

Participarea Romaniei la EUROfusion WPENR si cercetari complementare

Director de proiect :

- Madalina Vlad (INFLPR, madalina.olimpia.vlad@gmail.com)
- Traian Petrisor (Univ. Tehnica Cluj-Napoca, Traian.Petrisor@phys.utcluj.ro)
- Gheorghe Dinescu (INFLPR, dinescug@infim.ro)
- Andrei Galatanu (INCDFM, gala@infim.ro)
- Calin Atanasiu (INFLPR, cva@ipp.mpg.de)
- Teddy Craciunescu (INFLPR, c.teddy@ifa-mg.ro)

Noua metoda semi-analitica pentru studiul turbulentei in plasmе de tip ITER

Acesta este unul din proiectele Enabling Researchs acceptate de Consorțiul EUROfusion pentru finantare in perioada 2017-2018. Scopul proiectului este de a furniza o tratare semi-analitica a transportului si a turbulentei, considerata a avea o contributie dominanta la confinarea plasmei ITER. Conexiunea dintre turbulenta si drifturi va fi analizata incluzand un nou concept, acela de drift ascuns (invizibil). Importanta rezultatelor asteptate consta in posibilitatea dezvoltarii unor module de turbulenta foarte rapide, bazate pe aspecte fizice, care ar putea fi implementate in codurile de transport. Este de asteptat sa se obtina o mai adanca intelegere fizica asupra proceselor neliniare care determina saturarea turbulentei, transportul, modurile de curgeri zonale si rotatia plasmei. Acest proiect aduce o perspectiva diferita fata de cea extrasa din simularile numerice. Noutatea abordarii noastre teoretice consta in luarea in considerare a aspectelor cuasi-coerente ale traiectoriilor particulelor in cadrul turbulentei.

Perioada de desfasurare: 1 iulie 2017 – 31 decembrie 2018

Obiective:

- A. Dezvoltarea conceptului de drifturi ascunse (DA) si analiza efectelor lor asupra transportului si evolutiei turbulentei.
- B. Dezvoltarea metodei iterate self-consistente (ISC) pentru studiul turbulentei dincolo de stadiul cuasi-liniar si analiza efectelor neliniare in modurile L (low confinement) si H (high confinement).

Etape si activitati:

- A.1. Analiza drifturilor ascunse generate de rotatia plasmei;
- A.2. Identificarea altor mecanisme care produc drifturi ascunse;
- A.3. Investigarea efectelor drifturilor ascunse si a corelatiilor Lagrangiene generate de ele.

- A.4. Studiul efectelor drifturilor ascunse asupra evolutiei turbulentei in modurile L si H;
- A.5. Metode de identificare a drifturilor ascunse in simularile numerice.
- B.1. Calculul parametrilor structurilor cuazi-coerente intermitente;
- B.2. Dezvoltarea metodei ISC;
- B.3. Dezvoltarea codurilor pentru calculele implicate in metoda ISC;
- B.4. Analiza mecanismului de generare a curgerilor zonale pentru turbulenta de drift si ITG;
- B.5. Dezvoltarea metodei ISC pentru studiul turbulentei in prezenta rotatiei plasmei;
- B.6. Identificarea metodelor de evaluare a preciziei metodei ISC folosind simulari numerice.

Rezultatele obtinute:

In anul 2017 au fost acordate ambele obiective ale proiectului. Principalele rezultate sunt:

- A. Dezvoltarea conceptului de drifturi ascunse (DA) si analiza efectelor produse Traiectoriile ionilor determinate de driftul ExB in plasmе turbulente includ atat aspecte stohastice cat si cuazi-coerente. Se formeaza structuri intermitente de traiectorii si curgeri. Am aratat ca, pe langa acestea, apar si efecte mai subtile de cuazi-coerenta ce constau in generarea unor miscari ordonate dar care nu duc la viteze medii. Acestea sunt drifturile ascunse. Ele apar in directia radiala atunci cand exista o viteza medie poloidala V_t si constau in doua curgeri in directii opuse ce se compenseaza. Am determinat dependenta DA de V_t si de timpul de decorelare. Am aratat ca DA au o influenta puternica asupra evolutiei turbulentei de drift. Ele se coreleaza cu fluctuatiile de densitate si determina curgeri medii radiale care modifica frecventele si ratele de crestere ale modurilor. In plus, ele genereaza moduri instabile de curgeri zonale care sunt foarte importante datorita efectelor de reducere a pierderilor de particule si de energie pe care le pot genera. Am identificat inca doua mecanisme de producere a DA: existenta unui gradient al amplitudinii turbulentei si corelatiile ce apar intre vorticitate si deplasările ionilor. Al doilea mecanism este foarte important in turbulenta fluidelor. Am aratat ca el determina separarea vorticitatii dupa semnul ei in prezenta unei vortex de scala mare, ceea ce duce la generarea de curgeri de scala mare intr-un fluid turbulent. Rezultatele sunt prezentate in lucrarile [2]-[4] si la trei conferinte internationale [1]-[3].
- B. Dezvoltarea metodei iterate self-consistente (ISC) pentru studiul evolutiei turbulentei Metoda ISC este un studiu combinat de particule test si de moduri test. Ambele depind de corelatia Euleriana (EC) momentana a turbulentei de baza. Am aratat ca, calcule iterate ale statisticii traiectoriilor (incluzand caracteristicile structurilor de traiectorii) si ale ratelor de crestere ale modurilor test permit determinarea evolutiei turbulente (a EC). Metoda a fost aplicata la turbulenta de drift. Am gasit doua regimuri. In cazul unei plasme slab instabile, saturarea turbulentei e determinata de difuzia ionilor care produce un efect de atenuare si modificarea semnificativa a formei EC. Pentru puternic instabile, structurile cuazi-coerente

determinate de captura ionilor si modurile de curgere zonala care sunt generate in aceste conditii joaca rolul principal in atenuarea si saturarea turbulentei de drift. Am studiat moduri test in plasmе turbulente pentru doua dintre instabilitatile importante in plasma: cele determinate de electronii capturati (DTEM) si de gradientul temperaturii ionice (ITG). Au fost determinate frecventele si ratele de crestere ale acestor moduri ca functii de caracteristicile turbulentei de baza. Metoda ISC a fost dezvoltata pentru descrierea acestor instabilitati prin includerea spectrelor paralele si a difuziei paralele. A fost dezvoltate coduri care calculeaza marimile implicate in metoda ISC (caracteristici statistice ale traiectoriilor, coeficienti de difuzie, rate de crestere ale instabilitatilor, spectrele turbulentei si evolutia lor). Rezultatele sunt prezentate in lucrarile [1], [5], [6] si la doua conferinte internationale [4], [5].

Publicatii:

Articole

- [1] Vlad M, Spineanu F, Random and quasi-coherent aspects in particle motion and their effects on transport and turbulence evolution, Focus on Turbulence in Astrophysical and Laboratory Plasmas, New Journal of Physics 19 (2017) 025014.
- [2] Vlad M., Spineanu F., Hidden drifts in turbulence, JET pin board, to be submitted for publication.
- [3] Vlad M., Spineanu F., Quasi-coherent structures and flows in turbulent transport, Journal of Physics: Conf. Series 936 (2017) 012057.
- [4] Vlad M., Spineanu F., Combined effects of the hidden and polarization drifts on impurity transport in tokamak plasmas, JET pin board, to be submitted for publication
- [5] Baran V. V., Palade D. I., Vlad M., Spineanu F., Trapped Electron mode turbulence: test mode approach, JET pin board, submitted to Romanian Journal of Physics
- [6] Vlad M., Baran V. V., Spineanu F., Iterated self-consistent study of the evolution of ion temperature gradient driven turbulence, in preparation

Conferinte

- [1] M. Vlad, F. Spineanu, Quasi-coherent structures and flows in turbulent transport, 6th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences (ICMsquare2017), Pafos, Cyprus, 28-31 August, 2017
- [2] M. Vlad, F. Spineanu, Hidden drifts and turbulence evolution, Collisionless Boltzmann (Vlasov) equation and modeling of self-gravitating systems and plasmas, CIRM, Luminy, October 30 – November 3, 2017
- [3] M. Vlad, F. Spineanu, Radial pinch produced by the gradient of turbulence amplitude in tokamak plasmas, 17th International Conference on Plasma Physics and Applications, Magurele, Romania, 15-20 June 2017
- [4] V. Baran, M. Vlad, F. Spineanu, ITG driven turbulence: test mode approach, 17th International Conference on Plasma Physics and Applications, Magurele, Romania, 15-20 June, 2017

Degradarea si imbunatatirea confinarii in plasmе turbulente

Proiectul isi propune sa clarifice natura duala a unor procese fundamentale ce apar in plasmеle fierbinti confinate magnetic: turbulenta electrostatica si stohasticitatea magnetica pot conduce atat la degradarea cat si la imbunatatirea confinarii cu posibile tranzitii rapide intre aceste efecte. Se va studia dependenta coeficientilor de transport de parametrii caracteristici ai turbulentei (regimurile de transport) in scopul identificarii conditiilor favorabile confinarii si se vor analiza procesele fizice care conduc la confinare imbunatatita. Abordarea adecvata este de tip particula test si se vor folosi metodele semi-analitice dezvoltate in cadrul grupului cat si simulari numerice.

Simularile numerice au aratat ca transportul de energie evolueaza cu cresterea dimensiunii plasmei de la scalarea Bohm (cu difuzivitate ce creste cu raza plasmei) la scalarea gyro-Bohm (in care difuzivitatea se satureaza) si au prezis ca plasmеle ITER vor fi in apropierea regimului gyro-Bohm. Cele doua regimuri vor fi analizate in detaliu in abordarea complementara a particulelor test.

Se vor determina efectele campurilor magnetice stohastice asupra confinarii plasmei. Efectele electromagnetice sunt importante pentru plasmеle ITER datorita cresterii presiunii cinetice. Difuzia liniilor de camp magnetic si a particulelor va fi analizata prin mai multe metode.

Se va dezvolta o metoda originala semi-analitica pentru studiul turbulentei pe baza unei analize iterate cuplate a particulelor test si a modurilor test. Au fost obtinute rezultate preliminare care vor fi dezvoltate in cadrul proiectului. Ele reprezinta prima abordare teoretica care descrie regimurile puternic neliniare in evolutia turbulentei de drift.

Perioada de desfasurare: 1 iulie 2014 – 30 iunie 2016

Obiective:

- Determinarea coeficientilor de transport indusi de turbulenta de tip drift in plasma de dimensiunile ITER
- Efecte ale stohasticitatii magnetice in plasmе ITER
 - Rotatia poloidala indusa de stohasticitatea magnetica
 - Confinarea particulelor rapide
 - Difuzia liniilor de camp magnetic si transportul particulelor. Estimarea pragului de disruptive cauzata de turbulenta magnetica.
- Evolutia turbulentei de tip drift si generarea modurilor de curgeri zonale
- Calculul vitezei de convecție a impuritatilor generate de gradientul amplitudinii turbulentei
- Studiul numeric al procesului de difuzie fractionara neizotropa bazat pe un cod original

Etape si activitati:

Etapa I (iunie-decembrie 2014)

- Determinarea coeficientilor de transport indusi de turbulenta de tip drift in plasma de dimensiunile ITER
- Difuzia liniilor de camp magnetic si transportul particulelor. Estimarea pragului de disrupctie cauzata de turbulenta magnetica.

Etapa II (ianuarie-decembrie 2015)

- Rotatia poloidala indusa de stohasticitatea magnetica. Conexiunea stohasticitate-rotatia plasmei ca scenariu activ ce poate conduce la o metoda de control bazata pe profilul curentului si pe procesul de ionizare.
- Confinarea particulelor rapide. Cod pentru determinarea coeficientilor de transport ai particulelor alpha in conditiile plasmei ITER.
- Evolutia turbulentei de tip drift si generarea curgerilor zonale. Metoda semi-analitica Lagrangiana pentru determinarea caracteristicilor modurilor test in plasma turbulenta.
- Calculul vitezei de convecție a impuritatilor determinata de gradientul intensitatii turbulentei.
- Studiul numeric al proceselor de difuzie fractionara anizotropa pe baza unui cod original.

Etapa III (ianuarie-iunie 2016)

- Determinarea proprietatilor si a efectelor vitezei de convecție generate de gradientul amplitudinii turbulentei
- Studiul numeric al efectelor non-locale si de memorie in procese de difuzie fractionara anizotropa.
- Efectul colizionalitatii plasmei asupra confinarii in prezenta perturbatiilor magnetice rezonante
- Efecte neclasice asupra transportului turbulent la colizionalitate redusa
- Dezvoltarea metodei iterate selfconsistente pentru studiul turbulentei
- Difuzia liniilor de camp magnetic in turbulenta cu forfecare.

Rezultatele obtinute:

- Echilibrul intre stohasticitatea magnetica si rotatia plasmei [11], [C1]. Am aratat ca generarea stohasticitatii magnetice intr-un volum finit induce pierderi aleatorii ale periodicitatii orbitelor banana. Se produce modificarea polarizarii neclasice si descresterea rotatiei poloidale.
- Topologia ansamblurilor de linii magnetice este descrisa de numarul de inlantuire al lui Gauss. Intr-un camp stohastic dispersia aceste variabile este o masura a cresterii transportului [4], [8].
- Rotatia plasmei indusa de ionizare [5]. Am arata ca fiecare eveniment de ionizare induce un curent radial si ca pentru alimentarea plasmei cu clastere acest curent e suficient de mare incat sa depaseasca atenuarea magnetica. Apare o rotatie poloidala suficient de puternica incat sa reduca turbulenta.
- A fost explicat procesul de separare a vorticitatii dupa semn in fluide ideale. Acesta ar putea determina un mecanism de tranzitie spontana in modul H [2], [3].

- A fost determinat teoretic efectul perturbatiilor magnetice rezonante asupra transportului turbulent [10], [C2]
- S-a investigat relatia dintre liniile de camp magnetic fluctuant, cu shear, si caracteristicile traiectoriilor particulelor rapide folosind metode numerice si semi-analitice [14]-[18].
- S-a evaluat energia particulelor α corespunzatoare maximului coeficientului de difuzie [13].
- S-au pus bazele unei metode auto-consistente iterate pentru descrierea turbulentei care foloseste particule si moduri de test [9], [C3]
- S-a determinat efectul difuziei traiectoriilor asupra modurilor test in turbulenta de drift [6], [7]
- S-au studiat modurile test pentru turbulenta determinata de gradientul temperaturii ionice si s-a aratat ca in regim nelinier sunt generate moduri de curgeri zonale [12]
- S-au determinat regimurile de transport ale energiei componente electronice in turbulenta cu multiple scale (de la raza Larmor electronica la cea ionica) [1]
- S-a aratat ca gradientul turbulentei este sursa unui nou mecanism de drift al impuritatilor. Importanta sa va fi evaluata experimental in cadrul campaniilor JET C35-C36 (M15-01, 02).
- S-a dezvoltat un cod numeric (bazat pe o metoda matriceala) in care s-au inclus efecte de memorie si perturbatii spatiale, analiza concentrandu-se in special pe fenomenele anizotrope[19]-[21].
- transferul spectral invers, specific sistemelor fluide in doua dimensiuni, are un efect detrimental asupra calitatii confinarii, fiind un canal eficient de transport. Pe baza invariantului MHD propus de Sagdeev, Moiseev, Tur, Yanovskii au rezultat doua consecinte foarte importante: in primul rand scenariul "tokamak avansat" apare drept rezultat al rotatiei poloidale diferentiale cuplate cu modificarea densitatii de curent, - acestea fiind generate de ionizarea unei particule inghetate (« pellet ») de gaz de lucru ; in al doilea rand s-a aratat ca in modul H stratul de vorticitate este si un strat in care se acumuleaza curentul, si valoarea atinsa de acesta depaseste curentul numit « bootstrap ».
- S-a studiat difuzia liniilor de camp magnetic turbulent caracterizat de o forfecare constanta. Am utilizat metoda decorelarii traiectoriilor pentru a calcula coeficientii de difuzie ai liniilor de camp magnetic stochastic cu forfecare. Forfecarea magnetica determina un potential magnetic mediu care modifica structura liniilor de camp. Modificarea coeficientilor de difuzie este produsa de parametrul de forfecare in prezenta fenomenului de prindere. Includerea ulterioara a unor particule incarcate in diferite configuratii magnetice este pregatita [1-3].
- S-au analizat bifurcatiile intr-o familie de sisteme hamiltoniene asociate cu aplicatii cubice de tip non-twist. Scenariul reconectarilor a fost utilizat pentru explicarea distrugerii barierelor de potential in modele matematice corespunzatoare configuratiilor de tip tokamak. S-a analizat de asemenea transportul fractional in reconectarea turbulenta. Am aratat ca ecuatia clasica Fokker Planck nu poate reproduce rezultatele particulei test deoarece transportul in spatiul

energiilor este “straniu” și particulele efectuează traiectorii de tip Levy. Motivul pentru utilizarea ecuațiilor de transport de tip fracționar este că acestea pot reproduce foarte bine rezultatele obținute prin simulări numerice [4-5].

Publicatii:

Articole

- [1] M. Vlad, F. Spineanu, Electron heat transport multi-scale turbulence, *Physics of Plasmas* 22 (2015) 112305.
- [2] M. Vlad, F. Spineanu, Trajectory statistics and turbulence evolution, *Chaos, Solitons and Fractals* 81 (2015) 463-472
- [3] F. Spineanu, M. Vlad, Self-organization of the vorticity field in two-dimensional quasi-ideal fluids: The statistical and field-theoretical formulations, *Chaos, Solitons and Fractals* 81 (2015) 473-479.
- [4] F. Spineanu, M. Vlad, Statistical analysis of the linking number in stochastic magnetic fields, *Romanian Reports in Physics* 67 (2015) 573–585
- [5] F. Spineanu, M. Vlad, Effects of density changes on tokamak plasma confinement, electronic preprint <http://arxiv.org/abs/1502.06093>, submitted to *Nuclear Fusion*
- [6] M. Vlad, F. Spineanu, „Evolution of plasma turbulence beyond the quasilinear stage; a semi-analytical study”, *Romanian Reports in Physics* 67 (2015) 1074–1086.
- [7] B. Weyssow, M. Negrea, G. Steinbrecher, I. Petrisor, D. Constantinescu, N. Pometescu, M. Vlad, F. Spineanu, Ideas in fusion plasma physics and turbulence, *Romanian Reports in Physics* 67 (2015) 547–563.
- [8] M. Vlad, F. Spineanu, A. M. Croitoru „Nonlinear effects in particle transport in stochastic magnetic fields”, *The Astrophysical Journal* 815 (2015) 11.
- [9] M. Vlad, F. Spineanu, Turbulence modelling using test modes, *J. Phys.: Conf. Ser.* 633 (2015) 012062
- [10] M. Vlad, F. Spineanu, Effects of the resonant magnetic perturbation on turbulent transport, electronic preprint <http://arxiv.org/abs/1512.00722>; *Nuclear Fusion* 56 (2016) 092003
- [11] F. Spineanu, M. Vlad, A MHD invariant with effects on the confinement regimes in Tokamak, electronic preprint <http://arxiv.org/abs/1512.04730>; *Nuclear Fusion* 56 (2016) 092005
- [12] V. Baran, M. Vlad, F. Spineanu, Test modes for ion temperature gradient driven turbulence, to be submitted
- [13] A. Croitoru, D. Palade, M. Vlad, F. Spineanu, Turbulent transport of alpha particles, *Nuclear Fusion* 57 (2017) 036019
- [14] M. Negrea, Collisionless particle diffusion in mixed electrostatic and magnetic stochastic fields, *Physics AUC* 25, 112-126, 2015.
- [15] I. Petrisor, Some Statistical Features of Particle Dynamics in Tokamak Plasma, *Rom. J. Phys.*, Vol. 61, Number 1-2, 2016

[16] M. Negrea, V.N. Cancea, On the Stochastic Anisotropic Sheared Magnetic Field Lines Diffusion, Rom. J. Phys., Vol. 61, Number 1-2, 2016.

[17] M. Negrea, Trajectories of a dust particle in a magnetic field with constant shear, Physics AUC 26, 28-33, 2016.

[18] A. Shalchi, M. Negrea, I. Petrisor, Stochastic field-line wandering in magnetic turbulence with shear, I. Quasi-linear theory, Physics of Plasmas 23, 072306 (2016).

[19] D. Constantinescu, I. Petrisor, Generalization of a Fractional Model for the Transport Equation Including External Perturbations, Rom. J. Phys., Vol. 61, Number 1-2, 2016.

[20] D. Constantinescu, Regular versus Chaotic Dynamics in Systems Generated by Area-Preserving Maps. Applications to the Study of Some Transport Phenomena, Rom. J. Phys., Vol. 61, Number 1-2, 2016.

[21] Y. Wang, M. Han, D. Constantinescu, On the limit cycles of perturbed discontinuous planar systems with 4 switching lines, Chaos Solitons & Fractals, Volume: 83, Pages: 158-177, 2016.

Conferinte

[1] F. Spineanu, M. Vlad, Balance of magnetic stochasticity and plasma rotation with effect on instabilities, 597th Wilhelm and Else Heraeus Seminar on "Stochasticity in fusion plasmas", September 10-12, 2015, Bad Honnef, Germany.

[2] M. Vlad, F. Spineanu, Stochastic and quasi-coherent aspects in test particle statistics and their effects on turbulence evolution, 597th Wilhelm and Else Heraeus Seminar on "Stochasticity in fusion plasmas", September 10-12, 2015, Bad Honnef, Germany.

[3] M. Vlad, F. Spineanu, Turbulence modeling using test modes, 4th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences, June 5-8, 2015, Mykonos, Greece.

[4] M. Vlad, F. Spineanu, Turbulence and zonal-flow generation: a semi-analytical study based on the iterated self-consistent method, Workshop on "Nonlinear Dynamics and Applications in Plasma Physics, March 09-13, 2016, Sinaia, Romania.

[5] D. Palade, A. Croitoru, M. Vlad, F. Spineanu, Turbulent transport of alpha particles in drift type turbulence in tokamak plasmas, Workshop on "Nonlinear Dynamics and Applications in Plasma Physics, March 09-13, 2016, Sinaia, Romania.

[6] D. Constantinescu, The study of some fractional versions of the transport equation, 14th International Conference on Mathematics and its Applications - ICMA 2015, 4-7.11.2015, Timisoara

[7] D. Constantinescu, M. Negrea, I. Petrisor, Anisotropic fractional transport models in fusion plasmas, Workshop on "Nonlinear Dynamics and Applications in Plasma Physics, March 09-13, 2016, Sinaia, Romania.

[8] D. Constantinescu, M. Negrea, I. Petrisor, Hamiltonian description of fast particles' dynamics in tokamak, International Conference on Applied Mathematics and Numerical Methods, Craiova, 14-16 April 2016

[9] D. Constantinescu, M. Negrea, I. Petrisor, Regular and chaotic dynamics in low dimensional Hamiltonian systems. Applications to the study of some transport phenomena in fusion plasma physics, Workshop on Qualitative Theory of Differential Equations and Singular Perturbation Theory, School of Mathematical Sciences Shanghai Jiao Tong University, May 6-8, 2016

[10] D. Constantinescu, Fractional dynamics. Applications to the study of some transport phenomena, invited lecture to Shanghai Normal University, Shanghai, China, May 17, 2016

[11] D. Constantinescu, Essentials on fractional calculus. Fractional differential equations and applications in physics and economics. invited lecture to Zhejiang Normal University, Jinhua, China, May 25, 2016

[12] M. Negrea, I. Petrisor, D. Constantinescu, Influence of the gradient pressure and magnetic field inhomogeneity on dust dynamics in tokamak plasma, The Joint Meeting of Quantum Fields and Nonlinear Phenomena, Workshop on "Nonlinear Dynamics and Applications in Plasma Physics, March 09-13, 2016, Sinaia, Romania.

[13] M. Negrea, I. Petrisor, D. Constantinescu, Motion of charged particles in tokamak perturbed toroidal magnetic field, The Joint Meeting of Quantum Fields and Nonlinear Phenomena, Workshop on "Nonlinear Dynamics and Applications in Plasma Physics, March 09-13, 2016, Sinaia, Romania.

Persoane de contact: M. Vlad (madalina.vlad@inflpr.ro), F. Spineanu (florin.spineanu@inflpr.ro), I. Petrisor (ipetri2@yahoo.com)

Regimuri neexplorate de vortexuri magnetice relevante pentru aplicatiile supraconductibilitatii in fuziunea nucleara

Scenariile posibile de crestere a temperaturii de operare (>4,2 K) si/sau a campului magnetic (13-16 T) a magnetilor supraconductorii pentru confinarea plasmei a fost larg discutata in ultimul timp de catre comunitatea stiintifica din cadrul fuziunii nucleare. In timp ce cresterea campului magnetic ar insemna o confinare mai eficienta a plasmei si o crestere a densitatii de energie in reactorul de fuziune, cresterea temperaturii de operare ar avea un impact tehnologic deosebit datorita reducerii costurilor de refrigerare si o reducere a complexitatii reactorului. Oricum, dezvoltarea de magneti supraconductorii raciti fara heliu la 20-50 K reprezinta un deziderat major datorita reducerii drastice a rezervelor de heliu la nivel mondial. Cu toate acestea, datorita lipsei datelor experimentale si teoretice cu privire la comportamentul materialelor supraconductoare in campuri inalte si in domeniul de temperatura 20-50 K, au fost inregistrate progrese modeste in domeniul magnetilor supraconductorii raciti in sistem "cryogen-free".

Scopul acestui proiect consta in intelegerea exhaustiva la nivel microscopic a dinamicii vortexurilor in supraconductorii de temperatura inalta de tipul ReBa₂Cu₃O_{7-y}. ReBCO este cel mai relevant

material supraconductor de temperatura inalta pentru aplicatii in fuziune: temperatura de operare ridicata (4-50 K) si campuri magnetice inalte (pana la 18 T).

Perioada de desfasurare:2015-2017

Obiective

Obiectivul principal al proiectului este de natura fundamentala si consta in acumularea de cunostinte cu privire la regimurile de curgere si la mecanismele de ancorare a vortexurilor in filme de ReBCO in campuri intense (18 T) si la temperaturi ridicate (20-50 K). Obiectivul principal va fi atins prin urmatoarele obiective secundare:

1. Modelarea ancorarii vortexurilor in ReBCO pur;
2. Caracterizarea structurala a limitelor de cristalite si a centrilor artificiali de ancorare (artificial pinning centers -APC);
3. Dezvoltarea unui proces efectiv pentru introducerea de APC in matricea de ReYBCO;
4. Modelarea efectelor de ancoraj la limita dintre cristalite si la APC.
5. Evaluarea potentialului de reducere a dependentei angulare a curentului critic, $J_c(\theta)$, cu ajutorul centrilor artificiali de ancoraj (APC);
6. Evaluarea altor supraconductori de temperatura inalta pentru aplicatii in fuziune.

Etape si Activitati

1. Sinteza de precursori organo-metalici cu continut redus de fluor pentru depunerea din solutie a filmelor de ReBCO;
2. Depunerea filmelor de ReBCO cu nanocentri de ancoraj indusi in-situ si ex-situ;
3. Sinteza si caracterizarea tintelor nanocompozite YBCO-BZO pentru depunerea prin ablatie laser
4. Decorarea substratelor monocristaline cu nanoinsule de LSMO;
5. Sinteza si caracterizarea precursorilor CSD;
6. Caracterizarea morfologica, structurala, electrica si magnetica a filmelor de YBCO si a filmelor nanocompozite YBCO-APC;
7. Masuratori de transport supraconductor, modelarea miscarii fluxonilor si a mecanismelor de ancorare.

Rezultate obtinute

1. Au fost preparate solutii de depunere cu un continut redus de fluor pentru depunerea prin CSD a filmelor de YBCO. Solutiile precursore au fost analizate prin analize termogravimetrice diferentiale (TG-DTA) cuplate cu spectrometrie de cvadrupol si FTIR pentru a determina mecanismul de descompunere termica a precursorilor. Filmele de YBCO depuse cu ajutorul acestor solutii precursore au proprietati supraconductoare, prezinta o temperatura de tranzitie normal-supraconductor de 91 K si o largime a tranzitiei de 1,5 K, iar raportul $R(300)/R(100)$ este de aproximativ 3. De asemenea, filmele au o densitate de curent

critic cuprinsa intre 1 si 2 MA/cm² la 77 K si in camp zero, B=0. Este important de remarcat ca, prin masuratori de spectroscopie Auger, nu au fost detectate urme de carbon in matricea filmului.

2. Au fost obtinute filme nanocompozite de YBCO-BaZrO₃ prin tehnica depunerii ex-situ din solutii. Cresterea epitaxiala a filmelor nanocompozite s-a realizat pe substraturi monocristaline de (100)STO din solutii precursoroare de tip propionat cu un continut redus de fluor. S-au obtinut astfel filme nanocompozite epitaxiale de YBCO-BZO cu o grosime de aproximativ 500nm. Scanarile in ω a peak-ului (005)YBCO confirma mozaicitatea in afara planului, evidentiind in acelasi timp efectul incluziunilor de BZO asupra stress-ului din matricea de YBCO. Studiul sectiunilor TEM au aratat ca centrii de pinning, cu diametrul de ~30 nm sunt uniform distribuiti in filmul gazda. S-a observat tendinta ca limita cristalitelor din filmul de YBCO sa se localizeze in pozitiile BZO. Efectul doparii cu BZO a fost cuantificat prin masuratori de transport. Acestea evidentiaza o crestere a densitatii de curent critic la 77K in camp zero de la 1 MA/cm² in filmul de YBCO nedopat la 3MA/cm² in proba YBCO-10 %mol BZO ca urmare a cresterii densitatii fortei de pinning de la 0,5 la 4 GN/m³.
3. A fost studiat efectul centrilor de pinning de GFO asupra proprietatilor supraconductoare ale filmelor de YBCO. Pentru a determina concentratia optima, in solutia precursoroare de YBCO s-au introdus diferite % vol. de GFO. Filmele epitaxiale nanocompozite de YBCO au fost caracterizate structural (XRD), morfologic (AFM, TEM), electric si magnetic (SQUID). Adaosul de GFO reduce in mod semnificativ densitatea de curent critic (de la 1,5 la 0,3 MA/cm²) fata de YBCO pur ca urmare a interactiunii dintre ionii de ytriu si fier. Tintele compozite de tip YBCO-BZO (2,5-10%mol) s-au preparat prin reactii in faza solida.
4. Au fos preparate prin reactie in faza solida urmatoarele tinte compozite pentru ablare laser: (1) YBCO + 2,5 mol% BZO; (2) YBCO + 5 mol% BZO; (3) YBCO + 7 mol% BZO; (4) YBCO + 10 mol% BZO.
5. Filmele YBCO depuse prin tehnica CSD (chemical solution deposition) utilizand o solutie precursor cu concentratie scazuta de fluor furnizeaza proprietati supraconductoare foarte bune cu T_c = 91K si un current critic J_c = 1.5-2 MAcm⁻² la 77 K in camp magnetic propriu.
6. A fost introdus BaZrO₃ in matricea YBCO prin intermediul BZO in Solutia YBCO precursor. Analiza TEM a aratat formarea de nanoparticule BZO cu dimensiuni cuprinse intre 10 nm si 30 nm.
7. Valoarea maxima a densitatea de current critice de aproximativ 2.92 MA/cm² la 77 K in camp magnetic propriu a fost obtinuta pentru filme YBCO cu 10%mol. BZO. Este de remarcat faptul ca J_c pentru filmul YBCO cu nanoparticule BZO este crescut cu un factor de 3 in raport cu filmul YBCO pur.

Parteneri externi:

- Institutul National CD pentru Fizica Laserilor, Plasmei si Radiatiilor (INFLPR)
- ENEA Superconductivity Laboratory
- Roma TRE University

Lucrari publicate

[1] R.B. Mos, T.Petrisor Jr, M.Nasui a, A.Mesaros , M.S.Gabor a, M.Senila b, E.Ware , L. Ciontea si T.Petrisor, Epitaxial $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ nanostructures obtained by polymer-assisted surface decoration (PASD), Materials Letters, 171 (2016) 281-284.

[2] Kostiantyn Torokhtii, Nicola Pompeo, Anna Frolova, Valentina Pinto, Achille Angrisani Armenio, Laura Piperno, Giuseppe Celentano, Traian Petrisor, Lelia Ciontea, Ramona B. Mos, Mircea Nasui, Giovanni Sotgiu, Enrico Silva, Microwave Measurements of Pinning Properties in Chemically Deposited YBCO/BZO Films, IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 22, N0.4, 8000405.

[3] A. Frolova, N. Pompeo, Member, IEEE, F. Rizzo, K. Torokhtii, Member, E. Silva, A. Augieri, G. Celentano, V. Pinto, A. Angrisani Armenio, A. Mancini, A. Rufoloni, A. Vannozzi, G. Sotgiu, L. Ciontea, T.Petrisor, Analysis of Transport Properties of MOD YBCO Films with BaZrO_3 as Artificial Vortex Pinning Centres, Presented at European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS-15_3A-M-P-03.06). Accepted for publication in IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Citation information: DOI 10.1109/TASC.2016.2542274, IEEE

Persoane de contact: Universitatea Tehnica din Cluj-Napoca– Traian Petrisor (traian.petrisor@phys.utcluj.ro) si Lelia Ciontea (Lelia.Ciontea@chem.utcluj.ro)

Determinarea efectului constrangerilor impuse de invariantii MHD care conecteaza vorticitatea, curentul si densitatea plasmei

Lucrarea prezenta pune accentul pe existenta structurilor cuasi-coerente in plasma confinata magnetic. Organizarea curgerii convective, rezultata din transferul spectral invers, specific sistemelor fluide in doua dimensiuni, are un efect detrimental asupra calitatii confinarii, fiind un canal eficient de transport. Este deci o problema fundamentala aceea de a intelege in ce conditii convecția de scala spatiala large poate fi generata. Am abordat aceasta problema prin prisma invariantelor ecuatiilor Magneto-Hidrodinamice. In primul rand subliniem rolul complexei retele aleatoare de linii spatiale (entanglement) descris prin invariantul Gauss, masura a stochasticitatii magnetice. Pentru medii continue, reamintim existenta unui invariant MHD care a fost propus de Sagdeev, Moiseev, Tur, Yanovskii pentru a oferi o generalizare a teoremei Ertel pentru fluide. Pe baza acestui invariant noi demonstram doua consecinte care ni se par foarte importante: in primul rand scenariul "tokamak avansat" apare drept rezultat al rotatiei poloidale diferentiale cuplate cu modificarea densitatii de curent, - acestea fiind generate de ionizarea unei particule inghetate (« pellet ») de gaz de lucru ; in

al doilea rand aratam ca in modul H stratul de vorticitate este si un strat in care se acumuleaza curentul, (conform invariantului) si valoarea atinsa de acesta depaseste curentul numit « bootstrap ». Este de asteptat ca aceasta directie de investigatie sa contribuie la clarificarea unor rezultate experimentale greu de inteles. Pentru instalatiile actuale (JET, DIII-D, Asdex) se configureaza faza de crestere a curentului (« ramp-up ») in corelare cu NBI (Neutral Beam Injection, injectia de neutri rapizi) si cu incalzirea unei minoritati a ionilor de baza (ICRH – Ion Cyclotron Radiation Heating). Se observa uneori formarea unei bariere de transport (ITB) aproximativ la jumatatea razei mici. Temperatura ionica creste si alta indicatie a barierei nu este vizibila (densitatea are un profil relativ plat). Aplicand genul de analiza pe care il sugereaza invariantul MHD mentionat, devine plauzibil ca un strat de curent sa se formeze aproximativ la pozitia barierei. Care ar fi deci originea acestui strat de curent ? Credem ca impuritatile grele care penetreaza in zona axei magnetice produc franarea accentuata a electronilor rapizi proveniti de la NBI in timp ce ionii, foarte rapizi, sunt mai slab franati si deci sustin un curent suplimentar fata de cel Ohmic. Acest curent are o rata de crestere rapida (« ramp-up » plus NBI) si deci are efect skin intr-o plasma care este foarte slab rezistiva (deci are difuzie mica a curentului). Deoarece invariantul MHD presupune ca la un strat de curent se genereaza un strat de vorticitate, rezulta ca premisele unui bariere (ITB) sunt asigurate. Aceasta directie de studiu se va aborda cantitativ in perioada urmatoare.

Perioada de desfasurare: 1 iulie 2016 – 31 decembrie 2018

Obiective

1. Proiectul isi asuma obiectivul de a oferi descrierea cantitativa a unui nou mecanism ce are ca efect ameliorarea confinarii plasmei in tokamak : rotatia indusa de ionizarea neutrilor. Acest mecanism a fost anterior ignorat.
2. In corelatie cu noul mecanism de rotatie, - dar incluzand orice alta sursa de rotatie poloidala, Proiectul investigheaza conexiunea dintre vorticitate si distributia densitatii de curent (ce genereaza campul magnetic poloidal) pe baza conservarii unui invariant MHD universal (Sagdeev Moiseev Tur Yanovskii). Printre aplicatiile ce sunt avute in vedere : regimul « tokamak avansat » in care profilul radial al factorului de securitate este inversat in zona centrala a plasmei ; si formarea barierei de transport atunci cand exista surse de sustinere non-inductiva externa a curentului (ECCD : Electron Cyclotron Current Drive).
3. Pe aceasta baza Proiectul isi propune sa investigheze rotatia reziduala (intrinseca) a plasmei tokamak, care exista chiar atunci cand nu se induce prin mijloace externe rotatie. Este posibil ca, alaturi de stresul Reynolds, admis azi ca sursa spontana de rotatie, sa existe si simpla ionizare asociata reciclarii densitatii gazului de lucru.

Ca obiectiv practic, acest Proiect va contribui la stabilirea unui scenariu favorabil unei confinari superioare in reactor.

Etape si Activitati

1. Determinarea efectului constrangerii impuse de existenta unui invariant MHD ce implica vorticitatea, profilul curentului si densitatea
2. Calcularea curentului radial generat de serii de evenimente tranziente constand din ionizare si respectiv transferul intre populatiile ionice capturate si circulante
3. Determinarea amplitudinii si directiei diverselor mecanisme de rotatie a plasmei (cu relevarea posibilelor scenarii de sinergie)

Rezultate obtinute

Identificarea calitativa a mecanismului de generare de rotatie datorat curentului radial al fiecarui eveniment de ionizare a fost urmata de calcularea amplitudinii si compararea cu rata de franare a rotatiei poloidale datorate variatiei campului magnetic principal. S-a aratat ca in cazul corpusculilor de deuteriu special destinati alimentarii cu gaz (« pellets ») rata de rotatie depaseste franarea si deci o bariera de transport poate fi generata. Este deci firesc sa se coreleze rotatia indusa cu modificarea profilului densitatii de curent, deoarece invariantul MHD impune aceasta constrangere.

1. s-a aratat ca alimentarea cu gaz prin « pellets » induce o rotatie a carei consecinta este inversia locala a profilului factorului de securitate, deci atingerea unei stari de tokamak avansat
2. s-a aratat ca stratul de vorticitate de la marginea plasmei in modul H (« high-confinement ») trebuie sa fie de asemenea un strat de curent. Invariantul MHD permite sa se estimeze ca acest strat contine curent cu o amplitudine superioara celei « bootstrap ». Este deci necesar sa se considere modurile localizate la margine (« ELM ») ca filamentare a curentului prin moduri tearing.

Publicatii

[1] F. Spineanu, M. Vlad, On the late phase of relaxation of two-dimensional fluids: turbulence of unitons, Focus on Turbulence in Astrophysical and Laboratory Plasmas, New Journal of Physics 19 (2017) 025004

[2] F. Spineanu, M. Vlad, A MHD invariant with effects on the confinement regimes in Tokamak, Nuclear Fusion 56 (2016) 092005

Evaluarea coeficientilor de difuzie pentru liniile de camp magnetic in diferite cazuri de turbulenta magnetica

Una din cele mai importante probleme in plasma de fuziune se refera la materialele utilizate in experimentele de fuziune. Analiza legata de rolul particulelor de praf in fuziune a fost inceputa de mult timp si totusi nu se stie exact care este impactul particulelor de praf asupra parametrilor plasmei de la periferie si care este contaminarea plasmei cu impuritati. O teorie completa a electrizarii particulelor de praf, a acceleratiei si a incalzirii in plasma de fuziune se poate dezvolta dar

apar probleme care se refera la acuratetea modelelor care descriu interactiile plasmei cu particulele de praf in ceea ce priveste codurile de transport. Scopul prezentului proiect este de a dezvolta un model pentru transportul si dinamica particulelor de praf in plasma pentru a imbunatati intelegerea rolului particulelor de praf in functionarea tokamakului.

Proiectul intentioneaza sa conduca la imbunatatirea intelegerii transportului de particule de praf in tokamak si in general al transportului in conditiile plasmei din ITER. Stochasticitatea campurilor determina procese de transport neliniare cu dependente complicate ale parametrilor care pot degrada sau imbunatati confinarea. Identificarea regimurilor favorabile confinarii si intelegerea conditiilor de realizare a acesteia este un pas important in realizarea confinarii.

Perioada de desfasurare: 1 iulie 2016 – 31 decembrie 2018

Obiective

Unul din obiectivele pe termen lung este imbunatatirea intelegerii transportului si dinamicii particulelor de praf in SOL. Ne vom axa pe:

1. Dezvoltarea modelelor ce descriu profile instantanee ale plasmei in zona traiectoriilor particulelor de praf pentru imbunatatirea calculului acestora din urma.
2. Studiul transportului in plasma simple sau plasmе de tip tokamak.

Etape si Activitati

1. Implementarea metodei decorelarii traiectoriei pentru difuzia liniilor de camp magnetic stochastic in turbulenta magnetica
2. Dezvoltarea unui model de transport fractionar adaptat la descrierea traiectoriilor de particule
3. Implementarea unui cod bazat pe metoda decorelarii traiectoriei pentru transportul de impuritati. Extrapolare la particulele de praf.
4. Compararea rezultatelor obtinute prin diferite simulari numerice

Rezultate obtinute

1. Am studiat difuzia liniilor de camp magnetic turbulent caracterizat de o forfecare constanta. Am utilizat metoda decorelarii traiectoriilor pentru a calcula coeficientii de difuzie ai liniilor de camp magnetic stochastic cu forfecare. Forfecarea magnetica determina un potential magnetic mediu care modifica structura liniilor de camp. Modificarea coeficientilor de difuzie este produsa de parametrul de forfecare in prezenta fenomenului de prindere. Includerea ulterioara a unor particule incarcate in diferite configuratii magnetice este pregatita [1-3].
2. Am studiat bifurcatiile intr-o familie de sisteme hamiltoniene asociate cu aplicatii cubice de tip non-twist. Scenariul reconectarilor a fost utilizat pentru explicarea distrugerii barierelor de potential in modele matematice corespunzatoare configuratiilor de tip tokamak. S-a analizat de asemenea transportul fractional in reconectarea turbulenta. Am aratat ca ecuatia clasica Fokker Planck nu poate reproduce rezultatele particulei test deoarece transportul in spatiul energiilor este "straniu" si particulele efectueaza traiectorii de tip Levy. Motivul pentru

utilizarea ecuatiilor de transport de tip fractionar este ca acestea pot reproduce foarte bine rezultatele obtinute prin simulari numerice [4-5].

Publicatii

- [1] N. Negrea, Trajectories of a dust particle in a "sheared slab" unperturbed magnetic configuration, Physics AUC, volume 26, 34-39, 2016.
- [2] I. Petrisor, Radial diffusion of inhomogeneous shared stochastic magnetic field lines in tokamak plasma, Physics AUC, volume 26, 40-46, 2016.
- [3] M. Negrea, I. Petrisor, A. Shalchi, Stochastic field-line wandering in magnetic turbulence with shear, II. Decorrelation trajectory method, submitted for publication in Physics of Plasmas.
- [4] G. Tigan, D. Constantinescu, Bifurcations in a family of Hamiltonian systems and associated nontwist cubic maps, Chaos Solitons & Fractals, Volume: 91, Pages: 128-135, 2016.
- [5] H. Isliker, L. Vlahos, Th. Pisokas, D. Constantinescu, A. Anastasiadis, Fractional Transport in Turbulent Reconnection, submitted for publication.

Persoane de contact: Universitatea din Craiova – Iulian Petrisor (ipetri2@yahoo.com)

Simularea disruptiilor magnetohidrodinamice de tip Moduri Kink ce Ating Peretele (Wall Touching Kink Modes - WTKM) generate de Evenimente de Deplasare Verticala (Vertical Displacement Events - VDE) in plasmale tokamak cu aplicatie la instalatiile tokamak ITER si JET

Acesta este un proiect Enabling Research (teorie), acceptat de Consorțiul EUROfusion pentru finantare in perioada 1.01.2017-31.12.2017. Intelegerea disruptiilor in plasma tokamak si precizarea efectelor lor reclama descrierea matematica realista a excitarii curentilor in structurile 3D ale peretilor tokamak de catre plasma ce atinge peretii tokamak. Modurile WTKM sunt excitate in mod frecvent in timpul evenimentelor de deplasare verticala (Vertical Displacement Events – VDE) si produc mari forte laterale asupra peretelui tokamak, forte ce sunt greu de stapanit in instalatii tokamak mari. Trebuie subliniat ca aparitia in tokamakul ITER a unui numar limitat de disruptii va deteriora in mod definitiv peretele, fara nicio posibilitate de restaurare. In acest scop, in vederea intelegerii acestei manifestari periculoase a plasmei tokamak, in 2015 am pus bazele unui model electromagnetic de perete tokamak subtire pentru simularea modurilor MHD neliniare WTKM si VDE [1]. S-a elaborat o formulare riguroasa a ecuatiilor curentilor de suprafata intr-un perete tokamak, considerat, data fiind scala de timp in care au loc instabilitatile, ca limita unui perete subtire. In reprezentarea variationala a ecuatiilor ce definesc ambele componente de curenti, cea turbionara cu divergenta nula si cea pe traseul plasma-perete-plasma (source/sink), sunt descrise cu acelasi model matematic. S-a elaborat o formulare optimizata a acestor curenti pentru cazul tipic al unei instabilitati ce atinge peretele tokamak (WTKM). S-a aratat ca reprezentarea printr-un gradient nu

poate fi folosita decat in zona de contact plasma-perete, in timp ce functia de curgere de divergenta finita poate fi folosita pe intreaga suprafata a peretelui. S-a reusit elaborarea unui model de calcul in care cele doua componente sa fie abordate in acelasi mod [2, 3]. Prin realizarea unor interfete intre codul nostru si alte coduri de dinamica plasmei, JOREK de exemplu, se vor putea simula disruptiile in tokamakul ITER si JET, in vederea stabilizarii lor [4].

Perioada de desfasurare: ianuarie 2017- decembrie 2017

Obiective

Se ridica doua intrebari teoretice la care acest proiect a trebuit sa raspunda: a) cand un tokamak se afla intr-o stare metastabila in care pierderea controlului este credibila si b) care este nivelul credibil al efectelor distructive maxime si cum s-ar putea tempera aceste efecte. Astfel, ne-am propus urmatoarele obiective:

- 1) Intelegerea mecanismului de curgere a curentilor de la plasma la perete (si invers) in timpul evenimentelor de disruptie majora;
- 2) Elaborarea unei reprezentari variationale matriceale pentru functionala energetica corespunzatoare curentilor turbionari, folosind aceeasi abordare ca si pentru curentii source/sink;
- 3) Determinarea curentilor turbionari in pereti subtiri 3D, cu geometrie multiplu conexa, cunoscandu-se dependenta temporala a fluxului magnetic inductor;
- 4) Determinarea cuplajului inductiv dintre cele doua componente ale curentilor superficiali, considerand o dependenta temporala reala si nu una simplificata de tipul $\exp(\gamma t)$, cu γ rata de crestere a perturbatiei;
- 5) Dezvoltarea unei formulari unice de determinare a celor doua componente de curenti superficiali.

Modelul adoptat

- 1) In timpul disruptiilor, modurile MHD, considerate a fi asociate cu curentii de suprafata, sunt de tipul cu granita libera, dupa cum a rezultat din: (a) excitarea unui mod kink $m/n=1/1$ in timpul unui VDE la tokamakul JET in 1996 si (b) masuratori recente pe tokamakul chinezesc EAST (2012);
- 2) Atat teoria cat si masuratorile recente pe JET si EST au indicat, fara tagada, ca contactul galvanic plasma-perete este critic in timpul disruptiilor;
- 3) Aproximatia de perete subtire este rezonabila pentru structuri din otel inoxidabil de grosimi de 1-3cm si pentru procese disruptive nu mai mari de 1ms;
- 4) Reproducerea 3D fidela a structurilor peretelui este importanta.

Rezultate obtinute

- 1) Am plecat de la teorema de decompozitie a lui Helmholtz, prin care orice camp vectorial suficient de neted si rapid descrescator, de doua ori diferentiabil continuu in 3D, poate fi

descompus in suma dintre un camp vectorial irrotational (ce are un potential scalar) si un camp vectorial solenoidal (care are un potential vector). Astfel, curentul din peretele conductor a fost descompus in doua componente: una de divergenta nula (exprimata cu ajutorul unei functii scalare de curgere) si cealalta, exprimata cu ajutorul unui potential scalar (o functie de suprafata). Componenta a doua se determina din ecuatia de continuitate prin grosimea peretelui tokamak si cu ajutorul ecuatiei Faraday [1];

- 2) Tinand in seama ca configuratia peretelui tokamak este deosebit de complexa si prezinta interfete din materiale diferite, rezolvarea problemei noastre folosind formularea puternica (strong) cu ajutorul ecuatiilor cu derivate partiale (PDE) nu este eficienta. Astfel, am folosit o formulare slaba, variationala. Prin aceasta formulare, potentialul scalar s-a obtinut prin minimizarea unei functionale energetice. In mod similar, am definit o functionala pentru functia scalara de curgere [1, 3];
- 3) Minimizarea celor doua functionale a dus la obtinerea unui sistem de ecuatii cu matrici hermitice, simetrice si pozitiv definite, pentru rezolvarea caruia s-a folosit o descompunere de tip Cholesky [4, 5];
- 4) Este de subliniat ca valorile potentialului magnetic vector si ale campului magnetic date de acesti curenti au putut fi calculate cu relatii analitice, ceea ce a marit precizia calculelor noastre in mod considerabil si a scurtat timpii de calcul [6];
- 5) Am reusit sa elaboram doua cazuri particulare, cate unul pentru fiecare componenta de curent, ce au solutii analitice, cu care am putut verifica calculele noastre numerice [7, 8];
- 6) Am facut posibila trecerea la ETAPA II prin definirea urmatoarelor marimi de intrare in modelarea noastra pentru a descrie o descarcare reala: potentialul magnetic vector dat de plasma si de alte surse exterioare, inductia magnetica data de plasma si de alte surse exterioare si densitatea de curent ce vine de la plasma pe perete; toate cele trei marimi ca functii de timp si spatiu.

In Figura 1. sunt prezentate rezultatele calculului distributiei curentilor ce rezulta din schimbul plasma-perete-plasma.

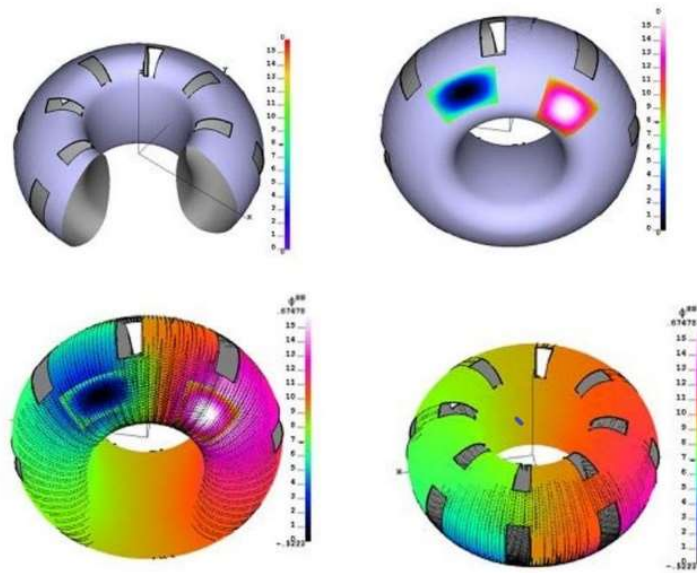


Figura 1. Stanga sus: perete toroidal cu gauri de acces. Dreapta sus: zonele in perete unde este distribuit curentul plasma-perete (scenariu teoretic). Stanga jos: vedere de jos a distributiei potentialului scalar al curentului de divergenta potential nenula. Dreapta jos: Vedere de sus a acelorasi curenti, in mod evident mai mici decat in partea de jos.

La cererea comunitatii de fuziune, codul elaborat de noi a primit statutul de «open source licence» putand fi folosit de intreaga comunitate europeana de fuziune. Este o premiera in asociatia noastra.

Parteneri externi:

- 1) Max Planck Institute for Plasma Physics, Garching b. M., Germany
- 2) LiWFFusion, Princeton, US

Lucrari

- [1] L.E. Zakharov, C.V. Atanasiu, K. Lackner, M. Hoelzl, and E. Strumberger, "Electromagnetic thin-wall model for simulations of plasma wall-touching kink and vertical modes", Journal of Plasma Physics. 81, 515810610 (2015).
- [2] L.E. Zakharov, C.V. Atanasiu, L. Xujing, Interface of wall current modeling with disruption simulation codes, JOEK-STARWALL discussion meeting, IPP, Garching bei München, Germany, March 10, (2017).
- [3] C.V. Atanasiu, L.E. Zakharov, K. Lackner, M. Hoelzl and E. Strumberger, Simulation of the electromagnetic wall response to plasma wall-touching kink and vertical modes with application to ITER, 59th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Milwaukee, WI, US, October 23-27, 2017 (oral presentation).
- [4] C.V. Atanasiu, L.E. Zakharov, K. Lackner, M. Hoelzl, F.J. Artola, E. Strumberger and L. Xujing, Modelling of wall currents excited by plasma wall-touching kink and vertical modes during a tokamak

disruption, with application to ITER, 17th European Fusion Theory Conference, Athens Greece, October 9-12, 2017 (oral presentation).

[5] C.V. Atanasiu, L.E. Zakharov, K. Lackner, M. Hoelzl and E. Strumberger, Wall currents excited by plasma wall-touching kink and vertical modes, JOEAK Meeting, Prague - 20-24/03/2017 (oral presentation).

[6] L.E. Zakharov, L. Xujing, S.N. Gerasimov and JET Contributors, C.V. Atanasiu, K. Lackner, M. Hoelzl, E. Strumberger and Artola Such, Tokamak MHD and its interface (ssec) with the wall model, 30th ITPA-MHD Disruptions & Control topical group workshop October 9 2017, Fusion For Energy, Barcelona, Spain (oral presentation).

[7] F.J. Artola, C.V. Atanasiu, M. Hoelzl, G.T.A. Huijsmans, K. Lackner, S. Mochalsky, G. Oosterwegel, E. Strumberger and L.E. Zakharov, Second intermediate report for ITER project IO/16/CT/4300001383 on the Implementation and validation of a model for halo-currents in the nonlinear MHD code JOEAK and demonstration of 3-D VDEs simulations in ITER, Version 2, March 5th 2017.

[8] C.V. Atanasiu, L.E. Zakharov, K. Lackner, M. Hoelzl, F.J. Artola, E. Strumberger, X. Li, G. Steinbrecher, N. Pometescu, "Modelling of Wall-Touching Kink and Vertical Modes in ITER", Euratom-Fusion Association Day, Bucharest, February 2nd 2017.

Persoane de contact: INFLPR - Calin V. Atanasiu (cva@ipp.mpg.de)

Determinarea influentei neliniare a componentelor feromagnetice asupra generarii de curenti superficiali in timpul evenimentelor de deplasare verticala a plasmei, asupra echilibrului si stabilitatii plasmei din instalatiile tokamak JET, WEST si ITER.

Acesta este un proiect Enabling Research (teorie), acceptat de Consorțiul EUROfusion pentru finantare in perioada 2019-2020 si se are in vedere prelungirea lui pentru 2021-2022 in cadrul viitorului proiect Theory, Simulation, Verification and Validation (TSVV). Instalatiile tokamak cu component feromagnetice prezinta un aspect distinct: acestea pot influenta stabilitatea plasmei. Drept urmare, dependenta puternic neliniara a solutiilor magnetohidrodinamice de permeabilitate fierului duce la calcule de echilibru, stabilitate sau evenimente de deplasare vertical mult mai complicate si, in acelasi timp, necesitand timpi de calcul mult mai mari. Considerand componentele feromagnetice omogene, liniare si izotrope pe subdomenii, am inlocuit aceste medii printr-un mediu omogen (vid) si un curent de suprafata distribuit pe suprafata de de separatie dintre subdomenii. Pentru cazul studiat de noi, al unei geometrii cu simetrie de rotatie, acest curent de suprafata este descris de o ecuatie integrala Fredholm de speta a 2-a. In mode vident, avantajul metodei este mai

evident in formularile inverse ale problemelor de stabilitate si de evenimente de deplasare verticala ale plasmei: termenul neliniar este mutat din operatorul differential in membrul drept al ecuatiilor.

Perioada de desfasurare: 2019 – 2020

Obiective: Dezvoltarea unui model matematic pentru calculul influentei neliniare a componentelor feromagnetice in modelarea evenimentelor de deplasare vertical, echilibrului si stabilitatii plasmei tokamak.

Etape si activitati (A)

A.1 Dezvoltarea metodei ecuatiilor integrale pentru calcule de echilibru si stabilitate MHD in instalatii tokamak cu transformator ferromagnetic.

A.2 Calculul echilibrului MHD in plasma tokamakului JET (cu structuri feromagnetice) – activitate in curs de finalizare.

Rezultate obtinute (B)

B.1 Pentru modelarea modurilor MHD de tip WTKM, densitatea de current de suprafata j_{d_w} din peretele conductor poate fi divizata in doua component (d_w fiind grosimea peretelui): (a) una cu divergenta nula i si (b) a doua care este proportional cu potentialul sursa al plasmei $\nabla \phi^S$ avand o divergenta potential finita:

$$d_w j = i - d_w \sigma \nabla \phi^S, i \equiv \nabla I \times n, (\nabla \cdot i) = 0.$$

I este functia de flux a componentei cu divergeneta nula. $d_w \sigma \nabla \phi^S$ este curentul de suprafata rezultat din divizarea curentului electric intre plasma si perete. Ecuatia de determinare a functiei de flux este

$$\left(\nabla \cdot \left(\frac{1}{\sigma d_w} \nabla I \right) \right) = \frac{\partial B_{\perp}}{\partial t} = \frac{\partial (B_{\perp}^{pl} + B_{\perp}^{coil} + B_{\perp}^I + B_{\perp}^S + B_{\perp}^{Fe})}{\partial t}$$

unde componenta normala a inductiei magnetice este data de contributiile plasmei B_{\perp}^{pl} , bobinelor externe B_{\perp}^{coil} , ale celor doua component ale curentilor de suprafata $B_{\perp}^I + B_{\perp}^S$ si ale transformatorului feromagnetic (al tokamakului JET, de exemplu) B_{\perp}^{Fe} .

Geometria peretelui tokamak fiind complexa si prezentand interfete intre materiale diferite, rezolvarea de tip tare cu ecuatii cu derivate partiale (PDE) nu s-a dovedit eficienta. Astfel, am folosit o formulare slaba, rezolvata numeric cu elemente finite. Astfel, ecuatia pentru determinarea lui ϕ^S s-a obtinut minimizand functionala W^S

$$W^S = \int \{ \sigma d_w \dots \}$$

unde integrala de suprafata dS este efectuata de-alungul suprafetei peretelui, iar integral de contur dI este luata de-alungul marginii suprafetei conductoare. Pentru componenta cu divergenta nula a curentului de suprafata, principiul energetic s-a dedus ca

$$W^I = \frac{1}{2} \int \left\{ \dot{i} \frac{\partial(i \cdot A^I)}{\partial t} + \frac{1}{\sigma d_w} \nabla \cdot \nabla I \dot{i}^2 + 2 \left(\dot{i} \cdot \frac{\partial A^{ext}}{\partial t} \right) \right\} dS - \oint (\dot{i} \cdot \vartheta^E - \vartheta^S) \frac{\partial I}{\partial t} dl \cdot \dot{i} \dot{i}$$

Potentialul magnetic vector a rezultat din contributia a patru surse externe: plasma, bobine, curenti de suprafata si componente feromagnetice,

$$\mathbf{A}^{ext} \equiv \mathbf{A}^{pl} + \mathbf{A}^{coil} + \mathbf{A}^S + \mathbf{A}^{Fe}.$$

Modelul si metodologia de calcul elaborate de noi au fost verificate pe un model cu solutie analitica, eroarea relativa, la o discretizare suficient de mare, fiind de 0.001. Pentru o geometrie cu simetrie de rotatie, distributia curentului de suprafata de-alungul unei curbe ce separa doua medii omogene este data de o ecuatie integrala Fredholm de speta a 2-a. Pe fiecare segment din curba (cu subdomenii cu permeabilitatea magnetica omogena dar diferita, iar curba trebuind sa fie o curba Liapunov), densitatea curentului de suprafata a fost considerata continua Hölder si de variatie finita, admitand astfel o dezvoltare uniform convergenta. Pentru cazul general al M contururi am folosit polinoame Legendre (ponderea $w_i = 1$) obtinand un sistem de ecuatii ce a trebuit fi rezolvat. Deoarece determinarea permeabilitatii relative nu se poate face decat iterativ, am definit o aproximare a dependentei $\mu_r(B)$ ce poate fi folosita pentru orice forma a curbei de magnetizare.

B2. Cu metoda dezvoltata de noi, configuratiile de echilibru urmeaza sa fie determinate in acelasi mod cu cel folosit intr-un tokamak cu transformator neferomagnetic, adica la fel de simplu si intr-un timp de calcul rezonabil. Sunt in curs de finalizare urmatoarele teste numerice de verificare a metodei elaborate:

- (a) influenta numarului de subregiuni cu permeabilitate magnetica constanta;
- (b) influenta numarului de diviziuni ale frontierei circuitului feromagnetic;
- (c) influenta gradului polinoamelor Legendre folosite in rezolvarea ecuatiei integrale Fredholm;
- (d) verificarea analitica a unor relatii integrale.
- (e) influenta numarului de segmante de discretizare a conturilor exterioare al structurii feromagnetice 2D.

B.3 La cererea partenerilor nostri, codul nostru a primit statutul de « open source license » si este folosit de intreaga comunitate EUROfusion in modelarea instabilitatilor de tip « Wall Touching Kink Modes » si a « Vertical Displacement Events » in plasma tokamakului ITER.

B.4 Recent, codul nostru a fost implementat cu succes in codul EUROfusion JOEKK-STARWALL.

In **concluzie**, metoda ecuatiilor integrale dezvoltata de noi pentru efectuarea de calcule magnetostatice in instalatii tokamak cu elemente feromagnetice permite calculul configuratiilor de echilibru si a conditiilor de stabilitate MHD ale plasmei tokamak in acelasi mod direct (ne-iterativ) ca in instalatiile tokamak cu transformator fara miez feromagnetic.

Intr-o **etapa urmatoare (prin proiectul EUROfusion TSVV 2021-2022)**, formalismul dezvoltat de noi pentru includerea influentei neliniare a componentelor feromagnetice va fi inclus in simularile MHD cu granita libera realizate de codul comunitatii EUROfusion JOEREK-STARWALL.

Parteneri externi:

- Departamentul de Teorie (TOKAMAK) al Institutului Max-Planck pentru Fizica Plasmei, Garching, Germania.
- Departamentul de Teorie LiWFusion, Princeton, SUA.
- Departamentul de Matematica, Hangzhou Normal University, Hangzhou, China.

Publicatii

Articole

- [1] L.E. Zakharov, C.V. Atanasiu, K. Lackner, M. Hoelzl, and E. Strumberger 2015 J. Plasma Phys. 81 515810610 (2015).
- [2] C.V. Atanasiu, L.E. Zakharov, K. Lackner and M. Hoelzl, J. Phys. Conf. Ser. 1141, 012065 (2018).
- [3] C.V. Atanasiu, L.E. Zakharov, X. Li, J. Phys. Conf. Ser. 1391, 012123 (2019).
- [4] M. Hoelzl, G. T. A. Huysmans, P. Merkel, C.V. Atanasiu, K. Lackner, K. Nardon et al, J. Phys. Conf. Ser. 561, 012011 (2018).
- [5] C.V. Atanasiu, L.E. Zakharov, M. Hoelzl, S.N. Gerasimov, acceptata spre publicare la J. Phys. Conf. Ser. (2020).

Conferinte:

- [1] Leonid E. Zakharov, Xujing Li, S.N. Gerasimov and JET Contributors, C.V. Atanasiu, K. Lackner, M. Hoelzl, E. Strumberger, J. Artola Such, "Tokamak MHD and its interface (ssec) with the wall model", 30th ITPA-MHD Disruptions & Control topical group workshop October 9 2017, Fusion For Energy, Barcelona, Spain (oral presentation).
- [2] L.E. Zakharov, Gerasimov S N, C.V. Atanasiu and Li X 2018 "Inductive effects in disruptions (Hiro currents, forces, voltage spikes) and their simulation with VDE code", 2018 European JOEREK collaboration meeting, 14.05.2018-18.05.2018, Culham, UK (oral presentation).
- [3] C.V. Atanasiu, L.E. Zakharov, K. Lackner and M. Hoelzl 2018, "Simulation of the electromagnetic wall response during Vertical Displacement Events (VDE) in ITER tokamak", 7th Int'l Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences, Moscow, Russia, August 27-31, 2018 (oral presentation) arXiv:1810.10277v1 (2018).

- [4] F.J. Artola, C. Atanasiu, M. Hoelzl, G.T.A. Huijsmans, K. Lackner, S.Mochalskyy, G. Oosterwegel, E. Strumberger, L. Zakharov, "Second intermediate report for ITER project IO/16/CT/4300001383 on the Implementation and validation of a model for halo-currents in the nonlinear MHD code JOREK and demonstration of 3-D VDEs simulations in ITER", Version 2, March 5th 2018.
- [5] C.V. Atanasiu, L.E. Zakharov, "Interfacing the electromagnetic wall response code with asymmetric vertical disruption simulation codes", General JOREK Meeting, Culham, Great Britain, May 14-18 2018 (oral presentation).
- [6] C.V. Atanasiu, L.E. Zakharov, K. Lackner, M. Hoelzl, "Electromagnetic model for simulations plasma wall-touching kink and vertical modes in ITER tokamak", Int'l Conference on Plasma Physics and Applications - CPPA2019, Iasi, Romania, June 20-22, 2019 (oral presentation).
- [7] C.V. Atanasiu, L.E. Zakharov, X. Li, "Simulation of disruptions triggered by Vertical Displacement Events in tokamak and leading edge effect in plasma energy deposition", Int'l Conference on Mathematical Modelling in Physical Sciences, Bratislava, Slovakia, August 26-29, 2019 (oral presentation).
- [8] C.V. Atanasiu, L.E. Zakharov, M. Hoelzl, S.N. Gerasimov, D. Yadykin, "Code optimization for the electromagnetic wall response during VDE and simulation of VDE disruptions", 2nd EUROfusion Programme workshop on disruption and run-away, JET, Culham, Great Britain, April 8-10, 2019 (oral presentation).
- [9] C.V. Atanasiu, L.E. Zakharov, K. Lackner and M. Hoelzl, "Simulation of the electromagnetic wall response during Vertical Displacement Events (VDE) in ITER tokamak", Int'l Conference on Mathematical Modelling in Physical Sciences, Moscow, Russia, August 27-31, 2018 (oral presentation).
- [10] C.V. Atanasiu, L.E. Zakharov, K. Lackner, M. Hoelzl 2019, "Electromagnetic model for simulations plasma walltouching kink and vertical modes in ITER tokamak", Int'l Conference on Plasma Physics and Applications - CPPA2019, Iasi, Romania, June 20-22, 2019 (oral presentation).
- [11] C.V. Atanasiu, L.E. Zakharov, M. Hoelzl, Gerasimov S N and Yadykin D 2019, "Code optimization for the electromagnetic wall response during VDE and simulation of VDE disruptions", 2nd EUROfusion Programme workshop on disruption and run-away, JET, Culham, Great Britain, April 8-10, 2019.
- [12] C.V. Atanasiu, L.E. Zakharov, M. Hoelzl, S.N. Gerasimov, "A mathematical model for calculation of the influence of ferromagnetic components in Vertical Displacement Events and stability simulations of tokamak plasmas", Int'l Conference on Mathematical Modelling in Physical Sciences, Tinos island, Greece, September 7-10, 2020 (oral presentation).

Carburi cimentate cu activare redusa pentru aplicatii in fluxuri mari de caldura

Scopul proiectului este acela de a dezvolta un material alternativ pentru utilizarea in fluxuri mari de caldura, capabil sa reziste in conditiile specifice ale unui reactor de fuziune. Propunerea se concentreaza pe dezvoltarea unui carburi cu granulatia fina cimentata cu un liant format din elemente cu un grad de activare redus, acest material urmand sa fie utilizat ca armura pentru componentele care sunt supuse la incarcari termice mari, cum sunt de pilda componentele divertorului. Efortul principal este axat pe inlocuirea liantilor obisnuiti cum sunt Co si Ni cu elemente cu activare redusa cum sunt Cr, Fe, W, V si Ta sau cu aliaje cu entropie ridicata, controland cu atentie continutul de C astfel incat stoichiometria carburii sa fie conservata. Acest nou material ar trebui sa permita utilizarea unui fluid de racire la temperaturi mai inalte si in consecinta sa conduca la o mai buna eficienta a reactorului. Astfel se poate accelera dezvoltarea tehnologica pentru a transforma fuziunea nucleara intr-o sursa eficienta si economica de energie. In cadrul proiectului, pentru atingerea obiectivelor si obtinerea unor rezultate semnificative, a fost realizata o echipa de cercetatori din mai multe institute, avand cunostinte complementare in domeniul proiectului.

Activitatile propuse sunt consecvente cu planul de ansamblu de cercetare in domeniul fuziunii (asa numita „fusion roadmap”) in domeniul materialelor, intrucat isi propune producerea unor materiale pe baza de W stabile cu temperatura si cu o mai buna rezistenta in cadrul expunerii la fluxuri mari de caldura, capabile sa opereze cu succes intr-un reactor de fuziune. Spre deosebire de activitatile din fluxul principal de lucru al consorțiului EUROfusion care urmaresc imbunatatirea W, conceptul de fata are in vedere dezvoltarea si adaptarea pentru utilizare specifica in reactoare de fuziune a unui material deja definit din punct de vedere ingineresc si disponibil pe piata. Din acest motiv se estimeaza ca transferul tehnologic aferent producerii materialului va fi realizat mult mai usor iar implementarea la nivel industrial nu va necesita acelasi efort ca in cazul unor materiale complet noi

Perioada de desfasurare: 1 ianuarie 2017 – 31 decembrie 2018

Obiective:

- Selectarea unor lianti optimi pe baza de elemente cu activare redusa utilizand calcule termodinamice pentru a vedea daca materialele pot fi adecvate utilizarii intr-un reactor de fuziune
- Explorarea rutelor posibile pentru a realiza carburi cimentate fara a utiliza lianti suplimentari, prin controlul microstructurii in faza de productie.
- Realizarea de materiale optimizate conform 1 si 2 si investigarea proprietatilor acestora.

Etape si activitati:

Avand in vedere natura proiectului si timpul scurt de desfasurare, activitatile se desfasoara iterativ. Activitatea de cercetare care revine institutului nostru in acest proiect este legata de determinarea proprietatilor termofizice ale materialelor produse in Institutul JS din Slovenia, JSI (conducatorul de proiect). In paralel proprietatile mecanice sunt investigate de partenerul CIEMAT (Spania) iar in final sunt realizate teste in fluxuri mari de caldura la facilitatea JUDITH de la FZJ (Juellich, Germania).

Rezultatele obtinute:

Pana in prezent au fost investigate 3 seturi de probe primite de la conducatorul de proiect, totalizand 18 probe. Este vorba de materiale din W cu carburi de W obtinute in diferite conditii. de procesare. Cel putin un material este foarte promitator din punctul de vedere al transportului termic, avand conductibilitati termice mari, peste 100 W/m/K in intreg domeniul de temperaturi, adica pana la 1000 C. Aceste valori il califica pentru aplicatii in armura divertorului DEMO. Rezultatele obtinute au fost transmise conducatorului de proiect.

Publicatii:

[1] Saša Novak, Petra Jenuš, Matej Kocen, Andreja Šestan Zavašnik, Andrei Galatanu, Magdalena Galatanu, Elena Marija Tejado Garrido, Ignacio Pastor, "The beneficial effect of WC addition in FAST-densified tungsten", trimisa spre publicare la J. Nucl. Mater (2018)

Persoane de contact: INCDFM – Andrei Galatanu (gala@infim.ro)

Perioada de desfasurare: 1 ianuarie 2019 – 31 decembrie 2020

Obiective:

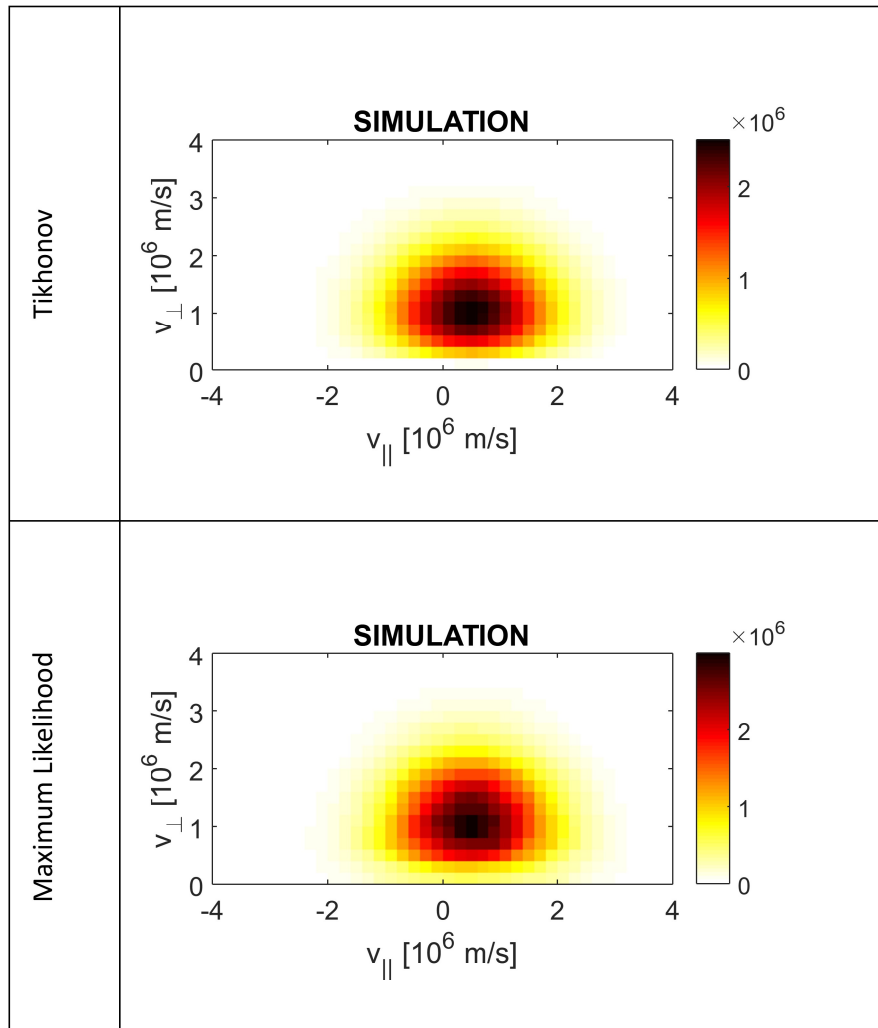
- Scopul acestui proiect este de a dezvolta noi instrumente pentru analiza integrate a datelor provenite de la toate sistemele spectrometrice dedicate studiului ionilor rapizi la JET. Tomografia de viteze s-a dovedit in trecut a fi o metoda adecvata studiului fenomenelor "sawteeth" si a instabilitatilor de tip NTM. Particulele energetice din plasmeele de fuziune genereaza fenomene 3D (2D in spatiul vitezelor + o dimensiune spatiala) care pot fi surprinse numai de tomografia de viteze. Se are de aceea in vedere transformarea acestui tip de tomografie intr-un instrument de diagnostic curenta la JET pentru studiul ionilor rapizi si al fenomenelor MHD. Ulterior metodica poate fi extinsa pentru studio emisiilor RE (runaway electrons) .

Parteneri externi:

- Technical University of Denmark (DTU)
- ENEA, Italia
- Swedish Research Council (VR)

Rezultatele obtinute:

In cursul anului 2019 partea romana a avut ca obiectiv dezvoltarea unei metode de reconstructie tomografica bazata pe principiul statistic al verosimilitatii maxime (maximum likelihood) si testarea acestei metode pe date simulate numeic care modeleaza un caz tipic de la JET. Metoda a fost comparata cu cea dezvoltata de DTU si VR, bazata pe o regularizare de tip Tikhonov. Comparatia s-a efectiat pe date numerice ce simuleaza un experiment de la instalatia tokamak ASDEX-Upgrade (Garching). Un exemplu ilustrativ este redat mai jos.



Rezultate obtinute confirma capacitatea metodei dezvoltate de a oferi reconstructii de calitate. In plus atu-ul metodei dezvoltate de noi consta in a oferi si o evaluare a incertitudinilor care insotesc reconstructia.

Persoane de contact: INFLPR – Teddy Craciunescu (c.teddy@ifa-mg.ro)

Meniu

- Informatii generale
 - Obiective
 - Pachet de informatii **NOU**
 - Proiecte in derulare
 - Manifestari, Conferinte
 - Rapoarte Anuale
 - Documente europene
 - Apeluri EUROfusion
 - Posturi Vacante EUROfusion
 - **Noutati**
 - Arhiva
 - Legaturi utile
 - Old Website
 - Contact
-

Adresa

- **Institutul de Fizica Atomica**
- Str. Atomistilor nr. 407, Magurele
- 077125, Ilfov, Romania
- Tel: +40 (21) 457.44.93,
+40 (31) 710.15.54
- Fax: +40 (21) 457.44.56
- E-mail: euratom_fuziune@ifa-mg.ro

