Munchen Germania
- EPFL-CRPP Lausanne, Elvetia.

Rezultatele obtinute:

- Au fost rezolvate ecuatiile perturbate liniarizate din plasma, vid si elementele conductoare exterioare plasmei cu scopul de a obtine solutia dependenta de timp a perturbatiei ce descrie evolutia NTM. A fost luata in considerare influenta peretelui rezistiv si a perturbatiei cuplate tearing-mod rezistiv de perete. Solutia obtinuta descrie analitic dependenta de toti parametrii elementelor conductoare din afara plasmei, precum si de rotatia plasmei si amplitudinea si faza fiecărei componente a campurilor magnetice eroare. Efectele acestora din urma asupra evolutiei modului tip tearing au fost determinate.
- Ecuatiile dinamice ale perturbatiilor din interiorul insulei au fost rezolvate iar solutia dependenta de timp a fost obtinuta in mod explicit, analitic. Avand la indemana expresia dependenta de timp, a perturbatiei magnetice calculate, i.e. a NTM-lui, ca o functie explicita de parametrii plasmei, de spectrul perturbatiilor campurilor magnetice-eroare, obtinerea dinamicii efectelor ce fac obiectul proiectului de fata a fost simpla. A fost aratat in mod clar si explicit efectul destabilizator al campurilor magnetice-eroare rezonante asupra amplitudinii NTM. A fost dedus pragul temporal de la care, pentru o rotatie joasa a plasmei, perturbatiile externe duc la aparitia unei cresteri abrupte a perturbatiei neoclasice, punandu-se in evidenta efectul RFA la timpi foarte mici. A fost pus in evidenta cu claritate impactul destabilizator al cuplajului perturbatiei NTM si cu spectrul non-rezonant al campurilor magnetice-eroare, dand masura efectului destabilizator al cuplajului inter-modal asupra perturbatiei NTM centrale.
- A fost modelat fenomenul de cuplaj magnetic dintre NTM si modurile de perturbatie vecine, cu scopul de a gasi spectrul optim al acestora din urma, astfel incat destabilizarea NTM sa fie minima.
- Modelul matematic si codul numeric aferent au fost modificate astfel incat sistemul preexistent de feedback, constand in spire detector si spire de feedback active, sa fie extras si, in locul acestuia, sa fie inserat sistemul de spire de tip B, caracteristic tokamak-ului ASDEX-Upgrade, generatoare de perturbatii magnetice de tipul campurilor magnetice-eroare.
- Au fost obtinute rezultate analitice si numerice clare astfel incat influenta perturbatiilor externe adiacente asupra NTM a fost pusa in evidenta in chip explicit. A fost obtinut analitic indicele de stabilitate al perturbatiei NTM, ce da masura influentei RMP asupra evolutiei NTM, prin urmare s-a aratat, in mod clar, rolul de declansator al RMP, via indicele de stabilitate, in aparitia si evolutia incipienta a perturbatiei NTM, dincolo de efectul incipient mai putin semnificativ, al termenului de bootstrap. A fost pusa in evidenta si masurata cresterea amplitudinii NTM sub influenta RMP.

Publicatii:

Articole

[1] H. Meyer, T. Eich, M. Beurskens, ..., I. G. Miron et al, Overview of progress in European Medium Sized Tokamaks towards an integrated plasma-edge/wall solution, IAEA Paper (Nucl. Fusion, accepted for publication)

[2] S. Coda, J. Ahn, R. Albanese, ..., I. G. Miron et al, Overview of the TCV Tokamak Program: Scientific Progress and Facility Upgrades, IAEA Paper (Nucl. Fusion, accepted for publication)

Conferinte

[1] Sina Fietz, Rui Coelho, Ivo Classen, Valentin Igochine, Heinz Isliker, Avrilios Lazaros, Enzo Lazzaro, Marc Maraschek, Iulian Gabriel Miron, Silvana Nowak, Paolo Piovesan, Wolfgang Suttrop, Qingquan Yu; "NTM dynamics and external magnetic perturbations"; MST TF Meeting, AUG14-1.4-4 experiments, 23 April 2014, Garching bei Munchen, Germany.

[2] Sina Fietz, Rui Coelho, Ivo Classen, Valentin Igochine, Heinz Isliker, Avrilios Lazaros, Enzo Lazzaro, Marc Maraschek, Iulian Gabriel Miron, Silvana Nowak, Paolo Piovesan, Wolfgang Suttrop, Qingquan Yu; "NTM dynamics and external magnetic perturbations"; Kick off Meeting, Task T14-4, Coordination of modelling on MHD stability and its control, 15 May 2014, Garching bei Munchen, Germany.

[3] Sina Fietz, Rui Coelho, Ivo Classen, Valentin Igochine, Heinz Isliker, Avrilios Lazaros, Enzo Lazzaro, Marc Maraschek, Iulian Gabriel Miron, Silvana Nowak, Paolo Piovesan, Wolfgang Suttrop, Qingquan Yu; "(N)TM dynamics and external magnetic perturbations"; 1st MST1 Science Review Meeting, 15-18 September 2014, Garching bei Munchen, Germany.

[4] I.G. Miron "3D Modeling of the NTM evolution and the effect of the external magnetic perturbations"; KOM meeting of AUG15-1.4-3, 16 July 2015, Garching bei Munchen, Germany.

[5] S. Fietz, Y. Liang, R. Coelho, L. Frassinetti, N. Wang, R. Fridström, M. Maraschek, I. Classen, Y. Gao, V. Igochine, E. Nardon, P. Bettini, N. Marconato, D. Terranova, P. Denner, O. Sauter, L. Lazaros, T. Bolzonella, I. G. Miron, H. Isliker, T. Pisokas, L. Li, Interaction between resonant magnetic perturbations and NTM stability, AUG15-1.4-3 Monday Morning Presentation Session 2 2016, 15 Feb 2016, Garching (local conference).

[6] I. G. Miron, Modeling the NTM evolution and the effect of the magnetic perturbations, AUG15-1.4-3 Analysis Meeting, 2 Mar 2016, Garching (video conference).

[7] S. Nowak, E. Lazzaro, O. Sauter, ..., I. G. Miron et al, Effect of the EC torque on slow plasma rotation under central ECH/ECCD for NTM onset, 26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto, Japan, 17–22 October 2016.

Persoane de contact: Iulian Gabriel Miron (igmiron@infim.ro)

Modelarea efectului perturbatiilor magnetice asupra evolutiei perturbatiilor de forfecare neoclasice

Regimul neliniar de comportament al perturbatiilor neoclasice de forfecare (NTM) e descris de catre dinamica grosimii insulei magnetice ce satisface ecuatia neliniara Rutherford. Termenii corespunzatori curentului de bootstrap, termenul stabilizator Glasser si cel corespunzator polarizarii au o dependenta neliniara de grosimea radiala a insulei magnetice. Daca toti acesti termeni au o reprezentare euristica in ecuatia Rutherford, singurul termen deductibil din ecuatiile fizice ale perturbatiilor e cel care da masura saltului transversal al perturbatiei prin insula magnetica.

Pentru obtinerea acestui din urma termen, modelul matematic construit in carul proiectului depaseste ceea ce s-a propus initial, in momentul inaintarii proiectului de fata. Noutatea consta in rezolvarea ecuatiilor dinamice ale perturbatiei in interiorul insulei magnetice. Metodologia folosita a constat in folosirea transformarii Laplace a ecuatiilor perturbate, in gasirea solutiilor ecuatiilor transformate Laplace si finalmente in aplicarea transformarii inverse Laplace asupra solutiei obtinute in interiorul insulei. In functie de momentul declansarii abrupte a perturbatiei au fost deduse doua solutii dependente de timp ale perturbatiei NTM: una timpurie, care poate masura dinamica perturbatiei la cateva milisecunde si o a doua solutie, care poate acoperi regimul Furth-Kileen-Rosenbluth sau regimul Rutherford, transient catre regimul de saturatie al NTM-lui. Solutiile obtinute analitic sunt puternic neliniare in raport cu timpul. A doua solutie, de exemplu, contine o dependenta de functia speciala integrala exponentiala, avand ca argument o expresie de timp. In acelasi timp, solutiile obtinute au o expresie analitica de valoarea initiala a spectrului perturbatiilor si de

valorile perturbatiilor externe, de tipul campurilor magnetice-eroare. Folosind solutiile obtinute, a fost indeplinita cerinta propusa initial a fi indeplinita: obtinerea unei expresii analitice, dependente de timp, a saltului perturbatiei NTM de-a curmezisul insulei magnetice (delta prime). In aceeasi masura dependenta este explicata de parametrii plasmei si ai sistemului de feedback pasiv (perete rezistiv) si activ (spire detector si spire de feedback) exterior coloanei de plasma. Introducand saltul perturbatiei in ecuatia de evolutie neliniara Rutherford, au fost obtinute numeric solutiile ecuatiei Rutherford si au fost trasate dependentele de timp ale grosimii radiale a insulei magnetice.

In concluzie, gasirea solutiei analitice, dinamice a ecuatiilor perturbatiilor din interiorul si exteriorul insulei magnetice, pe baza modelului matematic construit a permis indeplinirea obiectivului proiectului de fata: obtinerea dinamicii insulei magnetice asociate perturbatiilor de tip NTM.

Totodata, a fost realizata obtinerea dinamicii evolutiei insulelor magnetice aferente perturbatiilor de forfecare neoclasice (NTM), pe baza unui model matematic tridimensional construit, care calculeaza spectrul perturbatiilor in interiorul si in afara insulei magnetice. Calculele sunt efectuate spre a fi aplicate tokamak-ului german ASDEX-Upgrade (AUG), pentru care e luat in considerare un perete exterior neomogen rezistiv, precum si un sistem de spire generatoare de perturbatii magnetice (MP) externe, sistemul de spire de tip B. Geometria folosita in calcul implica asa-numitele coordonate de flux magnetic, de tip Hamada: coordonata „radiala” de flux impreuna cu unghiurile poloidal si toroidal. Rotatia toroidala a plasmei e mentinuta constanta pentru a pastra validitatea modelului perturbat.

Solutia ce satisface ecuatiile perturbate de impuls si ecuatia generalizata a lui Ohm in interiorul insulei magnetice a fost obtinuta folosind conditia la frontiera dintre insula si plasma ideala, transformata Laplace. Solutia interna, obtinuta in interiorul insulei magnetice, e construita pe baza celei externe, obtinute prin rezolvarea ecuatiilor perturbate de impuls din plasma ideala, a ecuatiilor perturbate in vidul exterior si a ecuatiilor de circuit aplicate structurilor externe coloanei de plasma.

Datorita faptului ca modelarea e dinamica, dependenta de timp, insasi evolutia insulei a fost determinata. Tratarea analitica conferita de catre modelul teoretic construit permite abordarea multi-mod a perturbatiilor. Inserarea in abordare teoretica a sistemului de spire de tip B specific AUG furnizeaza practic optiuni de interactiune non-rezonante si/sau rezonante ale MP-ilor cu NTM-ul.

Influenta primelor asupra evolutiei insulei magnetice a fost calculata si trasata grafic cu acuratete. Un alt obiectivul de cercetare al proiectului de fata il reprezinta compararea efectelor cuplului de torsiune electromagnetic (EM) si a cuplului de torsiune al vascozitatii toroidale neoclasice (NTV) asupra stabilitatii NTM. Primul cuplu mentionat este indus de catre cuplajul resonant dintre NTM si perturbatiile rezonante magnetice (RMP), generate de catre spirele de tip B ale tokamak-ului ASDEX-Upgrade (AUG), in timp ce al doilea tip de cuplu se datoreaza efectului perturbatiilor non-rezonante, aparute ca urmare a deteriorarii simetriei campului magnetic de echilibru in urma aparitiei perturbatiei NTM insasi.

E necesara clarificarea privind prevalenta unuia dintre cele doua efecte mentionate mai sus asupra stabilitatii si dinamicii NTM, in lumina ultimelor masuratori efectuate la AUG (S. Fietz et al., Nucl.Fusion 55 (2015) 013018) care au aratat ca principalul responsabil pentru franarea rotatiei toroidale a plasmei il reprezinta cuplurile EM aparute la nivelul tuturor suprafetelor magnetice din plasma, ca urmare a fenomenului de cuplaj resonant. Pe de alta parte, studii teoretice precedente (cum ar fi W. Zhu et al., Phys. Rev Letters 96 (2006) 225002) au demonstrat prevalenta cuplului NTV intre mecanismele responsabile pentru franarea rotatiei plasmei si afectarea conditiilor de confinare a coloanei de plasma. O modalitate potrivita de a discerne contributia specifica a fiecarui cuplu de torsiune este aceea de a le calcula in cadrul aceluiasi model teoretic (spre deosebire de metoda uzuala de folosinta a unor modele diferite) pentru a compara finalmente contributia fiecaruia.

Un singur model care acopera atat modelarea fluidului cat si modelarea cinetica a particulelor constituyente si care foloseste aceleasi expresii obtinute pentru amplitudinea si faza NTM, reprezinta o conditie necesara pentru obtinerea de rezultate stiintifice intr-o maniera metodologica potrivita.

Perioada de desfășurare: 2014-2016

Obiective:

- construcția unui model teoretic tridimensional de descriere a perturbărilor magnetice de tip tearing neoclasice (NTM) pentru o structură bidimensională a liniilor de câmp magnetic de echilibru. Comparativ cu modelări tridimensionale anterioare, noutatea acestui obiectiv o constituie modelarea NTM în cadrul regimului neliniar Rutherford, caz în care saltul perturbăției peste insulă magnetică corespunzătoare NTM, ce măsoară stabilitatea perturbăției, este o mărime dependentă de grosimea insulei
- rezolvarea ecuațiilor dinamice ale perturbăției în interiorul insulei magnetice. Metodologia folosită a constat în folosirea transformării Laplace a ecuațiilor perturbate, în găsirea soluțiilor ecuațiilor transformate Laplace și finalmente în aplicarea transformării inverse Laplace asupra soluției obținute în interiorul insulei. În funcție de momentul declanșării abrupte a perturbăției au fost deduse două soluții dependente de timp ale perturbăției NTM: una timpurie, care poate măsoară dinamica perturbăției la câteva milisecunde și o a doua soluție, care poate acoperi regimul Furth-Killeen-Rosenbluth sau regimul Rutherford, transient către regimul de saturare al NTM-lui.
- Determinarea efectului componentelor rezonante și non-rezonante asupra soluțiilor ecuației de evoluție Rutherford și, în consecință, direct asupra evoluției insulei magnetice aferente perturbăției de forfecare neoclasice.
- Evaluarea prevalenței efectului cuplului de torsiune electromagnetic (EM) în comparație cu efectul cuplului de torsiune al vâscozității toroidale neoclasice (NTV) asupra stabilității perturbăției de forfecare neoclasice (NTM) și, în consecință, asupra condițiilor de confinare a plasmei.

Etape:

- Modelarea liniară tridimensională a comportamentului perturbărilor de tip tearing neoclasice.
- Rezolvarea ecuației de evoluție neliniară Rutherford în scopul obținerii dinamicii insulelor perturbărilor NTM.
- Efectul perturbărilor rezonante și non-rezonante asupra evoluției insulelor magnetice
- Calculul cuplului de torsiune electromagnetic în prezența perturbărilor magnetice externe

Rezultate obținute:

- A fost determinată soluția analitică a unui sistem tridimensional multimodal de ecuații ce cuprinde ecuațiile din plasma, vid și elementele conductoare din exteriorul plasmei, în termenii componentelor perturbărilor de flux magnetic, în funcție de mărimea grosimii insulei magnetice NTM. Soluția obținută are o dependență explicită de timp, depinde explicit de parametrii ce dau măsură formei geometrice a structurilor suprafețelor magnetice de echilibru (deci și a suprafeței plasmei), precum și de spectrul componentelor câmpurilor magnetice eroare.
- Au fost obținute expresiile analitice, dependente de timp, ale saltului perturbăției NTM de-a curmezisul insulei magnetice (delta prime). În aceeași măsură dependență este explicită de parametrii plasmei și ai sistemului de feedback pasiv (perete rezistiv) și activ (spire detector și spire de feedback) exterior coloanei de plasma. Introducând saltul perturbăției în ecuația de evoluție neliniară Rutherford, au fost găsite numeric soluțiile ecuației Rutherford și au fost trasate dependențele de timp ale grosimii radiale a insulei magnetice. Determinarea soluției analitice, dinamice a ecuațiilor perturbărilor din interiorul și exteriorul insulei magnetice, pe baza modelului matematic construit, a permis îndeplinirea obiectivului proiectului de față: obținerea dinamicii insulei magnetice asociate perturbărilor de tip NTM.

- A fost obtinut indicele de stabilitate al perturbatiilor de forfecare, ce masoara derivata radiala a saltului perturbatiilor prin insula magnetica. Cu ajutorul acestuia din urma, ecuatia de evolutie Rutherford a grosimii radiale a insulei magnetice a fost rezolvata analitic.
- Au fost calculate diferentele de faza dintre cele doua randuri de spire de tip B (inferior si superior) ale tokamak-ului ASDEX-Upgrade, pentru diverse spectre de curent prin spire, care corespund interactiunii rezonante maxime, de evitat. Acest din urma aspect are o importanta deosebita, evidentiata in cadrul ultimei campanii experimentale MST1 la care am participat, legata de influenta perturbatiilor externe rezonante asupra NTM-lui, pentru instalatia AUG de la institutul IPP Max-Planck din Garching bei Munchen.
- Expresia clara, analitica, a perturbatiei de tip neoclassic NTM, a fost folosita in determinarea analitica a cuplului EM pentru a masura cuplajul rezonant. Modelul evolutiv pe care l-am construit e special adaptat parametrilor AUG. Dincolo de influenta spirelor de tip B, avand orice configuratie imaginabila privind amplitudinea semnalului RMP generat si a diferentei de faza dintre cele doua inele (superior si inferior) ale structurii spirelor AUG de tip B, asupra comportamentului NTM si evolutiei insulei magnetice insasi, efectul acestora asupra indicelui de stabilitate a perturbatiei si, in consecinta, asupra amplitudinii si evolutiei cuplului EM e calculat si trasat. Spectrul parametric optim poate fi gasit (privind spirele de tip B) astfel incat efectul cuplului EM asupra perturbatiilor NTM sa fie minim. Etapa stiintifica de acum reprezinta primul pas dintr-un plan extins, cu intentia de a compara efectul intregului spectru al perturbatiilor externe (rezonante si non-rezonante) asupra dinamicii NTM si evolutiei rotatiei plasmei insasi. Contributia stiintifica prezenta e complementara campaniilor experimentale aferente WP Eurofusion-MST1, avand indicativele AUG15-1.4-3 si TCV15-1.4-4, la care am participat.

Publicatii:

Conferinte

[1] I.G. Miron, "Kinetic resonances effect on magnetic braking in tokamaks"; 42nd European Physical Society Conference on Plasma Physics, 22-26 June 2015, Lisbon, Portugal; P1.169.

[2] I.G. Miron, "Modeling of seed magnetic island formation", 43rd European Physical Society Conference on Plasma Physics, 4-8 July 2016, Leuven, Belgium.

Persoane de contact:

Iulian Gabriel Miron (igmiron@infim.ro)

Modelarea efectului regimului de rotatie scazuta asupra aparitiei si evolutiei perturbatiilor NTM

Campaniile experimentale Eurofusion MST1 au rolul de a rezolva probleme-cheie care apar in instalatiile tokamak de marime medie, asa-numitele instalatii Mid-Sized, cu scopul de a fi ulterior implementate in constructia si functionarea ITER. Una dintre problemele de rezolvat o constituie aparitia si stabilizarea perturbatiilor neoclasice de forfecare (NTM) care sunt intrinseci instalatiilor tokamak, datorita gradientilor de presiune ce apar, legati fiind de toroidicitatea liniilor de camp magnetic. Studii amanuntite au fost realizate pana acum, privitoare la acest tip de instabilitati. Rotatia toroidala joasa a plasmei (ce va fi caracteristica ITER) reprezinta o problema-cheie care trebuie studiata pentru a se estima efectul asupra tuturor perturbatiilor in ansamblu si asupra aparitiei si evolutiei perturbatiilor de tip NTM, in special. Este stiut faptul ca rotatia plasmei joaca un rol stabilizator asupra instabilitatilor din plasma iar obiectivul acestui studiu este gasirea metodelor prin care efectul stabilizator al unei rotatii inalte poate fi inlocuit, cand aceasta din urma ia valori joase, pentru cazul particular al perturbatiilor NTM. Studiul de fata este important si datorita faptului ca rotatii joase ale plasmei pot fi gasite in foarte putine instalatii tokamak, astfel incat sa efectul acestora sa poate fi testat experimental (tokamak-ul TCV e unul dintre acestea).

Am construit un model tridimensional cvasi-analitic care calculeaza amplitudinea, rata de crestere temporala, frecventa, indicele de stabilitate delta prim si faza NTM de de-a lungul aparitiei si evolutiei acestuia. Rotatia plasmei (poloidala si/sau toroidala) reprezinta un parametru explicit al modelului propus. Putem testa modelul nostru pentru orice valoare a rotatiei plasmei si pentru orice spectru parametric ce descrie instalatia tokamak aleasa. Modelul acopera toate ecuatiile perturbatiilor dinauntru si din afara plasmei pentru a rezolva finalmente sistemul complet al ecuatiilor ce descriu efectul plasmei, vidului si al structurilor externe coloanei de plasma asupra evolutiei perturbatiilor NTM. Rezultatele obtinute au aratat o restrangere a posibilitatilor de inlocuire al efectului stabilizator al unei rotatii mari de catre alti parametri caracteristici ai plasmei, atunci cand rotatia scade semnificativ. De fapt, am constatat ca odata cu scaderea vitezei de rotatie a plasmei, dependentele ce arata evolutia NTM devin cu atat mai indistincte, chiar daca corespund unor alegeri net diferite ale altor parametri ai plasmei.

Perioada de desfasurare: 2017

Obiective:

- obiectivele proiectului nostru legat de campania experimentală la tokamak-ul TCV au misiunea de a intelege si masura aparitia si evolutia perturbatiilor NTM in regimul de rotatie toroidala scazuta a plasmei tokamak, informatii absolut necesare pentru a descrie acest regim uzual de functionare a viitorului tokamak ITER.
- scalarea rotatiei in vecinatatea pragului factorului marginal beta al plasmei si explorarea efectelor rotatiei scazute in lipsa vreunui factor declansator al aparitiei insulelor magnetice.

Etape:

- Modelarea liniara tridimensionala a comportamentului perturbatiilor de tip tearing neoclasice.
- Calculul cvasi-analitic al perturbatiei neoclasice, rezolvand ecuatiile perturbate ale plasmei in interiorul insulei magnetice.
- Trasarea evolutiei ratei de crestere, frecventei de rotatie, indicelui de stabilitate si grosimii insulei magnetice asociate perturbatiei neoclasice de forfecare folosind solutia obtinuta in urma constructiei modelului nostru analitic

Rezultate obtinute:

- A fost calculata frecventa modurilor NTM de perturbatie care, s-a dovedit, ca nu are un comportament specific in regimurile de rotatie toroidala joasa a plasmei. Frecventa perturbatiei urmareste rotatia plasmei, in ciuda cuplarii magnetice a perturbatiei cu perturbatii corespondente magnetice-eroare sau perturbatii generate de catre spirele de tip B ale instalatiei AUG.
- A fost calculata rata de crestere calculata a NTM care, intr-un stadiu temporal incipient, depinde de rotatia toroidala a plasmei; la rotatii joase, asa cum era de asteptat, rata de crestere e mai inalta, rotatia avand un effect stabilizator asupra NTM. Acest interval de timp initial e definitoriu pentru calculul pragului la care NTM-ul isi face aparitia. Pragul minim corespunde unui regim de rotatie scazuta a plasmei. Pe de alta parte, odata cu trecerea timpului, rata de crestere se stabilizeaza la o valoare comuna, indiferent de amplitudinea rotatiei plasmei. La timpi mari, rotatia plasmei devine irelevanta in raport cu alte efecte, cel putin in privinta ratei de crestere a perturbatiei.
- A fost dedus indicele de stabilitate al perturbatiei. Ca si in cazul frecventei modului de perturbatie, regimul de rotatie scazuta a plasmei corespunde unui indice de stabilitate crescut. Odata cu trecerea timpului, indicele de stabilitate se stabilizeaza la valori diferite, pentru valori diferite ale rotatiei plasmei. Nu exista vreun comportament specific pentru cazul regimului de rotatie joasa.

- Prin rezolvarea ecuației Rutherford de evoluției a insulei magnetice, a fost calculată evoluția grosimii insulei magnetice asociată NTM-ului. Regimul de rotație joasă corespunde unei grosimi ridicate a insulei magnetice, în acord cu stabilitatea scăzută a NTM, indicată și de către frecvența de rotație și rata de creștere a modului de perturbare. Pe de altă parte, dacă pentru modul de perturbare 3/2 un factor beta mare al plasmei devine mai stabilizator în condițiile unui regim de rotație joasă, pentru modul 2/1 nu există un astfel de comportament monoton. Pentru perturbarea din urmă există un factor beta optim, pentru care NTM-ul este cel mai stabil, în regimul de rotație joasă a plasmei. Dacă în cazul unei rotații înalte a plasmei, pentru valori distincte ale curentului în plasma, finalmente grosimea insulei se stabilizează la o valoare comună, în cazul regimului de rotație joasă, curenții mari ai plasmei devin cu atât mai destabilizatori pentru perturbarea neoclasică.

Publicatii:

[1] S. Coda, J. Ahn, R. Albanese, ..., I. G. Miron et al, Nucl Fusion 57, 102011 (2017)

Conferinte

[1] I. G. Miron, the EUROfusion MST1 Team and the ASDEX Upgrade Team, Modelling the effect of resonant magnetic perturbations on neoclassical tearing modes, 17th European Fusion Theory Conference, P2.9, Athens, Greece, 9-12 October 2017.

Persoane de contact:

Iulian Gabriel Miron (igmiron@infim.ro)

Modelarea efectului vascozității neoclasice toroidale asupra stabilității perturbărilor NTM, datorat cuplajului non-rezonant

Faza științifică de față intenționează să stabilească rolul vascozității toroidale neoclasice (NTV) asupra apariției și evoluției perturbărilor neoclasice de forfecare (NTM). Provocarea a constă în a stabili care dintre mecanismele destabilizatoare pentru evoluția NTM prevalează: cuplul de torsiune non-rezonant NTV sau cuplul electromagnetic dintre NTM și perturbările magnetice rezonante. Studii teoretice anterioare au clamat faptul că, neîndoios, cuplul de torsiune NTV reprezintă principalul cuplu vinovat de destabilizarea NTM, în timp ce măsurători experimentale realizate la tokamak-ul ASDEX-Upgrade au evidențiat cuplul electromagnetic dintre NTM și perturbări externe ca fiind principalul mecanism de degradare a stabilității NTM.

Am modelat, ținând cont de cinetica particulelor constitutive ale plasmei, fluxul radial non-ambipolar (prin urmare, cuplul NTV) pornind de la calculul tensorului de presiune perturbat, de urmă nula, ce va fi folosit în formula de calcul a magnitudinii cuplului NTV. Pentru aceasta a fost necesară deducerea, în prealabil, a funcției de distribuție perturbată a particulelor constitutive ale plasmei.

A fost luat în considerare un regim de colizionalitate slabă dintre particule pentru care a fost calculată integrala energiei, ținând cont de fenomenul de rezonanță dintre frecvența de oscilație tip bounce a particulelor și frecvența de rotație a plasmei. Acest tip de rezonanță e posibil în regimuri uzuale, de astăzi, de rotație înaltă a plasmei. În acest caz, integrala energiei de care am pomenit, devine singulară, valoarea ei principală Cauchy fiind calculată. În acest fel va fi calculată finalmente mărimea NTV, dependentă de gradul de rupere a simetriei liniilor de câmp magnetic, generatoare de flux radial de particule.

Pe de altă parte, cuplul NTV depinde în mod explicit de perturbările de flux magnetic (NTM în cazul nostru) care sunt calculate rezolvând ecuațiile perturbărilor în tot spațiul: ecuațiile perturbate de impuls în plasma ideală, ecuațiile MHD în plasma rezistivă din insula magnetică, ecuațiile perturbărilor în vid și, finalmente, ecuațiile de circuit ale perturbărilor în structurile metalice exterioare coloanei de plasma (perete exterior, spire). Soluția obținută furnizează aceeași perturbare NTM folosită și în calculul cuplului rezonant electromagnetic. În final, s-a demonstrat că, cel puțin pentru cazul tokamak-ului ASDEX Upgrade,

rezultatele noastre se aliniaza partial cu rezultatele experimentale obtinute anterior: cuplul de torsiune NTV are o influenta mai redusa asupra evolutiei NTM in comparative cu cuplul electromagnetic, insa aceasta influenta nu e nesemnificativa.

Perioada de desfasurare: 2017

Obiective:

- Calculul cuplului de torsiune NTV pornind de modelul nostru cvasi-analitic de descriere a perturbatiilor NTM
- Compararea principalelor mecanisme de scadere si franare a rotatiei toroidale a plasmei: cuplurile de torsiune electromagnetic si NTV.

Etape:

- Calculul perturbatiei functiei de distributie a particulelor pornind de la ecuatiile cinetice perturbate din plasma.
- Calculul perturbatiei tensorului de presiune pe baza perturbatiei functiei de distributie a particulelor obtinute anterior via componentele paralela si perpendiculara pe campul magnetic de echilibru ale perturbatiei presiunii scalare.
- Calculul cvasi-analitic al cuplului de torsiune NTV
- Demonstrarea prevalentei cuplului electromagnetic comparativ cu cel NTV asupra evolutiei plasmei.

Rezultate obtinute:

- A fost calculata analitic perturbatia functiei de distributie a particulelor din plasma in functie de impulsul canonic al constituentilor, momentul magnetic si energia particulelor, functia de distributie de echilibru a particulelor, temperatura plasmei, geometria torului de plasma, factorul de securitate al plasmei, numerele poloidal, toroidal si armonic corespunzator oscilatiilor pe orbite banana a particulelor, rotatia plasmei, frecventa de particulelor prinse in orbite de oscilatie si frecventa de precesie toroidala a orbitelor tip banana in care sunt prinse particulele constituinte ale plasmei.
- A fost calculat cuplul de torsiune NTV pe baza perturbatiei de flux magnetic asociat NTM, continand si informatiile specifice fenomenelor cinetice descrise anterior via integrarea de suprafata a produsului scalar dintre campul magnetic total si gradientului tensorului perturbat de presiune.
- A fost demonstrata prevalenta usoara a cuplului de torsiune electromagnetic asupra celui NTV pentru cazul AUG, folosind datele experimentale aferente experimentului no. #33959 pentru cazul modului 3/2 NTM de perturbatie. Prin urmare cuplul NTV nu e neglijabil cum experimente anterioare au aratat in mod indirect, dar nici nu e sensibil mai mare decat cel electromagnetic, cum au presupus rezultatele teoretice.
- Cuplul de torsiune NTV e sensibil la curenții injectati in plasma. Nu exista nicio dependenta monotona, ci exista un extremum pentru care cuplul NTV are influenta maxima asupra plasmei.
- Odata cu cresterea factorului beta normalizat, cuplul de torsiune NTV scade. Prin urmare presiunea cinetica a plasmei previne si descurajeaza amplificarea cuplajul non-rezonant al perturbatiilor. Asa cum ne-am asteptat, contrar cazului cuplului de torsiune electromagnetic, evolutia cuplului NTV e slab influentata de cuplajul rezonant dintre perturbatiile plasmei si perturbatiile exterioare, generate de catre sistemul de spire de tip B al AUG care, in mod uzual, au o mai mare influenta asupra torsiunii electromagnetice.

Publicatii:

Articole:

[1] H. Meyer, T. Eich, M. Beurskens, ..., I. G. Miron et al, Nucl. Fusion 57, 102014 (2017)

Conferinte

[1] I. G. Miron, the EUROfusion MST1 Team and the ASDEX Upgrade Team, Modelling the effect of resonant magnetic perturbations on neoclassical tearing modes, 17th European Fusion Theory Conference, P2.9, Athens, Greece, 9-12 October 2017.

Persoane de contact:

Iulian Gabriel Miron (igmiron@infim.ro)

Modelarea dinamicii interactiei dintre plasma si perturbatiile magnetice externe

Am construit un model tridimensional menit a descrie evolutia perturbatiilor din plasma sub influenta perturbatiilor externe rezonante si non-rezonante, generate de catre spirele de tip B ale AUG sau fiind campuri magnetice-eroare generate de catre o calibrare imperfecta, inerenta a bobinelor instalatiei tokamak.

O serie de date experimentale au fost folosite (corespunzatoare mai multor experimente in cadrul AUG: 33956, 33959, etc), precum si rezultatele aferente cu scopul de a compara pe acestea din urma cu rezultatele furnizate de catre modelul nostru teoretic si codul numeric aferent, ce au folosit aceleasi date experimentale. Experimentele au fost realizate in cadrul campaniei WPMST1 2017, Topic 9 "Assess plasma stability performance and stability control in high-beta and advanced tokamak regimes". Au fost alocate 15 descarcari la AUG pentru aceasta campanie.

Diverse experimente au fost realizate avand scopul de a testa reactia plasmei la influenta perturbatiilor externe generate de catre spirele de tip B ale AUG in doua privinte, cele legate de amplitudinea si/sau de faza perturbatiilor externe. In plus, un alt parametru folosit la testari l-a constituit diferenta de faza dintre cele doua randuri de spire de tip B, fiecare in numar de opt spire, de o parte si de alta a planului median al torului de plasma.

Am refacut aceste experimente folosind modelul teoretic propriu si, finamente, am comparat rezultatele obtinute teoretic cu cele experimentale.

Perioada de desfasurare: 2017**Obiective:**

- Descrierea teoretica a evolutiei NTM
- Compararea rezultatelor aferente experimentelor campaniei cu rezultatele obtinute teoretic, folosind modelul propriu propus.

Etape:

- Calculul perturbatiei NTM rezolvand ecuatiile perturbate in plasma ideala, plasma rezistiva din insula magnetica aferenta NTM-ului, in vid, in peretele rezistiv exterior si spirele de feedback si/sau de tip B caracteristice instalatiei AUG. Au fost introduse in model perturbatiile externe generate de catre spirele de tip B.
- Compararea frecventei calculate a modului de perturbatie cu frecventa perturbatiei din spectrogramele aferente rezultatelor experimentale pentru cazul mai multor descarcari pentru a testa si valida modelul teoretic propus.

Rezultate obtinute:

- A fost calculata cvasi-analitic perturbatia de flux magnetic aferenta NTM rezolvand ecuatiile perturbate in plasma ideala, plasma rezistiva din insula magnetica aferenta NTM-ului, in vid, in peretele rezistiv exterior si spirele de feedback si/sau de tip B caracteristice instalatiei AUG. Au fost introduse in model perturbatiile externe generate de catre spirele de tip B.
- A fost testat modelul teoretic in raport cu experimentul AUG 33959, in cadrul caruia s-a cautat amplitudinea statica optima a perturbatiei externe, intr-un regim de amplitudine dinamica constanta a perturbatiei externe, pentru care stabilitatea perturbatiei NTM e cea mai ridicata. Evolutia frecventei modului NTM, calculata folosind modelul nostrum teoretic, s-a suprapus peste frecventa data de spectrograma aferenta experimentului.
- A fost testat modelul nostru in raport cu experimentele 33968 si 33975 referitoare la influenta perturbatiilor externe si, ca effect stabilizator al acestora, al intarzierii stingerii descarcarii in cazul existentei perturbatiilor externe avand effect stabilizator. Din nou, rezultatele teoretice proprii s-au potrivit cu rezultatele experimentale pentru ambele experimente.
- Folosind experimentele AUG 34361, 34366, 34371, 34372 si 34375 a fost cautata faza optima a perturbatiilor externe pentru care NTM-ul e cel mai stabil posibil, in conditiile unor amplitudini statice si dinamice constante ale perturbatiilor generate de sistemul de spire B al AUG. Am reprodus toate experimentele si am obtinut aceleasi rezultate. Evolutia frecventei calculate teoretic a perturbatiei NTM a urmarit cu acuratete evolutia factorului beta normalizat al plasmei din datele experimentale.

[2] I.G. Miron - Modelling the error fields effects on NTMs – Preparation Meeting AUG (04.05.2018)

Persoane de contact:

Iulian Gabriel Miron (igmiron@infim.ro)

Rezolvarea problemei inverse: determinarea campurilor magnetice-eroare dinamice pornind de la comportamentul perturbatiilor NTM. Validarea modelului teoretic.

Acest obiectiv a constituit propunerea pentru task-ul MST1-20-&09-AUG de la ASDEX-Upgrade „Detectarea si controlul campurilor magnetice-eroare”.

Pornind de la modelul teoretic pe care l-am propus si l-am validat in raport cu descarcari la AUG (ASDEX-Upgrade) privitoare la evolutia perturbatiilor neoclasice de tip NTM, ne-am folosit de validarea acestuia in scopul inversarii sale si determinarii campurilor magnetice-eroare dinamice, intrinseci instalatiei. Inversarea a presupus tratarea campului magnetic-eroare in acelasi mod in care e tratata perturbatia neoclasica insasi, dar in afara plasmei. Pornind acum de la cunoasterea evolutiei perturbatiei, ceea ce inainte reprezenta sistemul de ecuatii ale perturbatiilor, acum devine un sistem de ecuatii diferentiale ale campurilor magnetice-eroare, perturbatiile NTM jucand rolul de termeni liberi.

A fost determinata solutia generala a campurilor-eroare, bazata pe solutiile NTM dependente explicit de timp, derivata radiala a acestora, precum si semnalele spirelor de tip B specifice AUG.

Validarea modelului direct de determinare a perturbatiilor NTM s-a facut in raport cu descarcari la AUG, precum descarcarea AUG #36273.

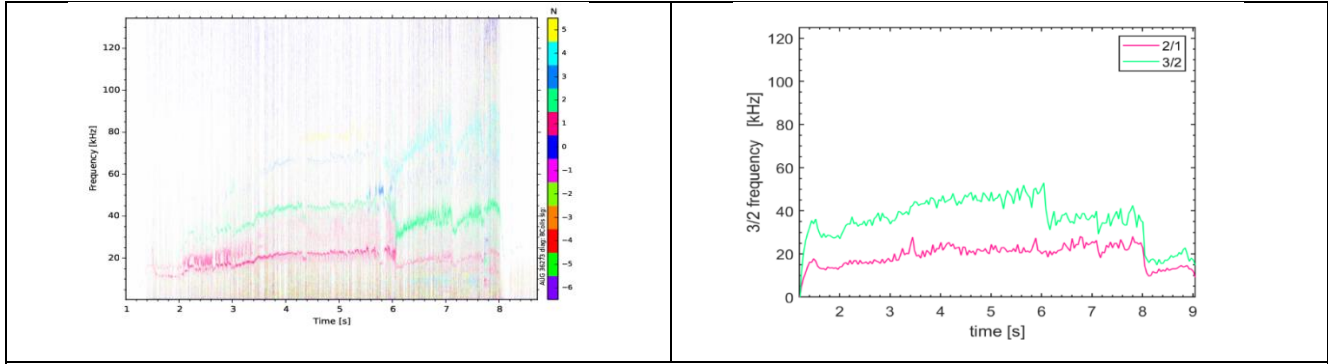


Fig.1 AUG #36273 - Spectrograma vs frecventele calculate ale modurilor 2/1 si 3/2 folosind $\text{Im}[(\partial \psi_{s-}^{jk} / \partial t) / \psi_{s-}^{jk}]$. ψ_{s-}^{jk} este perturbatia de flux a NTM-ului j/k.

Se poate observa potrivirea dintre spectrograma frecventelor modurilor NTM de perturbatie 2/1 si 3/2 din Fig.1 (stanga) cu graficul frecventelor calculate, folosind modelul nostru, ale acelorasi perturbatii in Fig.1 (dreapta).

O situatie similara se observa in Fig. 2(stanga), unde evolutia modurilor NTM, oferite de catre tabelul datelor diagnostice MOD\EvenN si MOD\OddN de la AUG, reprezentand radicalul amplitudinii perturbatiilor, e comparata cu graficul radicalului amplitudinii perturbatiei calculat folosind modelul pe care l-am propus. Si in acest caz exista o potrivire rezonabila intre datele masurate si cele determinate, ceea ce ne indreptatesta sa apreciem ca fiind valid modelul propus si testat in raport cu descarcarile la AUG. Bazandu-ne pe aceasta concluzie, solutia modelului nostru inversat, de determinare a campurilor magnetice-eroare pornind, de la comportamentul perturbatiilor NTM.

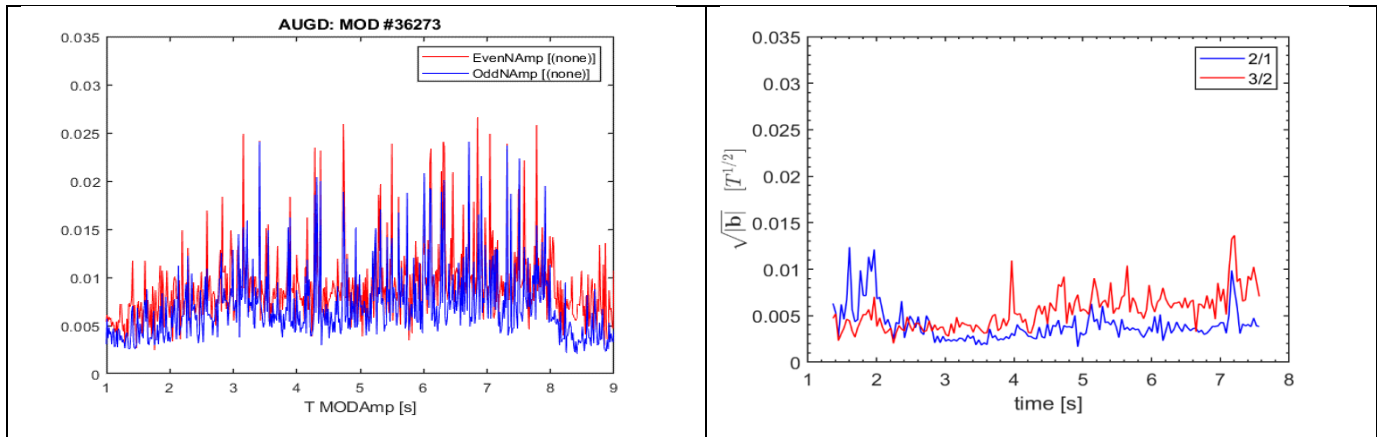


Fig.2 AUG #36273 - MOD\EvenNamp, MOD\OddNamp vs radicalul amplitudinii calculate ale perturbatiilor 2/1 si 3/2

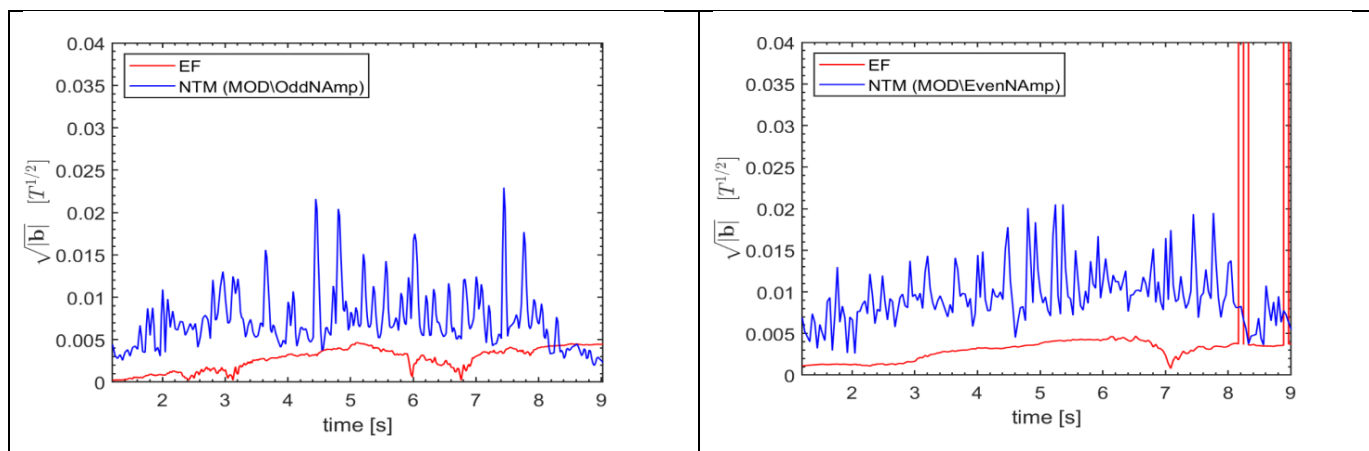


Fig.3 AUG #36273 - radicalul amplitudinii calculate a campurilor magnetice-eroare in comparatie cu datele MOD\OddNAmp si MOD\EvenNAmp, pentru modurile 2/1 si 3/2.

Fig. 3 (stanga) prezinta evolutia radicalului amplitudinii campului magnetic-eroare 2/1 in comparatie cu datele MOD\OddN ale radicalului amplitudinii perturbatiei masurate. Fig.3 (dreapta) prezinta acelasi lucru pentru cazul 3/2. Ambele valori ale campurilor magnetice-eroare intrinseci instalatiei nu sunt masurabile. Determinarea lor a fost realizata gratie modelului pe care l-am testat si propus. Campurile magnetice-eroare au o influenta directa si nemijlocita asupra evolutiei perturbatiilor neoclasice NTM. Determinarea lor e obligatorie in scopul evaluarii aparitiei si stabilitatii nu numai a NTM, dar a unei intregi clase de perturbatii MHD.

Persoane de contact:

Iulian Gabriel Miron (igmiron@infim.ro)

Generarea și saturarea câmpului electric de polarizare în momentul ionizării

În cadrul programului de lucru Medium-Size Tokamak WP MST1-20-T01-AUG, tema T01: ITER H-mode scenario operation space am studiat cuplul tranzient generat în momentul ionizării atomilor neutri. Pentru fiecare ion nou generat și capturat există un eveniment unic de deplasare, din punctul în care se produce ionizarea până în centrul mișcării periodice pe orbita banană.

Ansamblul tuturor acestor deplasări creează un curent semnificativ pe durata ionizării (peletului, puful de gaz, introducerii de impurități). Curentul de retur influențează rotația plasmei, formarea barierelor de transport și poate contribui la crearea modurilor PEP ("pellet enhanced performance", "performanță îmbunătățită prin peleți").

Am examinat acest proces în relație cu separarea de sarcină, polarizarea, câmpul electric radial și curentul radial. Aceste procese sunt relevante în formarea barierelor de transport și a regimurilor de confinare înaltă în instalațiile tokamak.

În același timp se produce o separare de sarcină: electronii și ionii care inițial ocupau aceeași poziție în momentul ionizării sunt acum separați de o distanță finită în plan ecuatorial (datorită simetriei traiectoriei banană). Întrebarea care apare în mod natural este: ce mecanism ar putea produce

saturarea câmpului electric pentru a împiedica o creștere colosală?

Unul din efectele care ar putea contribui la obținerea unei stări staționare este rotația a plasmei. Aceasta este predispusă la frecare colizională. Astfel, câmpul electric de polarizare creat prin separarea de sarcină din momentul ionizării va crește doar până când rotația plasmei va fi saturată prin vâscozitate.

Folosind modele analitice curenți (abordarea fluidă și respectiv abordarea cinetică), am examinat problema legăturii între curentul radial (sau, echivalent a separării de sarcină) și curgerea plasmei.

Mecanismul responsabil de limitarea creșterii câmpului electric radial rezultat din separarea de sarcină este reprezentat de vâscozitatea plasmei. Starea staționară corespunde egalării curentului de ionizare și a curentului de return, cu posibilitatea neglijării câmpului electric de polarizare.

În viitor, lucrarea de față își propune dezvoltarea unei formulări analitice a relației dintre câmpul electric de polarizare și vâscozitate.

Perioada de desfasurare: 2020

Obiective:

- Găsirea contribuției cuplului produs de curenții ionilor produși prin NBI și ionizarea gazului neutru la formarea modului H

Etape:

- Derivarea legăturii între curentul radial ce conduce la separarea de sarcină și variația temporală a curgerilor toroidale și paralele folosind abordarea fluidă
- Calculul amortizării rotației poloidale folosind o abordare cinetică
- Obținerea saturării câmpului electric radial de polarizare datorită vâscozității
- Calculul câmpului electric radial produs de ionii NBI și de particulele alpha

Rezultatele obtinute:

- Am calculat curentul radial produs în plasmă de ionii nou generați în faza lor tranzitorie așezării pe orbitele periodice de tip banană. Deși această etapă este unică, curentul total generat este semnificativ.
- Am identificat vâscozitatea ca mecanismul capabil să absoarbă momentul generat de polarizarea radială astfel încât să se poată ajunge la o saturare o separării de sarcină

Publicatii:

Articole

- [1] F. Spineanu, M. Vlad, *Comment on the vortices of the early phase of the ELMs*, <https://arxiv.org/pdf/2011.11782>.

Persoane de contact: Andreea Mihaela Croitoru (andreea.croitoru@inflpr.ro) Florin Spineanu (florin.spineanu@inflpr.ro)

Evenimente de transport intermitent cauzate de interacțiunea între curgerile toroidale/poloidale forfecate

În cadrul programului de lucru WP MST1-20-T04-AUG, tema T04: Natural stationary no-ELM regime compatibility with ITER & DEMO am analizat legătura între evenimentele tranziente aleatorii și competiția între rotația poloidală forfecată și rotația toroidală forfecată.

Experimentele recente au observat o reducere a confinării datorată evenimentelor aleatoare de pierdere a particulelor și a energiei. Disipările aleatoare apar atât în modul de confinare L, cât și în modul de confinare H și pot constitui pierderi de până la 50% din totalul transportului radial $E \times B \phi$. Aceste evenimente sunt convective și își au originea în apropierea ultimei suprafețe de flux închise. Considerăm că evenimentele tranziente aleatorii (intermitențe) sunt cauzate de competiția între rotația poloidală forfecată și rotația toroidală forfecată, rotații ce au efecte opuse asupra transportului.

Bariera de transport este creată de curgerea poloidală cu o viteză forfecată. Există însă și o curgere toroidală cu viteză forfecată. În condițiile întâlnite uzual la marginea plasmei tokamak este binecunoscută posibilitatea producerii instabilităților de tip Kelvin Helmholtz. Tensiunea Reynolds a instabilităților susținute de curgerea toroidală are o componentă ce poate transfera impuls către rotația poloidală. Acest transfer de impuls de la rotația toroidală către rotația poloidală contribuie la formarea unei bariere de transport. Datorită barierelor de transport, gradientii parametrilor plasmei cresc considerabil. Astfel, instabilitățile Kelvin Helmholtz au mai puține condiții favorabile dezvoltării iar turbulența susținută de curgerea toroidală forfecată reduce transferul tensiunii Reynolds către rotația poloidală. Având o susținere slăbită, rotația poloidală devine amortizată de pompajul magnetic iar bariera de transport se pierde. Acesta este mecanismul pierderii majore observate experimental.

Am examinat instabilitatea Kelvin Helmholtz liniară susținută de rotația toroidală forfecată și am observat că în condițiile prezente la marginea plasmei tokamak este favorabilă creșterea nivelului turbulenței. Transferul impulsului către rotația poloidală este posibil prin tensiunea Reynolds. Acesta contribuie la formarea barierei de transport. Deși nu reprezintă singurul factor ce contribuie la formarea barierei de transport, această contribuție este considerabilă în timpul injecției de neutri. Am arătat că o mărire a gradientilor (consecință a confinării îmbunătățite) reduce rata de creștere a instabilităților Kelvin Helmholtz. Astfel, contribuția oferită prin intermediul tensiunii Reynolds scade și amortizarea produsă prin pompaj magnetic suprimă rotația poloidală. Acest scenariu reprezintă un puls de pierdere intensă.

În viitor ne propunem derivarea unui set de ecuații pentru bilanțul acestor efecte: instabilitatea Kelvin Helmholtz și turbulența, contribuția tensiunii Reynolds la rotația poloidală, creșterea gradientilor și scăderea turbulenței Kelvin Helmholtz.

Perioada de desfasurare: 2020

Obiective:

- Găsirea unei explicații a pierderilor intermitente de amplitudine mare ce conduc la suprimarea aleatorie a barierei de transport

Etape:

- Analiza instabilității Kelvin Helmholtz în prezența rotației paralele forfecate
- Obținerea unui set de ecuații ce descrie cuplajul între rotațiile poloidală și toroidală în prezența tensiunii Reynolds
- Obținerea ecuației evoluției vitezei poloidale

Rezultatele obtinute:

- Formularea unui model fizic al tranzițiilor aleatorii între rotația toroidală forfecată (starea turbulentă) și rotația poloidală forfecată (bariera de transport) mediate de tensiunea Reynolds

Publicatii:

Articole:

- [1] *"Transient alignment of vorticity and magnetic field helical structures in tokamak plasma" (in preparation)*

Persoane de contact: Andreea Mihaela Croitoru (andreea.croitoru@inflpr.ro) Florin Spineanu (florin.spineanu@inflpr.ro)

Separarea variabilă de scală între starea turbulentă și structuri și intensificarea tranzientă a transportului

În cadrul programului de lucru WP MST1-20, tema complementara „Running scale separation between turbulence and structures and transient enhancement of transport” am dezvoltat un model explicativ pentru fenomenul observat experimental al pulsurilor intermitente de pierderi de energie la marginea plasmei tokamak.

Scopul acestei lucrări este examinarea “separării de scală” într-o stare turbulentă mixtă ce conține și structuri coerente. Structurile de scală mare sunt uneori observate experimental și sunt recunoscute pentru producerea unor rate de transport considerabile, datorită creării unei conexiuni între regiuni îndepărtate ale plasmei. Ne-am concentrat pe ipoteza că originea acestor structuri de scală mare este reprezentată de formarea, atracția și coalescența structurilor de scală mică, *i.e.* a vortexurilor. Deși vortexurile pot apărea în turbulență intensă datorită unei localizări spontane a câmpului (curgerii) nelinier (e), am analizat situația în care formarea vortexurilor este produsă de un puls extern, astfel vortexurile sunt tranziente. Rezultă că și structurile de scală mare sunt generate de asemenea în mod tranzient și determină un transport intens intermitent.

Folosind formulări analitice clasice, am descris forma explicită a vortexurilor și a pierderilor disipative ale structurilor prin intermediul radiației undelor. Am estimat numărul de vortexuri ce pot fi create dintr-un puls extern (perturbativ) ce ajunge la marginea plasmei datorită unui eveniment localizat în centrul plasmei.

În conexiune cu generarea vortexurilor și evoluția acestora prin coalescență către structuri coerente sub formă de celule convective, am formulat o problemă adiacentă. Condițiile de la marginea plasmei în regimul confinării înalte (modul H) favorizează apariția “modurilor localizate la margine” (edge localized modes - ELM) periodice. O abordare teoretică indică drept o posibilă explicație a acestor

evenimente instabilitatea de tip “peeling ballooning”. Însă, în modul de confinare H, plasma prezintă o rotație puternică, iar această rotație suprimă aproape în totalitate instabilitatea “peeling ballooning”.

Propunem drept explicație faptul că stadiul unei bariere de transport eficiente, cu un pedestal înalt și o rotație puternică a plasmei reprezintă o condiție ce favorizează în mod natural formarea vortexurilor. Acestea întrerup continuitatea « pedestalului » (zona de la marginea plasmei unde gradientii sunt foarte mari) și plasează plasma într-o condiție favorabilă dezvoltării instabilităților “peeling ballooning” ce conduc mai departe la formarea “modurilor localizate la margine” (ELM)

Însă vortexurile există numai dacă secțiunea transversală este mai mică decât raza Larmor a ionilor.

Am arătat că raza Larmor a ionilor implicată în constrângere este una “efectivă”, dependentă de diferența dintre viteza diamagnetică și viteza indusă de câmpul electric.

Aceasta este într-adevăr foarte mare deoarece în regiunea pedestalului rotația plasmei este mai mare decât viteza diamagnetică, însă cea din urmă crește continuu datorită creșterii gradientilor în bariera de transport.

Perioada de desfasurare: 2020

Obiective:

- Construcția unui model explicativ pentru pulsurile de pierdere, bazat pe dinamica scalelor spațiale

Etape:

- Evaluarea ratei de generare a vortexurilor din perturbațiile plasmei
- Studiul formării de structuri de scală largă prin contopirea (coalescența) vortexurilor de drift
- Model analitic relevând rolul razei ionice efective în formarea vortexurilor de drift

Rezultatele obtinute:

- Formularea unui model fizic pentru un proces esențial în plasmă: variația scalei spațiale a mișcărilor vorticale, între vortexuri de drift și structuri cuasi-coerente, cu rol în pierderile intermitente

Publicatii:

Articole:

[1] *“Running Scale Separation for drift cuasi-organized structures” (in preparation)*

Conferințe

[1] Croitoru, F. Spineanu, M. Vlad, ” Sequence of random wave excitations and minimum entropy production in tokamak plasma”, autori:, 13th International Conf. CHAOS2020,

Persoane de contact: Florin Spineanu

Transportul si controlul impurităților grele (W) în centrul plasmei si in SOL

Scopul campaniei experimentale EUROfusion MST1 este acela de a rezolva probleme deschise în fizica instalațiilor tokamak pentru a veni în întâmpinarea viitoarei instalații ITER. Una dintre aceste probleme este aceea a transportului impurităților grele. În particular, este cunoscut că ionii de tungsten (W) rezultați din eroziunea pereților instalației ajung în centrul plasmei acolo unde se comporta ca un canal foarte eficient de pierdere a energiei termice prin radiație. Implicit, acumularea de W în centrul plasmei reprezintă un pericol pentru reacția de fuziune. Mecanismele care contribuie la acest tip de transport sunt incomplet înțelese. Înțelegerea și caracterizarea lor cantitativă ar putea servi drept instrument de control în viitoarele experimente de fuziune.

Teza noastră principală este aceea că o contribuție consistentă la transportul tungstenului este dată de componenta turbulentă. Mai precis, descriem un mecanism fizic de interacțiune dintre turbulența și accelerația paralelă a ionilor grei în prezența unei viteze poloidale efective care duce la ruperea simetriei hidden-drifturilor. Acestea din urmă reprezintă mișcări radiale cuasi-coerente a căror simetrie perturbată rezultă într-o viteză radială efectivă a ionilor grei.

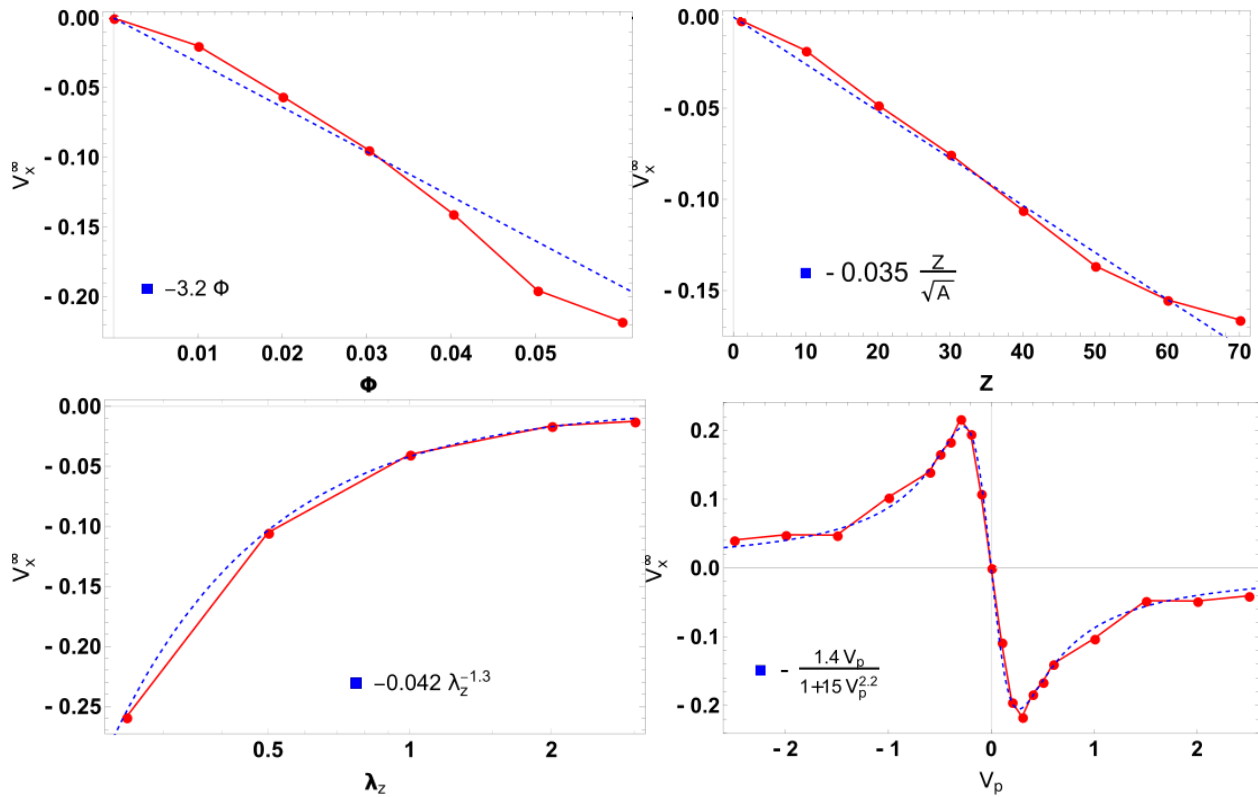
Perioada de desfasurare: 2020

Obiective:

- Dezvoltarea unui model de transport capabil să suprindă interacția dintre transportul turbulent și accelerația paralelă a impurităților grele în prezența unei viteze poloidale.
- Dezvoltarea de coduri numerice care sa implementeze ecuațiile modelului de transport și dezvoltarea de metode numerice specifice de reprezentare a câmpurilor stocastice implicate.
- Caracterizarea coeficienților de transport (difuzie și drift radial) ca funcții de principalii parametri ai plasmei și ai turbulentei. Identificarea parametrilor de control pentru transportului radial.

Rezultatele obținute:

Principalele rezultate ale simulărilor numerice realizate sunt reprezentate in figurile de mai jos care prezintă dependența vitezei radiale efective de principalii parametri ai modelului: Φ (amplitudinea turbulentei), Z (sarcina impuritatilor), λ_z (lungimea de corelatie paralela a turbulentei) și viteza poloidală V_p .



Concluzia simulărilor este că, într-adevăr, mecanismul fizic identificat contribuie consistent la transportul radial (către centrul plasmei) al ionilor grei de tungsten. Aceasta este valabil atât pentru plasmă din instalațiile prezente (AUG, JET) cât și pentru condițiile din viitoarea instalație ITER. Timpii de convecție pot fi estimați ca având valorile $\Delta t_c = a/V_x^\infty \approx [4, 11, 10] \text{ msec}$ pentru cele trei mașinării. Principalul parametru de control al transportului (cel mai eficient) a fost identificat ca fiind viteza poloidală a plasmei.

Publicatii:

- [1] D. I. Palade, M. Vlad, Fast generation of Gaussian random fields for direct numerical simulations of stochastic transport, Statistics and computing (in press)
- [2] M. Vlad, D. I. Palade, F. Spineanu, Effects of the parallel acceleration on heavy impurity transport in turbulent tokamak plasmas, Plasma Phys. Control. Fusion 63 035007

Conferinte

- [1] D. I. Palade, M. Vlad, F. Spineanu, Turbulent Transport of the W Ions in Tokamak Plasmas, IAEA Fusion Energy Conference (FEC) 2020, Nice, May 2021
- [2] D. I. Palade, M. Vlad, F. Spineanu, Turbulent transport control by tokamak plasma rotation, Chaotic Modelling and Simulation International Conference CHAOS 2020 (virtual).

Persoane de contact:

Dragoș Iustin Palade(dragos.palade@inflpr.ro) Mădălina Vlad(madalina.vlad@inflpr.ro)

Transportul turbulent al ionilor rapizi in plasmă tokamak in prezenta perturbatiilor magnetice

În dispozitivele tokamak actuale, dar mai ales în viitoarele experimente cu plasmă D-T precum ITER, va exista o populație semnificativă de ioni rapizi supra-termici cu energii din gama MeV provenind din reacția de fuziune sau din mecanisme de încălzire externe. Deoarece sunt o sursă crucială de căldură, impuls și curent, este important să înțelegem și să controlăm transportul acestor particule. Două mecanisme particulare de transport sunt importante în plasmă de fuziune: turbulența electrostatică și perturbațiile magnetice.

În proiectul de față am analizat mecanismele fizice din spatele acestui tip de transport de ioni rapizi utilizând un model de transport de particule test. Turbulența electrostatică și RMP-urile sunt considerate câmpuri stochastice cu statistici euleriene cunoscute. Caracteristicile lor servesc drept parametri de intrare. Natura statistică a modelului este abordată cu o metodă de simulare numerică directă (DNS). Coeficienții de difuzie sunt calculați ca o măsură cantitativă a transportului. Sunt explorate legile de scalare aproximative pentru difuzie.

Perioada de desfasurare: 2020

Obiective:

- Dezvoltarea unui model de transport capabil să surprindă interacția dintre turbulența și perturbațiile rezonantelor magnetice.
- Dezvoltarea de coduri numerice care să implementeze ecuațiile modelului de transport și dezvoltarea de metode numerice specifice de reprezentare a câmpurilor stochastice implicate.
- Caracterizarea coeficienților de difuzie în termen de principalii parametri ai plasmei și ai turbulenței. Identificarea parametrilor de control ai transportului radial.

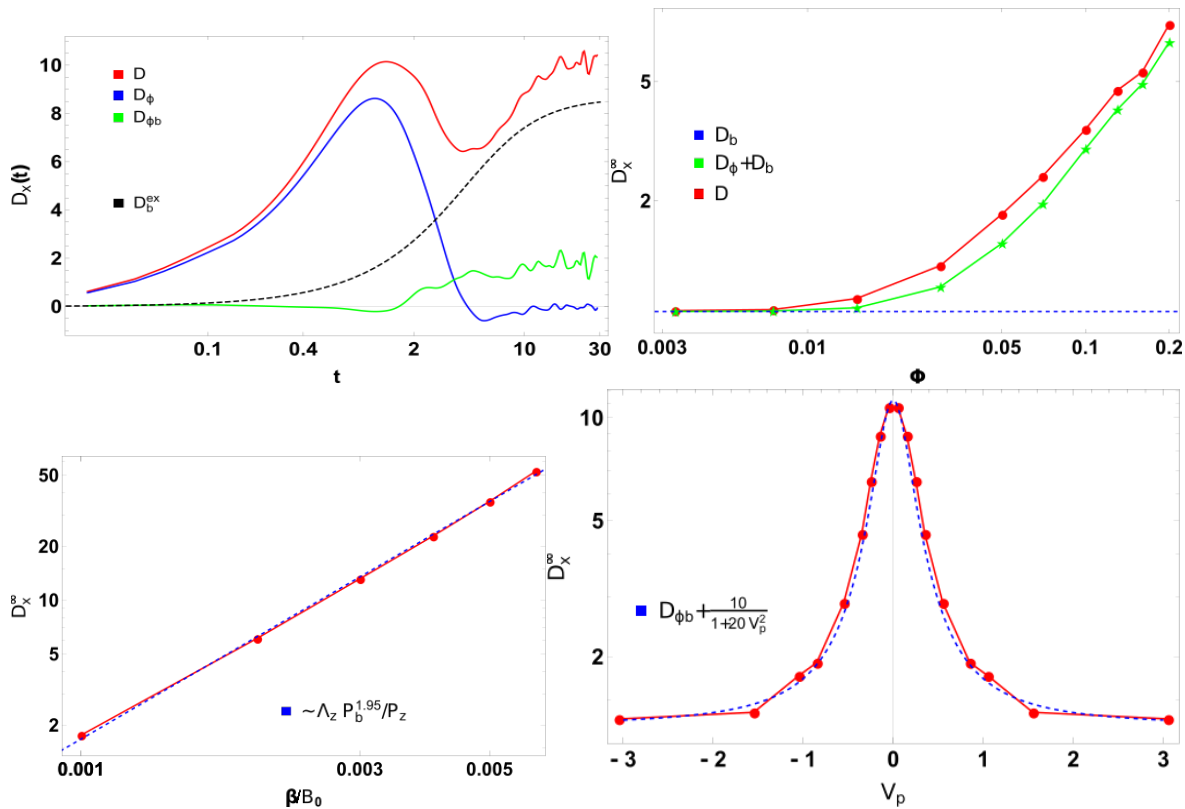
Rezultatele obtinute:

În urma simulărilor numerice realizate am identificat un fenomen de cuplaj synergetic între transportul turbulent și cel de tip magnetic. Mai mult legi de scalare aproximative pentru coeficienții de difuzie au fost obținute:

$$D_x^\infty = D_\phi^\infty + D_{\phi b}^\infty + D_b^\infty, \quad D_b^\infty = \frac{P_b^2 \Lambda_z}{P_z}, \quad D_\phi^\infty \propto f(\rho) K_s^\gamma / \tau_{eff}^{\gamma_2 [V_p]}$$

$$D_{\phi b}^{\infty} \propto \frac{f(\rho) K_s^2 P_b^2 \Lambda_z W^{\gamma}}{P_z}, \quad f(\rho) = \left(\frac{2\rho^2}{\lambda_{eff}^2} + 1 \right)^{\gamma} \left(\frac{4\rho^2}{\lambda_{eff}^2} + 1 \right)^{-\frac{3\gamma}{2}}$$

Aceste estimari sunt in buna concordanta cu rezultatele numerice ale simularilor neliniare. Astfel de rezultate sunt reprezentate graphic in figurile de mai jos ca dependente ale coeficientilor de difuzie de principalii parametri ai modelului de transport.



[1] D. I. Palade, Turbulent transport of fast ions in tokamak plasmas in the presence of resonant magnetic perturbations, Physics of Plasmas 28, 022508

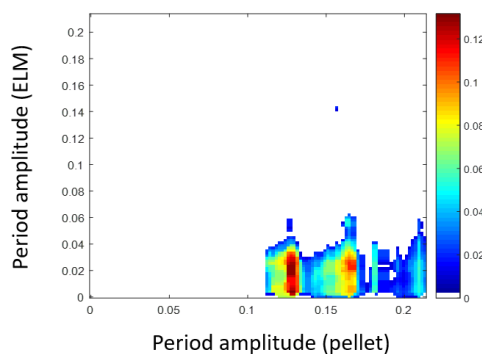
Persoane de contact:

Dragoș Iustin Palade (dragos.palade@inflpr.ro) Mădălina Vlad (madalina.vlad@inflpr.ro)

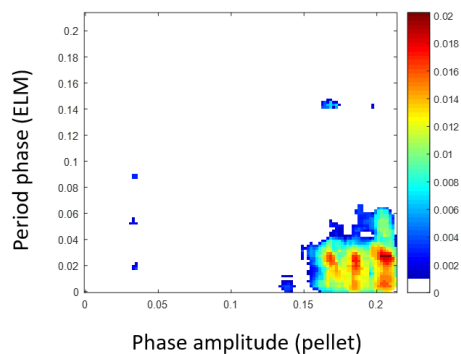
Diagnostică pulsurilor AUG prin tehnici imagistice și de analiză a seriilor temporale

Obiectivul analizei derulate în cursul anului 2020 a vizat detectarea posibilelor efecte de sincronizare și cauzalitate între componentele temporale ale instabilităților ELM de la AUG (în regim ELM de intensitate scăzută). Analiza a dovedit existența sincronizărilor

faza-faza, amplitudine-amplitudine si faza-amplitudine si a aratat ca efectele de cauzalitate intre componentele oscilatorii la diverse scale de timp nu reprezinta un fenomen semnificativ.

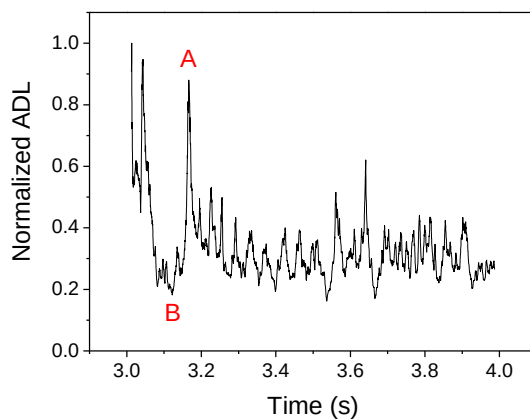


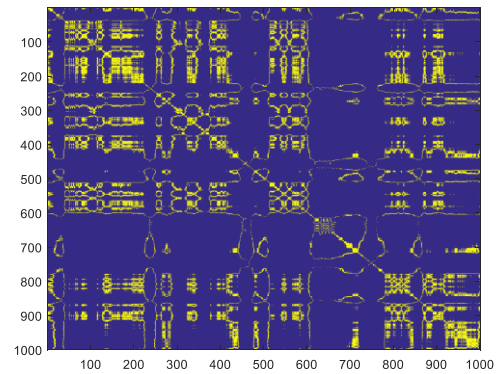
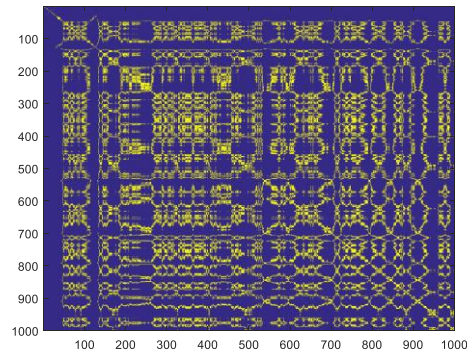
Pattern al interactiunii cauzale amplitudine (pellet) – amplitudine (ELM) pentru pulsul AUG #34462 in intervalul temporal 5.2-5.5s



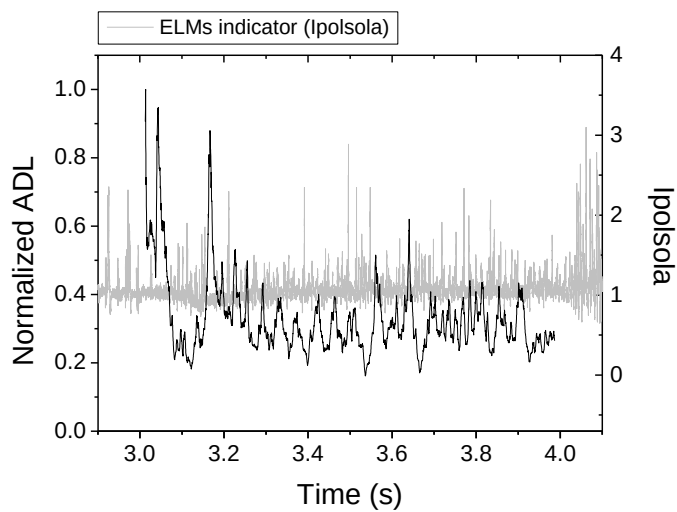
Pattern al interactiunii cauzale faza (pellet) – faza (ELM) pentru pulsul AUG pulse #34462 pentru intervalul temporal 5.2-5.5s

Evolutia proprietatilor dinamice ale instabilitailor ELM au fost analizate cu ajutorul diagramelor de recurenta. Analiza a relevat modul de evolutie al complexitatii spatiului fazelor, ce are o periodicitate mai lenta decat cea a aparitiei ELM-urilor.

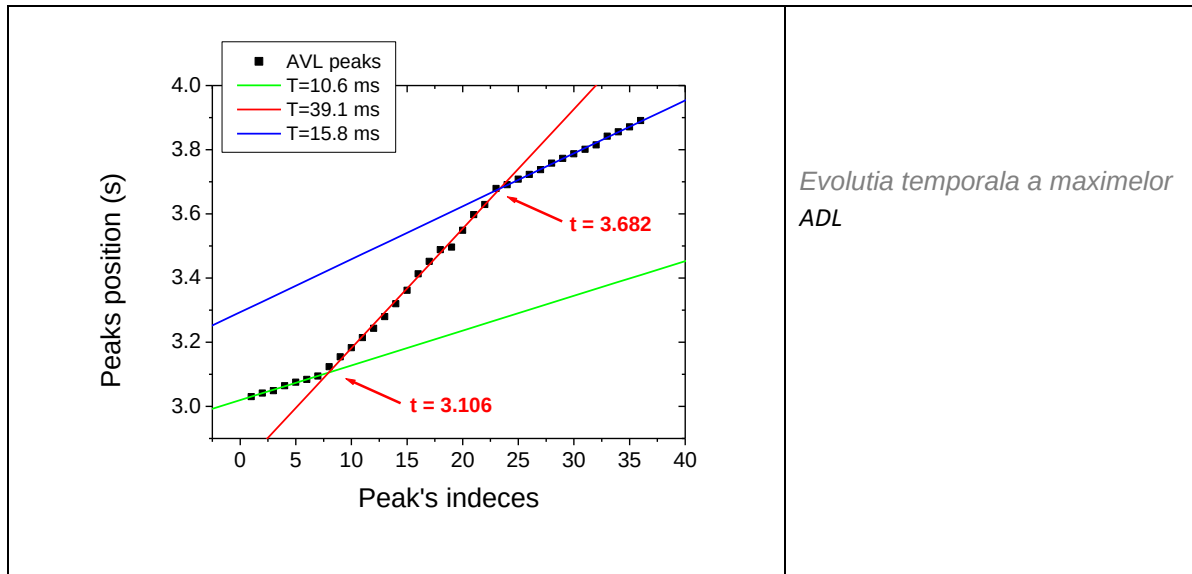




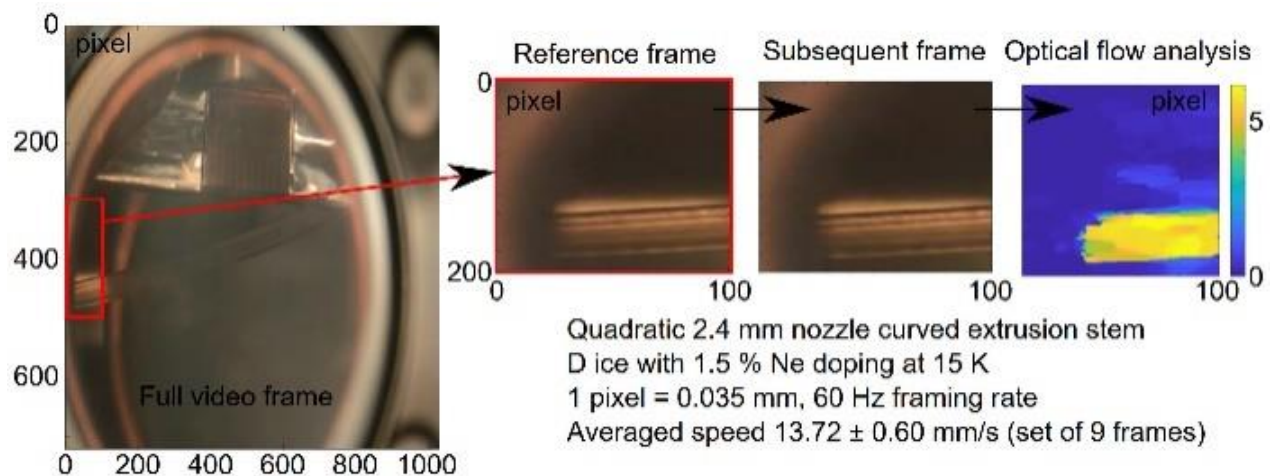
Evolutia dinamica a spatiului fazelor ELM surprinsa de modificarea diagramelor de recurenta. Diagrama din stanga corespunde punctului A iar cea din dreapta punctului B.

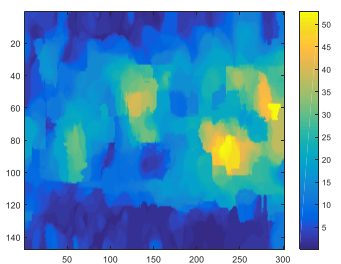
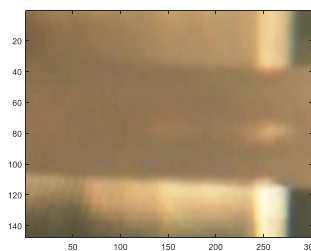
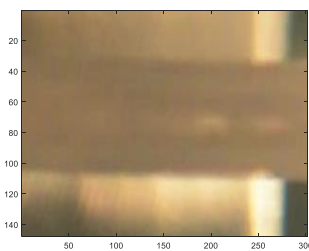
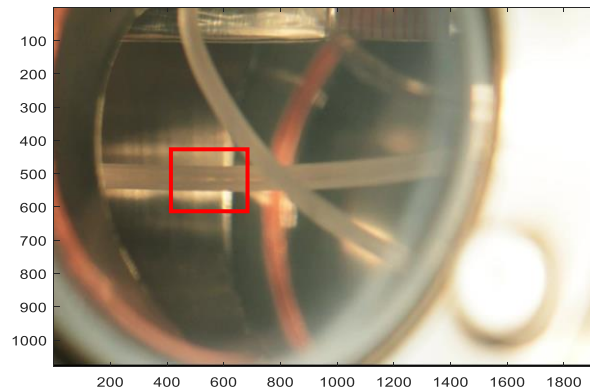


Evolutia lungimii medii a diagonalelor din diagramele de recurenta (Average Diagonal Length – ADL), factor ce caracterizeaza gradul de complexitate al spatiului fazelor. Semnalul Ipolsola indica aparitia instabilitatilor de tip ELM.



Tot in aceasta perioada, analize de determinare a vitezei din imagini video (optical flow) au fost efectuate pentru caravterizarea performantelor sistemului de injectie de pellet-uri de la AUG. De-a lungul unor experimente cuprinzatoare, aceste calcule au contribuit la optimizarea parametrilor instalatiei de injectie (sectiune de injectie, rata de injectie, compozitia optima a elementelor dopante).





Exemple de estimarea a vitezei de injectie a pellet-urilor printr-o metoda de tip optical flow.

Publicatii:

Articole

- [1] P.T. Lang, L.R. Baylor, T. Craciunescu, T.E. Gebhart , S.J. Meitner , B. Ploeckl, Developing fuel sources for a steady-state multi-purpose pellet launching systems, Fus. Eng. Design, 166 (2021) 112273.

Conferinte

- [1] P.T. Lang, L.R. Baylor, T. Craciunescu, T.E. Gebhart , S.J. Meitner , B. Ploeckl, Developing fuel sources for a steady-state multi-purpose pellet launching systems, 31st Symposium on Fusion Technology (SOFT2020), 20TH – 25TH September 2020, virtual edition.

Persoane de contact:

Teddy Craciunescu (teddy.craciunescu@gmail.com)