

# 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 statueaza 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-tritiu) 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 intelegerea comportarii plasmei in diverse regimuri, in pregatirea viitoarelor experimente cu deuteriu-tritiu, 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 aduce competente in: diagnostic plasmei (spectrometrie gama, tomografie de emisie gama, neutron, HXR, bolometrie, imagistica cu camera ultra-rapide si imagistica de infra-roosu), 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-roosu. Au fost realizate masuratori de spectrometrie gamma si s-au realizat analize tomografice pentru determinarea distributiei emisivitatiei 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 peretii reactorului si metode de corectiei a rotatiei imaginilor pentru camerele video si infrarosiu 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 radial 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 (inclusiv 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 poloidala poate conduce la profile de curent cu minime centrale.

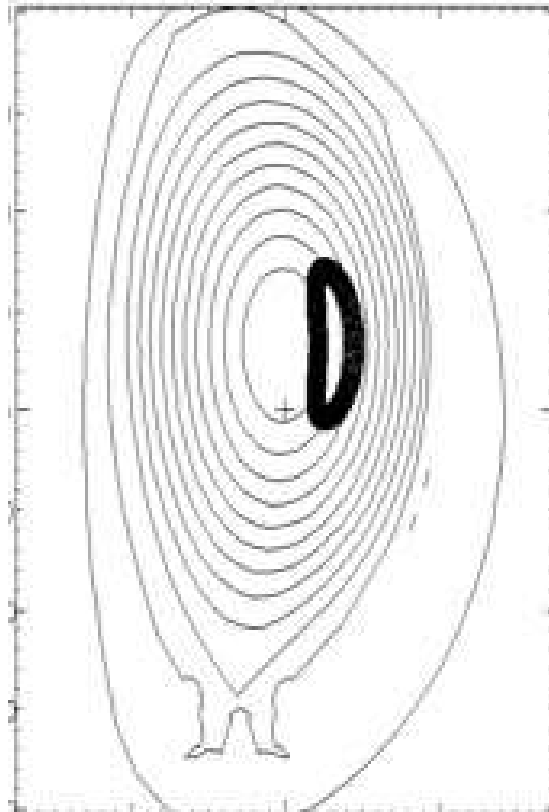
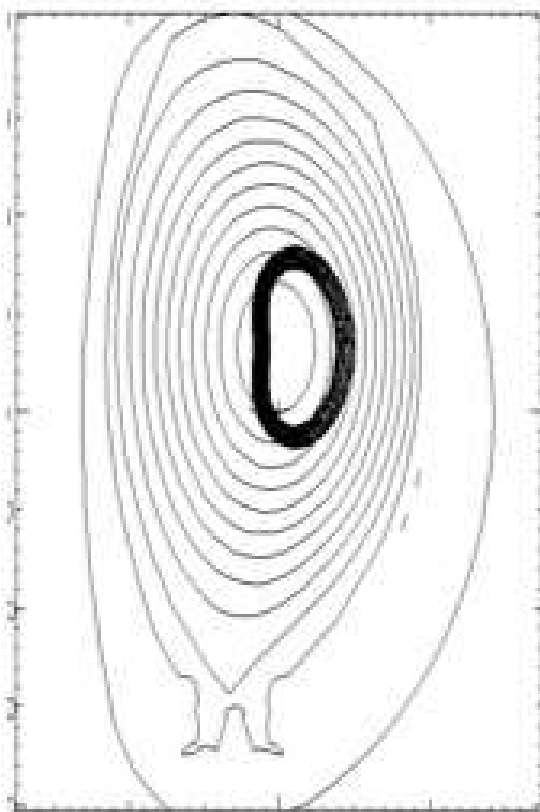
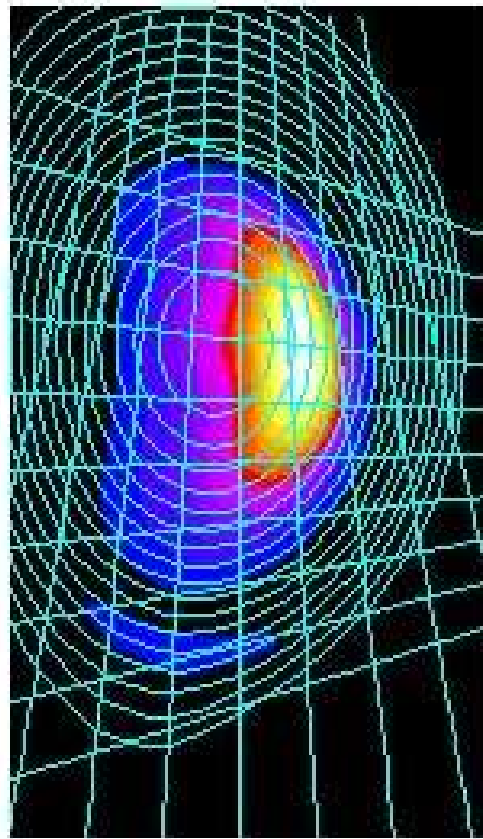
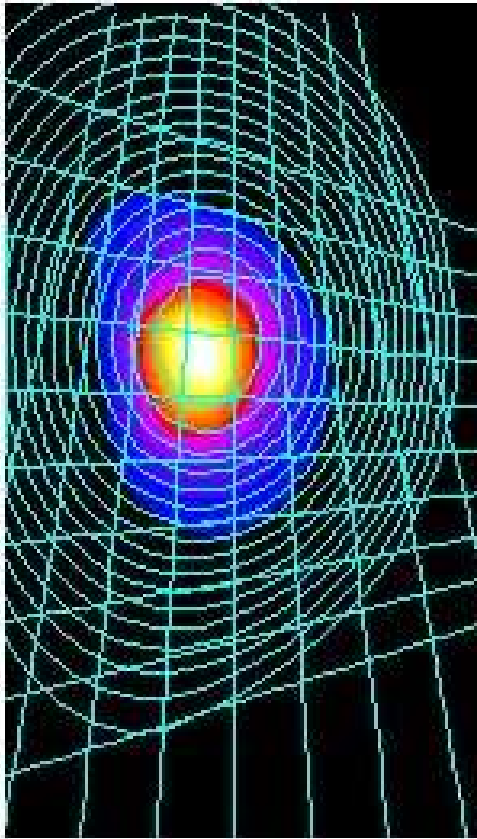
Participarea cercetatorilor romani la campaniile C35-35 a fost legata de experimentele:

- M15-01: Baseline scenario for DT
- M15-02: Hybrid scenario for DT
- B15-12: H D He3 ICRH scenario test.

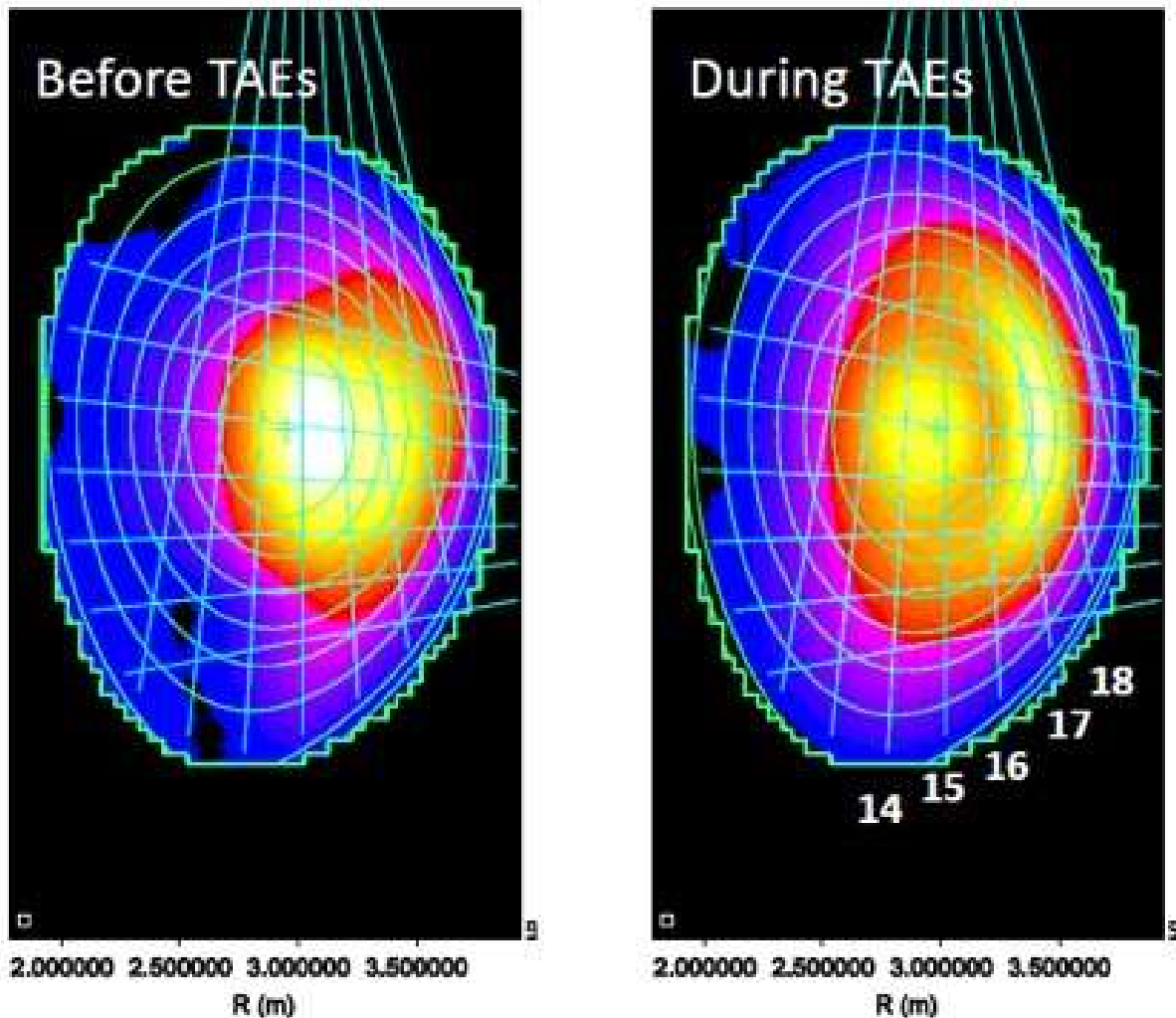
- M15-19 - Mitigation of runaway with high Z
- M15-24 - Target discharge for TAEs in DTE2 and fast particle physics in all scenarios.
- Activitatile de analiza a datelor si dezvoltarea de modele cuprind si experimentele
- H16-12 – Three-ion ICRF scenario development

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 variatia rezolutiei si confirma insemnatatea curentului radial la ionizarea unui influx masiv de neutri (gas puff, pellet). Am expus modelul nostru care, in opinia noastra, trebuie sa devina parte din imaginea fizica a confinarii, fiind legat de generare de bariere de transport prin rotatie diferentiale. Am dezvoltat si am expus un model original ce poate oferi o explicatie pentru oscilatiile radiatiei D-alpha, observata experimental. Modelul propune o secventa ciclica de ionizare de neutri (crestere a semnalului D-alpha), generare de bariera de transport (deci reducere de reciclare de particule si caderea semnalului D-alpha), reducerea influxului de neutri si implicit a suportului de rotatie poloidala, deci distrugerea barierei de transport. Efectul se repeta. Teoria noastra 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 componentele peretelui instalatiei tokamak cu rezolutie temporala, spatiala 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).



lizarea 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 apaitiei instabilitatii de tip TAE

### Participarea la campania experimentală C38 de la JET

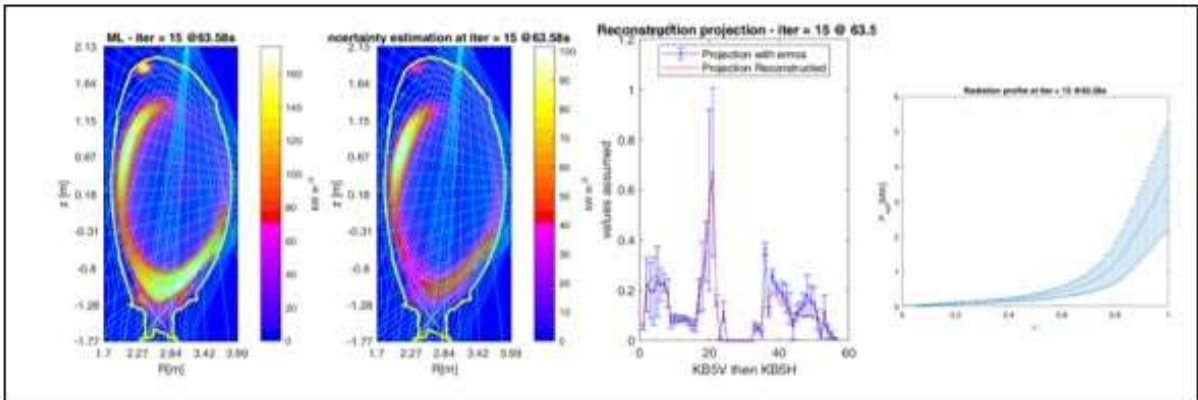
Participarea cercetatorilor romani la campania experimentală C38 este legata de 8 experimente si 2 task-uri de modelare si analiza a datelor:

- 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

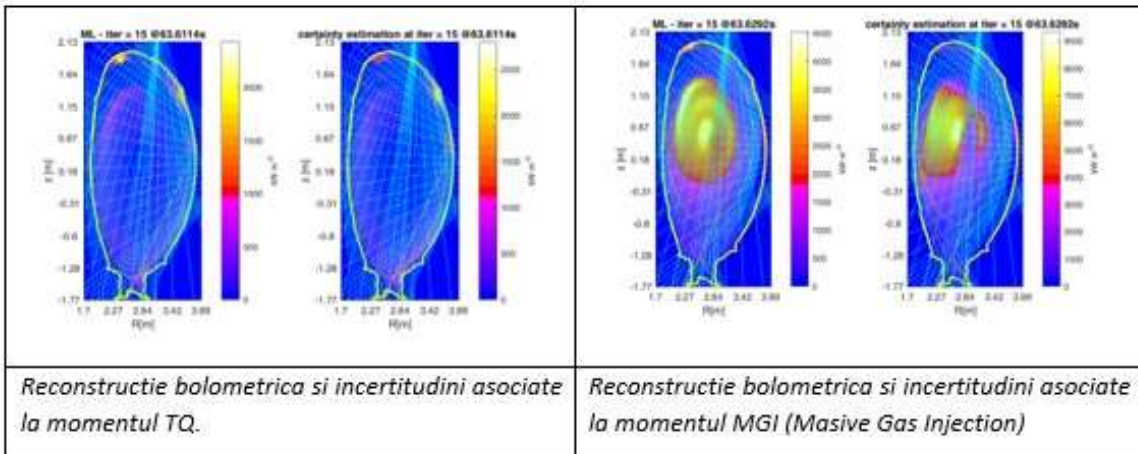
DT

- 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 intrumente 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 ala JET. In plus o serie de noi cercetari au fost dezvoltate: evolutia emisivitatiei neutronice in experimentele cu electroni de tip runaway, dezvoltarea de tehnici pentru vizualizarea depunerilor de tungsten in zona SOL (scrape-of-layer), dezvoltarea de metode de predictie a disruptiilor bazate pe forma profilului puterii radiate. Pentru eficientizarea exploatarei metodelor tomografice in cadrul viitoarei campanii DT, inclusiv in analizele intre pulsuri succesive, un cod de calcul integrat a fost dezvoltat. Codul include si variate routine dedicate pre-procesarii datelor sau corectiilor diferitelor efecte parazite.

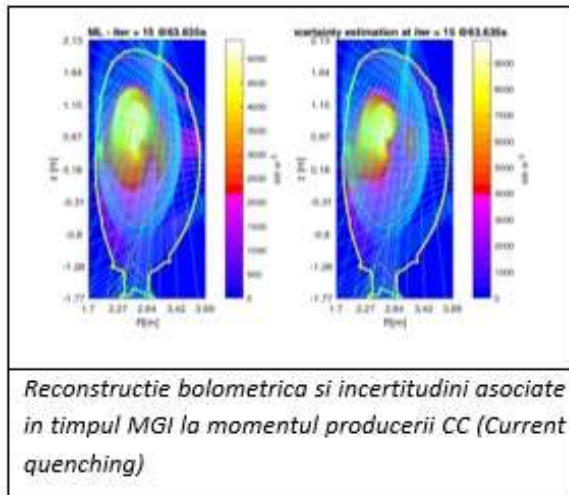


*Reconstructie bolometrica, incertitudini asociate, proiectii experimentale vs. deduse din reconstructive si profilul puterii radiate inainte de TQ (temperature quenching).*



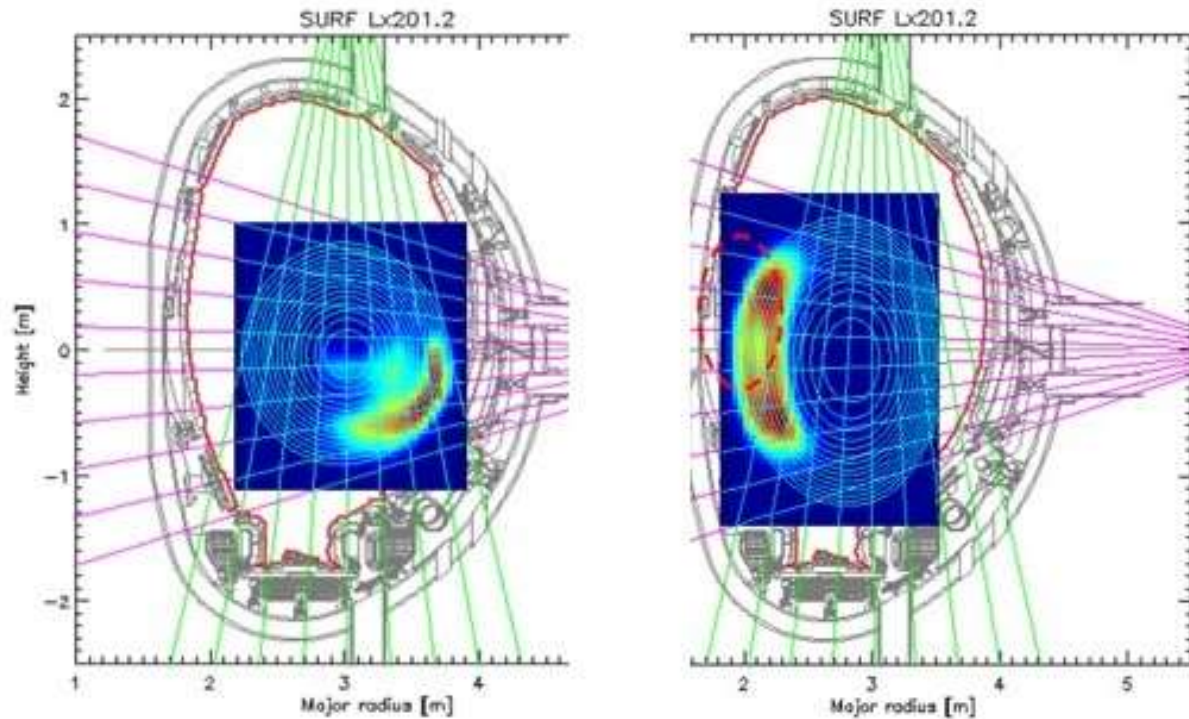
*Reconstructie bolometrica si incertitudini asociate la momentul TQ.*

*Reconstructie bolometrica si incertitudini asociate la momentul MGI (Masive Gas Injection)*



*Reconstructie bolometrica si incertitudini asociate in timpul MGI la momentul producerii CC (Current quenching)*

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 evoluția perturbărilor MHD de forfecare neoclasică (NTM) și de a testa modelul teoretic pe care l-am propus în raport cu rezultatele experimentale obținute în urma cât mai multor descărcări. A fost obținută o potrivire precisă între evoluția frecvenței calculate a modurilor NTM și cea furnizată de către spectrogramele asociate perturbărilor, din analiza de date experimentale. Mai mult, au fost calculate evoluții similare ale grosimii insulei magnetice asociate perturbărilor neoclasice, folosind modelul teoretic pe care l-am propus și codul numeric European Transport Solver (ETS). În concluzie, dacă validitatea modelului propus este dovedită, acesta poate deveni un instrument folositor, având capacități predictive. Condiția de evitare a disruptiilor în plasma, ușor de calculat folosind modelul propus, se traduce prin hărți de stabilitate ale parametrilor plasmei și ale datelor livrate de către 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



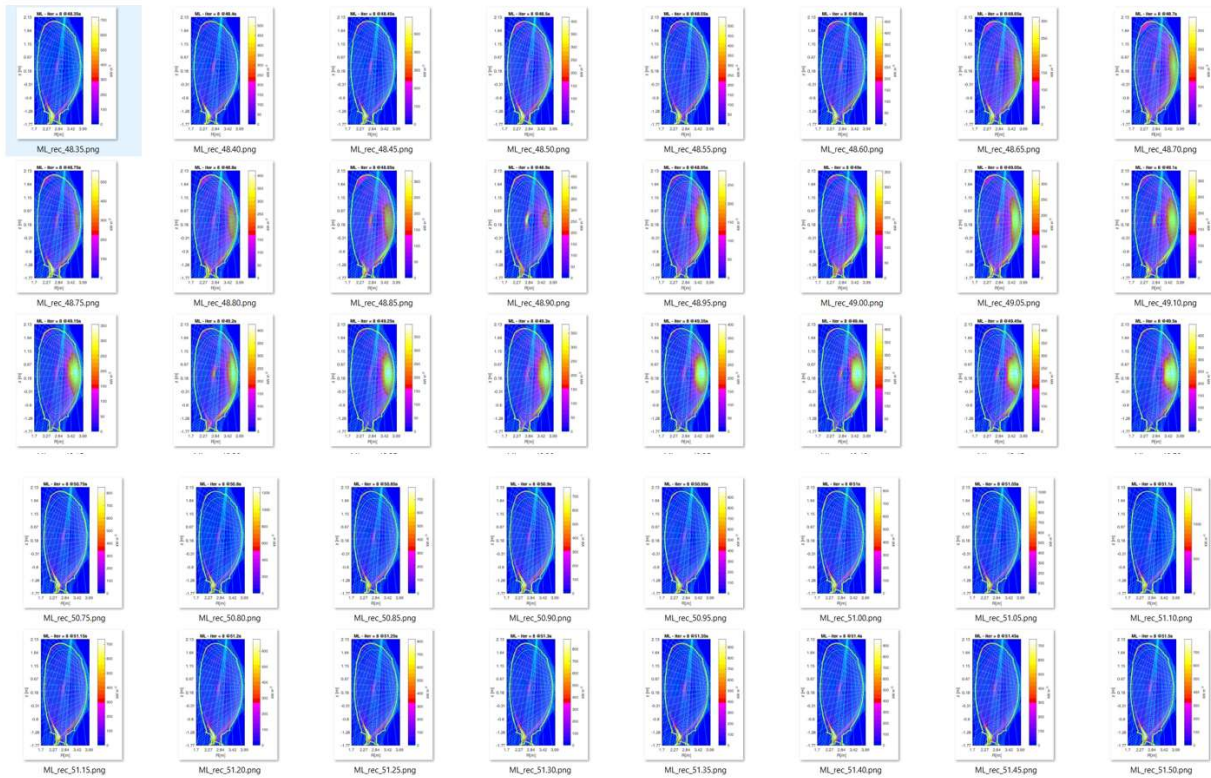
- M18-36: Run-away suppression with the SPI
- M18-37: Run-away avoidance and formation conditions

**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:**

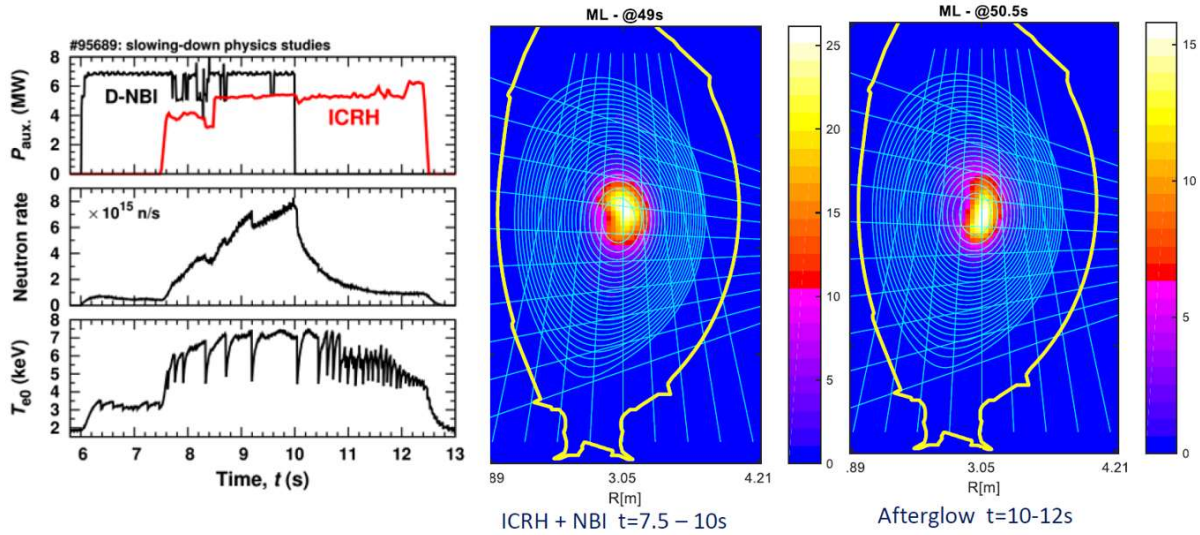
In cadrul experimentului M18-01 contributia a constat in reconstructii bolometrice pentru determinarea profilului 2D al puterii radiate, in vederea determinarii incarcarii divertorului si acumularii de impuritati in experimente de fuziune bazate pe scenarii ce tintesc atingerea unei puteri de 15 MW pentru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



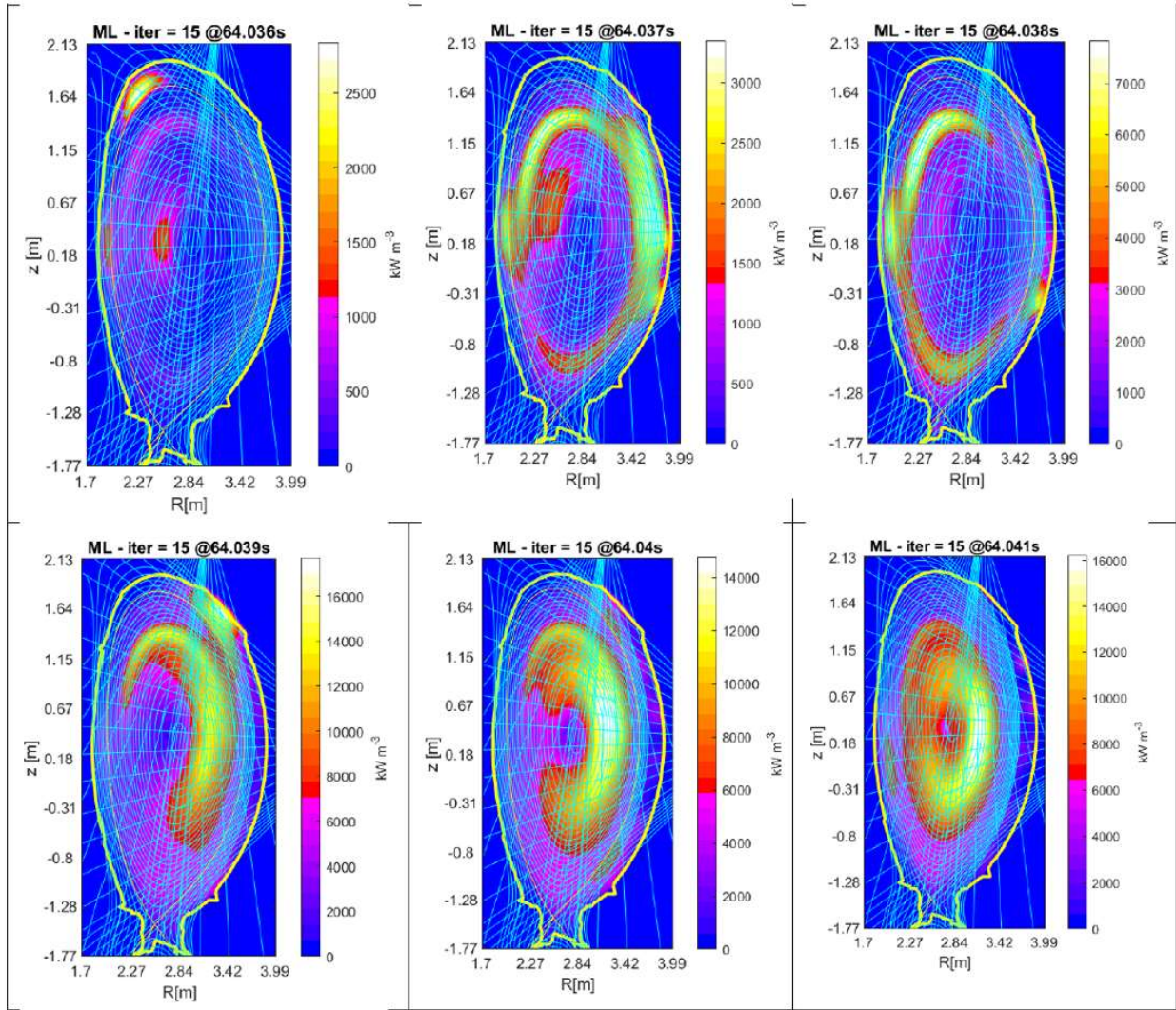
In cadrul M18-11 si M18-12 contributia romana a constat in analize de tomografie gama de emisie dedicate studiului evolutiei distributiei spatiale a particulelor alfa la tranzitia intre diferite regimuri de

incalzire (NBI, ICRH). Reconstructiile tomografice au fost obtinute pe baza liniilor gama de 17 MeV generate in reactia  $3\text{He}(d,\gamma)5\text{Li}$ .

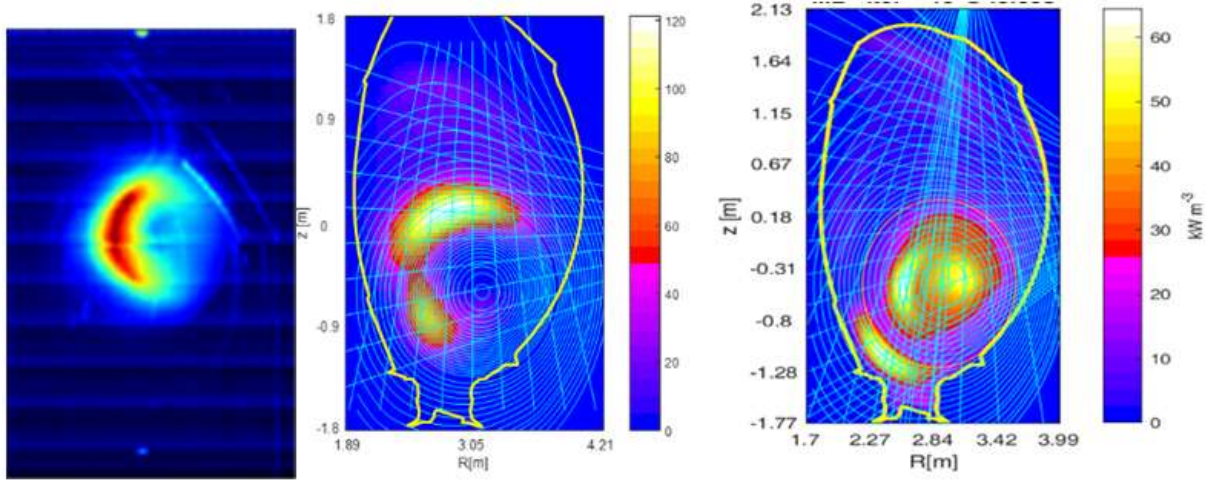
### KN3G: tomographic reconstruction of 17-MeV gammas



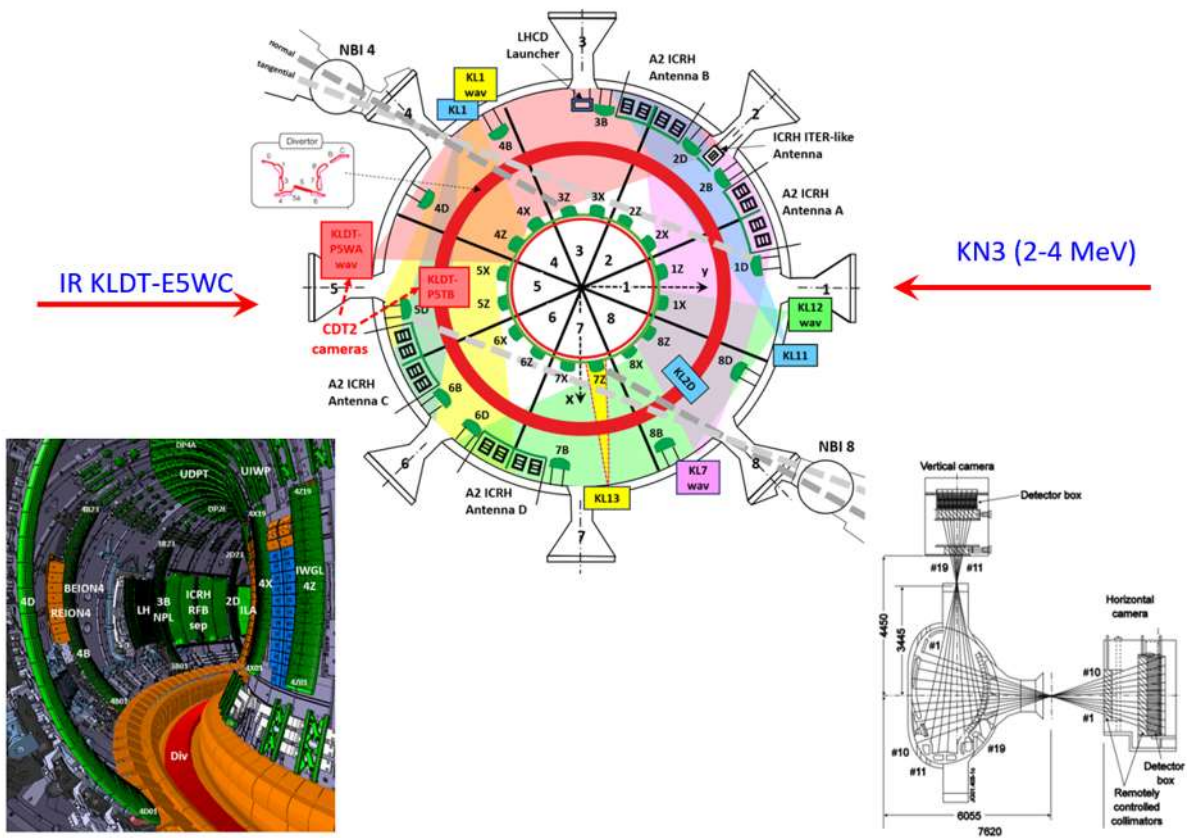
In cadrul experimentului M18-33 analizele de bolometrie au vizat evolutia profilului emisiei radiative dupa injectarea de pastile de deuterium (*shattered pellets*) pentru controlul emisiilor de electroni *runaway*. Un exemplu ilustrativ, obtinut cu o rezolutie temporală de 1 ms, este redat mai jos.



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 fasciculul de electron in zbor, inainte de ciocnirea cu peretele tokamak. Dificultatea consta insa in faptul ca aparitia electronilor *runaway* se petrece inainte de disrupcia 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 sincrotronic.

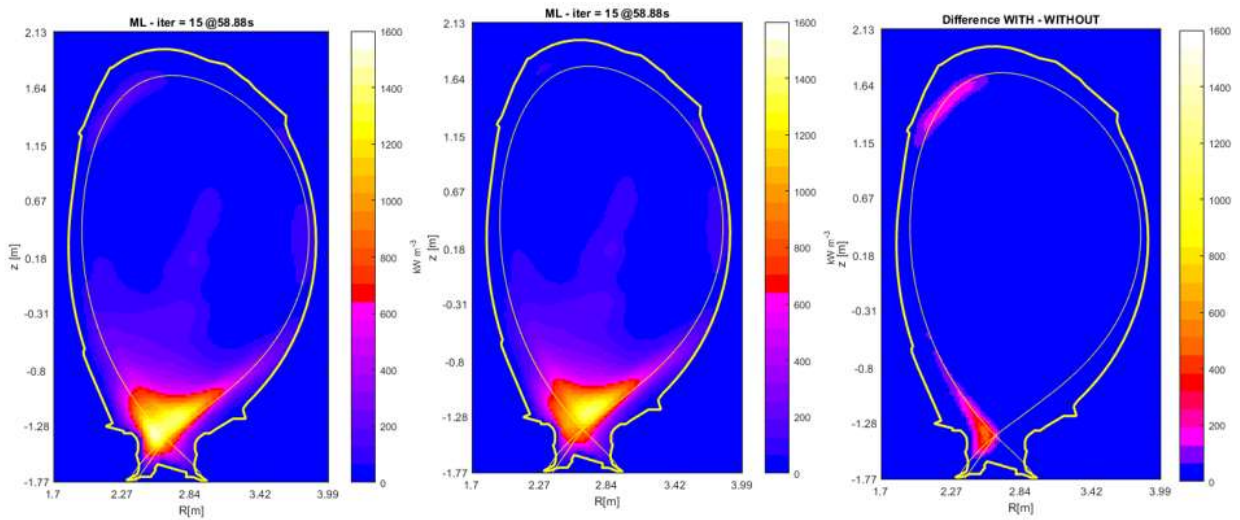


Imaginea furnizata de camera video (radiatie sincrotronică) reconstructive tomografică HXR și reconstrucție bolometrică.

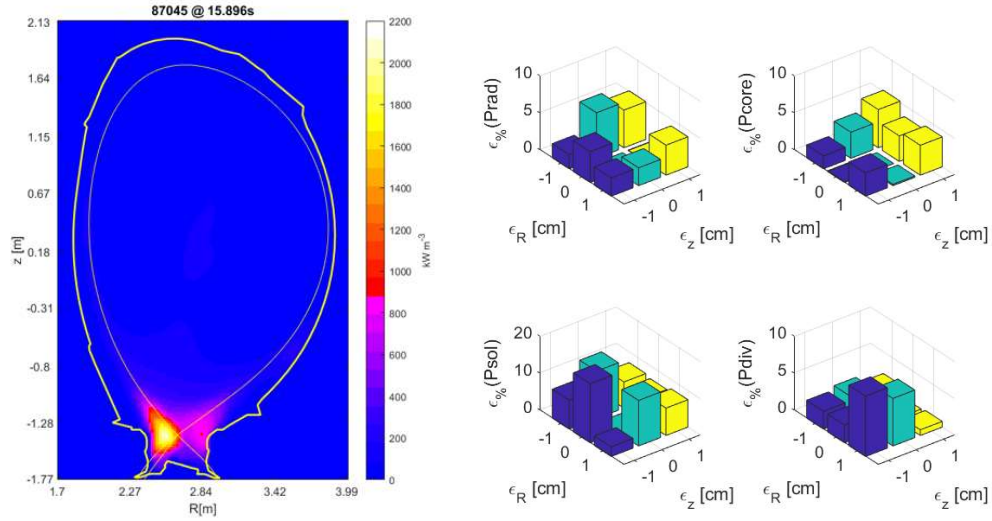


Localizarea și vederile oferite de camera KLDT-E5WC și de sistemul de tomografie HXR de la JET

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 accidentala a masuratorilor ce furnizeaza informatii pe o anume directive de proiectie (situatie tipica pentru experimentele ce se vor efectua in campnia experimentală 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 diferenta 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, deasemenea, 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 ideala, vid, structuri resistive externe):

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

$A_s^{mn}$  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:

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

$\tilde{\eta}$  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).

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 frecventele perturbatiilor obtinute folosind modelul nostru.

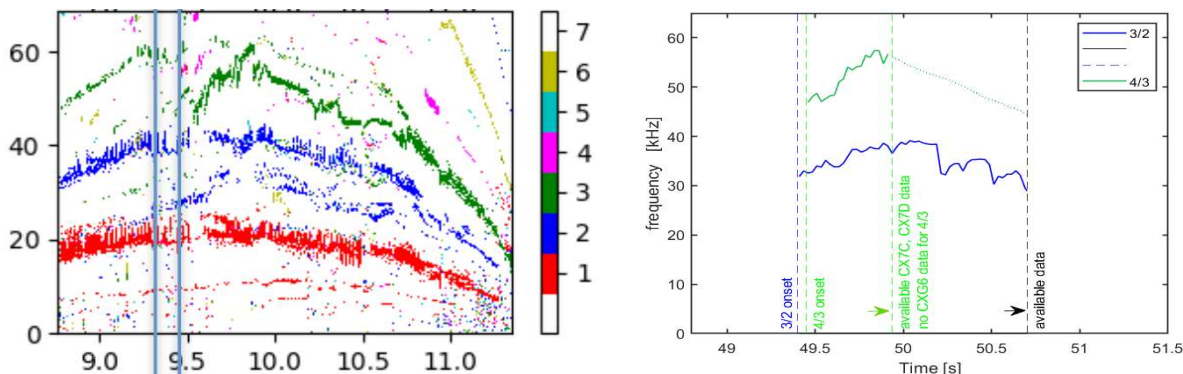


Figura 1: Spectrogramele (stanga) perturbatiilor 3/2 (albastru) si 4/3 (verde) versus frecventele calculate (dreapta) (#92356)

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 diagnosticii CX7D privind viteza toroidala de rotatie 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 rotatie 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.

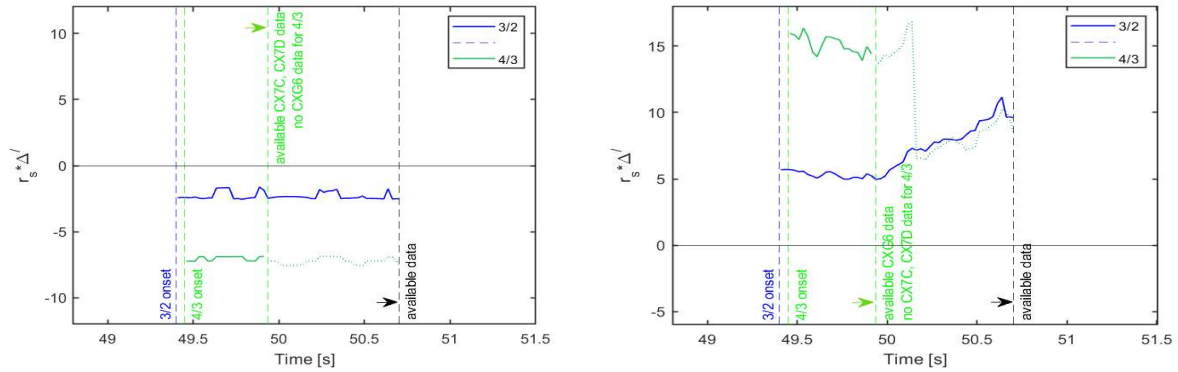


Figura 2: Parametrul delta prim pentru perturbatiile 3/2 (albastru) si 4/3 (verde), expresia clasica (stanga) versus formula "NTM",  $\Delta'(t) = -m/r_s \left[ 1 - \Psi_{out}^{mn}(t) / \Psi_i^{mn}(t) \right]$  (#92356)

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

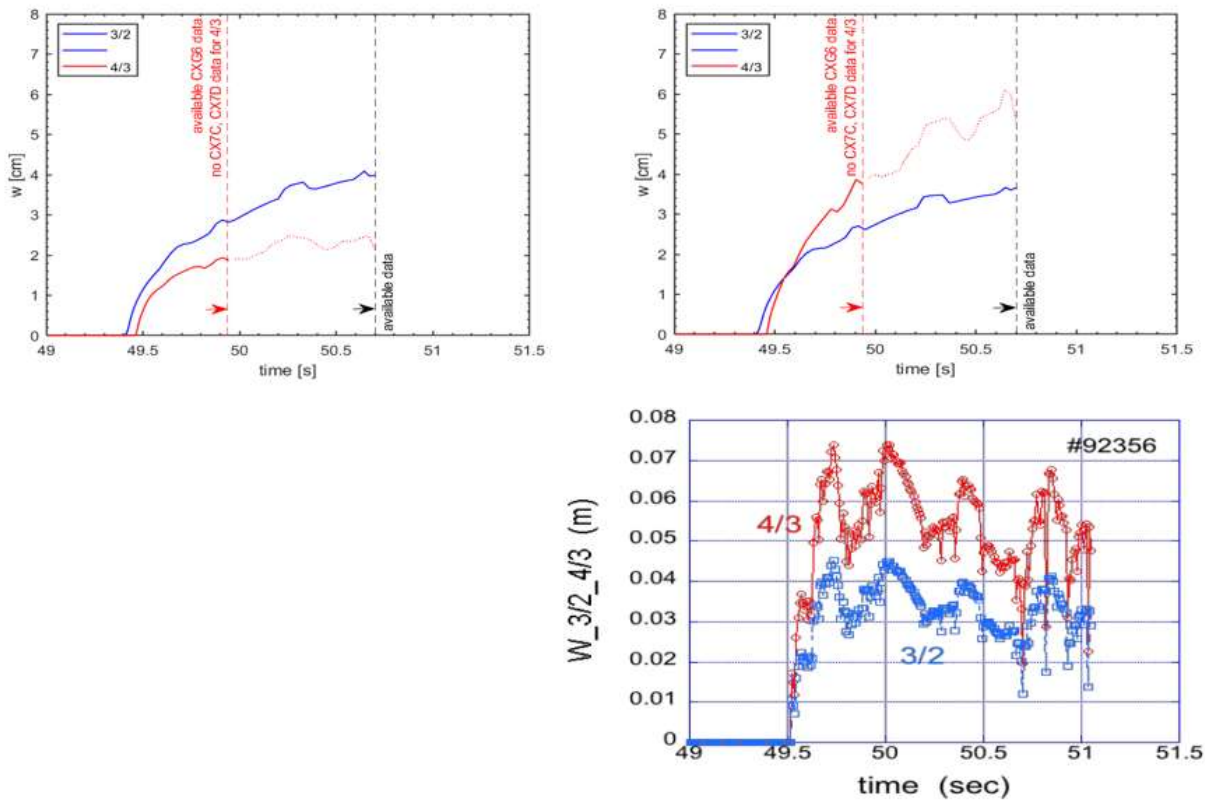


Figura 3: Evolutia insulei magnetice aferente perturbatiei 3/2 (albastru) si 4/3 (rosu) folosind functia delta prim clasica (stanga) si "NTM" (dreapta sus) in comparatie cu rezultatele experimentale (dreapta jos).



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 experimentul. 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 prtopus 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 nostrum 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.

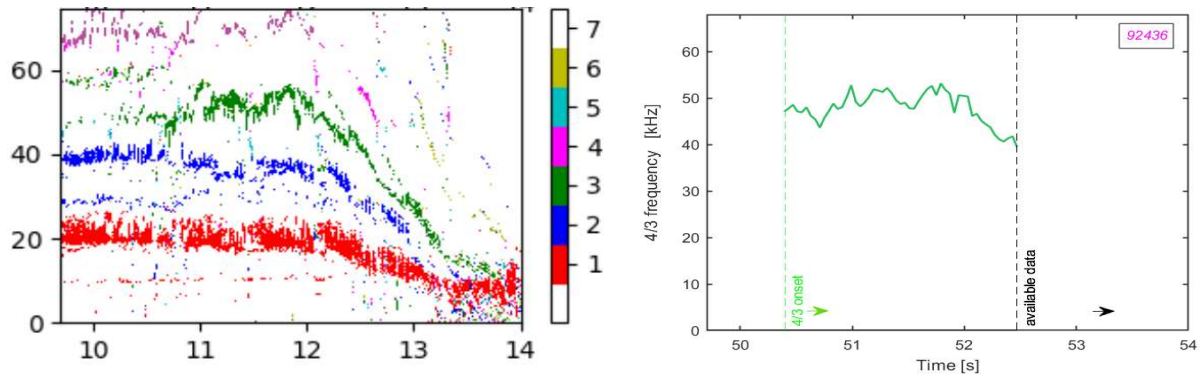
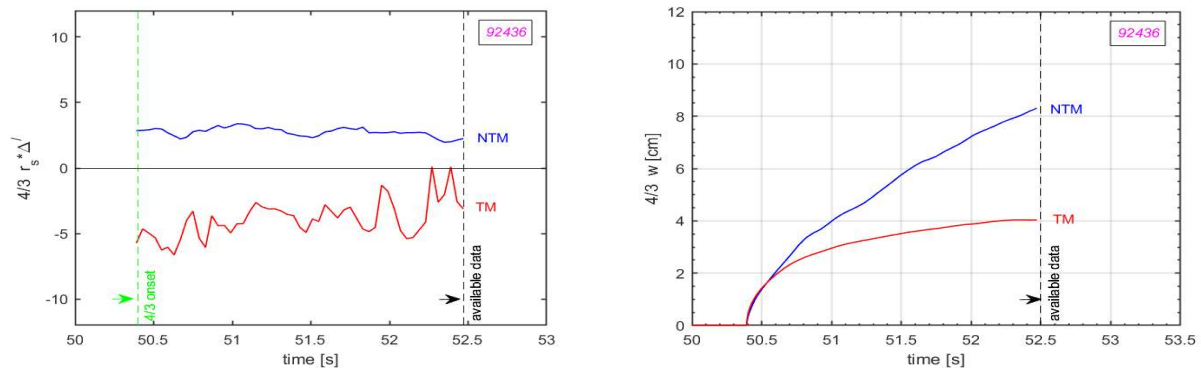


Figura 4: 4/3 (green) spectrograms (left) versus calculated frequency (right) (#92436)



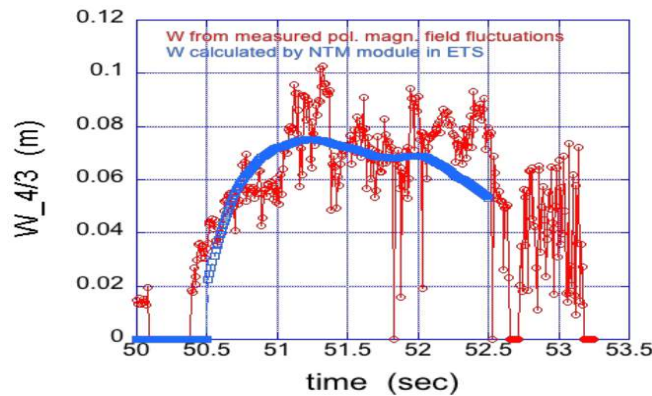


Figura 5: Versiunea "NTM" (albastru) vs. clasica (rosu) a parametrului delta prim (stanga) aferenta perturbatiei 4/3 si evolutia insulelor magnetice corespunzatoare (dreapta sus) in comparatie cu rezultatele experimentale (dreapta jos).

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 considerare si descrie noi aspecte ce afecteaza evolutia perturbatiilor NTM in plasma.

## Publicatii:

### Articole:

- [1] 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
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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. Cromb , A. Czarnecka, R. Dumont, P. Dumortier, F. Durodi , 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.

- [6] 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.
- [7] 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>
- [8] Kazakov, Y.O., Ongena, J., Wright, J.C., Wukitch, S.J., Lerche, E., antsinen, M.J., Van Eester, D., Craciunescu, T., Kiptily, V.G., Lin, Y., Nocente, M., abais, F., Nave, M.F.F., Baranov, Y., Bielecki, J., Bilato, R., Bobkov, V., Crombé, K., Czarnecka, A., Faustin, J.M., Felton, R., Fitzgerald, M., allart, D., Giacomelli, L., Golfinopoulos, T., Hubbard, A.E., Jacquet, P., Johnson, ., 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Croitoru A. M., Effects of magnetic drifts on ion transport in tokamak turbulent plasmas, Romanian Journal of Physics, submitted 2017.
- [12] Vlad M., Spineanu F., Combined effects of hidden and polarization drifts on impurity transport in tokamak plasmas, JET pinboard, to be submitted for publication.
- [13] Vlad M., Spineanu F., Hidden drifts in turbulence, JET pinboard, to be submitted for publication.
- [14] 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.

- [15] 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., Cziegler, 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.
- [16] T. Craciunescu, A. Murari, Geodesic distance on Gaussian manifolds for the robust identification of chaotic systems, *Nonlinear Dynamics* 86—1 (2016) 677–693.
- [17] F. Spineanu and M. Vlad, Effect of density changes on tokamak plasma confinement, electronic preprint <http://arxiv.org/pdf/1502.06093.pdf> (submitted)
- [18] 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*.
- [19] 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*.
- [20] 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 new ITER-like wall, *Plasma Phys. Control. Fusion* 57 (2015) 014037 (11pp), doi:10.1088/0741-3335/57/1/014037.
- [21] 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.

- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] F. Spineanu, M. Vlad, A MHD invariant with effects on the confinement regimes in Tokamak, Nuclear Fusion 56 (2016) 092005
- 

### *Conferinte*

- [1] 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.
- [2] 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, 18-21 June 2019, Chania, Greece.
- [3] 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.
- [4] E. Peluso<sup>1</sup> , T. Craciunescu<sup>2</sup> , A. Murari<sup>3</sup> , M. Gelfusa<sup>1</sup> , E. Lerche<sup>4,5</sup>, L. Garzotti<sup>5</sup> , 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
- [5] 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.
- [6] 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.

- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] [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.
- [10] 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.
- [11] 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
- [12] 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
- [13] 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.
- [14] 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 emisivitatii la 4 $\mu\text{m}$ 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 emisivitatii 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  $\mu\text{m}$  si 20  $\mu\text{m}$  determinarea emisivitatii 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 infrarosiu 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 ( $\varnothing$ 65x5 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  $\mu\text{m}$

depușe pe elemente din CFC (Carbon Fibre Composite) și FGG (Fine Grain Grafite). Înregistrarea semnalului de la detectorul IR precum și comanda motoarelor pas cu pas au fost integrate într-o aplicație MATLAB dezvoltată special pentru măsurarea emisivității. Determinările de emisivitate s-au făcut într-o plajă de temperatură cuprinsă între 4000 C și 12000 C.

În cazul experimentelor nu s-a constatat o influență semnificativă a temperaturii asupra valorilor emisivității, însă emisivitatea straturilor de W depuse pe CFC este influențată semnificativ de structura poroasă a CFC-ului, fapt care conduce la o dispersie mare a valorilor. Acest fenomen nu apare în cazul stratului de W depus pe proba de grafit cu graunți fini. În cazul straturilor de W de 10 μm depuse pe CFC valorile de emisivitate măsurate la 700 0C au indicat valori de 0.1,8 în timp ce straturile de 20 μm au indicat valori de 0.23. În cazul straturilor de W de 10 μm depuse pe FGG emisivitatea, la aceeași temperatură (700 0C), a fost de 0.147. Pentru W masiv emisivitatea a fost de 0.10 iar pentru Be, emisivitatea la aceeași temperatură 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)).

---

**Contribuții la înțelegerea comportării specifice a plasmei JET în condițiile determinate de noul perete ILW și dezvoltarea de metode de analiză și interpretare a datelor experimentale**

Scopul general al proiectului este să aducă o contribuție la înțelegerea comportării diferite a plasmei JET după instalarea peretelui de tip ITER și să dezvolte metode de analiză și de interpretare a experimentelor. Proiectul abordează două aspecte importante: acumularea impurităților de W în plasma și tehnici de atenuare a modurilor localizate la marginea plasmei (ELM).

Obiective:

1. Analiză detaliată a transportului impurităților grele în plasma turbulentă. Noutatea abordării 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, mișcarea lor paralelă și rotația plasmei. Scopul acestor cercetări este determinarea regimurilor de transport ale impurităților de W în modurile L și H (confinare slabă și înaltă) și identificarea mecanismelor de împiedicare a acumulării lor în centrul plasmei. Se va dezvolta un cod pentru determinarea coeficienților 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. Această este o problemă dificilă mai ales în cazul sistemelor complexe neliniare afectate de un nivel semnificativ de zgomot. O nouă abordare pentru analiză acestui tip de sisteme este propusă în cadrul proiectului. Ea se bazează pe un nou concept de distanță din geometria



informationala. Metode bazate pe i) analiza topologica a recurentelor, un instrument puternic pentru studiul proprietatilor sistemelor complexe si eventual haotice, ii) functia de verosimilitate a sincronizarii proceselor si iii) inferenta relatiilor cauzale pe baza modelelor cu ecuatii structurale vor fi de asemenea dezvoltate in cadrul proiectului pentru analiza seriilor temporale experimentale de la JET.

### **Etape si activitati:**

#### Etapa 1

- Code pentru determinarea coeficientilor de transport folosind DTM si studiul efectului driftului de polarizare. Validarea importanței efectului driftului de polarizare in prezenta altor procese ce depind de masa ionilor
- Utilizarea unei metrici Gaussiane pentru identificarea sistemelor haotice

#### Etapa 2

- Dezvoltarea ideii drifturilor ascunse pentru transportul scalarilor si al campurilor passive si studiul efectului combinat al drifturilor ascunse si de polarizare asupra transportului impuritatilor.
- Studiul contributiei drifturilor ascunse asupra transportului ionilor de W in modurile L si H si identificarea regimurilor de transport
- Code pentru determinarea coeficientilor de transport in functie de parametrii turbulentei
- Evaluarea eficientei sincronizarii experimentelor in tokamak pe baza metodelor RP si SL

#### Etapa 3

- Studiul efectelor ciocnirilor asupra transportului indus de drifturile ascunse.
- Model complex si cod pentru studiul transportului impuritatilor grele.
- Studiul regimurilor de transport si analiza mecanismelor posibile pentru curatarea plasmei.
- Inferenta cauzalitatii intre serii de timp experimentale la JET pe baza modelelor structurale.

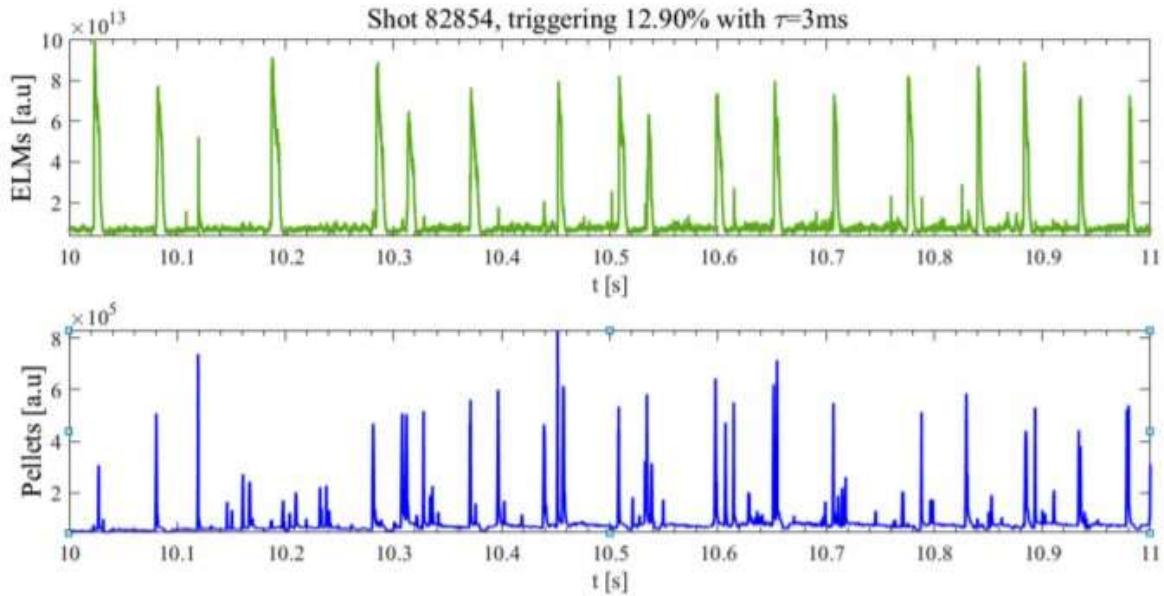
### **Rezultate obtinute:**

Primul stadiu al Obiectivului 1 consta din evaluarea efectelor driftului de polarizare. A fost dezvoltat un model complex care include driftul ExB cu o descriere realista a spectrului turbulentei, miscarea paralela, viteza diamagnetica si drifturile magnetice. Am dezvoltat un cod Fortran bazat metoda semi-analitica DTM in varianta rapida pentru determinarea proprietatilor transportului turbulent al impuritatilor grele. Am aratat ca driftul de polarizare determina efecte neliniare complexe care constau intr-o crestere semnificativa a coeficientului de difuzie (pana la dublare) si in generarea unui drift mediu radial. Conditia pentru aparitia acestor efecte este existenta capturii vorticale a triectoriilor

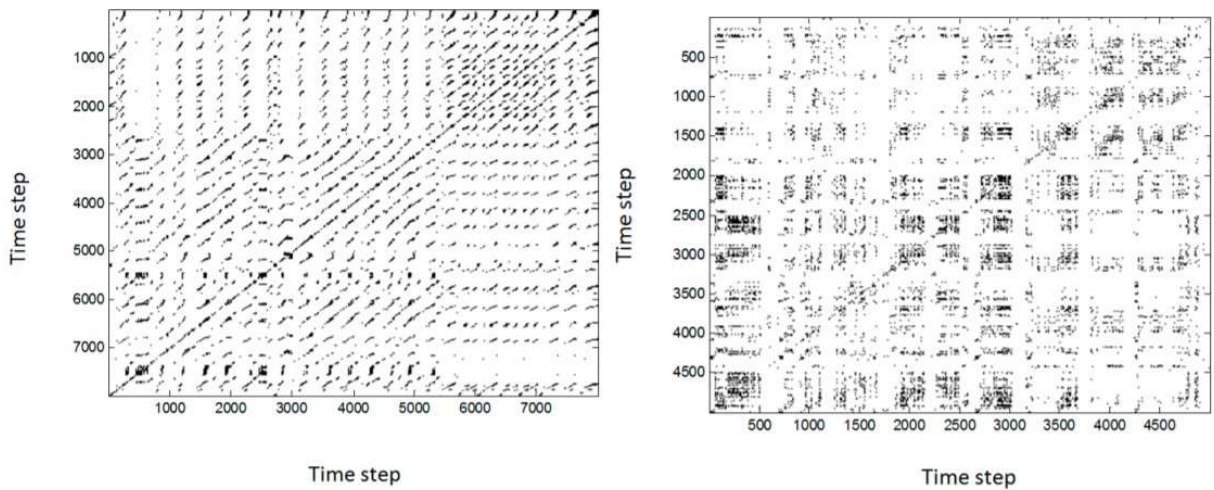
care este specifica transportului neliniar. In cazul transportului cuasi-liniar, influenta driftului de polarizare este neglijabila chiar si pentru ioni cu mase foarte mari cum este W. Importantei driftului de polarizare pentru transportul ionilor W este determinata de tipul de transport. Am dezvoltat un studiu complex care are ca scop intelegerea acestei probleme fundamentale [2]. Primele rezultate arata ca evolutia turbulentei de drift poate conduce la ambele tipuri de transport in functie de valoarea parametrului ce apare in rata de crestere.

Determinarea proprietatilor seriilor temporale si eventuala identificare a caracterului lor haotic se poate face prin diverse metode care implica definirea si utilizarea unei distante. Metrica adoptata poate avea o influenta semnificativa asupra rezultatelor, in special in cazul in care datele experimentale sunt afectate de zgomot. A fost propusa adoptarea unei metrici care a fost dezvoltata special pentru tratarea datelor experimentale afectate de zgomot Gaussian, anume distanta geodesica pe varietati Gaussiene (DGVG). O serie cuprinzatoare de teste numerice prezentate aici dovedesc faptul ca utilizarea DGVG produce rezultate superioare cazului in care se foloseste distanta Euclidiana (abordarea uzuala in majoritatea aplicatiilor). Rezultatele sunt importante pentru analiza seriilor temporale masurate in tokamak in vederea determinarii sincronizarii unor evenimente precum injectarea de pellet-uri pentru controlul instabilitatilor ELM sau controlul fenomenelor de relaxare de tip sawtooth prin modularea ICRH.

Doua metode de analiza a sincronizarii seriilor temporale – metoda diagramelor de recurenta (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 recurenta s-a dovedit extrem de utila pentru analiza unor cazuri in care zgomotul in datele experimentale a atins un nivel semnificativ.



Semnalele D $\alpha$  signals indicand aparitia instabilitatilor de tip ELM (sus) si Semnalele D $\alpha$  indicand injectia unui pellet de deuteriu in plasma.



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

In instalatiile tokamak cu perete metalic 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

processe. 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.

### **Publicatii:**

#### *Articole:*

- [1] F. Spineanu, M. Vlad, On the late phase of relaxation of two-dimensional fluids: turbulence of unities, Focus on Turbulence in Astrophysical and Laboratory Plasmas, New Journal of Physics 19 (2017) 025004.
- [2] 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.
- [3] Croitoru A. M., Effects of magnetic drifts on ion transport in tokamak turbulent plasmas, Romanian Journal of Physics, submitted 2017.
- [4] Vlad M., Spineanu F., Combined effects of hidden and polarization drifts on impurity transport in tokamak plasmas, JET pinboard, to be submitted for publication.
- [5] Vlad M., Spineanu F., Hidden drifts in turbulence, JET pinboard, to be submitted for publication.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] T. Craciunescu, A. Murari, Geodesic distance on Gaussian manifolds for the robust identification of chaotic systems, Nonlinear Dynamics 86—1 (2016) 677–693.
- [10] 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.
- [11] 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.

- [12] 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.
- [13] 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:*

- [1] 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.
- [2] M. Vlad, F. Spineanu, Quasi-coherent aspects in turbulent transport, Europhysics Conference on Statistical Physics (SigmaPhi2017), Corfu, Greece, 10-15 July 2017
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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.
- [6] 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
- [7] A. Croitoru, Transport of cold ions in tokamak microturbulence, 17th International Conference on Plasma Physics and Applications, Magurele, Romania, 15-20 June, 2017
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.

- [11][S. Nowak, O. Sauter, D. Yadykin, E. Alessi, D. Brunetti, A. Czarnecka, V. Fusco, G. Miron, et al, Analysis and modelling of NTMs dynamics in JET discharges using the European Transport Simulator (ETS) and integrated modelling tools, TH/P6-26, 27th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2018), 22–27 October 2018, Gandhinagar, India
- [12] 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)), M. Vlad ([madalina.olimpia.vlad@gmail.com](mailto:madalina.olimpia.vlad@gmail.com)), F. Spineanu ([florin.spineanu@gmail.com](mailto:florin.spineanu@gmail.com))