

# Participarea Romaniei la EUROfusion WPJET1 si cercetari complementare

---

**Director de proiect: Teddy Craciunescu (INFLPR)**

**Parteneri externi:**

- CCFE, Culham Science Center, Marea Britanie
- Consorzio RFX (CNR, ENEA, INFN, Universita' di Padova, Acciaierie Venete SpA), Padova, Italia
- Universitatea Tor Vergata, Roma, Italia
- CIEMAT, Madrid, Spania
- University of Coimbra, Portugal
- Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, Instituto Superior TécnicoLisbonPortugal
- Institute of Plasma Physics, Prague, Czech Republic

In acord cu documentele ce statuseaza cercetarea stiintifica privind fuziunea nucleara in cadrul programului Orizont 2020, reactorul de tip tokamak JET (Joint European Torus) de la Culham, Marea Britanie ocupa un rol central. Campaniile experimentale desfasurate aici sunt orientate spre solutionarea unor probleme de fizica esentiale pentru ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Aceste campanii vor include in final un set cuprinzator de experimente de tip DT (deuteriu-tritium) menite sa demonstreze compatibilitatea dintre regimurile de operare inductive cu materialele peretelui ILW (ITER like wall). Campaniile au rolul de a furniza elementele esentiale privind intelegerarea comportarii plasmei in diverse regimuri, in pregatirea viitoarelor experimente cu deuteriu-tritium, programate pentru anul 2020.

## Participarea la campaniile experimentale C33-36 de la JET

Participarea la experimentele:

- M13-45: *Fusion product studies - Diagnose confined and lost fast-ions*
- M13-22: *Runaway generation due to disruptions with an ITER-like wall*
- M15-01: *Baseline scenario for DT: Scenario development, Pellet fuelling and ELMpacing, Seeding, ICRH for W-accumulation control*
- M15-02: *Hybrid scenario for DT: Scenario development, Pellet fuelling and ELMpacing, Seeding, ICRH optimisation for Wcontrol and effects on transport, q-profile optimisation and MHD*
- M15-19: *Mitigation of run-away with high-Z injection*
- M15-24: *Target discharge for TAE's in DTE2 and fast particle physics*
- H16-12: *Three-ion ICRF scenario development*

Participarea cercetatorilor romani adduce competente in: diagnostic plasmei (spectrometrie gama, tomografie de emisie gama, neutron, HXR, bolometrie, imagistica cu camera ultra-rapide si imagistica de infra-rosu), diagnostica acoperirilor metalice ale primului perete, dezvoltarea de modele teoretice, interpretari.

### **Rezultatele obtinute:**

Participarea Romaniei la experimentele din campaniile C33-34 a fost legata de experimente legate de fizica ionilor rapizi si de diagnostica plasmei cu camere video si de infra-rosu. Au fost realizate masuratori de spectrometrie gamma si s-au realizat analize tomografice pentru determinarea distributiei emisivitatii gama in pasma de fuziune. Analizele tomografice au furnizat informatii privind distributia ionilor rapizi in plasma si de asemenea au permis determinarea evolutiei temporale si spatiale a RE (runaway electrons). A fost de asemenea finalizat si testat un pachet de metode de procesare a imaginilor pentru diagnoza plasmei: metode de identificare a aparitiei fenomenelor de tip MARFE (Multifaceted Asymmetric Radiation from the Edge) pentru predictia disruptiilor in plasma, metode de identificare si analiza a depunerilor de suspensii pe pereti reactorului si metode de corectie a rotatiei imaginilor pentru camerele video si infraroșu din sistemul de diagnostica de la JET. In cadrul participarii la experimentele din campania C35-36 si in cadrul campaniei de hidrogen C37, in domeniul diagnosticii plasmei de fuziune, s-au realizat analize de tomografie de emisie gama si de neutroni pentru determinarea distributiei ionilor rapizi in plasma si pentru determinarea evolutiei temporale si spatiale a RE (runaway electrons).

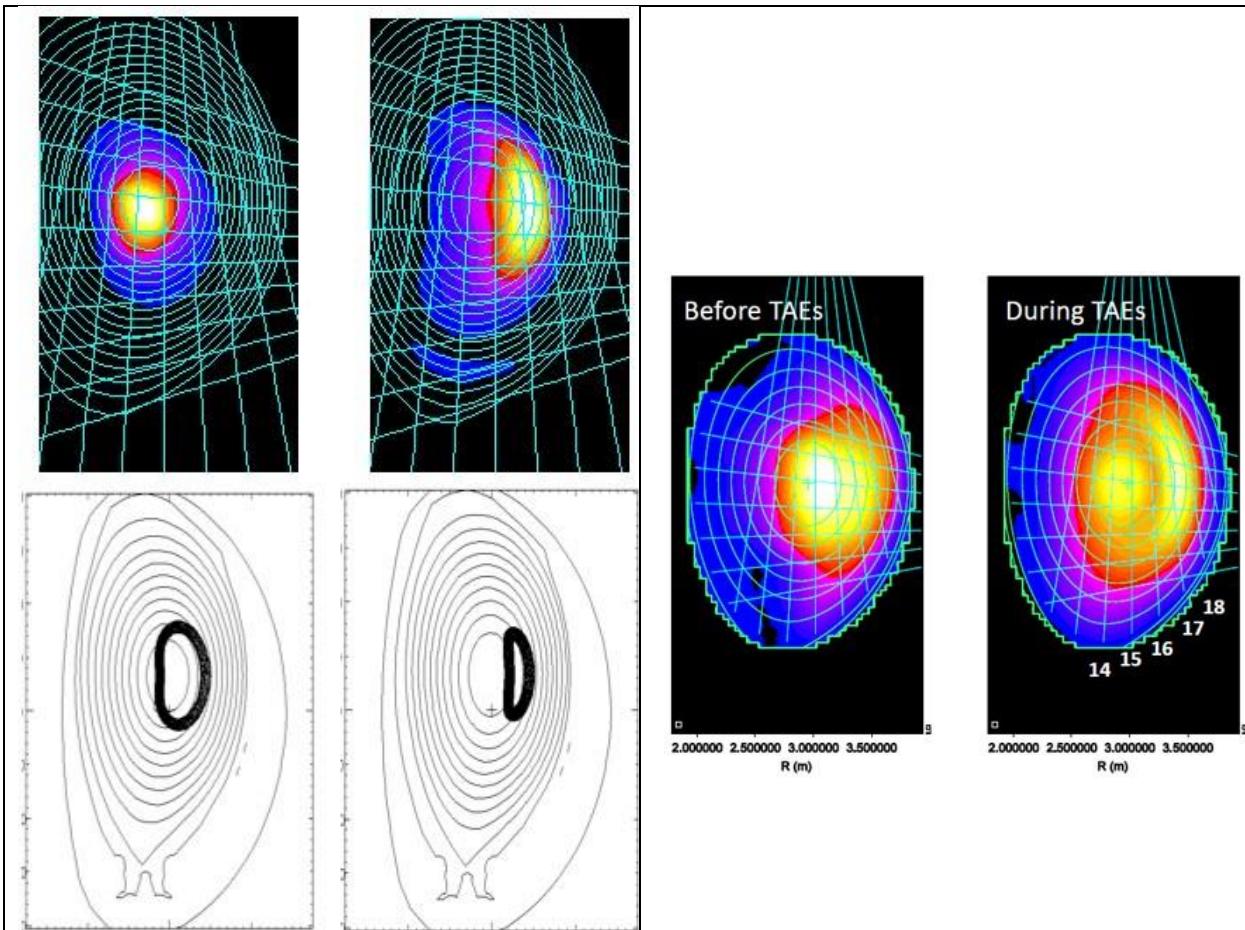
Participarea cuprinde si o puternica componenta teoretica, ce tine cont de faptul ca este esential pentru reactor ca imaginea fizica a evolutiei plasmei sa fie corecta, ceea ce impune modele cu caracter predictiv. Transportul si acumularea impuritatilor in plasma este o problema importanta pentru experimentele M15-01. S-au adus contributii la modelarea transportului turbulent (difuziv si prin viteza medie) pentru impuritati cu masa mica si mare. S-a aratat ca gradientul amplitudinii turbulentei poate genera o viteza radiala medie. Scenariile hibride investigate intr-o serie de experimente in cadrul M15-02 sunt importante datorita posibilitatii de a se obtine o mai buna stabilitate si performanta. Particularitatea regimului hibrid consta in profilele de densitate si de curent care sunt plate sau cu minime centrale. Am gasit elemente fizice noi care ar putea fi importante pentru aceste experimente: 1) efectul influxului de neutri (incusiv implantare de ioni de Ne) ca sursa de rotatie a plasmei ce poate influenta confinarea; 2) o relatie intre rotatia forfecata, densitatea de curent si densitatea de particule ce reprezinta un invariant MHD. Aceasta arata ca rotatia poloidală poate conduce la profile de curent cu minime centrale.

Participarea cercetatorilor romani la campaniile C35-35 a fost legata de experimentele:

- M15-01: Baseline scenario for DT
- M15-02: Hybrid scenario for DT
- B15-12: H D He3 ICRH scenario test.
- M15-19 - Mitigation of runaway with high Z
- M15-24 - Target discharge for TAEs in DTE2 and fast particle physics in all scenarios.
- Activitatile de analiza a datelor si dezvoltarea de modele cuprind si experimentele
- H16-12 – Three-ion ICRF scenario development

Pentru a contribui la experimentele M15-01 si M15-02 din Campania C35 – C36 la JET, a fost dezvoltat suportul analitic si numeric al teoriei propuse de noi recent, ce consta in relevarea conexiunii dintre ionizare si modificarea starii de confinare. Noua versiune a codului numeric este rebusta si stabila la variația rezolutiei si confirma insemnatarea curentului radial la ionizarea unui influx masiv de neutri (gas puff, pellet). Am expus modelul nostru care, in opinia noastră, trebuie sa devina parte din imaginea fizica a confinarii, fiind legat de generare de bariera de transport prin rotatie diferentiala. Am dezvoltat si am expus un model original ce poate oferi o explicatie pentru oscilatiile radiatiei D-alpha, observata experimental. Modelul propune o secenta ciclica de ionizare de neutri (crestere a semnalului D-alpha), generare de bariera de transport (deci reducere de re-ciclare de particule si caderea semnalului D-alpha), reducerea influxului de neutri si implicit a suportului de rotatie poloidală, deci distrugerea barierii de transport. Efectul se repeta. Teoria noastră despre curentul produs la ionizare joaca un rol central in aceasta descriere. In special pentru scanariul « hybrid » (tokamak avansat) am dezvoltat un model bazat pe un invariant MHD care ofera o explicatie alternativa a inversarii profilului de factor de securitate.

Analize de tomografie de emisie gama au fost efectuate pentru experimentul H16-12 pentru determinarea distributiei spatiale a ionilor rapizi si de asemenea pentru experimentul M15-12 pentru determinarea distributiei ionilor rapizi. Metode de tomografie de emisie de raze X dure au fost aplicate pentru vizualizarea propagarii electronilor RE (runaway) inainte de interactia cu componentelete peretelui instalatiei tokamak cu rezolutie temporală, spatială si energetica. Evaluare preliminara efectuata a fost urmata de o analiza detaliata bazata pe calculul unor configuratii magnetice de echilibru cu inalta rezolutie spatiala. Analize cuprinzatoare de tomografie de emisie de neutroni au fost efectuate pentru experimentul M15-24 in corelatie cu evenimentele de tip TAE (Toroidal Alfvén Eigenmodes).



Vizualizarea orbitelor ionilor rapizi si comparative cu simularile numerice (simulari numerice V. Kiptily et al., Nucl. Fusion, 45, L21). Ioni  $^{3}\text{He}$  proveniti din reactiile  $\text{Be}(^{3}\text{He},\text{pg})^{11}\text{B}$ ,  $^{9}\text{Be}(^{3}\text{He},\text{ng})^{11}\text{C}$ ,  $^{12}\text{C}(^{3}\text{He},\text{pg})^{14}\text{N}$  au contribuit la formarea distribuiei de emisivitate gamma.

Vizualizarea modificarii distributiei ionilor accelerate prin ICRH datorita apariiei instabilitatii de tip TAE

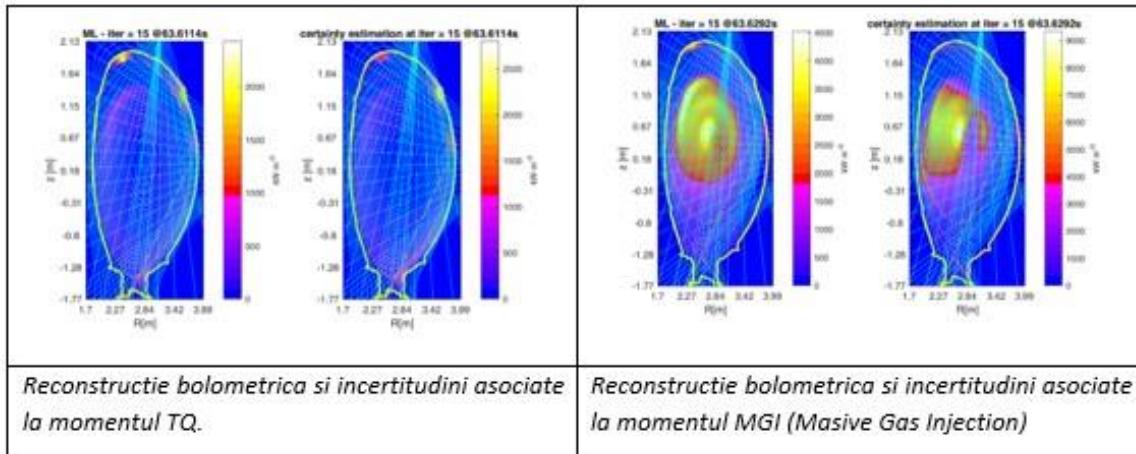
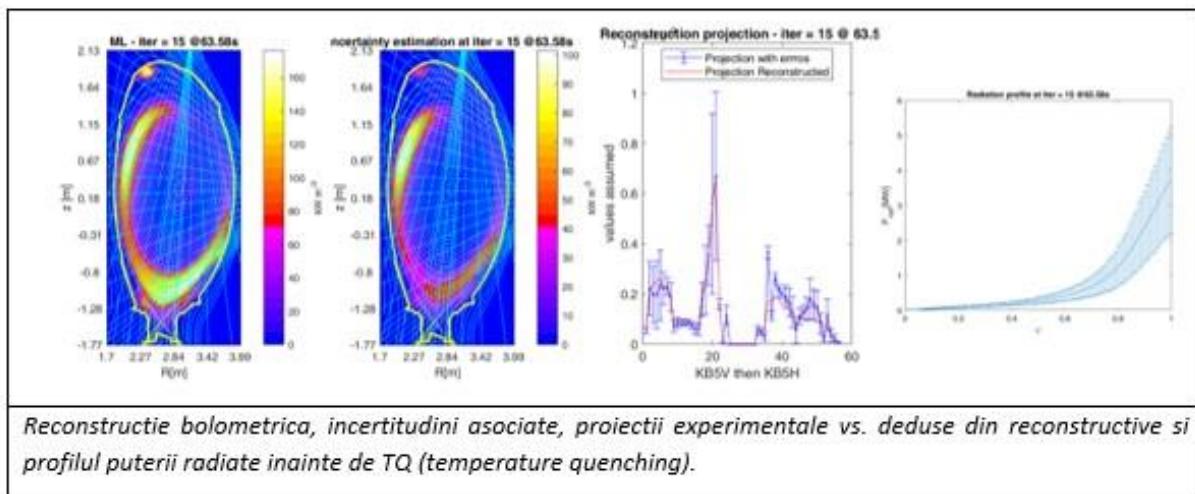
### Participarea la campania experimentalala C38-39 de la JET

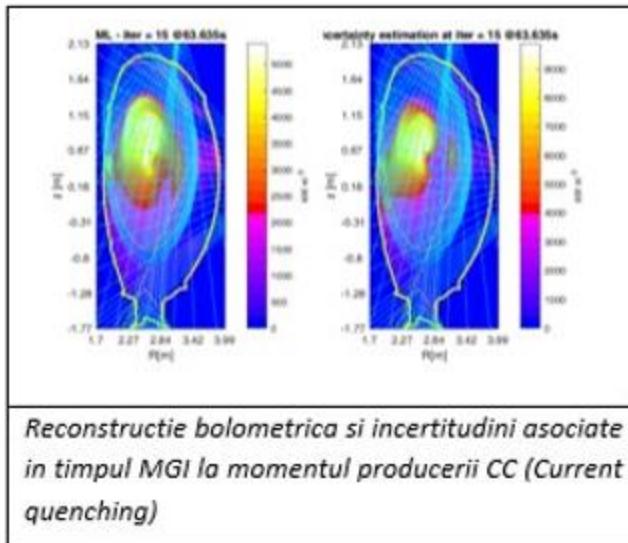
Participarea cercetatorilor romani la campania experimentalala C38 este legata de 8 experimente si 2 task-uri de modelare si analiza a datelor:

- M18-02: Hybrid scenario for DT
- M18-03: Scenario for EP and EPM in DT
- M18-11 : ICRH concept development for JET DT scenarios and for ITE
- M18-12 : Alpha mock-up experiments and preparation of fast particle diagnostics for DT
- M18-14 : Isotope effects on L-H transition power threshold
- M18-33 : Mitigation of disruption electro-magnetic load with SPI

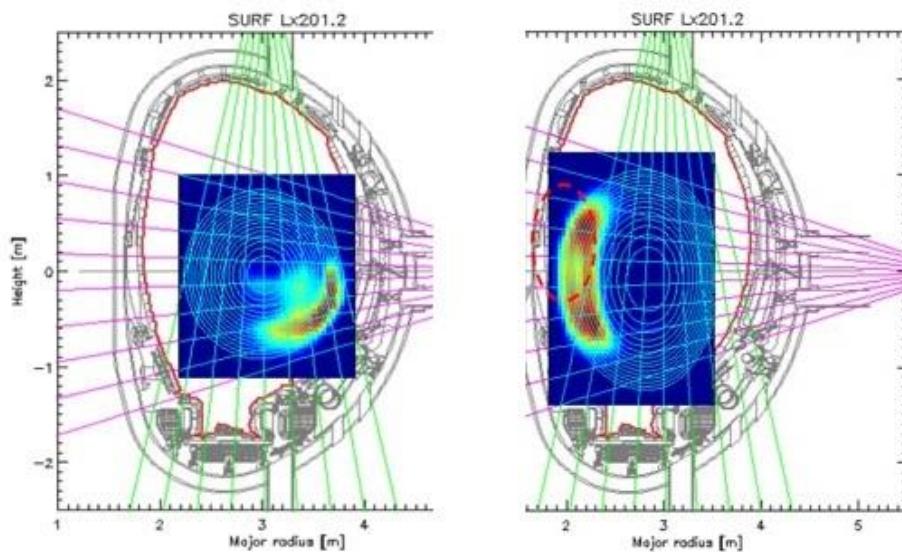
- M18-37: Run-away avoidance and formation conditions
- M18-38 : Max divertor radiation
- T18-01 Improved diagnostic analysis and intershot codes task
- T17-03 MHD analysis and modelling in support of scenario development

Ea se axeaza in principal de furnizarea de metode si instrumente pentru tomografia de emisie gama, neutroni, HXR si bolometrie. Analize tomografice extensive au fost efectuate pentru toate experimentele. A fost demonstrata capacitatea metodei de reconstructie bolometrica dezvoltata de noi in surprinderea si analiza tuturor stadiilor importante in studiile efectuate cu noul sistem de injectie a pastile de deuteriu solid utilizate pentru controlul instabilitatilor ELM de la JET. In plus o serie de noi cercetari au fost dezvoltate: evolutia emisivitatii neutronice in experimentele cu electroni de tip runaway, dezvoltarea de tehnici pentru vizualizarea depunerilor de tungsten in zona SOL (scrape-off-layer), dezvoltarea de metode de predictie a disruptiilor bazate pe forma profilului puterii radiate. Pentru eficientizarea exploatarii metodelor tomografice in cadrul viitoarei campanii DT, inclusiv in analizele intre pulsuri succesive, un cod de calcul integrat a fost dezvoltat. Codul include si variante routine dedicate pre-procesarii datelor sau corectiilor diferitelor efecte parazite.





Vizualizarea celor mai semnificative etape intr-un experiment "de tip "shuttered pellets"



Vizualizarea propagarii electronilor de tip runaway

Referitor la partea de modelare, unul dintre principalele obiective a fost cel de a descrie evolutia perturbatilor MHD de forfecare neoclasica (NTM) si de a testa modelul teoretic pe care l-am propus in raport cu rezultatele experimentale obtinute in urma cat mai multor descarcari. A fost obtinuta o potrivire precisa intre evolutia frecventei calculate a modurilor NTM si cea furnizata de catre spectrogramele asociate perturbatilor, din analiza de date experimentale. Mai mult, au fost calculate evolutii similare ale grosimii insulei magnetice asociate perturbatilor neoclasice, folosind modelul teoretic pe care l-am propus si codul numeric European Transport Solver (ETS). In concluzie, daca validitatea modelului propus e dovedita, acesta poate deveni un instrument folositor, avand capacitatii predictive. Conditia de evitare a disruptiilor in plasma, usor de calculat folosind modelul propus, se

traduce prin harti de stabilitate ale parametrilor plasmei si ale datelor livrate de catre diagnostica plasmei.

## **Participarea la campania experimentală C38 de la JET**

### **Participare la experimentele:**

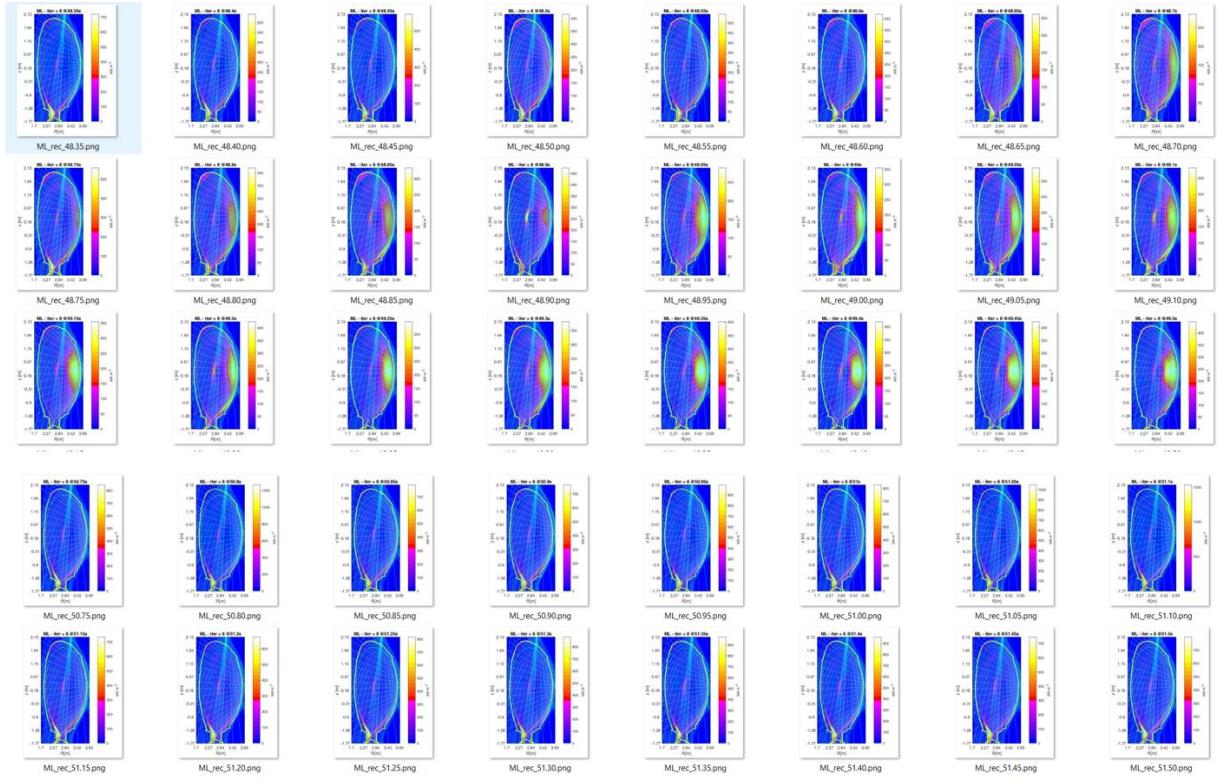
- M18-01: Baseline scenario for DT
- M18-11 : ICRH concept development for JET DT scenarios and for ITE
- M18-12 : Alpha mock-up experiments and preparation of fast particle diagnostics for DT
- M18-33 : Mitigation of disruption electro-magnetic load with SPI
- M18-36: Run-away suppression with the SPI
- M18-37: Run-away avoidance and formation conditions

### **Participare la Task-urile de modelare si analiza de la JET:**

- T18-01 Improved diagnostic analysis and intershot codes task
- T17-03 MHD analysis and modelling in support of scenario development

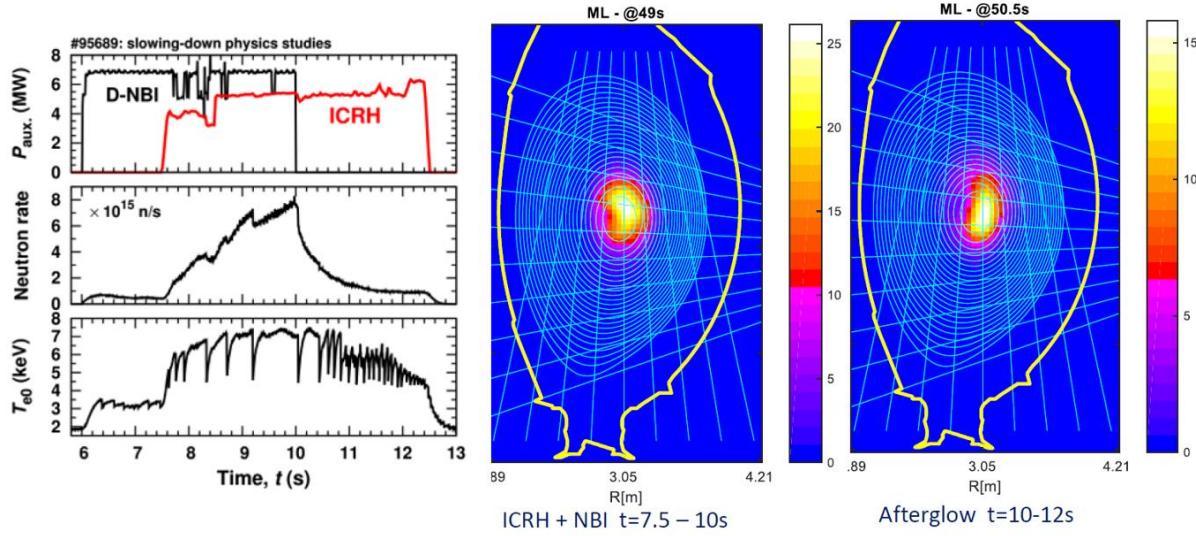
### **Rezultate obtinute:**

In cadrul experimentului M18-01 contributia a constat in reconstrucii bolometrice pentru determinarea profilului 2D al puterii radiate, in vederea determinarii incarcarii divertorului si acumularii de impuritati in experimente de fuziune bazate pe scenarii ce tintesc atingerea unei puteri de 15 MW pentru o perioada de 5s. Reconstrucțiile bolometrice au fost realizate cu o inalta rezolutie temporală (50 ms), permitand relizarea unor inregistrari video, mai usor de interpretat. Un exemplu semnificativ este prezentat mai jos.

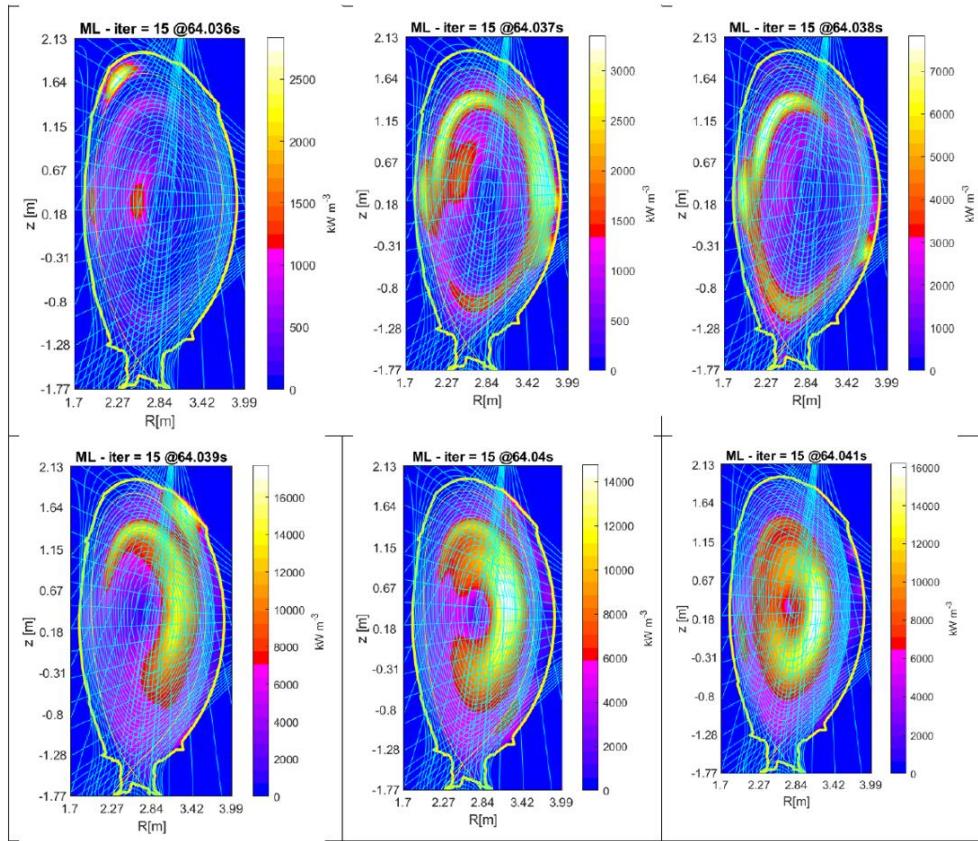


In cadrul M18-11 si M18-12 contributia romana a constat in analize de tomografie gama de emisie dedicate studiului evolutiei distributiei spatiale a particulelor alfa la tranzitie intre diferite regimuri de incalzire (NBI, ICRH). Reconstuctiile tomografice au fost obtinute pe baza liniilor gama de 17 MeV generate in reactia  ${}^3\text{He}(d,\gamma){}^5\text{Li}$ .

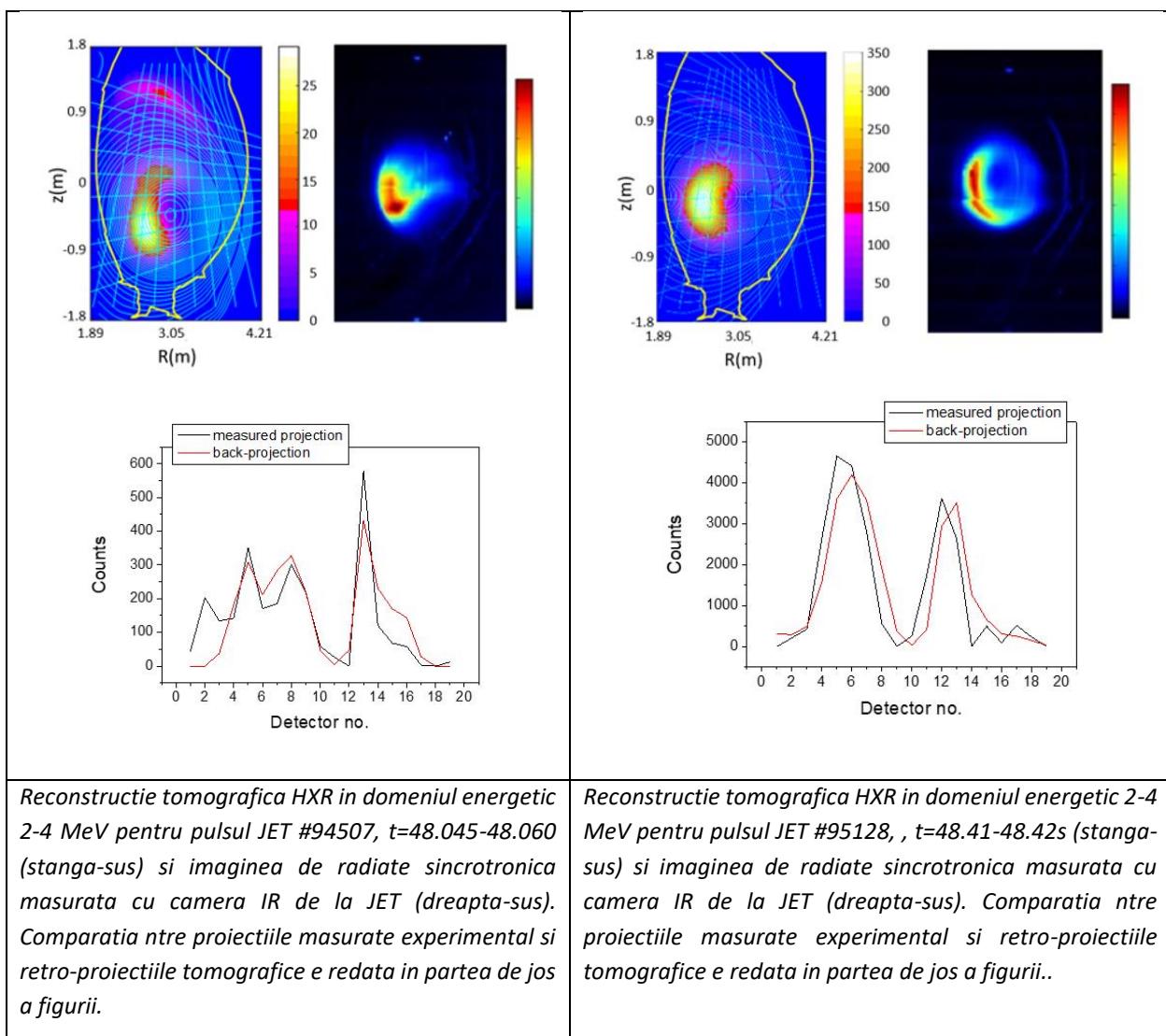
## KN3G: tomographic reconstruction of 17-MeV gammas

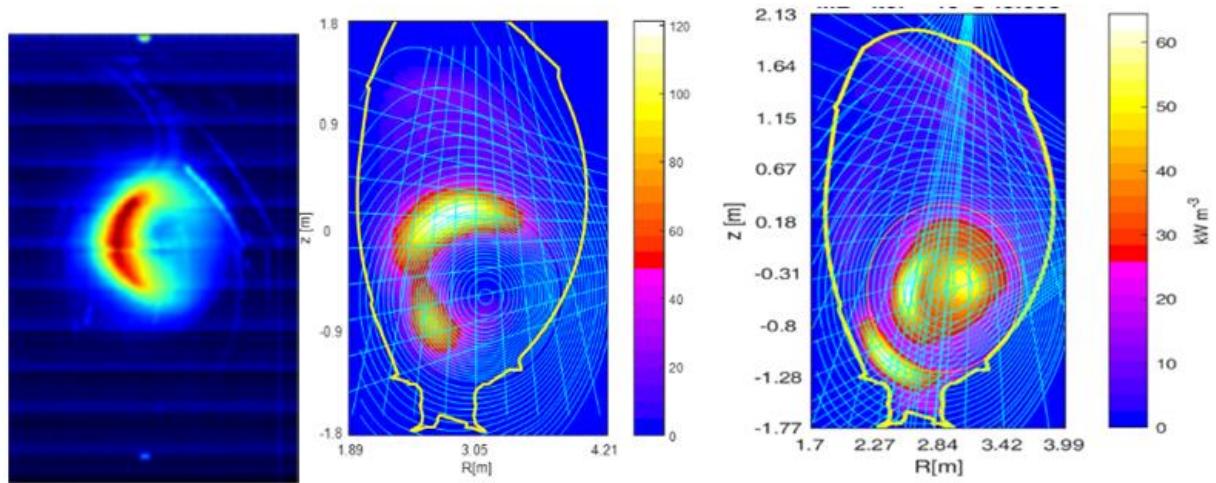


In cadrul experimentului M18-33 analizele de bolometrie au vizat evolutia profilului emisiei radiative dupa injectarea de pastille de deuterium (*shattered pellets*) pentru controlul emisiilor de electroni *runaway*. Un exemplu ilustrativ, obtinut cu o rezolutie temporală de 1 ms, este redat mai jos.

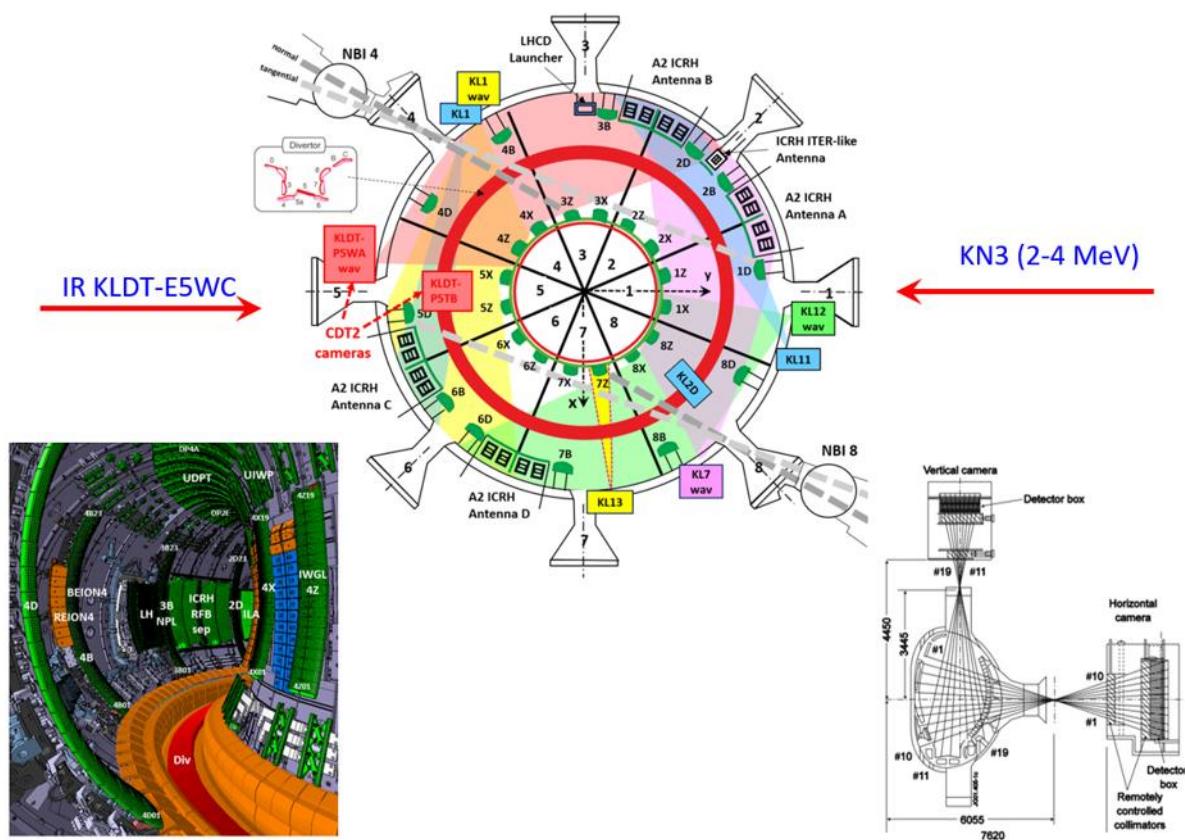


In cadrul experimentelor M18-36 si M18-37 au fost efectuate analize de tomografie de emisie HXR (*hard X-rays*) pentru caracterizarea emisiilor de electroni *runaway*. Avantajul acestui tip de tomografie este de a putea caracteriza fasicul de electron in zbor, inainte de ciocnirea cu peretele tokamak. Dificultatea consta insa in faptul ca aparitia electronilor *runaway* se petrece inainte de disruptia plasmei, cand suprafetele de echilibru magnetic variaza foarte mult. Forma acestor suprafete este utilizata ca un factor de regularizare in reconstructia tomografica, pentru compensarea existentei unui set limitat de date (doar doua unghiuri de proiectie si numai 19 linii de proiectie). Rezulta ca pentru o cat mai buna aproximatie este necesara utilizarea unui timp de masura cat mai mic. Pe de alta parte insa trebuie asigurata o statistica satisfacatoare a masuratorilor. Analizele de tomografie HXR au fost completate cu analize de bolometrie. Figura de mai jos prezinta cateva reconstructii HXR comparative cu imaginile furnizate de camera KLDT-E5WC de la JET care permite vizualizarea radiatiei sincrotronice.





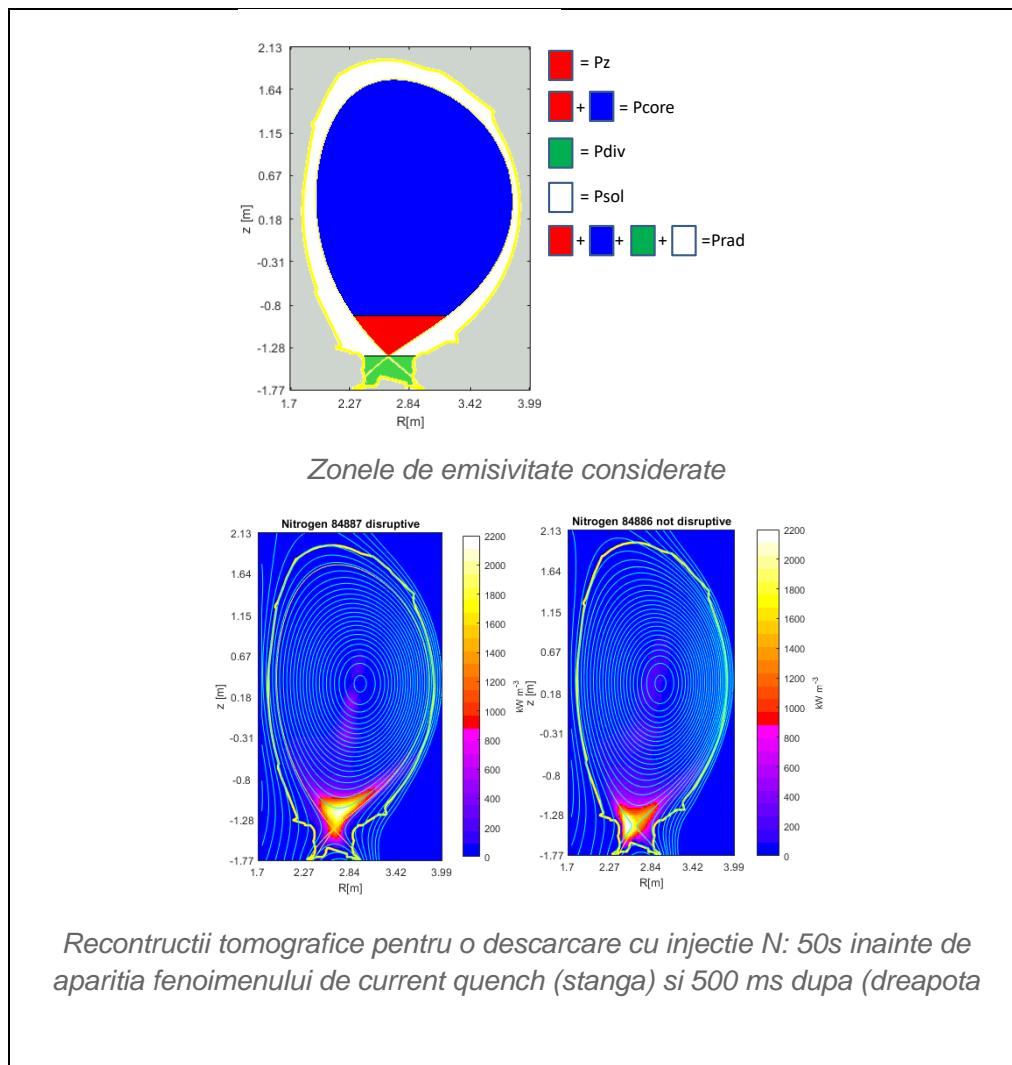
Imaginea furnizata de camera video (radiatie sincrotronica) reconstructive tomografica HXR si reconstrucție bolometrica.

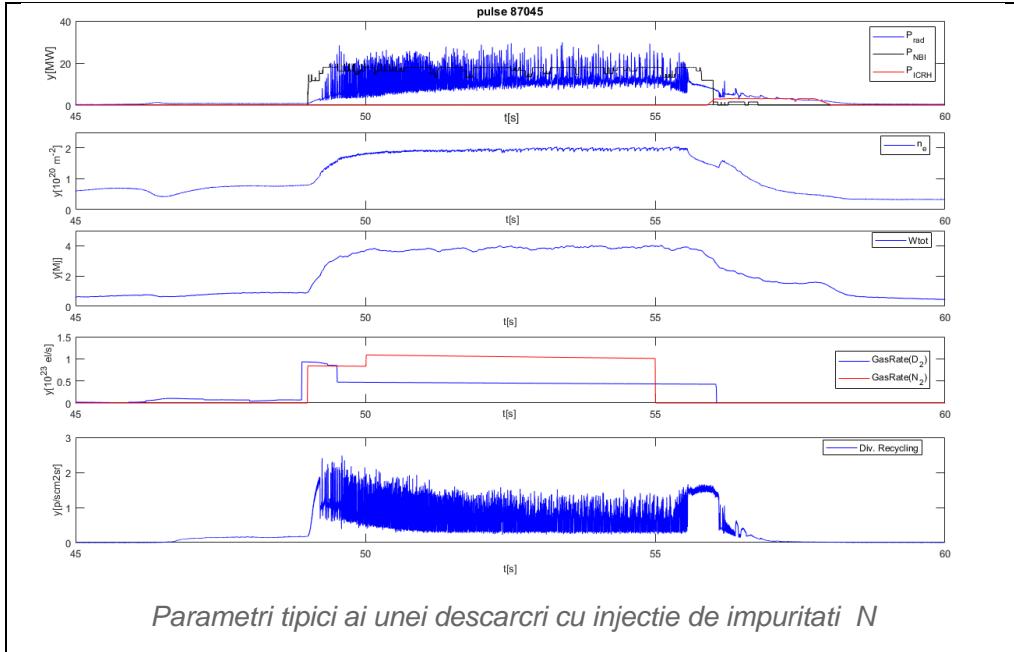


In cadrul experimentului M18-38 metoda tomografica bazata pe principiul *Maximum Likelihood* (ML) a fost utilizata pentru determinarea cu acuratete a radiatie emise, global dar si in zone specifice ale plasmei, cu scopul de a determina o corelatie intre regimul de emisie si aparitia disruptiilor in plasma.

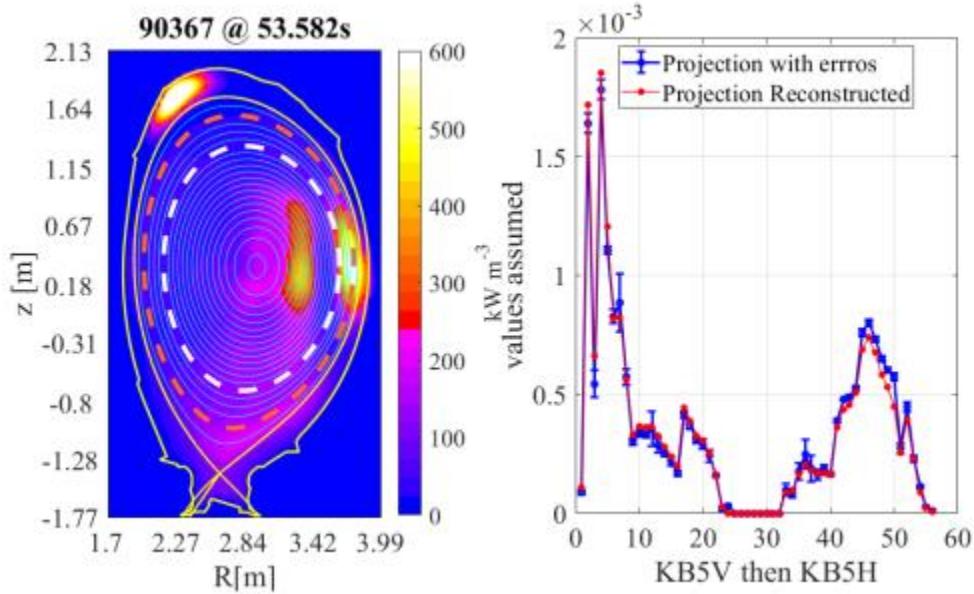
In JET, de la instalarea ILW, principalele impuritati sujt Be si W, radiatia emisa atingand uʒual 30% din puterea injectata fiind dissipata prin radiatie. Experimentele ce utilizeaza injetarea de impuritati (N, Ne, Kr) permit cresterea puterii radiate pana la un factor pana la 70%. Incercarea de a creste aceasta valoare conduce la aparitia instabilitatilor in plasma si ulterior a disruptiilor. Scopul studiului a fost de a contribui la elucidarea mecanismelor ce conduc la aparitia disruptiilor. Estimarea realista a erorilor asociate (ce poate fi obtinuta numai cu ajutorul metodei ML) joaca un rol esential.

Pentru descarcari cu injectie de impuritati N la un nivel crescut de radiatie deasupra *X-point*, concomitent cu o scadere a radiei disperse prin divertor, este intotdeauna urmata de producerea unei disruptii. Aceasta comportare este similara cu cea intalnita in descarcarile cu injectie de Ne. Disruptiile apar atunci cand radiatia emisa depaseste cu 15% (N) si respectiv 10% (Ne) puterea injectata in descarcare.

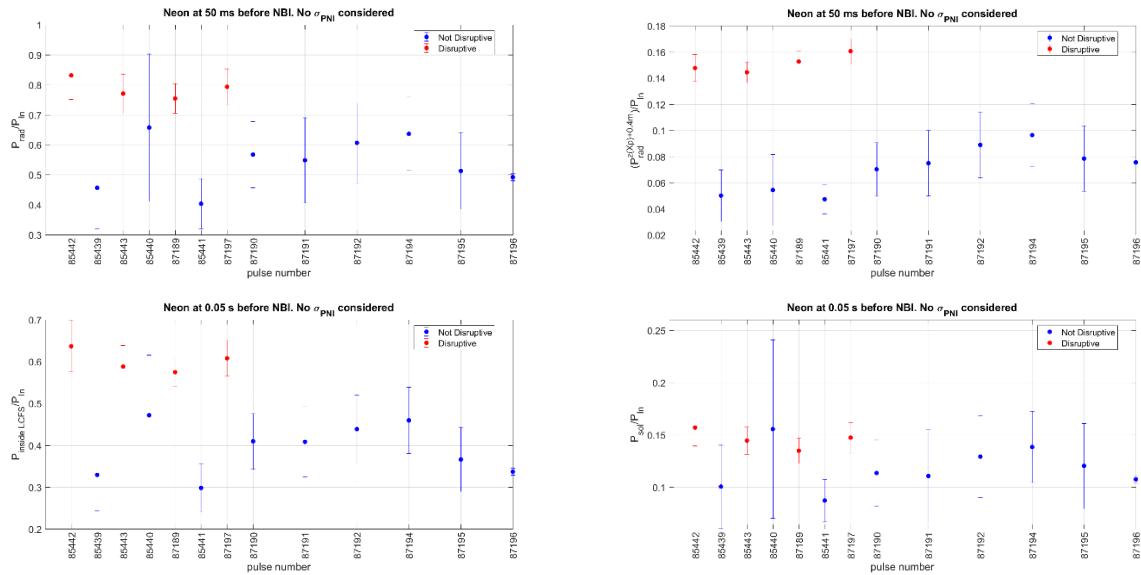




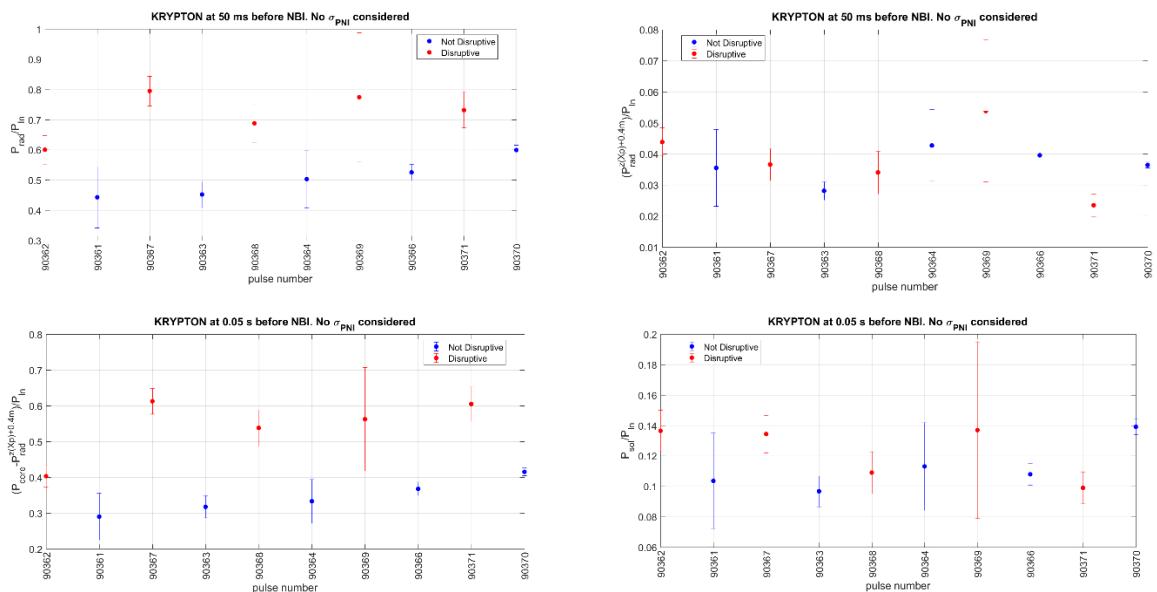
Descarcarile cu injectie de Kr au o fenomenologie diferita, distributia de emisivitate inainte de aparitia disruptiei fiind si ea sensibil diferita. Se constata o mica emisivitate in zona X-point, corelat cu o crestere semnificativa a radiatie emise in zona centrala a plasmei. Emisia crescuta in zona ecuatoriala este o consecinta a fortelelor centrifuge generate de rotatia toroidalala a plasmei.



*Descarcare cu injectie de Kr: reconstructive tomografica pentru emisivitatea la 50 ms inainte de current quench (stanga) si comparative intre masuratorile experimentale si retro-proiectii.*



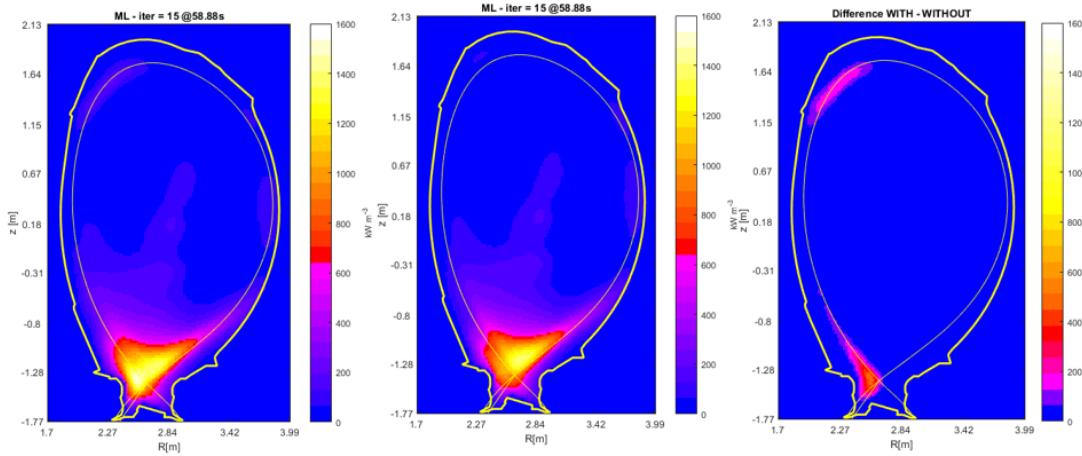
*Descarcari cu injectie de Ne. Fractia de ptere radiata in diferite zone cu 50 ms inainte de aparitia fenomenului de current quench: radiatie totala (stanga sus) radiatia emisa deasupra X-point (dreapta-sus), radiata emisa in interiorul LSMS (stanga-jos) radiatia emisa in SOL (dreapta-jos).*



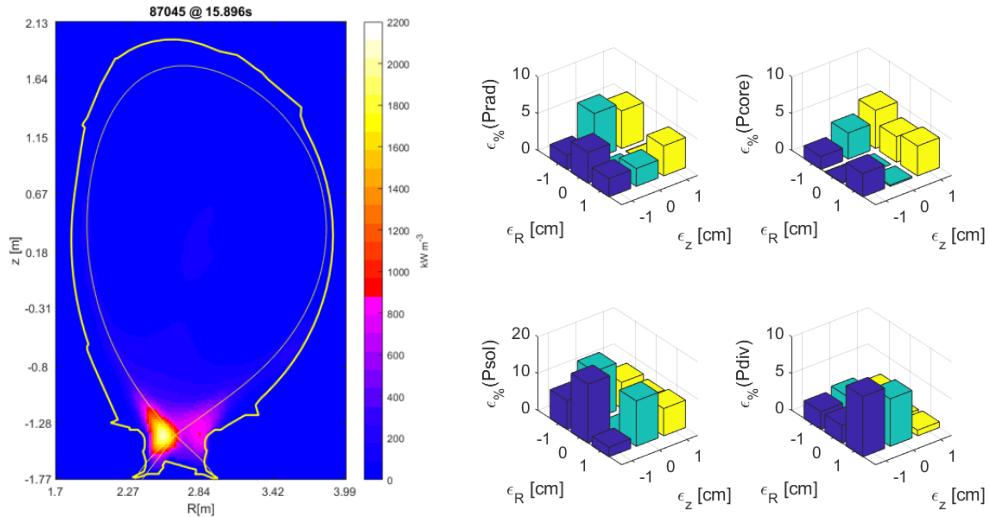
*Descarcari cu injectie de Kr. Fractia de ptere radiata in diferite zone cu 50 ms inainte de aparitia fenomenului de current quench: radiatie totala (stanga sus) radiatia emisa deasupra X-point (dreapta-sus), radiata emisa in interiorul LSMS (stanga-jos) radiatia emisa in SOL (dreapta-jos).*

In cadrul Task-ului de modelare si analiza T18-01 s-a realizat un studio cuprinzator privind sursele al surselor de incertitudine in obtinerea reconstructiilor de bolometrie. Principalii factori luati in discutie au fost: incertitudinile ce caracterizeaza configuratia de echilibru magnetica (utilizata ca un factor de regularizare in reconstructiile tomografice), existenta valorilor atipice (*outliers*), lipsa accidentalala a

masuratorilor ce furnizeaza informatii pe o anume directive de proiectie (situatie tipica pentru experimentele ce se vor efectua in campnia experimentala DT, cand fluxurile intense de neutroni pot duce la defectarea unor detector), existenta unor seturi de ate limitate (impuse de contrangerile experimentale ce afecteaza geometria experimentului tomographic). Studiul comparative a fost efectuate pe distributii numerice ce simuleaza distributii 2D tipice experimentelor din JET dar si pe date experimentale obtinute in experimentele de la JET.



*Exemplu ilustrand efectul existentei outlier-ilor: reconstructia obtinuta dupa filtrarea outlier-ilor, reconstructia obtinuta cu datele initiale si diferența intre ele.*



*Reconstructia bolometrica a puterii radiate intr-un caz experimental JET caracterizat de o incarcare semnificaiva a divertorului (stanga). Diferentele procentuale intre puterile radiate in diferite regiuni ale plasmei la deplasarea configuratiei magnetice de echilibru cu +/- 1cm - zona centrala a plasmei (albastru, divertor (verde) si 'scrape off layer (galben)*

In cadrul Task-ului de modelare si analiza T17-03 obiectivul a fost de a valida un model dinamic MHD si de a previziona marginile de stabilitate ale perturbatiilor NTM in functie de parametrul beta al plasmei tokamak. Rolul distributiei izotopice a plasmei va fi, de asemenea, in scurt timp, modelat si clarificat.

O imbunatatire semnificativa a modelului nostru ce descrie dinamica perturbatiilor neoclasice de tip NTM a constat in obtinerea unei cu totul noi solutii a ecuatiilor perturbatiilor NTM, in interiorul insulei magnetice asociate. Aveam urmatoarea solutie care satisface ecuatiile perturbatiilor in afara insulei magnetice (plasma ideală, vid, structuri resistive externe):

$$\Psi_{out}^{mn}(t) = A_s^{mn} + B_s^{mn} e^{-in\Omega_{err}t} + \sum_{p=1}^{6L} C_{ps}^{mn} e^{\tau_p t}$$

$A_s^{mn}$  and  $B_s^{mn}$  sunt marimi deduse analitic, ce descriu influenta campurilor magnetice-eroare (EF) statice si rotationale.  $\Omega_{err}$  reprezinta frecventa de rotatie a EF.  $C_{ps}^{mn}$  si  $\tau_p$ , ca si  $A_s^{mn}$  si  $B_s^{mn}$  sunt marimi obtinute analitic, ce depind de parametrii plasmei ideale, ai structurilor resistive externe plasmei (pereti, spire) si de valoarea initiala a perturbatiilor. Au fost folositi indici specifici de notatie, regasiti in [2]. Pe de alta parte, noua solutie obtinuta in interiorul insulei magnetice, care depinde de parametrii solutiei exterioare, este urmatoarea:

$$\Psi_{in}^{mn}(t) = A_s^{mn}(1 - e^{-\tilde{\eta}t}) + \frac{B_s^{mn}\tilde{\eta}}{\tilde{\eta} - in\Omega_{err}}(e^{-in\Omega_{err}t} - e^{-\tilde{\eta}t}) + \tilde{\eta} \sum_{p=1}^{6L} \frac{C_{ps}^{mn}}{\tilde{\eta} + \tau_p}(e^{\tau_p t} - e^{-\tilde{\eta}t})$$

$\tilde{\eta}$  depinde de rezistivitatea insulei magnetice. Se observa cu usurinta ca solutia interna se suprapune peste cea externa, atunci cand rezistivitatea insulei magnetice se duce la infinit (cazul plasmei ideale).

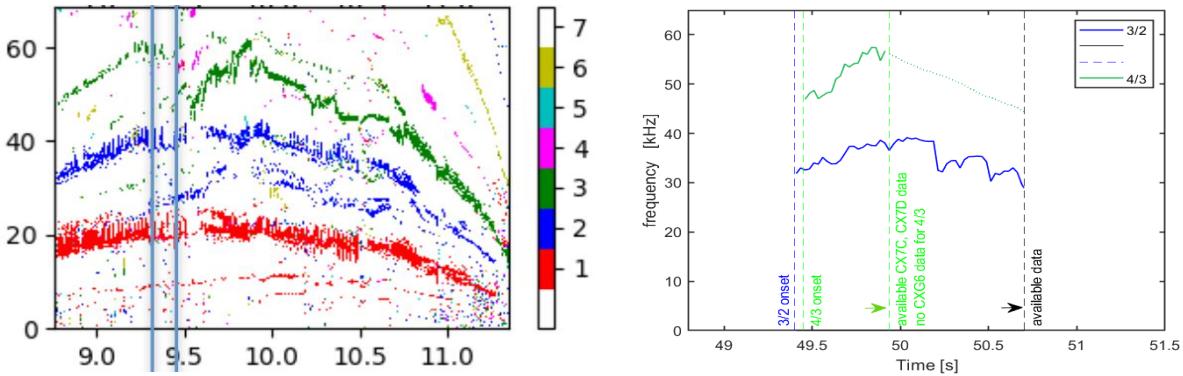


Figura 1: Spectrogramele (stanga) perturbatiilor 3/2 (albastru) si 4/3 (verde) versus frecvențele calculate (dreapta) (#92356)

A fost folosit un volum mare de date furnizate de diagnostica plasmei pentru diverse descarcari in tokamak-ul JET, cu scopul de a testa si valida modelul pe care l-am propus. De exemplu, in cazul descarcarii #92356, au fost comparate, pentru perturbatiilor NTM 3/2 si 4/3, spectrogramele descarcarii cu frecvențele perturbatiilor obtinute folosind modelul nostru.

Se poate observa o potrivire destul de buna intre rezultatele experimentale si cele date de modelare, astfel incat sa putem folosi increzatori modelul propus. Pentru perturbatia NTM 3/2 au fost folosite datele diagnostice CX7D privind viteza toroidală de rotație a plasmei (un parametru foarte important pentru modelul nostru). Din pacate CX7D nu contine date aferente pozitiei radiale a perturbatiei 4/3. Astfel incat a fost folosita diagnostica CXG6 pentru 4/3 pentru care, pe de alta parte, exista date ale vitezei de rotație pana la momentul de timp 50s. A trebuit sa extrapolam datele CXG6 pentru 4/3 dincolo de limita de 50s.

Versiunile clasica si "NTM" ale saltului derivatei logaritmului fluxului perturbatiei peste insula magnetica se gasesc in Figura 2.

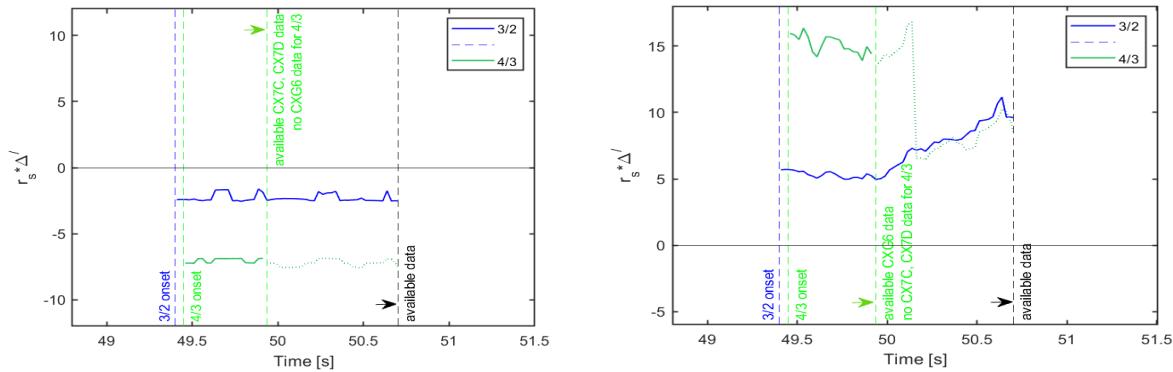


Figura 2: Parametrul delta prim pentru perturbatiile 3/2 (albastru) si 4/3 (verde), expresia clasica (stanga) versus formula "NTM",  $\Delta'(t) = -m/r_s [1 - \Psi_{out}^{mn}(t)/\Psi_{in}^{mn}(t)]$  (#92356)

Expresia "NTM" a parametrului de mai sus e validata de evolutia grosimii insulei magnetice corespunzatoare perturbatiei, in Figura 3.

Se observa ca functia delta prim clasica corespunde unei grosimi mai mari a insulei in cazul perturbatiei 3/2, comparativ cu 4/3, contrazicand rezultatele experimentale. In cazul functiei delta prim "NTM" exista o potrivire rezonabila cu experimentalul. Evolutia grosimii insulei magnetice a fost obtinuta rezolvand ecuatia generalizata Rutherford, folosind o expresie modelata a termenului delta prim si una euristica pentru termenul de bootstrap. O validare similara a modelului propriu s-a realizat si pentru cazul descarcarii #92436 in JET. Figura 4 arata similitudinea dintre spectrograma perturbatiei 4/3 si frecventa calculata folosind modelul nostru, in timp ce figura 5 valideaza iarasi modelul "NTM" al functiei delta-prim, comparativ cu rezultatele experimentale. Evolutia insulei obtinuta de modelul nostru pare a se potrivi mai bine direct cu experimental decat cu evolutia obtinuta folosind codul de transport in plasma ETS. In orice caz, aceasta ultima descarcare e una speciala. Plasma are trei componente izotopice. Pentru a gasi influenta izotopilor asupra evolutiei perturbatiilor, trebuie folosit un alt termen de bootstrap, nu versiunea lui euristica, care nu ofera nicio informatie privind componenta plasmei.

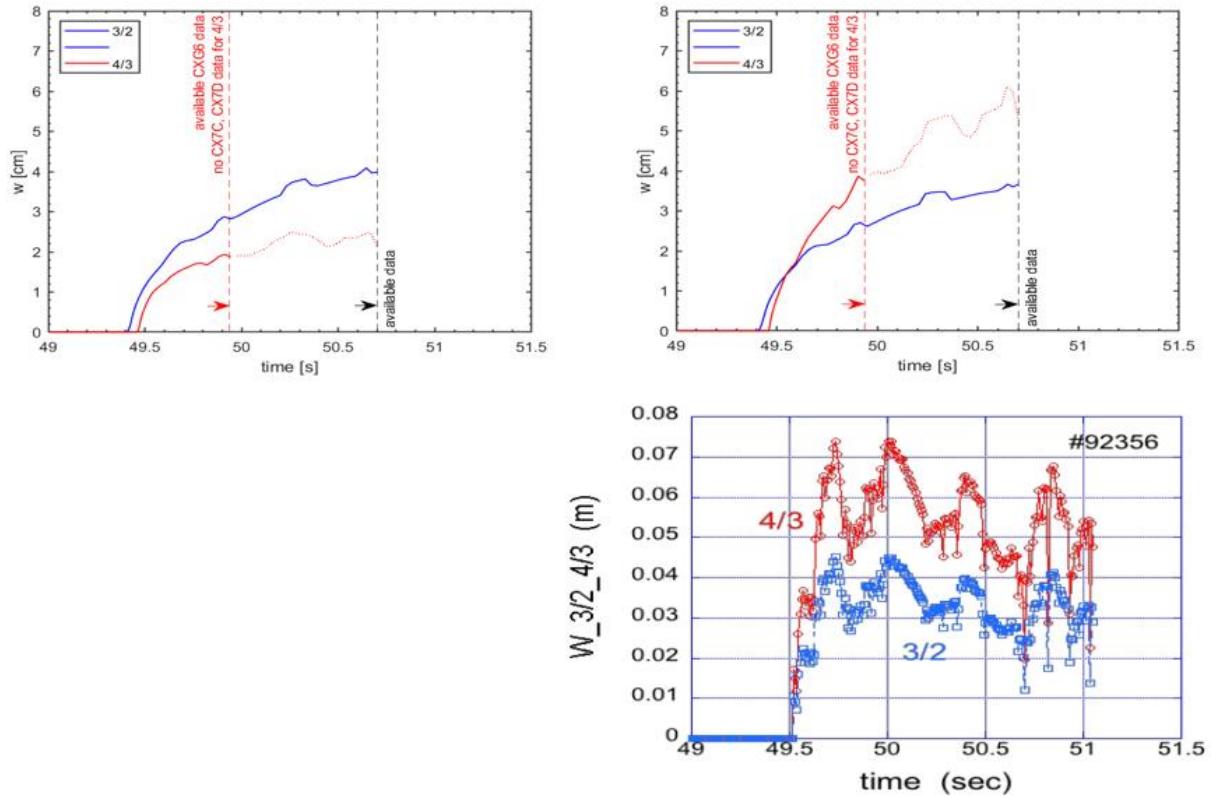


Figura 3: Evolutia insulei magnetice aferente perturbatiei 3/2 (albastru) si 4/3 (rosu) folosind functia delta prim clasica (stanga) si "NTM" (dreapta sus) in comparatie cu rezultatele experimentale (dreapta jos).

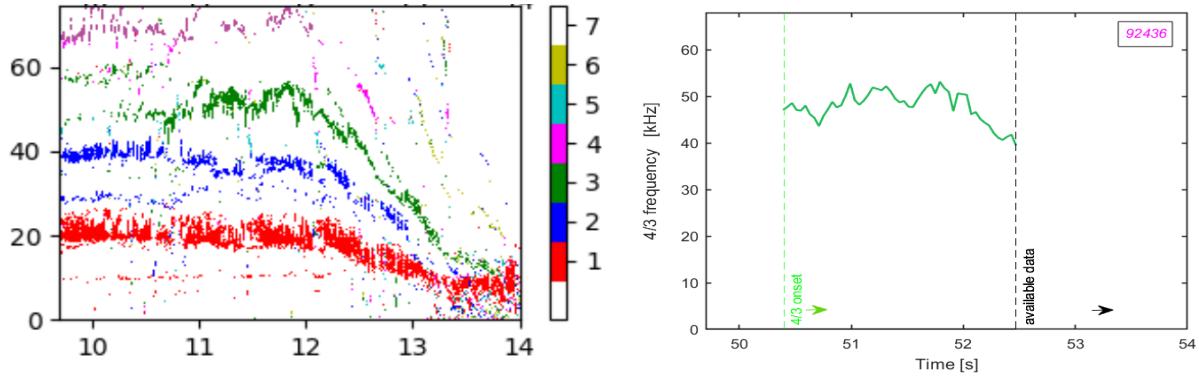


Figura 4: 4/3 (green) spectrograms (left) versus calculated frequency (right) (#92436)

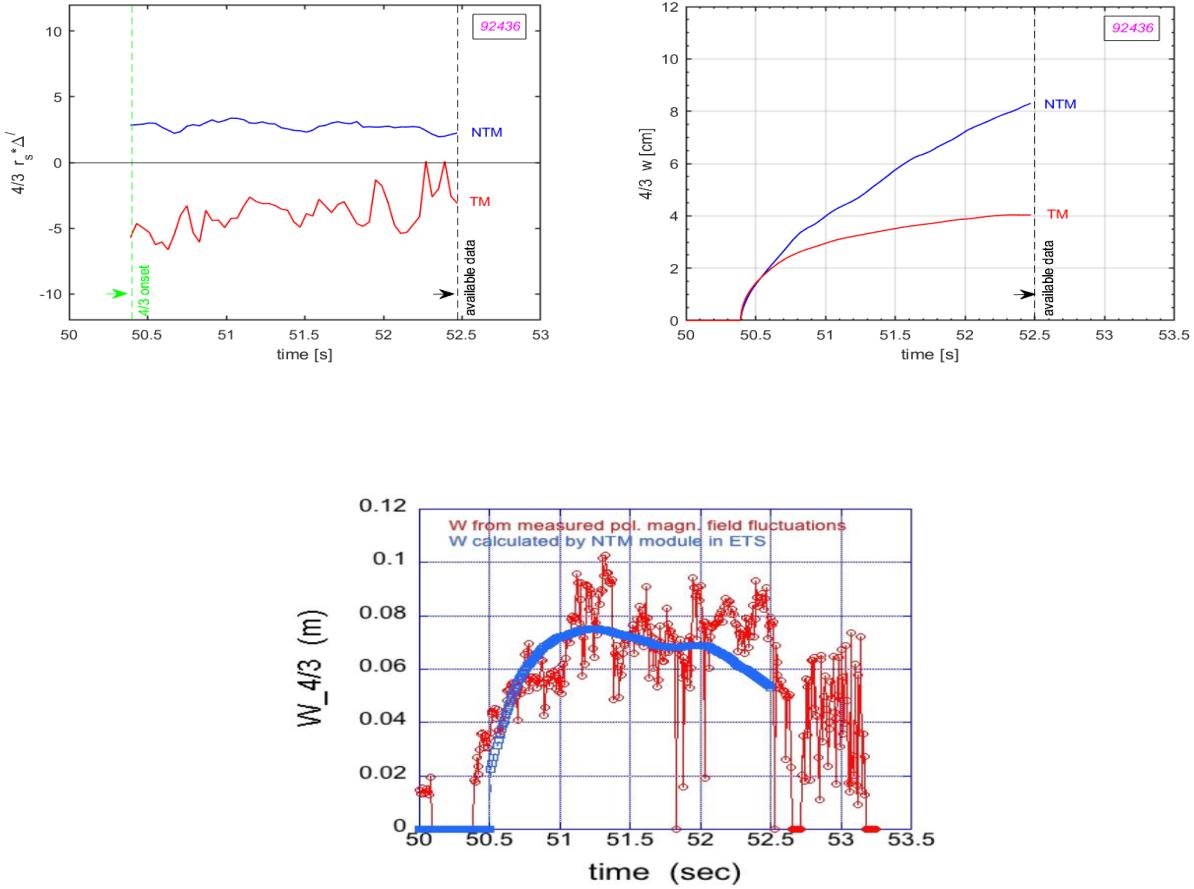


Figura 5: Versiunea “NTM” (albastru) vs. clasică (rosu) a parametrului delta prim (stanga) aferentă perturbatiei  $4/3$  și evoluția insulelor magnetice corespunzătoare (dreapta sus) în comparație cu rezultatele experimentale (dreapta jos).

In concluzie, s-a facut dovada ca modelul folosit ofera rezultate suficient de apropiate de rezultatele experimentale, astfel incat validarea acestuia sa fie luata in calcul. Va fi curand imbunatatit pentru a lua in consideratie si descrie noi aspecte ce afecteaza evolutia perturbatiilor NTM in plasma.

In cursul anului 2020, obiectivul task-ului T17-03 a fost imbunatatirea modelului propriu cvasi-analitic si a codului numeric aferent prin deducerea unei noi solutii NTM, dependente nemijlocit de fenomenul de bootstrap specific perturbatiilor neoclasice.

In cadrul task-ului T17-03 a fost testata o noua solutie a sistemului de ecuatii perturbate ce determina evolutia NTM, obtinuta prin considerarea, drept conditie pe frontiera, a saltului perturbatiei prin insula magnetica asociata ca fiind termenul de bootstrap asociat NTM. Noua solutie s-a dovedit a conduce la o buna potrivire intre rezultatele calculate si cele experimentale, cel putin in cazul perturbatiilor neoclasice cu o evolutie continua. Propriu-zis sistemul perturbat al ecuatiilor NTM in tot spatiul exceptand insula magnetica (plasma ideal, vid, structuri externe coloanei de plasma) este cuplat cu ecuatie modificata Rutherford ce descrie evolutia grosimii insulei magnetice, via indicele de stabilitate NTM, i.e. saltul derivatei radiale a logaritmului fluxului perturbat prin insula magnetica.

Astfel o noua solutie NTM este obtinuta, ce depinde in mod direct si nemijlocit de termenul de bootstrap al ecuatiei Rutherford si care da masura, acum, inclusiv efectului asociat termenului amintit. O consideram o metoda mai rapida si mai practica de determinare a perturbatiei de flux NTM, in locul unei gasirii unei solutii interne a ecuatiilor perturbate in plasma rezistiva din interiorul insulei magnetice.

Solutia obtinuta a fost testata, pentru exemplificare, in raport cu descarcarea #96947 de la tokamak-ul JET astfel:

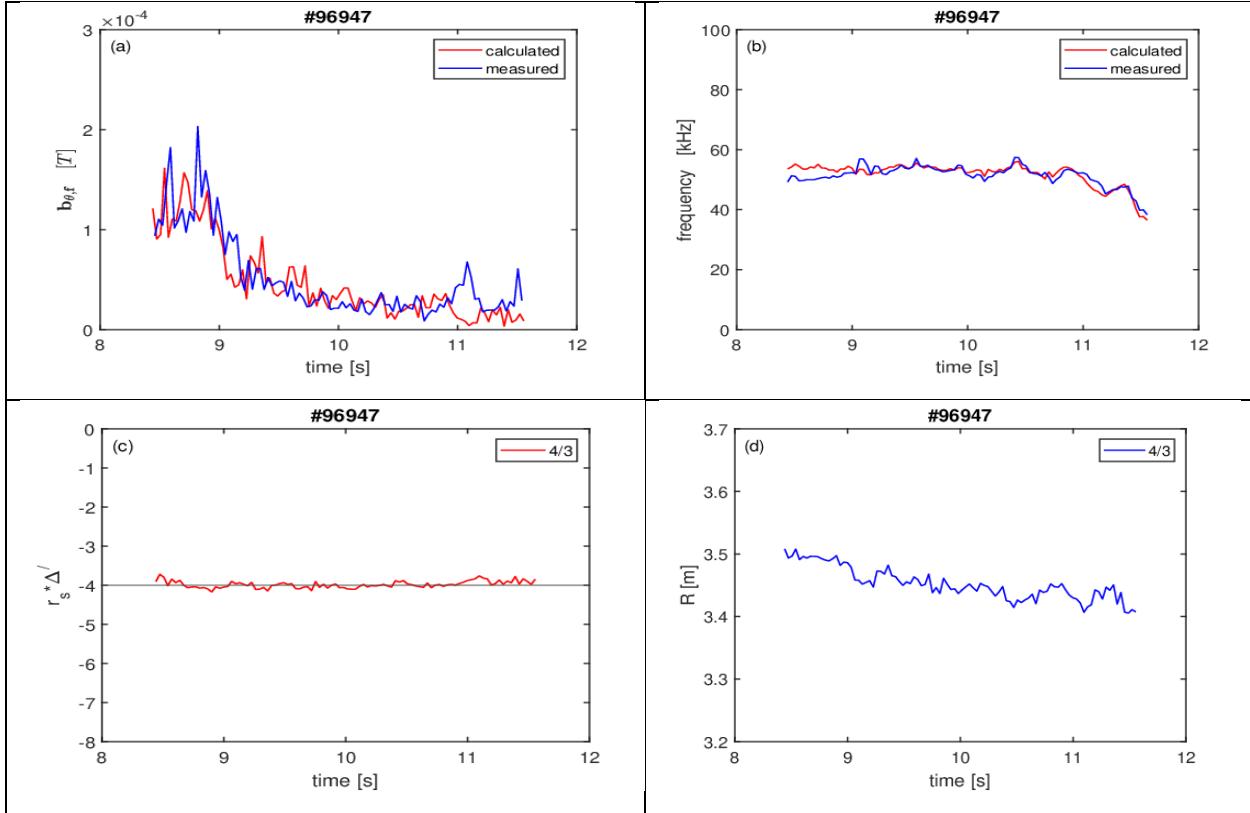


Fig1. JET #96947, (a) amplitudinea, (b) frecventa, (c) indicele normat de stabilitate si (d) pozitia radiala a perturbatiei NTM (4/3).

Figura 1(a) si 1(b), de mai sus, arata, comparativ, evolutiile amplitudinii si frecventei calculate folosind solutia pe care am determinat-o, a perturbatiei 4/3, in raport cu aceleasi dependente masurate si prezentate conform codului de analiza a modurilor de perturbatie de la JET. In ciuda faptului ca modelul nostru a fost construit pe baza unor aproximatii care sa permita o abordare analitica a ecuatiilor perturbate, similaritatea dintre curbele masurate si cele calculate este foarte buna. Figura 1(c) prezinta dependenta calculata a indicelui normat de stabilitate ce aproximeaza foarte precis valoarea asteptata a lui – numarul poloidal al perturbatiei (-4). In figura 4(d) este expusa variatia pozitiei razei mari a suprafetei magnetice corespunzatoare perturbatiei NTM considerate, astfel incat sa putem folosi valori determinate cu acuratete ale pozitiei NTM-ului in studiu.

Noua solutia fost folosita extensiv in raport cu mai multe descarcari in tokamak-ul JET in scopul validarii acestieia si a modelului aferent. Rezultatele au fost foarte bune. In concluzie validarea modelului propus duce la existenta unui instrument la indemana, self-consistent, rapid, de determinare a amplitudinii si frecventei perturbatiilor neoclasice. Validarea modelului permite inversarea acestuia in scopul determinarii unor valori initiale ale unor marimi diagnostice sau ale unor

marimi ce nu sunt masurabile, cum ar fi campurile magnetice-eroare intrinseci instalatiei tokamak, pornind de la datele finale ale perturbatiilor, pentru care valorile calculate se suprapun, in mare masura, peste cele masurate. Prin urmare, si in acest fel, acest model teoretic isi dovedeste utilitatea.

---

## Publicatii:

### Articole:

- [1] A.Murari, E.Peluso , T.Craciunescu, C.Lowry, S.Aleiferis, P.Carvalho, M.Gelfusa, Investigating the Thermal Stability of Highly Radiative Discharges on JET with a new Tomographic Method, Nucl. Fusion 60 (2020) 046030.
- [2] M.Gelfusa, T.Craciunescu, E.Peluso , L.Giacomelli, V.Kiptily, C.Reux, A.Murari, A Maximum Likelihood Tomographic Method applied to JET Hard X-ray Emission during the Current Quench, submitted to Fus. Eng. Design.
- [3] Y. Kazakov, M. Nocente, M. Mantsinen, J. Ongena, Y. Baranov, T. Craciunescu, M.Dreval, R. Dumont, J. Eriksson, J. Garcia, L.Giacomelli, V. Kiptily, K. Kirov, L. Meneses, F. Nabais, M., F. Nave, M. Salewski, S. Sharapov, Ž. Štancar, J. Varje, H. Weisen, Nucl. Fusion 60 (2020) 112013.
- [4] Nocente, M., Kazakov, Y.; Garcia, J.; Kiptily, V.; Ongena, J.; Dreval, M.; Fitzgerald, M.; Sharapov, S.; Štancar, Ž.; Weisen, H.; Baranov, Y.; Bierwage, A.; Craciunescu, T.; Dal Molin, A.; de la Luna, E.; Dumont, R.; Dumortier, P.; Eriksson, J.; Giacomelli, L.; Giroud, C.; Goloborodko, V.; Gorini, G.; Khilkevitch, E.; Kirov, K.; Iliasova, M.; Jacquet, P.; Lauber, P.; Lerche, E.; Mantsinen, M.; Mariani, A.; Mazzi, S.; Nabais, F.; Nave, M.F.F.; Oliver, H.; Panontin, E.; Rigamonti, D.; Sahlberg, A.; Salewski, M.; Shevelev, A. E.; Shinohara, K.; Sirén, P.; Sumida, S.; Tardocchi, M.; Van Eester, D.; Varje, J.; Zohar, A., Generation and observation of fast deuterium ions and fusion-born alpha particles in JET D- 3He plasmas with the 3-ion radio-frequency heating scenario, Nuclear Fusion Letters, NF-104015.R1, accepted for publication.
- [5] V.G. Kiptily, M. Fitzgerald, Ye.O. Kazakov, M. Nocente, J. Ongena, S.E. Sharapov, M. Dreval, Ž. Štancar, T. Craciunescu, J. Garcia, L. Giacomelli, V. Goloborodko, H.J.C. Oliver, H. Weisen, Evidence for Alfvén Eigenmodes Driven by Alpha Particles in D-3He Fusion Experiments on JET, submitted to Physical Review Letters.
- [6] V.G. Kiptily, Ye.O. Kazakov, M. Nocente, J. Ongena, M. Dreval, T. Craciunescu, M. Fitzgerald, L. Giacomelli, V. Goloborodko, D. Rigamonti, A.V. Shevelev, J. Garcia, H.J.C. Oliver, S.E. Sharapov, Z. Stancar, H. Weisen, Excitation of Alfvén eigenmodes by fusion-born alpha-particles in D-3He plasmas on JET, submitted to Nuclear Fusion.
- [7] Peluso, E., Craciunescu, T., Gelfusa, M., Murari, A., Carvalho, P.J., Gaudio, P., On the effects of missing chords and systematic errors on a new tomographic method for JET bolometry, (2019) Fusion Engineering and Design, 146, pp. 2124-2129, DOI: 10.1016/j.fusengdes.2019.03.120
- [8] E.Peluso , T.Craciunescu, A. Murari, P. Carvalho, M. Gelfusa, A Comprehensive Study of the Uncertainties in Bolometric Tomography on JET using the Maximum Likelihood Method, review of Scientific Instruments 90 (2019) 123502.
- [9] Mlynar, J., Craciunescu, T., Ferreira, D.R., Carvalho, P., Ficker, O., Grover, O., Imrisek, M., Svoboda, J., Current Research into Applications of Tomography for Fusion Diagnostics, (2019) Journal of Fusion Energy, 38 (3-4), pp. 458-466.
- [10] A. Murari, M. Lungaroni, E. Peluso, T. Craciunescu, M. Gelfusa, A Model Falsification Approach to Learning in Non-Stationary Environments for Experimental Design, Scientific Reports 9 (2019) 17880.
- [11] Ye.O. Kazakov, J. Ongena, R. Bilato, V. Bobkov, J.M. Faustin, A. Kappatou, V.G. Kiptily, E. Lerche, M. Mantsinen, M. Nocente, M. Schneider, D. Van Eester, M. Weiland, H. Weisen, J.C. Wright, S.J. Wukitch, Y. Baranov, J. Bielecki, S.A. Bozhenkov, A. Cardinali, C. Castaldo, T. Craciunescu, K. Crombé, A. Czarnecka, R. Dumont, P. Dumortier, F. Durodié, J. Eriksson, R. Felton, M. Fitzgerald, J. Galdon-Quiroga, D. Gallart, M. Garcia-Munoz, L. Giacomelli, C. Giroud, M. Goniche, J. Gonzalez-Martin, J. Graves, D. Grekov, C. Hellesen, Ph. Jacquet, T. Johnson, N. Krawczyk, M. Lennholm, T. Loarer, S. Menmuir, I. Monakhov, F. Nabais, M.F.F. Nave, J.-M. Noterdaeme, R. Ochoukov, H. Patten, M. Porkolab, P. Schneider, S.E. Sharapov, D. Valcarcel,

Recent advances in ICRF heating of mixture plasmas: survey of JET and AUG experiments and extrapolation to JET-DT and ITER, submitted to Nuclear Fusion.

- [12] Craciunescu, T., Peluso, E., Murari, A., Gelfusa, M., Maximum likelihood bolometric tomography for the determination of the uncertainties in the radiation emission on JET TOKAMAK, (2018) Review of Scientific Instruments, 89 (5), art. no. 053504.
- [13] Mlynar, J., Craciunescu, T., Ferreira, D.R., Carvalho, P., Ficker, O., Grover, O., Imrisek, M., Svoboda, J., Current Research into Applications of Tomography for Fusion Diagnostics, (2018) J Fusion Energ (2018). <https://doi.org/10.1007/s10894-018-0178-x>
- [14] Kazakov, Y.O., Ongena, J., Wright, J.C., Wukitch, S.J., Lerche, E., Mantsinen, M.J., Van Eester, D., Craciunescu, T., Kiptily, V.G., Lin, Y., Nocente, M., Nabais, F., Nave, M.F.F., Baranov, Y., Bielecki, J., Bilato, R., Bobkov, V., Cromb  , K., Czarnecka, A., Faustin, J.M., Felton, R., Fitzgerald, M., allart, D., Giacomelli, L., Golfinopoulos, T., Hubbard, A.E., Jacquet, P., Johnson, J., Lennholm, M., Loarer, T., Porkolab, M., Sharapov, S.E., Valcarcel, D., Van Schoor, M., Weisen, H., Efficient generation of energetic ions in multi-ion plasmas by radio-frequency heating, (2017) Nature Physics, 13 (10), pp. 973-978.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Croitoru A. M., Effects of magnetic drifts on ion transport in tokamak turbulent plasmas, Romanian Journal of Physics, submitted 2017.
- [18] Vlad M., Spineanu F., Combined effects of hidden and polarization drifts on impurity transport in tokamak plasmas, JET pinboard, to be submitted for publication.
- [19] Vlad M., Spineanu F., Hidden drifts in turbulence, JET pinboard, to be submitted for publication.
- [20] M. Vlad, F. Spineanu, 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.
- [21] Kazakov, Y.O., Ongena, J., Wright, J.C., Wukitch, S.J., Lerche, E., Mantsinen, M.J., Van Eester, D., Craciunescu, T., Kiptily, V.G., Lin, Y., Nocente, M., Nabais, F., Nave, M.F.F., Baranov, Y., Bielecki, J., Bilato, R., Bobkov, V., Cromb  , K., Czarnecka, A., Faustin, J.M., Felton, R., Fitzgerald, M., Gallart, D., Giacomelli, L., Golfinopoulos, T., Hubbard, A.E., Jacquet, Ph., Johnson, T., Lennholm, M., Loarer, T., Porkolab, M., Sharapov, S.E., Valcarcel, D., Van Schoor, M., Weisen, H., Marmar, E.S., Baek, S.G., Barnard, H., Bonoli, P., Brunner, D., Candy, J., Canik, J., Churchill, R.M., Czegler, I., Dekow, G., Delgado-Aparicio, L., Diallo, A., Edlund, E., Ennever, P., Faust, I., Fiore, C., Gao, C., Golfinopoulos, T., Greenwald, M., Hartwig, Z.S., Holland, C., Hubbard, A.E., Hughes, J.W., Hutchinson, I.H., Irby, J., LaBombard, B., Lin, Y., Lipschultz, B., Loarte, A., Mumgaard, R., Parker, R.R., Porkolab, M., Reinke, M.L., Rice, J.E., Scott, S., Shiraiwa, S., Snyder, P., Sorbom, B., Terry, D., Terry, J.L., Theiler, C., Vieira, R., Walk, J.R., Wallace, G.M., White, A., Whyte, D., Wolfe, S.M., Wright, G.M., Wright, J., Wukitch, S.J., Xu, P., Efficient generation of energetic ions in multi-ion plasmas by radio-frequency heating, Nature Physics, (2017) 13 (10), pp. 973-978.
- [22] T. Craciunescu, A. Murari, Geodesic distance on Gaussian manifolds for the robust identification of chaotic systems, Nonlinear Dynamics 86—1 (2016) 677–693.
- [23] F. Spineanu and M. Vlad, Effect of density changes on tokamak plasma confinement, electronic preprint <http://arxiv.org/pdf/1502.06093.pdf> (submitted)
- [24] A.Murari, T.Craciunescu, E.Peluso, M.Gelfusa, M.Lungaroni, L.Garzotti, D.Frigione, P.Gaudio, How to Assess the Efficiency of Synchronization Experiments in Tokamaks, submitted to Nuclear Fusion.
- [25] S.E.Sharapov , T.Hellsten , V.G.Kiptily , T.Craciunescu , J.Eriksson , M.Fitzgerald , J.-B.Girardo , V.Goloborod'ko , C.Hellesen , A.Hjalmarsson , T.Johnson , Y.Kazakov , T.Koskela , M.Mantsinen , I.Monakhov , F.Nabais, M.Nocente, C. Perez von Thun, F.Rimini, M.Santala , M.Schneider , M.Tardocchi, M.Tsalas, V.Yavorskij, V.Zoita, Fusion product studies via fast ion D-D and D- 3He fusion on JET, submitted to Nuclear Fusion.
- [26] J.C. Flanagan, M. Sertoli, M. Bacharis, G. F. Matthews, P. C. de Vries, A. Widdowson, I. H. Coffey, G. Arnoux, B. Sieglin, S. Brezinsek, J.W. Coenen, S. Marsen, T. Craciunescu, A. Murari, D. Harting, A. Cackett, E. Hodille, Characterising dust in JET with the newITER-like wall, Plasma Phys. Control. Fusion 57 (2015) 014037 (11pp), doi:10.1088/0741-3335/57/1/014037.

- [27] T. Craciunescu, A. Murari, M. Gelfusa, I. Tiseanu, V. Zoita, Overview of image processing tools to extract physical information from JET videos, *Plasma Phys. Control. Fusion* 56 (2014) 114006 (13pp), doi:10.1088/0741-3335/56/11/114006.
- [28] T. Craciunescu, A. Murari, B. Sieglin, G. Matthews, An original method for spot detection and analysis for large surveys of videos in JET , *IEEE Trans. Plasma Sci.* 42 (2014) 1358–66, doi: 10.1109/TPS.2014.2311463.
- [29] 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.
- [30] F. Spineanu, M. Vlad, A MHD invariant with effects on the confinement regimes in Tokamak, *Nuclear Fusion* 56 (2016) 092005
- 

### Conferinte

- [1] M.Gelfusa, T.Craciunescu, E.Peluso , L.Giacomelli, V.Kiptily, C.Reux, A.Murari, A Maximum Likelihood Tomographic Method applied to JET Hard X-ray Emission during the Current Quench, presented at the virtual conference 31st Symposium on Fusion Technology (SOFT 2020).
- [2] V. Kiptily, Ye.O.Kazakov, M.Nocente, J.Ongena, M.Dreval, T.Craciunescu, M.Fitzgerald,L.Giacomelli, V.Goloborodko, D. Rigamonti, A.V. Shevelev, J.Garcia,H.J.C.Oliver, S.E.Sharapov, Z.Stancar, H. Weisen, Measurements of energetic ions in JET D-3Heplasmas with the 3-ion RF heating scenario, 24th ITPA Energetic Particle Physics TG Meeting, 12th October 2020 - 16th October 2020.
- [3] V. Kiptily, A E Shevelev, V Goloborodko, T Craciunescu, E M Khilkevitch, M Kocan, I Lengar, I A Polunovsky, K Schoepf, S Soare, E Veschchev, V Yavorskij, V L Zoita, GRAM: γ-ray monitor of lost α-particles in fusion reactor, 24th ITPA Energetic Particle Physics TG Meeting, 12th October 2020 - 16th October 2020.
- [4] Ye.O.Kazakov, M.Nocente, J.Ongena, M.Dreval, T.Craciunescu, M.Fitzgerald,L.Giacomelli3, V.Goloborodko, D. Rigamonti, A.V. Shevelev, J.Garcia,H.J.C.Oliver, S.E.Sharapov, Z.Stancar, H. Weisen, Measurements of energetic ions in JET D-3Heplasmas with the 3-ion RF heating scenario, 24th ITPA Energetic Particle Physics TG Meeting, 12th October 2020 - 16th October 2020.
- [5] T. Craciunescu, A. Murari, E. Peluso, M. Gelfusa, Causality Detection: An Overview of the Methodologies for Time Series Analysis, Third Technical Meeting on Fusion Data Processing, Validation and Analysis, IAEA Headquarters, Vienna, Austria, 27–31 May 2019.
- [6] T. Craciunescu, A. Murari, M. Gelfusa, Characterisation of Interconnected Dynamical Systems by Complex Networks, International Conference on Non Linear Analysis and Modeling: Theory and Applications CHAOS 2019, !8-21 June 2019, Chania, Greece.
- [7] T. Craciunescu, A. Murari, M. Gelfusa, E. Peluso, The Analysis of Time Series Causality Based on Complex Networks, 6th International conference on Time Series and Forecasting ITISE 2019, 25th-27th, Granada, Spain.
- [8] E. Peluso1 , T. Craciunescu2 , A. Murari3 , M. Gelfusa1 , E. Lerche4,5, L. Garzotti5 , M. Lungaroni, The Concept of Causality Horizon and Its Application to Synchronization Experiment, Third Technical Meeting on Fusion Data Processing, Validation and Analysis, IAEA Headquarters, Vienna, Austria, 27–31 May 2019
- [9] Ye.O. Kazakov, M. Nocente, J. Ongena, H. Weisen, Y. Baranov, T. Craciunescu , R. Dumont, J. Eriksson, L. Giacomelli, V.G. Kiptily, K. Kirov, Ya.I. Kolesnichenko, M.J. Mantsinen, L. Meneses, M.F.F. Nave, M. Salewski, S.E. Sharapov, Z. Stancar, J. Varje, Efficient generation of energetic passing ions with the 3-ion ICRH+NBI synergetic scenario in H-D plasmas on JET-ILW, 6th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems - Theory of Plasma Instabilities (EPPI2019), 3-6 Sept. 2019, Shizuoka, Japan.
- [10] M.J. Mantsinen, Ye. O. Kazakov , R. Bilato, V. Bobkov, T. Craciunescu, D. Gallart, L. Giacomelli, A. Kappatou, M. Nocente, M. Weiland, Modelling of three-ion ICRF schemes with PION, 46th Plasma Physics Conference, 8-12 July 2019, Milan, Italy.
- [11] T. Craciunescu, E. Peluso, A. Murari, M. Gelfusa, A New Approach to Bolometric Tomography in Tokamaks, 2018 International Symposium on Circuits and Systems, 27-30 May 2018, Florence, Italy.
- [12] T. Craciunescu, V. Kiptily, A. Murari, A. Fernandes, J. Bielcki, Gamma-ray Imaging of Fusion Plasmas, ICFDT5 - 5th International Conference on Frontier in Diagnostic Technologies, 3-5 October 2018, Frascati, Italy.

- [13] [1] Yevgen Kazakov, J. Ongena, D. Van Eester, R. Bilato, T. Craciunescu, R. Dumont, V. Kiptily, E. Lerche, M. Mantsinen, A. Messiaen, M. Nocente, S. Sharapov, J. Wright, S. Wukitch, Applications of Three-Ion ICRF Scenarios for Full-Field ITER Operation, Theory of fusion plasmas - Joint Varenna-Lausanne International Workshop, Varenna, Italy, Villa Monastero, Varenna, Italy August 29 – September 2, 2016.
- [14] Y. Kazakov ,S. Wukitch, J. Wright, E. Edlund, Y. Lin, M. Porkolab, E.F. Jaeger, J. Ongena, E. Lerche, D. Van Eester, M. Nocente, V. Kiptily, T. Craciunescu, S. Sharapov, Y. Baranov, J. Bielecki, R. Bilato, V. Bobkov, A. Cardinali, C. Castaldo, K. Cromb  , A. Czarnecka, R. Dumont, P. Dumortier, F. Durodie, J. Eriksson, J. Faustin, M. Fitzgerald, D. Gallart, L. Giacomelli, J. Graves, Ph. Jacquet, N. Krawczy, M. Lennholm, T. Loarer, M. Mantsinen, A. Messiaen, I. Monakhov, F. Nave, T. Johnson, D. Valcarcel, H. Weisen, M. Schneider, Plasma heating and generation of energetic ions with novel three-ion ICRF scenarios on Alcator C-Mod and JET tokamak facilities, 58th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, San Jose, California, USA October 31 - November 4, 2016.
- [15] S.E.Sharapov, T.Hellsten, V.G.Kiptily, T.Craciunescu, J.Eriksson, M.Fitzgerald, J.-B.Girardo, V.Goloborod'ko, A.Hjalmarsson, A.S.Jacobsen, T.Johnson, Y.Kazakov, T.Koskela, M.Mantsinen, I.Monakhov, F.Nabais, M.Nocente, C. Perez von Thun, F.Rimini, M.Salewski, M.Santala, M.Schneider, M.Tardocchi, M.Tsalas, V.Yavorskij, V.Zoita, Fast Ion D-D and D-3He Fusion on JET, , Fourteenth IAEA Technical Meeting (TM) on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems, 01 - 04 September, 2015 IAEA Headquarters, Vienna, Austria
- [16] F. Spineanu and 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
- [17] M. Vlad and 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.
- [18] T. Craciunescu, A. Murari, M. Gelfusa, I. Tiseanu, V. Zoita, Advanced Methods for Image Registration Applied to JET Videos, 28th Symposium on Fusion Technology (SOFT 2014), San Sebastián, Spain, from 29 Sept.- 3rd Oct. 2014.

**Persoane de contact:** T. Craciunescu ([teddy.craciunescu@gmail.com](mailto:teddy.craciunescu@gmail.com)), M. Vlad ([madalina.olimpia.vlad@gmail.com](mailto:madalina.olimpia.vlad@gmail.com)), F. Spineanu ([florin.spineanu@gmail.com](mailto:florin.spineanu@gmail.com)), I.G. Miron ([igmiron@infim.ro](mailto:igmiron@infim.ro))

---

## Determinarea emisivit  ii la 4   m a probelor de CFC acoperite cu straturi de W

Emisivitatea este raportul dintre intensitatea radiatiei emisa de suprafata de interes si cea data de corpul negru dupa extragerea fondului, cand ambele sunt la aceeasi temperatura. Utilizarea unei valori adecvate a acestei marimi este foarte importanta pentru masurarea corecta de catre sistemele de diagnoza a temperaturii primului perete in cazul echipamentelor de fuziune. In cadrul proiectului a fost elaborat un concept si a fost construit un experiment privind determinarea emisivit  ii depunerilor de wolfram prin experimente realizate in afara reactorului. Deoarece peretele de tip ITER (ILW) de la JET contine aproximativ 1300 de placi de CFC (Carbon Fiber Composite) acoperite cu straturi de W de 10   m si 20   m determinarea emisivit  ii pentru aceste straturi este importanta pentru interpretarea rezultatelor asociate cu temperatura suprafetelor obtinute in timpul campaniilor JET.

## Obiective:

Determinarea emisivitatii la 4  $\mu\text{m}$  a straturilor de W depuse pe substrat de CFC (Carbon Fibre Composite)

#### **Etape si activitati:**

In cadrul proiectului au fost prevazute urmatoarele activitati:

- Achizitionarea componentelor si realizarea montajului experimental de masurare a emisivitatii
- Dezvoltarea programului software pentru masurarea emisivitatii la 4  $\mu\text{m}$
- Masurarea emisivitatii la 4  $\mu\text{m}$  pentru acoperirile de W de 10  $\mu\text{m}$  si 20  $\mu\text{m}$  depuse pe diverse materiale substrat; determinarea emisivitatii pentru W si Be masiv
- Determinarea evolutiei emisivitatii in functie de temperatura

**Parteneri externi: JET Culham Science Center, Marea Britanie**

#### **Rezultate obtinute:**

In cadrul proiectului a fost realizat, intr-o prima faza montajul experimental de masurare a emisivitatii la 4  $\mu\text{m}$ . Montajul experimental a inclus atat sistemul optic de achizitie a radiatiei emise cat si partea mecanica necesara deplasarii opticii de masura. Pentru masurarea intensitatii radiatiei emise s-a utilizat un detector IR (PDA10JT HgCdTe) racit la -30 0C furnizat de firma Thorlabs. Optica de infraroșu a inclus pe langa detector, o lentila din CaF<sub>2</sub>, un filtru pentru lungimea de unda  $4 \pm 0.25 \mu\text{m}$ , sistemul de focalizare, un chopper si fereastra de safir ( $\phi 65 \times 5 \text{ mm}$ ). Sistemul optic a fost montat pe un suport care la randul lui a fost fixat pe o masuta X-Y comandata de doua motoare pas cu pas. Experimentele au vizat in principal determinarea emisivitatii straturilor de W de 10  $\mu\text{m}$  si 20  $\mu\text{m}$  depuse pe elemente din CFC (Carbon Fibre Composite) si FGG (Fine Grain Grafite). Inregistrarea semnalului de la detectorul IR precum si comanda motoarelor pas cu pas au fost integrate intr-o aplicatie MATLAB dezvoltata special pentru masurarea emisivitatii. Determinarile de emisivitate s-au facut intr-o plaja de temperatura cuprinsa intre 4000 C si 12000 C.

In cazul experimentelor nu s-a constatat o influenta semnificativa a temperaturii asupra valorilor emisivitatii, insa emisivitatea straturilor de W depuse pe CFC este influentata semnificativ de structura poroasa a CFC-ului, fapt care conduce la o dispersie mare a valorilor. Acest fenomen nu apare in cazul stratului de W depus pe proba de grafit cu graanti fini. In cazul straturilor de W de 10  $\mu\text{m}$  depuse pe CFC valorile de emisivitate masurate la 700 0C au indicat valori de 0.1,8 in timp ce straturile de 20  $\mu\text{m}$  au indicat valori de 0.23. In cazul straturilor de W de 10  $\mu\text{m}$  depuse pe FGG emisivitatea, la aceeasi temperatura (700 0C), a fost de 0.147. Pentru W masiv emisivitatea a fost de 0.10 iar pentru Be, emisivitatea la aceeasi temperatura a fost de 0.28.

#### **Persoane de contact:**

E. Grigore ([edigrig@infim.ro](mailto:edigrig@infim.ro)), C. Ruset ([ruset@infim.ro](mailto:ruset@infim.ro)).

---

## **Contributii la intelegerarea comportarii specifice a plasmei JET in conditiile determinate de noul perete ILW si dezvoltarea de metode de analiza si interpretare a datelor experimentale**

Scopul general al proiectului este sa aduca o contributie la intelegerarea comportarii diferite a plasmei JET dupa instalarea peretelui de tip ITER si sa dezvolte metode de analiza si de interpretare a experimentelor. Proiectul abordeaza doua aspecte importante: acumularea impuritatilor de W in plasma si tehnici de atenuare a modurilor localizate la marginea plasmei (ELM).

Obiective:

1. Analiza detaliata a transportului impuritatilor grele in plasma turbulentă. Noutatea abordarii constă în includerea unui concept nou: drifturile ascunse. Importanța mecanismului de transport produs de drifturile ascunse va fi evaluată în cadrul unui model complex care include driftul de polarizare, ciocnirile ionilor, miscarea lor paralela și rotația plasmei. Scopul acestor cercetări este determinarea regimurilor de transport ale impuritatilor de W în modurile L și H (confinare slabă și înaltă) și identificarea mecanismelor de impiedicare a acumularii lor în centrul plasmei. Se va dezvolta un cod pentru determinarea coeficientilor de transport în funcție de caracteristicile turbulentei. Acesta va deveni un instrument de analiză a datelor experimentale.
2. Determinarea relațiilor cauzale în analiza seriilor temporale. Aceasta este o problemă dificilă mai ales în cazul sistemelor complexe neliniare afectate de un nivel semnificativ de zgomot. O nouă abordare pentru analiza acestui tip de sisteme este propusă în cadrul proiectului. Ea se bazează pe un nou concept de distanță din geometria informațională. Metode bazate pe i) analiza topologică a recurrentelor, un instrument puternic pentru studiul proprietăților sistemelor complexe și evenuale haotice, ii) funcția de verosimilitate a sincronizării proceselor și iii) inferența relațiilor cauzale pe baza modelelor cu ecuații structurale vor fi de asemenea dezvoltate în cadrul proiectului pentru analiza seriilor temporale experimentale de la JET iv) dezvoltarea unei metode de determinare a relației cauzale între seriile temporale bazate pe utilizarea retelelor complexe.
3. Pentru a putea măsura efectul izotopilor asupra evoluției perturbatiilor neoclasicice de tip NTM precum și pentru a distinge între diferite regimuri izotopice ale plasmei, o nouă abordare este considerată pentru modelul nostru tridimensional, cvasi-analitic, dinamic și codul numeric aferente ce descriu evoluția NTM: modelarea termenului de bootstrap pornind de la perturbatia functiei de distributie a particulelor, deja determinata. Termenul de bootstrap va fi in acord cu termenul delta-prime analitic, obtinut deja.

### **Obiectivul 1**

- *Dezvoltarea unui cod pentru determinarea coeficientilor de transport folosind DTM și studiul efectului driftului de polarizare. Validarea importanței efectului driftului de polarizare în prezența altor procese ce depind de masa ionilor*

Primul stadiu al Obiectivului 1 constă din evaluarea efectelor driftului de polarizare. A fost dezvoltat un model complex care include driftul ExB cu o descriere realistă a spectrului turbulentei, miscarea paralela, viteza diamagnetica și drifturile magnetice. Am dezvoltat un cod Fortran bazat metoda semi-analitică DTM în varianta rapidă pentru determinarea proprietăților transportului turbulent al impurităților grele. Am arătat că driftul de polarizare determină efecte neliniare complexe care constau într-o creștere semnificativă a coeficientului de difuzie (pană la dublare) și în generarea unui drift mediu radial. Condiția pentru apariția acestor efecte este existența capturii vorticale a triectoriilor care este specifică transportului neliniar. În cazul transportului quasi-liniar, influența driftului de polarizare este neglijabilă chiar și pentru ioni cu mase foarte mari cum este W. Importanța driftului de polarizare pentru transportul ionilor W este determinată de tipul de transport. Am dezvoltat un studiu complex care are ca scop înțelegerea acestei probleme fundamentale. Primele rezultate arată că evoluția turbulentei de drift poate conduce la ambele tipuri de transport în funcție de valoarea parametrului ce apare în rata de creștere.

Determinarea proprietăților seriilor temporale și eventuala identificare a caracterului lor haotic se poate face prin diverse metode care implică definirea și utilizarea unei distanțe. Metrica adoptată poate avea o influență semnificativă asupra rezultatelor, în special în cazul în care datele experimentale sunt afectate de zgromot. A fost propusă adoptarea unei metriki care a fost dezvoltată special pentru tratarea datelor experimentale afectate de zgromot Gaussian, anume distanța geodesică pe varietăți Gaussiene (DGVG). O serie cuprinzătoare de teste numerice prezentate aici dovedesc faptul că utilizarea DGVG produce rezultate superioare cazului în care se folosește distanța Euclidiană (abordarea uzuale în majoritatea aplicatiilor). Rezultatele sunt importante pentru analiza seriilor temporale măsurate în tokamak în vederea determinării sincronizării unor evenimente precum injectarea de pellet-uri pentru controlul instabilităților ELM sau controlul fenomenelor de relaxare de tip sawtooth prin modularea ICRH.

- *Efectul accelerării paralele și a rotației toroidale asupra transportului impurităților grele în plasme turbulente: simulații numerice directe*

Dinamica ionilor grei într-o plasma turbulentă, în prezența accelerării paralele și a rotației poloidale, este caracterizată de un flux radial și o creștere a coeficientilor de difuzie. Aceste efecte pot fi înțelese prin intermediul conceptului de "drifturi ascunse" care sunt mișcări radiale quasi-coerente, simetric distribuite. Rotația poloidală și accelerarea paralelă perturbă aceste drifturi în mod asimetric rezultând o viteză efectivă radială medie a ionilor și o modificare a difuziei. Aceasta fenomenologie este surprinsă printr-un model de transport de tip particule-test. Modelul este analizat statistic în două etape: cu ajutorul metodei semi-analitice a triectoriilor de decorelare (DTM) și cu ajutorul metodei simulărilor numerice directe (DNS). Metoda DNS confirmă rezultatele calitative ale DTM, oferindu-le totodată aspect cantitativ. Folosind cele două metode în corelație cu modelul de transport, am analizat numeric dependența coeficientului de difuzie și a vitezei radiale medii de principali parametri: viteză poloidală, amplitudinea turbulentei, lungimi de corelație, tempi de corelație, sarcina efectiva a impurităților. Estimările obținute ajută la determinarea condițiilor de acumulare a impurităților în centrul plasmei tokamak și, implicit, a condițiilor de curățare a plasmei.

Principalele obiective ale acestei etape au fost:

- Dezvoltarea unui model de transport capabil să suprindă interacția dintre transportul turbulent și accelerarea paralelă a impurităților grele în prezența unei viteze poloidale.
- Dezvoltarea de noi metode cu convergență imbuantată de reprezentare a campurilor stocastice.
- Dezvoltarea de coduri numerice care să implementeze ecuațiile modelului de transport
- 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

### Rezultate obtinute:

In prima etapa a proiectului am construit o noua metoda generala de reprezentare a campurilor stocastice. Metoda se dovedeste a fi versatila si a da acces la mai multe tipuri de reprezentari particulare. O comparatie a ratei de convergență catre Gausianitate a fiecarei metode (FFC, FRD, FRC,BFC,BRD,BRC) este reprezentata in figura de mai jos (fig.1). Aceste rezultate sugereaza ca metoda cu cea mai rapida convergență este metoda FRD care, in practica se constituie in expansiuni de tipul:

$$\phi(x) = L_k^{1/2} \sum_i \sqrt{S(k_i)} \sin(k_i x + \frac{\pi}{4} \zeta_i)$$

In etapa urmatoare am folosit metoda FRD pentru a construi coduri numerice rapide care sa simuleze modelul de transport peste un ansamblu statistic. Principalele rezultate referitoare la dependenta coeficientilor de difuzie de parametrii modelului pot fi vazute in figurile de mai jos.

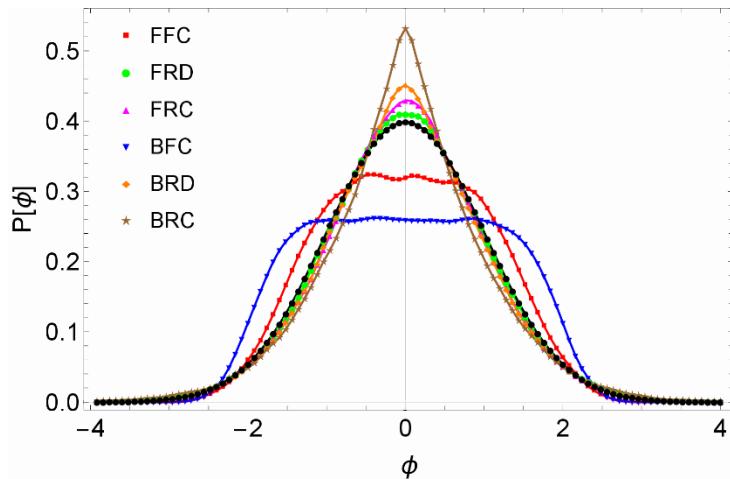


Fig 1: Distributia campurilor stocastice generate cu diverse metode de reprezentare

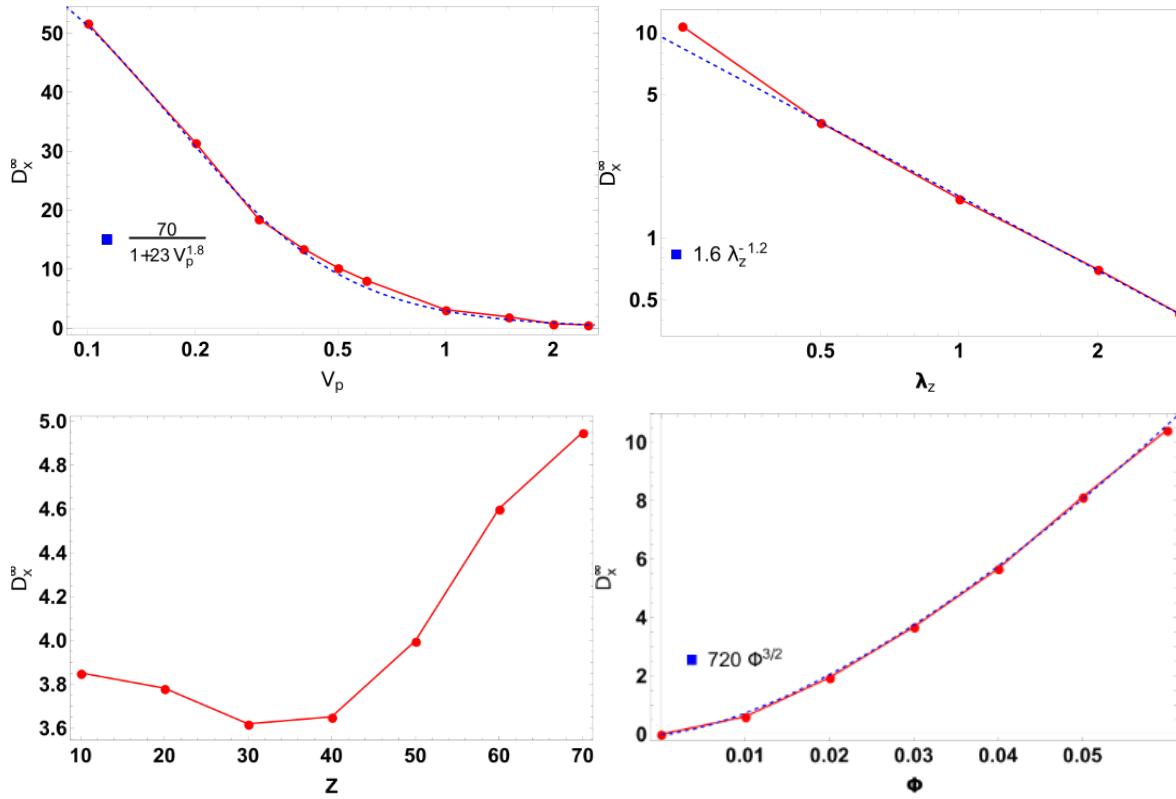


Fig.2 : Dependenta difuziei asimptotice radiale de principali parametri ai modelului (viteza poloidală, lungime de corelație paralela, sarcina efectiva a impuritatilor si amplitudinea turbulentei)

In concluzie, efectul acceleratiei parallele asupra transportului turbulent al ionilor grei a fost studiat cu ajutorul metodelor DTM si DNS. Ambele analize au indicat generarea unui pinch radial. Mecanismul fizic din spatele acestui pinch este oferit de interacția dintre miscarea paralela cu HD-urile. Acestea sunt un tip special de miscari radiale quasi-coerente care apar datorita vitezei poloidale. De asemenea, am arătat că influența mișcării parallele asupra transportului prin timpul de decorelare paralel  $\tau_z^\infty$  este mult mai puternică pentru impuritățile grele decât pentru ionii de plasmă. Fluctuațiile vitezei parallele sunt foarte mari pentru ionii W și determină un timp de decorelare paralel mai mic, care depinde de parametrii mișcării parallele  $\tau_z^\infty$  (W, Z,  $\Phi$ ,  $\lambda_z$ ). Acest proces complex de decorelare influențează atât viteza de pinch, cât și coeficientul de difuzie. conduce la un regim de difuzie neobișnuit de tip super-Bohm și modifică legile de scalare ale  $V_x^\infty$  și  $D_x^\infty$ . Ciupirea este semnificativă pentru impuritățile Z ridicate și neglijabilă pentru ionii plasmei.

## Publicații:

### Articole:

- [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
- [3] 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.

- [4] Vlad M, Spineanu F, Randon 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.
- [5] A. Croitoru, F. Spineanu, M. Vlad, On secondary contributions to the formation of an internal transport barrier, Computational Plasma Physics Conference, 20-22 November 2017, York, UK
- [6] A. Croitoru, Transport of cold ions in tokamak microturbulence, 17th International Conference on Plasma Physics and Applications, Magurele, Romania, 15-20 June, 2017
- [7] Croitoru A. M., Effects of magnetic drifts on ion transport in tokamak turbulent plasmas, Romanian Journal of Physics, submitted 2017.
- [8] Vlad M., Spineanu F., Combined effects of hidden and polarization drifts on impurity transport in tokamak plasmas, JET pinboard, to be submitted for publication.
- [9] Vlad M., Spineanu F., Hidden drifts in turbulence, JET pinboard, to be submitted for publication.
- [10] M. Vlad, F. Spineanu, Randon 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.

## 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).
- [3] 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.
- [4] M. Vlad, F. Spineanu, Quasi-coherent aspects in turbulent transport, Europhysics Conference on Statistical Physics (SigmaPhi2017), Corfu, Greece, 10-15 July 2017
- [5] F. Spineanu, M. Vlad, Singular states of the 2D Euler fluid and of the density of eigenvalues of random matrices, Collisionless Boltzmann (Vlasov) equation and modeling of self-gravitating systems and plasmas, CIRM, Luminy October 30 – November 3, 2017
- [6] F. Spineanu, M. Vlad, Clusters of helicity and stochastic linking number generation in plasma, Europhysics Conference on Statistical Physics (SigmaPhi2017), Corfu, Greece, 10-15 July 2017
- [7] F. Spineanu, M. Vlad, A. Croitoru, Formation of an Internal Transport Barrier due to neutral beam injection during current ramp-up in tokamak, 17th International Conference on Plasma Physics and Applications, Magurele, Romania, 15-20 June, 2017.

## Persoane de contact:

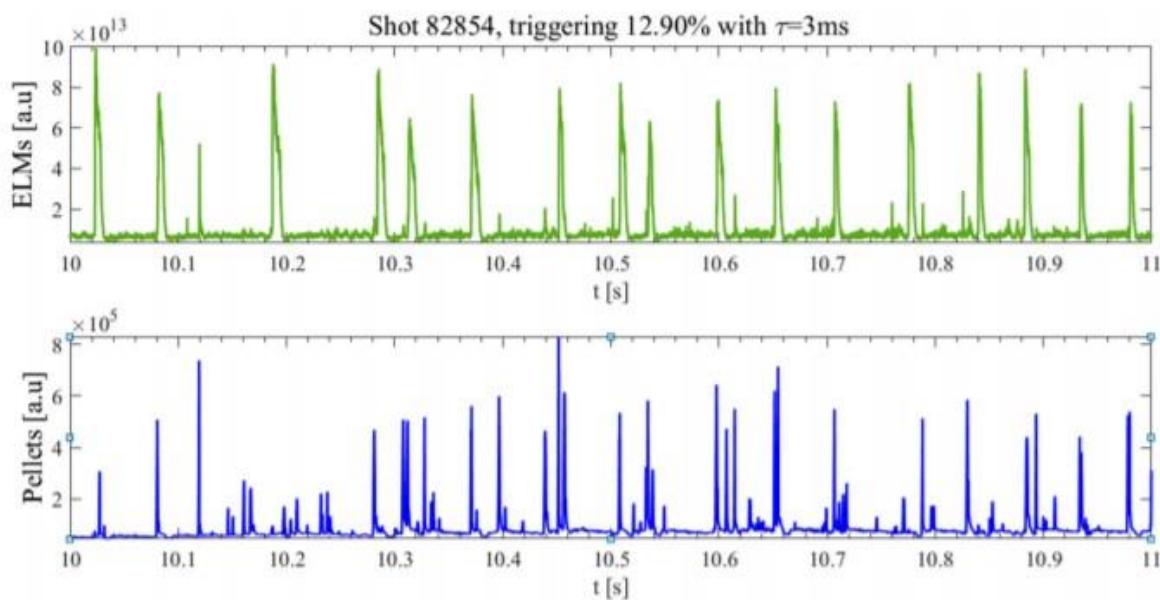
Dragos Iustin Palade ([dragos.palade@inflpr.ro](mailto:dragos.palade@inflpr.ro)), Andreea Mihaela Croitoru ([andreea.croitoru@inflpr.ro](mailto:andreea.croitoru@inflpr.ro)), Madalina Vlad ([madalina.vlad@inflpr.ro](mailto:madalina.vlad@inflpr.ro)), Florin Spineanu ([florin.spineanu@inflpr.com](mailto:florin.spineanu@inflpr.com))

## Obiectivul 2

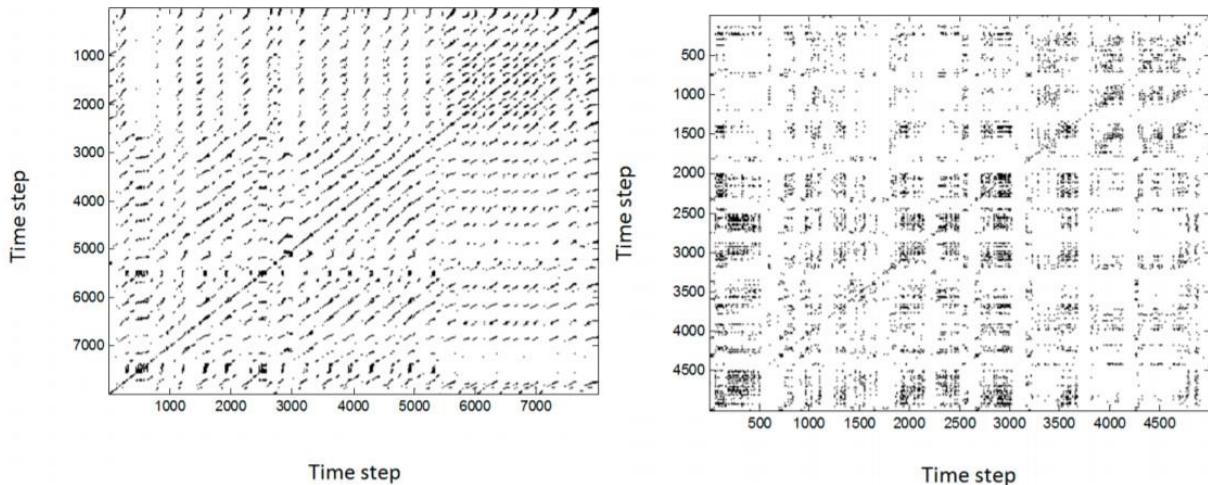
- Utilizarea unei metrii Gaussiane pentru identificarea sistemelor haotice
- Evaluarea eficientei sincronizarii experimentelor in tokamak pe baza metodelor RP si SL
- Inferenta cauzalitatii intre serii de timp experimentale la JET pe baza modelelor structurale.
- 

### Rezultate obtinute:

Doua metode de analiza a sincronizarii seriilor temporale – metoda diagramelor de recurrenta (Recurrence Plots (RP)) si metoda similitudinii sincronizarii (Synchronisation Likelihood (SL)) – in combinatie cu o metrica care a fost dezvoltata special pentru tratarea datelor experimentale afectate de zgomot Gaussian, anume distanta geodesica pe varietati Gaussiene (DGVG), au fost utilizate pentru determinarea relatiilor cauzale intre serii temporale relevante pentru diagnostic plasmei la JET. Aplicarea metricii DGVG, in combinatie cu diagramele de recurrenta s-a dovedit extrem de utila pentru analiza unor cazuri in care zgomotul in datele experimentale a atins un nivel semnificativ.



Semnalele Da signals indicand apartitia instabilitatilor de tip ELM (sus) si Semnalele Da indicand injectia unui pellet de deuteriu in plasma.



Diagramele de recurenta pentru un experiment dedicat controlarii instabilitatii de tip sawtooth prin modularea ICRH (stanga) si dedicat unui experiment de control al instabilitatilor de tip ELM prin injectia de pellet-uri (dreapta).

In instalatiile tokamak cu perete metallic metoda de incalzirea unei monoritati a ionilor de baza (ICRH – Ion Cyclotron Radiation Heating) joaca un rol foarte important. Una din aplicatiile recente de la JET este legata de controlul instabilitatilor de tip sawtooth prin modulatia ICRH, evitandu-se astfel aparitia ulterioara a unor instabilitati mult mai periculoase, anume NTM (Neoclassical Tearing Modes), si acumularea inerenta de impuritati. O dificultate majora a acestui tip de experiment este legata de evaluarea eficientei de sincronizare si a mecanismelor fizice aflate la baza acestor procese. A fost dezvoltata o metoda de analiza a sincronizarii seriilor temporale ce descriu evolutia instabilitatilor de tip sawtooth si respective ICRH pornind de la principiul vecinatatii spatiale a punctelor temporal successive din spatial fazelor, pentru procese legate causal. Aplicarea metodei pe date experimentale provenite de la JET, si comparatia cu alte doua metode, bazate pe principii diferite, arata ca metoda este capabila sa furnizeze rezultate robuste.

O noua metoda de analiza a cauzalitatii si sincronizarii seriilor temporale a fost dezvoltata in cadrul prezentului proiect. Performantele ei sunt evaluate pe baza datelor experimentale de la instalatia tokamak JET. Metoda porneste de la abordarea lui Lacasa (L. Lacasa et al., PNAS 2008 105-13 4972-4975) care propune realizarea unei mapari intre o serie temporală si o retea complexă pe baza reprezentarii seriei ca o succesiune de bare verticale. Privind aceasta reprezentare ca pe un peisaj, fiecarei bare verticale ii este asociat un nod in reteaua complexă, iar barele evrizontale care se vad' una pe alta sunt conectate. Din punct de vedere matematic două puncte  $(t_i, y_i)$  și  $(t_j, y_j)$  ale seriei temporale vor fi conectate dacă este indeplinita relația:

$$y_k < y_j + (y_j - y_i) \frac{t_j - t_k}{t_j - t_i} \quad (1)$$

Reteaua compusa rezultat este denumita retea de vizibilitate (visibility graph (VG)), VG mosteneste o parte din proprietatile seriei temporale care a generat-o. De exemplu o serie temporală este convertită

intr-o retea regulate, o serie aleatore intr-o retea aleatoare, etc. VG dezvaluie insa si proprietati care ar fi dificil de surprins in reprezentarea originala.

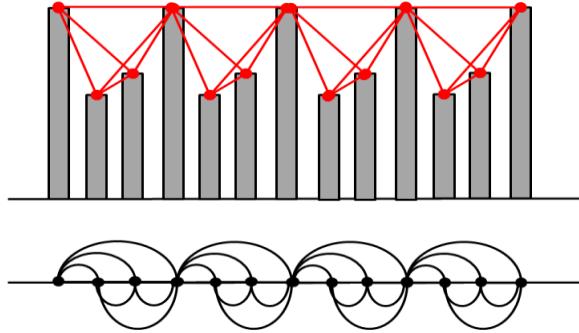


Figure 3 – Ilustrare a constructiei unei retele complexe dintr-o serie temporală

Ideea VG a fost recent extensa la perechi de serii temporale, afalate in posibile relatii de cauzalitate (S. Mehraban et al., EPL 2015, 103, 50011). Pentru o pereche de serii temporale  $\{x_i\}$  and  $\{y_i\}$ , in aceeasi reprezentare de bare vertical, reteaua complexa este construita pe criteriul vizibilitatii intre puncta ale serii temporale prin ‘peisajul’ creat de barele ce reprezinta cealalta serie temporală:

$$y_k \leq y_i + \frac{x_j - x_i}{j-i} (k - i), \quad i < \forall k < j$$

sau

$$y_k \geq y_i + \frac{x_j - x_i}{j-i} (k - i), \quad i < \forall k < j$$

Ideea noastra a constat in reprezentarea serii temporale prin intermdiuul unei matrici de adicenta modificate :

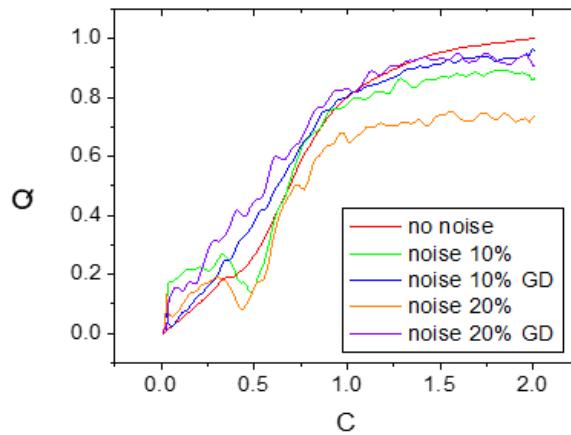
$$a_{ij}^w = \begin{cases} dist(y_i - y_j), & \text{daca una din ecuatiiile de mai sus e satisfacuta} \\ 0, & \text{altfel} \end{cases}$$

unde  $dist(y_i - y_j)$  este o distanta. Pentru a tine cont de existenta incertitudinilor statistice ce afecteaza inerent datele experimentele, pentru estimarea distantei  $dist$  utilizat ideea distanelor geodesice intre distributii de probabilitate. Datele experimentale  $x_1, x_2$  sunt considerate ca fiind insotite de o distributie de probabilitate Gaussiana  $p_1(x|\mu_1, \sigma_1)$  si respectiv  $p_2(x|\mu_2, \sigma_2)$ . Atunci distanta geodesica este: .

$$GDGM(p_1||p_2) = \sqrt{2} \ln \frac{1 + \delta}{1 - \delta} = 2\sqrt{2} \tanh^{-1} \delta, \quad \text{unde } \delta = \left[ \frac{(\mu_1 - \mu_2)^2 + 2(\sigma_1 - \sigma_2)^2}{(\mu_1 - \mu_2)^2 + 2(\sigma_1 + \sigma_2)^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

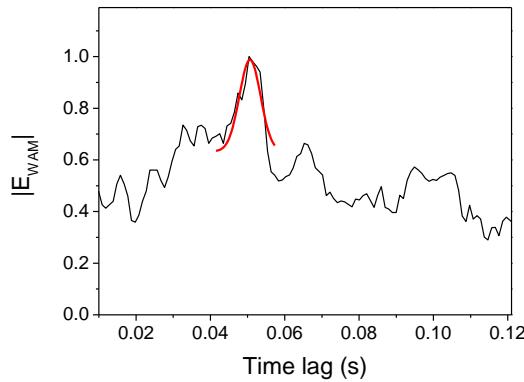
Este de asteptat ca o data cu cresterea cuplajului dintre seriile temporale complexitatea retelei sa scada. Pentru monitorizarea acestei evolutii a am propus calcularea entropiei Shannon pentru reprezentarea retelei complexe sub forma unei imagini. Metoda s-a dovedit a fi capabila sa produca rezultate de foarte buna calitate pentru serii temporale clasice generate numeric (Lorenz, Henon,

Rossler), un exemplu fiind prezentat in figura de mai jos. Metoda se dovedeste isi pastreaza eficienta si pentru nivele ale zgomotului de 10-20%.



*Evolutia cuplajului intre doua serii temporale Henon, calculat cu metoda propusa.*

Metoda a fost aplicata pentru evaluarea relatiei cauzale in experimente de pacing a instabilitatilor plasmei. Un exemplu ilustrativ este prezentat in figura de mai jos pentru cazul unui experiment de control al instabilitatilor de tip sawtooth cu ajutorul modulatiilor ICRH..



*Determinarea intervalului temporal in care modulatiile ICRH au un efect maxim in controlul disruptiilor de tip sawtooth (pulsul JET #89826).*

Metoda a fost comparata cu o serie de alte metode de evaluare a cauzalitatii intre serile temporale (transferul entropiei (TE), causalitate in formularea Granger (GR), diagrame de recurrenta (DR)) a caoror eficienta pentru analiza experimentelor de control al instabilitatilor in plasma a fost studiat anterior (Murari, A.; Craciunescu, T.; Peluso, E.; Gelfusa, M.; Lungaroni, M.; Garzotti, L.; Frigione, D.; Gaudio, P. How to assess the efficiency of synchronization experiments in Tokamaks. *Nucl. Fusion*

2016, 56, 076008), rezultatele fiind prezentate in tabelul de mai jos. Rezultatele obtinute cu metoda bazata pe retele complexe (RC) sunt redate in colona a treia in timp ce marja re valori obtinute cu celalalte metode este data in coloana a patra.

Numar puls JET	Regim	RC [ms]	TE, GR, DR [ms]
89822	L	50	[52,54]
89826	L	51	[52,54]
90005	H	70	[68,72]
90006	H	89	[85,95]

## Publicatii:

### Articole:

- [1] T. Craciunescu, A. Murari, M. Gelfusa, Methods to Investigate Synchronization between Time Series Relevant for Plasma Fusion Diagnostics, Entropy 2020, 22(7), 775.
- [2] E. Peluso, T. Craciunescu, A. Murari, A Refinement of Recurrence Analysis to Determine the Time Delay of Causality in Presence of External Perturbations, Entropy 2020, 22(8), 865
- [3] Craciunescu, T.; Murari, A.; Gelfusa, M. Improving Entropy Estimates of Complex Network Topology for the Characterization of Coupling in Dynamical Systems. Entropy 2018, 20, 891.
- [4] Murari, A., Craciunescu, T., Peluso, E., Lerche, E., Gelfusa, M., On efficiency and interpretation of sawteeth pacing with on-axis ICRH modulation in JET, (2017) Nuclear Fusion, 57 (12), art. no. 126057.
- [5] T. Craciunescu, A. Murari, Geodesic distance on Gaussian manifolds for the robust identification of chaotic systems, Nonlinear Dynamics 86—1 (2016) 677–693.
- [6] Murari, A., Craciunescu, T., Peluso, E., Lerche, E., Gelfusa, M., On efficiency and interpretation of sawteeth pacing with on-axis ICRH modulation in JET, Nuclear fusion (2017) 57 (12), art. no. 126057.
- [7] Craciunescu, T., Murari, A., Peluso, E., Gelfusa, M., Lungaroni, M., Gaudio, P., Complex networks for the analysis of the synchronization of time series relevant for plasma fusion diagnostics, DOI: 10.1109/ECCTD.2017.8093302 (2017) art. no. 8093302.
- [8] Murari, A., Craciunescu, T., Peluso, E., Gelfusa, M., Detection of causal relations in time series affected by noise in tokamaks using geodesic distance on gaussian manifolds, Entropy, (2017) 19 (10), art. no. 569.
- [9] Murari, A., Craciunescu, T., Peluso, E., Gelfusa, M., Lungaroni, M., Garzotti, L., Frigione, D., Gaudio, P., How to assess the efficiency of synchronization experiments in tokamaks, Nuclear Fusion, (2016) 56 (7), art. no. 076008.

## Conferinte:

- [10] T. Craciunescu, A. Murari, M. Gelfusa, Methods to Investigate Synchronization between Time Series Relevant for Plasma Fusion Diagnostics, Chaotic Modeling and Simulation International Conference CHAOS 2020 (virtual).

- [11] T. Craciunescu, A. Murari - The special session entitled "Identification and control of thermonuclear plasmas dynamics" has been organized at the Chaotic Modeling and Simulation International Conference CHAOS 2020 (virtual).
- [12] T. Craciunescu, E. Peluso, A. Murari, M. Gelfusa, A New Approach to Bolometric Tomography in Tokamaks, 2018 International Symposium on Circuits and Systems, 27-30 May 2018, Florence, Italy.
- [13] T. Craciunescu, V. Kiptily, A. Murari, A. Fernandes, J. Bielcki, Gamma-ray Imaging of Fusion Plasmas, ICFDT5 - 5th International Conference on Frontier in Diagnostic Technologies, 3-5 October 2018, Frascati, Italy.
- [14] T. Craciunescu, E. Peluso, A. Murari, M. Gelfusa, Maximum Likelihood Tomographic Method for the Analysis of Bolometric Measurements on JET, 30th edition of the Symposium on Fusion Technology (SOFT 2018), 16-21 Sept 2018, Giardini-Naxos, Italy.
- [15] Craciunescu, Murari, A., T., Peluso, E., Lerche, E., Gelfusa, M., Complex networks for the analysis of the synchronization of time series relevant for plasma fusion diagnostics, European Conference on Circuit Theory and Design, Special Session dedicated to Nuclear fusion Applications, Sept. 4-6, 2017, Catania, Italy.

#### **Persoane de contact:**

T. Craciunescu ([teddy.craciunescu@gmail.com](mailto:teddy.craciunescu@gmail.com)),

#### **Obiectivul 3**

##### **Modelarea curentului de bootstrap in regimuri colizionale diferite**

Un model 3D cvasi-analitic a fost propus si folosit pentru evaluarea perturbatiilor NTM neoclasice in tokamak-ul JET sau Asdex-Upgrade. Modelul e liniar si acopera evolutia perturbatiilor in tot spatiul: ecuatiile perturbate in plasma ideală, in vacuum si ecuatiile de circuit in structurile exterioare coloanei de plasma. Saltul perturbatiei peste insula magnetica asociata NTM joaca rolul unei ecuatii pe frontiera plasmei si introduce termenul de bootstrap in ecuatiile perturbate, in regimul saturat de evolutie a insulei. Intregul sistem de ecuatii a fost liniarizat si e tratat precum un sistem al micilor oscilatii in jurul starii de echilibru datorita existentei unei rate de crestere semnificative a perturbatiilor in raport cu rata de crestere a marimilor oferite de catre diagnostica (densitate, temperatura, etc) plasmei ce joaca rolul marimilor de echilibru in dinamica ecuatiilor perturbate din plasma. Am testat aceasta aproximatie pentru diverse descarcari in JET si AUG si, deloc surprinzator, rezultatele sunt bune. Finalmente aceasta aproximatie ne permite folosirea teoriei transformarii Laplace asupra ecuatiilor diferențiale perturbate, astfel incat sa putem obtine o solutie dinamica explicita. Aceste solutii NTM vor fi folosite in forma analitica a perturbatiei functiei de distributie a particulelor pe care am obtinut-o deja, pentru ca, in final, sa obtinem forma finala a curentului de bootstrap. Scopul nostru este de a masura influenta izotopilor asupra comportamentului NTM si acest lucru e posibil prin folosirea unui termen cinetic de bootstrap care e sensibil si poate distinge intre regimuri izotopice diferite. In mod uzual nu e posibila gasirea unei forme analitice generale pentru curentul de bootstrap datorita integralelor complicate dupa energia particulelor, prin urmare vom cauta sa gasim astfel de forme pentru diferite regimuri colizionale asociate cu curentul de bootstrap (banana,  $1/\nu$ , plateau). Va fi gasita cea mai buna forma in scopul calcularii unei

evolutii a latimii insulei magnetice NTM pentru a se potrivi in mod optim cu evolutia experimentala a insulei. Perturbatia campului magnetic e parametrizata astfel  $\mathbf{b} = \nabla \times \{[(1/B)\nabla\phi \times \mathbf{n} + \xi_{||}\mathbf{n}] \times \mathbf{B}\}$ , unde  $\mathbf{B}$  e campul magnetic,  $\mathbf{n} = \mathbf{B}/B$  si  $-\partial\phi/\partial t$  e potentialul electric scalar perturbat.

Am folosit coordonatele naturale de flux  $(r, \theta, \varphi)$  de tip Hamada. Termenul de bootstrap term presupune folosirea perturbatiei densitatii de curent de bootstrap  $\delta j_{BS}$  la nivelul insulei magnetice:

$$\frac{2\mu_0 r_s^2}{\tau_r} a_{BS} \frac{L_q}{B_{pol}} \delta j_{BS}$$

cu  $r_s$  coordonata radiala de flux unde NTM-ul se dezvolta,  $\tau_r$  timpul rezistiv,  $L_q = -q/q'$ ,  $B_{pol}$  campul magnetic poloidal,  $a_{BS}$  coeficientul de bootstrap si  $q$  factorul de securitate.  $\delta j_{BS}$  e calculat prin intermediul mediei de suprafata a marimii de mai jos de implica perturbatia functiei de distributie  $\delta f$ :

$$\delta j_{BS} = \langle \int d^3v v_{||} \delta f B \rangle$$

Am obtinut derivata functiei de distributie, folosind calea din Ref. [1]:

$$\begin{aligned} \delta f = & -\frac{f^0}{KTR_0 q B_{z0} (m - nq)} \sum_{m,n,l} \left\{ M v_{||}^2 [r(m - nq)(1 + O(\varepsilon)) \phi_s^{mn'}(t) \right. \\ & + ((2 - s)(m - nq) - ms) \phi_s^{mn}(t)] \\ & - \mu B (2 - s)(m - nq + O(\varepsilon)) \phi_s^{mn}(t) \} \exp[i(m\theta - n\phi)] \\ & + \frac{if^0}{KTrR_0 q^2 B_{z0}} \sum_{m,n,l} \frac{nv_{||}/R^2}{iv_k - n\Omega_\phi + l\omega_b - n\omega_D} \left\{ M v_{||}^2 \left[ iR \left( \sin \theta - \frac{r}{2R_0} \sin 2\theta \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. + \frac{a\varepsilon \partial \Delta_R}{r \partial \theta} \right) \phi_s^{mn'}(t) \right] \right. \\ & - m \left( \cos \theta + \frac{r}{2R_0} (3 - \cos 2\theta) + a\varepsilon \frac{\partial \Delta_R}{\partial r} \right) \phi_s^{mn}(t) \Big] \\ & + \mu B q^2 \left[ R_0 \left( m + \frac{ir}{R_0} \left( 1 - \frac{1}{q^2} \right) \sin \theta \right) \phi_s^{mn}(t) \right. \\ & \left. \left. + m \left( \cos \theta + \frac{r}{2R_0} \left( 3(1 + \cos 2\theta) + \frac{2n}{mq} (2 - s) \right) \right) \phi_s^{mn}(t) \right] \right\} \exp[i(m\theta - n\phi)] \end{aligned}$$

Am definit pe  $\mu$ ,  $M$ ,  $v_{||}$ ,  $E$ , and  $f^0$ , momentul magnetic al particulei, masa, viteza paralela la campul magnetic, energia si functia de distributie de echilibru (Maxwellian).  $K_B$  e constanta Boltzmann,  $T$  temperatura,  $R_0$  axa mare,  $B_{z0}$  campul magnetic toroidal de echilibru in axa magnetica si  $\varepsilon = r/R_0$  the inversul ratiei de aspect.  $s = rq'/q$ .  $m$ ,  $n$  si  $l$  sunt numerele armonice in expansiunea elicoidalala si de bounce.  $v_k \sim \nu E^{-3/2}$  e operatorul Krook colizional [3] si  $E$  energia particulei.  $\Omega_z$  e frecventa toroidalala de rotatie a plasmei si  $\omega_b \sim \sqrt{\Lambda E B}$  si  $\omega_D \sim \Lambda E B$  sunt frecvente

de bounce ale particulelor prinse in orbite banana si frecventa de precesie toroidală.  $\Lambda = 1/[1 + \varepsilon(2\kappa^2 - 1)]$  e un parametru de depinde de unghiul de aruncare a particulelor prinse in ,  $\kappa$ .  $\Delta_R = f(\Lambda_j)$  descrie frontiera plasmei  $\Lambda_j = \Delta\delta_{j1} + E\delta_{j3} + T\delta_{j2}$  (j=1,2,3 si  $\delta$  Kronecker delta), unde  $\Delta$ ,  $E$  and  $T$  sunt shiftul Shafranov, elipticitatea si triunghiularitatea.  $\phi_s^{mn}(t)$  este functia de flux perturbata NTM, pe care am obtinut-o deja [2]. Un calcul anevoios si lung duce la urmatoarea forma generala a curentului de bootstrap la colizionalitate scazuta:

$$\begin{aligned} \delta j_{BS} = & \sum_{m,n} \frac{B^2}{B_0^2} \left[ \tilde{\alpha}_1^{mn} \int_0^1 \left( 1 - \frac{\Lambda B}{B_{z0}} \right) \frac{d\kappa^2}{\Lambda} + \tilde{\alpha}_2^{mn} \int_0^1 \left( \frac{B}{B_{z0}} \right) d\kappa^2 \right] e^{i[m\theta - n\varphi]} \\ & + \sum_{m,n,l} \int_0^1 \frac{\sqrt{1 - \Lambda B/B_{z0}}}{l\Lambda^{3/2}} K(\kappa^2) \frac{B^2}{B_{z0}^2} [\tilde{\beta}_1^{mn}(1 - \Lambda B/B_{z0}) + \tilde{\beta}_2^{mn}\Lambda B/B_{z0}] \left\{ 2(K_B T)^3 \right. \\ & \quad \left. + (a_{ln} K_B T)^2 \frac{K^2(\kappa^2)}{\Lambda} \right. \\ & \quad \left. + a_{ln}^5 K_B T \frac{K^4(\kappa^2)}{\Lambda^2} - \frac{3}{4} (K_B T)^{5/2} a_{ln} \sqrt{\frac{\pi}{\Lambda}} K(\kappa^2) - \frac{1}{2} (K_B T)^{3/2} a_{ln}^3 \sqrt{\pi} \frac{K^3(\kappa^2)}{\Lambda^{3/2}} - \sqrt{K_B T} a_{ln}^5 \sqrt{\pi} \frac{K^5(\kappa^2)}{\Lambda^{5/2}} \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{2} a_{ln}^6 \frac{K^6(\kappa^2)}{\Lambda^3} e^{-a_{ln}^2 K^2(\kappa^2)/K_B T} \left[ 2\pi \operatorname{Erfi} \left( \frac{a_{ln}}{\sqrt{K_B T}} K(\kappa^2) \right) - 2 \operatorname{Ei} \left( \frac{a_{ln}^2}{K_B T} K^2(\kappa^2) \right) \right] \right\} d\kappa^2 e^{i[m\theta - n\varphi]} \end{aligned}$$

Integrarea e facuta dupa  $\kappa^2$ ,  $K(\kappa^2)$  e integrala eliptica de prim rang si  $\tilde{\alpha}_{1,2}^{mn}$ ,  $\tilde{\beta}_{1,2}^{mn}$  sunt expresii liniare obtinute analitic, functie de perturbatia de flux si derivata acesteia..  $a_{ln}$  e un parametru derivat analitic. Diverse regimuri colizionale pot fi studiate in functie de factorul de colizionalitate si de rezonanta dintre frecventa de rotatie a perturbatiei si frecventa de bounce sau tanzit a particulelor. In ultimul caz integrala ce implica derivarea termenului de bootstrap devine singulara. Integrala energiei, pentru o frecventa joasa a precesiei toroidale a particulei devine:

$$J_{5/2}^{ln} = \int_0^\infty E^{5/2} e^{-E/(K_B T)} \frac{dE}{iv_k - n\Omega_\phi - i\gamma_2^l \sqrt{\Lambda E B / B_{z0}}}$$

$\gamma_2^l$  e un parametru obtinut analitic. Integralele singulare de mai sus conduc la rezultate diferite in functie de regimul colizional ales. Cand nu exista rezonanta, intr-un regim in care frecventa de bounce e semnificativ mai mica decat frecventa de rotatie a plasmei, intr-un regim colizional inalt in care  $|v_k/(n\Omega_\phi)| \gg 1$ , integrala energiei devine  $J_{5/2}^{ln} = 24(K_B T)^5/v$ . Deoarece curentul de bootstrap e proportional cu  $1/v$  , se va numi regimul the  $1/v$ . Pe de alta parte, un regim colizional slab  $|v_k/(n\Omega_\phi)| \ll 1$  creste curentul de bootstrap la rezonanta astfel incat devine

$$J_{5/2}^{ln} = 2\pi i (n\Omega_\phi)^6 g^7(\kappa^2, \gamma_2^l) G_{45}^{32} \left( -i(n\Omega_\phi)^2 g^2(\kappa^2, \gamma_2^l)/(K_B T) \right|_{-3, -5/2, 0, -13/4, -11/4}^{-3, -5/2, -13/4, -11/4}$$

Deoarece integrala nu depinde de colizionalitate, regimul se numeste regim super-banana (SB-P).  $G_{45}^{32}$  e functia MeijerG si  $g(\kappa^2, \gamma_2^l)$  e un parametru obtinut analitic. Cand nu exista rezonanta

currentul de bootstrap se regaseste in formula generala a lui  $\delta j_{BS}$ . Evident  $\delta j_{BS}$  si  $J_{5/2}^{ln}$  sunt valabile pentru orice tip de constituent al plasmei izotopice, fiind suma tuturor contributiilor. Integralele corespunzatoare dupa  $\kappa^2$  sunt calculate fie numeric, fie analitic dar in anumite aproximatii depinzand de marimile diagnosticii experimentale folosite. Termenul de bootstrap depinde finalmente de perturbatiile de flux NTM  $\phi_s^{mn}$  si de derivatele lor radiale si arata o dependenta dinamica clara si explicita. Urmatorul pas il reprezinta testarea validitatii curentului de bootstrap dedus cinetic, folosindu-ne de diverse descarcari ce implica efectul izotopilor asupra NTM-urilor.

## Referinte

- [1] F.Porcelli, R. Stankiewicz and W. Kerner, Phys. Plasmas 1, 470 (1994).
- [2] I.G.Miron, "Modelling of seed magnetic island formation", P2.060, 43rd EPS Conference on Plasma Physics, July 4-8 2016, Leuven, Belgium.
- [3] J-K. Park, A.H.Boozer and J.E. Menard, Phys. Rev. Lett 102, 065002 (2009).

## Persoane de contact:

I.G. Miron ([igmiron@gmail.com](mailto:igmiron@gmail.com)),