

Vingt ans de collaboration (plasma de fusion, statistique de la turbulence, sciences de l'atmosphère)

Florin Spineanu
*National Institute of Laser, Plasma and
Radiation Physics*
Magurele, Romania
florin.spineanu@gmail.com

Madalina Olimpia Vlad
*National Institute of Laser, Plasma and
Radiation Physics*
Magurele, Romania
madalina.olimpia.vlad@gmail.com

Dragos Palade
*National Institute of Laser, Plasma and
Radiation Physics*
Magurele, Romania
dragos.palade@inflpr.ro

Andreea Mihaela Croitoru
*National Institute of Laser, Plasma
and Radiation Physics*
Magurele, Romania
andreea.croitoru@inflpr.ro

Résumé — Un histoire de plus de vingt ans de collaboration entre chercheurs Roumains et Français est résumée dans les quelques paragraphes ci-dessous. Il y a eu des sujets de plasma pour la fusion thermonucléaire contrôlée, de la statistique de la turbulence des fluides et de plasma, la science de l'atmosphère, des méthodes mathématiques nouvelles pour les problèmes non linéaires. Il y a eu des travaux publiés en commun, des visites et des stages, des Ateliers. Par ces conséquences cette collaboration est encore vivante et active.

Mots-clés — plasma, fusion, méthodes fonctionnelles, méthodes de théorie des champs, science de l'atmosphère

La collaboration entre chercheurs Français et Roumains avait commencé bien avant la collaboration institutionnelle. Les conférences, l'échange des textes avant publications (preprint) ont assurés les contacts et ont favorisé une certaine convergence des préoccupations. Le cadre thématique plus général était la physique statistiques des plasma en champs magnétiques. Le grand effort que la recherche mondiale avait entamé pour la réalisation du réacteur de fusion basée sur la configuration tokamak avait transformé les sujets de ce type dans des priorités auxquelles on demandait sans délai des résultats. Le plasma immergé dans un champ magnétique fort doit assurer une énergie des particules (isotopes de Hydrogène) suffisante pour qu'elles dépassent la répulsion électrique (étant des charges de même signes) et que l'interaction nucléaire puisse déclencher la fusion des noyaux. Des nouvelles particules apparaissent et aussi une grande quantité d'énergie. C'est sur cette base que la fusion doit devenir une source d'énergie, presque idéale du point de vue de l'écologie, de réserves de combustible, de déchets. Mais le plasma perd une partie de l'énergie qui est introduite pour atteindre le régime de réacteur et c'est pour ça que les processus de transport doivent être compris, décrits et modélisés pour pouvoir être contrôlés. La physique statistiques des plasma étudie les instabilités et les fluctuations turbulentes qui sont à l'origine du transport dit « anomal ». France avait construit un premier tokamak à Fontenay aux Roses puis une machine de très haut niveau technologique, Tore Supra au Centre d'Etude de Cadarache (appartenant au Commissariat à l'Energie Atomique). Après des échanges d'idées et après avoir dessiné un projet de travail intéressant, chercheurs roumains ont obtenu deux stages de six mois à Cadarache, au sein du Département de Recherche sur la Fusion

Contrôle (DRFC) en 1992. Dr. Jacques Misguich a fait tous les efforts pour faire possibles ces stages et il a travaillé avec nous pour faire avancer les sujets communs. Les premiers pas étaient plus proches des traitements théoriques usuelles. En suivant la tradition des approches de type physique des instabilités, on a essayé de examiner l'évolution du spectre des fluctuations des ondes de dérive. La phase de croissance de l'instabilité était déterminée par la résonance cinétique qui était altérée par la diffusion collisionnelle. Le calcul du propagateur (phase dynamique) permettait de calculer la réponse (amplitude de la fluctuation de densité) à partir de laquelle nous pouvons obtenir le spectre, donc le problème devient auto-consistent. C'était une étude intéressante mais ses simplifications auraient dû être progressivement réduites. Les auteurs (Madalina Vlad et Jacques Misguich) ont changé l'approche dans une direction plutôt « particule de test » et comme ça ils entrecroisaient les études du professeur Radu Balescu et de son groupe de l'Université Libre de Bruxelles. Ce qu'on a suivi est une vraie effervescence d'idées nouvelles, des travaux originaux et une collaboration qui s'est étendue sur une période de presque 10 ans. Ce travail n'est pas passé inaperçu dans le monde des théoriciens de la fusion et on peut dire qu'il a eu une influence remarquable.

Le phénomène qui accompagne le transport est la capture intrinsèque des trajectoires des particules dans la géométrie du champ fluctuant. L'idée originale d'un traitement théorique est de trouver un ensemble des trajectoires déterminées par les corrélations Eulériennes du potentiel. La corrélation Lagrangienne des vitesses est alors approximée en utilisant la vitesse moyennée sur ces trajectoires. Il faut donc diviser l'espace des réalisations aléatoires du potentiel dans des sous-ensembles caractérisés par une valeur donnée du potentiel et par la vitesse au moment du départ de la trajectoire. En utilisant cette vitesse on calcule la trajectoire qu'on appelle « la trajectoire de décorrélation ». Ces trajectoires fictives sont essentielles pour calculer les corrélations des positions des particules – mais, en tenant compte de la capture. Un certain nombre de résultats précédents a été repris et des nouveaux régimes, avec leurs coefficients de diffusion ont pu être examinés.

Cette idée et la procédure effective sont peut-être le plus important modèle qui est issu de cette collaboration. Une série d'applications et un certain horizon de développements ont fait de cette théorie un des meilleurs

produit de notre collaboration. Celle-ci s'est élargie avec le groupe de l'Université de Craiova, ce qu'il a suggéré le nom de collaboration France-Belgique-Roumanie. Il y avaient aussi des chercheurs invités à Cadarache (de Russie et d'Ukraine).

Des études numériques sur les effets que des fluctuations aléatoires des certaines paramètres du plasma de fusion peuvent avoir sur la stabilité et sur les taux de transport ont été faits sur des ordinateurs parallèles avec l'aide de Jean Daniel Reuss.

D'autre part nous avons cherché à apporter des moyens techniques très bien confirmés dans d'autres domaines et qui promettaient d'être efficace dans l'étude de la turbulence en tokamak. Il s'agit tout d'abord du calcul fonctionnel, naturellement adapté aux études des instabilités. En phase linéaire la réponse de la composante électronique (par exemple) et obtenue en intégrant le potentiel électrostatique au long des trajectoires. Mais les trajectoires sont un ensemble statistique de réalisations donc nous retrouvons de cadre de l'intégrale de chemin (« path integral ») de Feynman. L'intégrale sur l'espace des toutes trajectoires possible donnait la fonctionnelle génératrice des corrélations. Le mécanisme de l'intégrale de chemin nous a permis de traiter d'une manière systématique l'équation de Langevin pour les orbites des électrons dans une turbulence magnétique typique pour les modes de reconnexion de petites échelles. La fonctionnelle action a une structure qui nous a permis de porter jusqu'à la fin le calcul analytique puis d'obtenir des corrélations par des opérateurs de différentiation fonctionnelle par rapport à un courant fictif, pris zéro à la fin. Une procédure standard mais jamais utilisée auparavant dans la théorie du transport en plasma tokamak. Après le séminaire de présentation, à la fin de stage, il y a eu un vif intérêt pour ce moyen de calcul.

Il semble que les premiers stages ont laissés une impression positive sur la collaboration et plusieurs stages ont suivi, surtout par l'effort de Jacques Misguich, de Radu Balescu et par le soutien des Directeurs du Département DRFC. Jacques Misguich a fait des visites à Bucarest et un Atelier a été organisé à Sinaia, avec des invités de France et de Belgique, en 1997.

Nous avons continué les études basées sur l'intégrale fonctionnelle. L'étude du processus de capture des particules dans une turbulence électrostatique a été formulé comme équation de Langevin avec un terme qui simulait la répartition spatiale aléatoire et la durée des captures toujours aléatoire. Il a été de nouveau possible de calculer l'intégrale fonctionnelle et donc d'obtenir la fonction génératrice des corrélations des positions d'une particule de test. Nous avons pu étudier le coefficient de diffusion en tant que fonction des paramètres de capture. Une autre application des moyens fonctionnels a été le calcul du spectre d'une perturbation quasi-stable (un tourbillon « vortex », similaire à un soliton) immergé dans un plasma turbulent. Finalement, l'un des plus complexes problèmes qui consiste d'un plasma où se trouvent un nombre des structures ordonnées en interaction avec un fond de fluctuations turbulentes, nous avons réussi à le formuler de façon que la fonction génératrice des corrélations a pu être calculée explicitement. C'est l'une des situations physiques caractéristiques au plasma tokamak donc intéressante pour les taux de transport.

En l'an 2000 Roumanie est devenue état associée aux institutions de l'Europe (avant qu'elle devienne membre en 2007) et la collaboration a pris un caractère différent. Il fallait tenir compte du Plan de Travail des Associations EURATOM – chaque état, en particulier Roumanie. Les sujets se dirigeaient vers les applications immédiates liées aux grandes machines (JET, Tore Supra, Asdex) et les aspects de calcul numérique sont devenus dominants. Les simulations numériques sont en mesure d'éviter le long travail d'intuition des processus physiques et les études analytiques demandant des approximations mais aussi d'ingéniosité. Pourtant, les études purement théoriques (analytiques) sont restées une référence importante et la collaboration a continué d'obtenir des résultats de cette nature.

Nous avons continué à chercher d'enrichir les moyens de description analytique utilisés dans l'étude du plasma. Au départ, nous avons abordé le modèle fondamental, celui d'un fluide Euler (idéal) en deux dimensions. La discrétisation de la vorticités avait permis, par une analyse statistique, d'obtenir une équation pour les états stationnaires, Sinh-Poisson, mais une dérivation analytique n'existait pas. Nous avons compris que le modèle discret, si on essaye de revenir au continuum, était en fait une théorie des champs. Les composantes étaient un champ de spins mixtes, un champ de jauge avec interaction non linéaire et un terme dit Chern Simons qui apportait l'équivalent de la vorticités. Le Lagrangien donnait des équations qui n'étaient pas plus simples mais le Hamiltonien, après avoir appliqué la procédure dite de Bogomolnyi, faisait évidente l'auto-dualité des états stationnaires et donnait l'équation exacte de ses états : c'était Sinh-Poisson, l'équation devenue fameuse parce qu'elle était confirmée par des études numériques très solides. Donc nous avons offert la première dérivation purement analytique de cette équation, pour le fluide Euler en 2D.

De là nous avons développé des études pour trouver une théorie des champs pour le plasma confiné. La différence était très importante, il y avait maintenant une distance élémentaire, le rayon de Larmor. À cause de cela, la propriété d'auto-dualité ne pouvait pas être exacte. Si on acceptait une approximation (sans une claire base physique) on obtenait une nouvelle équation. C'est important de dire ici que la première utilisation de cette équation a été dans la physique de l'atmosphère. Cela était possible puisque le plasma dans un champ magnétique fort et l'atmosphère terrestre sont décrits par des équations similaires (le rayon de Larmor devenait le rayon de Rossby). En appliquant notre équation au cyclone tropical nous avons eu la surprise de voir des très bonnes comparaisons entre nos calculs et les observations. Plusieurs situations connues pour les cyclones tropicaux ont été obtenues naturellement par notre équation, par exemple le cycle de tourbillons forme après la fragmentation du cercle du maximum de vitesse azimutale. Nous avons aussi obtenu des relations générales entre trois paramètres accessibles aux observations d'un cyclone : la vitesse azimutale maximale, le rayon du cercle du maximum (« l'œil du cyclone ») et le rayon de l'étendue maximale du cyclone. Appliqués à quelques très connus cyclones (comme Katrina) les résultats se sont montrés étonnamment bons. Pour le plasma nous avons entamé une étude de distribution de la vorticités (rotationnel de la vitesse polaire), très important pour les barrières de transport.

Nous avons communiqué les résultats obtenus dans le cadre nouveau (théorie de champs pour l'équivalent du régime Hasegawa Mima) dans deux conférences aux Etats Unis et comme ça nous avons eu les premiers contacts avec un chercheur Français, Jun Ichi Yano, de Météo France Toulouse. Ensemble (et avec participation de Dragos Palade et Andreea Croitoru) nous avons étudié la relevance de la paradigme de l'auto-organisation à la criticalité aux processus de convection en atmosphère. Nous avons trouvé que le model simple, Bak-Sneppen, était une référence utile pour une représentation simplifiée de la statistique des événements de convection. Pour les situations de longue inactivité interrompus par des convection de haute amplitude nous avons trouvé que le model Gierer-Meinhardt était approprié. Les résultats ont été publiés dans un livre (World Scientific, éditeurs Robert Plant et Jun Ichi Yano). De plus nous avons examiné les changements des interfaces des nuages, en traitant l'équation de Sivashinsky avec la dynamique de singularités complexes. L'instabilité de type Hele Shaw (« fingering »), aussi intéressante pour la dynamique des nuages que pour les filaments émis par le plasma tokamak au bord, nous l'avons examiné à l'aide des solutions complexes de type Polubarinova-Galin suivi par des études numériques. Ces études aurait dû être continuées mais elle sont restés au niveau de publications Arxiv.org. Jun Ichi Yano a visité plusieurs fois notre group en Roumanie et nous avons organisé un Atelier (« workshop ») à l'aide de l'Institut de Météorologie à Bucarest.

Au cours des stages de travail à Cadarache nous avons souvent participé aux séminaires qui apportaient ensemble des chercheurs de la Direction de Recherche sur la Fusion Contrôlée et de l'Université d'Aix – Marseille. N'étant pas lié à une machine (Tore Supra) et au programme EURATOM, le spectre des sujets abordés dans le groupe de Marseille était plus large et s'étendait en astrophysique ou structures de confinement différentes de tokamak, comme par exemple la configuration « field-reversed », de Padova. Il y avait aussi une collaboration très active avec des chercheurs de Japon. En 2007 et 2008 nous avons eu pour des durées de quelques mois deux positions de professeurs invités dans le cadre de ce groupe et cela nous a permis d'élargir la collaboration et aborder des sujets nouveaux. Nous avons invité à Bucarest professeur Sadri Benkadda et il a pu connaître ici des chercheurs Roumains travaillant en fusion.

Les quatre équations que les moyens de théorie des champs nous ont permis de déduire : (1) Sinh-Poisson, pour le fluide Euler en 2D ; (2) l'équation du cyclone en atmosphère ; (3) l'équation de Liouville, pour la densité du courant en plasma ; (4) l'équation qui décrit les structures d'écoulement de type anneau, en Océanographie ; on fait l'objet d'une série des séminaires à Marseille qui a mis l'accent sur les fonctionnelle « action » de la théorie de champs correspondante, la structure des champs en interaction (fermions et champs de jauge), sur le rôle du

terme Chern Simons (source de l'élécite). Les séminaires ont été place sur une page web.

En 2008 nous avons reçu l'invitation de faire une présentation sur ces résultats dans la session plénière de la prestigieuse conférence organisée au Centre International des Rencontres Mathématiques de Luminy à Marseille. Des personnalités comme David Montgomery, J. B. Taylor, Keith Moffat se sont montrés très intéressés. Les années qui ont suivi nous avons cherché à maintenir le contact avec eux.

Ce serait intéressant de regarder comment les choses ont évoluée à partir de ces temps-là. Les changement dans la vision d'Euratom, la création de l'EURO-fusion, les exigences de ITER qui est construit à Cadarache, l'inévitable remplacement des générations dans tout le monde de la fusion contrôlée, la domination de plus en plus autoritaire des calculs numérique contre la modélisation sur des bases de l'intuition physique, les exigences strictes issues de l'utilisation des machines (JET, Asdex devenu Asdex Upgrade, Tore-Supra devenu WEST, etc.) ont produit une reconfiguration du champs de la recherche dans le domaine des plasma de fusion. Nécessairement, les collaborations doivent aussi changer.

REFERENCES

- [1] M. Vlad, F. Spineanu, J.H. Misguich, R. Balescu, "Diffusion with intrinsic trapping in 2-d incompressible velocity fields", *Physical Review E* 58 (1998) 7359-7368.
- [2] M. Vlad, F. Spineanu, J.H. Misguich, R. Balescu, "Collisional effects on diffusion scaling laws in electrostatic turbulence", *Physical Review E* 61 (2000) 3023-3032.
- [3] M. Vlad, F. Spineanu, J.H. Misguich, R. Balescu, "Magnetic line trapping and effective transport in stochastic magnetic fields", *Physical Review E* 67 (2003) 026406.
- [4] M. Vlad, F. Spineanu, J. H. Misguich, J.-D. Reuss, R. Balescu, K. Itoh, S.-I. Itoh, "Lagrangian versus Eulerian correlations and transport scaling", *Plasma Physics and Controlled Fusion* 46 (2004) 1051-1063.
- [5] M. Vlad, F. Spineanu, S. Benkadda, "Impurity pinch from a ratchet process", *Physical Reviews Letters* 96 (2006) 085001.
- [6] F. Spineanu, M. Vlad, "Spectrum of coherent structures in a turbulent environment", *Physical Review Letters* 84 (2000) 4854-4858.
- [7] F. Spineanu, M. Vlad, "Soliton modulation of the turbulence envelope and plasma rotation", *Physical Review Letters* 89 (2002) 185001, 1-4.
- [8] F. Spineanu, M. Vlad, "Stationary vortical flows in 2-dimensional plasma and planetary atmosphere", *Physical Review Letters* 94 (2005) 235003.
- [9] F. Spineanu, M. Vlad, "Relationships between the main parameters of the stationary two-dimensional vortical flows in planetary atmosphere", *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics* 103 (2009) 223-244.
- [10] F. Spineanu, M. Vlad, "Self-duality of the relaxation states in fluids and plasmas", *Physical Review E* 67 (2003), 046309, 1-4.
- [11] Croitoru A. M., Palade D. I., Vlad M., Spineanu F., Turbulent transport of alpha particles in tokamak plasmas, *Nuclear Fusion* 56 (2017) 036019
- [12] 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, 2021