
Contribution aux exercices de prospective nationale 2020-2030

Accélérateurs et instrumentation associée

RECHERCHE AMONT POUR LES SOURCES D'IONS DU FUTUR

Auteur principal

Nom : Thuillier¹, Maunoury²

Affiliation : ¹LPSC, ²GANIL

Email et coordonnées : thuillier@lpsc.in2p3.fr , LPSC , rue des martyrs 38026 Grenoble
maunoury@ganil.fr, GANIL, Bvd Becquerel 14000 Caen

Co-auteurs

Thomas André, LPSC

Maud Baylac, LPSC

Mickael Dubois, GANIL

Contribution à rédiger en français ou en anglais et à envoyer à PROSP2020-GT07-COPIL-L@IN2P3.FR
avant le **1^{er} novembre 2019**

1. Informations générales

TITRE : RECHERCHE AMONT SUR LES SOURCES D'IONS DU FUTUR

Acronyme : Proposition **SOIF** (**SO**urce d'**I**ons du **F**utur)

Résumé (max. 600 caractères espaces compris)

La prospective SOIF regroupe deux activités dédiées à la recherche amont sur les sources d'ions RCE. L'objectif est de faire sauter les verrous de compréhension physique et de repousser les limites technologiques des plasmas RCE au-delà du savoir-faire existant. La première activité concerne le développement d'une plateforme d'étude du plasma RCE à 60 GHz appliquée aux accélérateurs, aux plasmas de fusion et à l'astrophysique. La deuxième est dédiée à l'étude par simulation particule in cell du plasma RCE de source d'ions en collaboration avec les laboratoires spécialistes français.

Préciser le domaine de recherche (plusieurs choix possibles)

- Sources de particules (électrons, positrons, muons, protons, ions lourds stables, ions radioactifs...) et cibles associées
- Supraconductivité accélérateur (aimants fort champ, cavités SRF...)
- Diagnostics faisceau, instrumentation et contrôle intelligent

Préciser la motivation principale visée par la contribution :

- Accélérateurs pour la physique nucléaire
- Accélérateurs pour la physique des particules
- Accélérateurs pour les applications sociétales (santé, énergie, industrie...)
- Autre : Physique des plasmas, Astrophysique

2. Description des objectifs scientifiques et techniques

2.1 Etude des plasmas RCE denses à 60 GHz

Les sources d'ions à la résonance cyclotronique électronique [1] (RCE) sont utilisées pour produire des faisceaux d'ions mono ou multichargés auprès de nombreux accélérateurs d'ions dans le monde. On peut citer les faisceaux d'ions plomb pulsés au CERN et les faisceaux d'ions continus des cyclotrons et du LINAC du GANIL. Leurs grandes robustesses, l'absence de pièces d'usures les rendent utilisables en tant que composant de systèmes ayant tant des applications sociétales qu'industrielles (traitement de cancer par hadronthérapie, tribologie, traitement de surface, etc). Une propriété fondamentale du plasma RCE est que la densité du plasma produit est proportionnelle au carré de la fréquence de chauffage de la micro-onde ($n_e \propto f_{RCE}^2$) et qu'à ce jour aucune limite haute à cette loi n'a été observée. Les intensités de faisceau d'ions extraits sont proportionnelles à la densité du plasma et les perspectives d'amélioration sont donc très importantes. Le prix à payer est cependant une augmentation du champ magnétique de confinement du plasma qui suit linéairement la fréquence f_{RCE} . Les sources d'ions les plus performantes en opération fabriquent des plasmas de densité $n_e \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ à $f_{RCE} = 28 \text{ GHz}$ (champ magnétique RCE de 1T). A cet effet, un aimant supraconducteur générant un champ magnétique dit à "minimum-B", est nécessaire pour confiner efficacement ce plasma. Un développement de source à $f_{RCE} = 40 \text{ GHz}$ est en cours en Chine ($n_e \sim 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$), il utilise la technologie Nb_3Sn en raison des très forts champs magnétiques vus par les conducteurs supraconducteurs de l'aimant (~ 11 à 12 T).

Les auteurs se proposent de développer en collaboration internationale une plateforme de recherche incluant une source d'ions multichargés dédiée à la recherche amont travaillant à la fréquence de 60 GHz ($n_e \sim 4.6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$), une ligne d'analyse de basse énergie (45 kV) et un ensemble de diagnostics associés. L'opération à 60 GHz est acquise grâce au prototype SEISM du LPSC [2] exploité au Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses de Grenoble (LNCMI-G) avec le gyrotron fourni par l'Institute of Applied Physics de Nizhny Novgorod (Russie). Pour la source d'ions, les auteurs se proposent de développer un aimant soit hybride [3] (bobine résistive pour l'hexapôle et bobine supraconductrice pour le confinement magnétique axial), soit "tout supraconducteur"[4]. Cette réflexion inclura les experts du LNCMI et du CEA IRFU. Une telle source d'ions aura un grand volume utile (diam. 200 mm, longueur de 500 à 800 mm) et permettra d'instrumenter le plasma. Une telle installation sera unique dans le monde et sera d'un intérêt fort pour:

- la communauté de physique des plasmas (Tokamak, diagnostics et étude des plasmas fortement magnétisés, instabilité plasma, chauffage RCE...)
- les astrophysiciens intéressés par la qualification de leurs systèmes de mesure des champs magnétiques des étoiles en rotation (par effet Zeeman).

- *Les physiciens des accélérateurs pour étudier le transport de faisceau d'ions multichargés ultra intenses en régime de charge d'espace à basse énergie (exemple 24 mA d'O⁶⁺ à la haute tension de 45 kV)*

2.2 Etude du plasma RCE par simulation

Le plasma de source d'ions RCE, utilisé sur les accélérateurs pour produire les faisceaux d'ions, est très complexe et de nombreuses zones d'ombre demeurent encore aujourd'hui dans sa compréhension fine [1,5]. Le savoir-faire est essentiellement expérimental et les moyens d'investigations sont limités à des méthodes de mesure non invasives (lumière, micro-ondes, analyse des faisceaux d'ions, rayonnements X...) difficiles à mettre en œuvre compte tenu de l'accès très réduit au plasma dans les sources existantes. Un moyen prometteur pour améliorer la compréhension du plasma RCE est de l'étudier au moyen de simulations plasma de type particle in cell (PIC) ([6],[7]). Deux laboratoires français du CNRS sont experts des codes PIC : le Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas (LPGP) d'Orsay et le Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie (LAPLACE). Depuis 2016, plusieurs thèses ont lieu à l'IN2P3 pour étudier le plasma RCE par simulation (A.T. Annaluru, 2016-2019 au GANIL; A. Leduc, 2016-2019 au LPSC+GANIL ; A. Mendez, 2019-2022, LPSC+LPGP). Les perspectives de compréhension sont très importantes et les possibilités de publication sont nombreuses. Aujourd'hui, une équipe italienne (INFN) étudie le couplage micro-onde plasma avec un modèle fluide auto-consistant [9]. Un chercheur russe du JINR Dubna développe un code en trois dimensions dédié à l'étude du plasma RCE [8]. Pour le moment, le code impose la quasi-neutralité du plasma, n'inclut pas la gaine plasma et utilise des modèles analytiques paramétrables pour reproduire les données expérimentales. Même si ses approches sont originales et pionnières, les résultats dépendent des hypothèses de départ et peu de conclusions quantitatives peuvent en être tirées, seulement des tendances.

Les auteurs souhaitent proposer une étude des plasmas RCE par simulation PIC en collaboration avec les physiciens des plasmas spécialistes du domaine. La volonté de long terme est d'améliorer la compréhension du plasma jusqu'à atteindre l'étape de la prédictibilité qui permettra de développer de nouvelles générations de source d'ions avec une réduction des aléas des nouveaux projets. Les besoins en calculs sont forts (une simulation réaliste nécessite environ 1000 processeurs travaillant pendant 1 à 3 semaines). Les résultats des simulations seront à comparer avec des campagnes de mesures expérimentales réalisées au GANIL et au LPSC sur des sources d'ions existantes. Une collaboration avec le réseau des experts IN2P3 en diagnostic faisceau sera envisagée afin de bénéficier de leur savoir-faire et de leurs instruments. Les applications des études à mener permettront par exemple :

- *De maîtriser la technique de "charge breeding" RCE (méthode 1+N+) utilisée pour multi-ioniser les ions radioactifs dans les facilités de type SPIRAL1 du GANIL*
- *D'optimiser l'extraction des faisceaux d'ions et de maîtriser les émittances transmises vers l'accélérateur*

3. Développements associés, calendrier et budget indicatifs

(1 page max. incl. figures)

Préciser les travaux envisagés pour mener à bien les objectifs décrits (étude conceptuelle, expérience, prototypage, construction...) ainsi que les résultats espérés et leur échéance, en précisant si possible les partenaires potentiels.

Si possible, évaluer grossièrement l'ordre de grandeur du financement nécessaire pour mener le développement envisagé (coût complet, en distinguant équipements, consommables et ressources humaines).

3.1 Etapes du projet d'étude des plasmas RCE denses à 60 GHz

phase	durée	objectifs	Partenaires espérés
Étude conceptuelle	2 ans	Définir la source d'ions à construire, la ligne basse énergie, les diagnostics faisceaux et diagnostics plasma, les systèmes d'injection des atomes et des microondes.	IN2P3, LNCMI, CEA IRFU, IAP RAS (Russie)
Construction	4 ans	Construire l'instrument en collaboration	tous
Qualification	1,5 an	Valider le fonctionnement de l'instrument en collaboration	tous
Exploitation	20 ans	Recherche scientifique en collaboration et publications, transfert de technologie vers les projets d'accélérateurs du futur.	Ouverture aux autres communautés

Le budget nécessaire est estimé à environ 10 M€ (inclut la source d'ions, la ligne d'analyse, les diagnostics plasmas et astrophysiques), sa durée d'utilisation est estimée à 20 ans. Son coût de fonctionnement à environ 60 k€/an.

3.2 Etapes du projet d'étude du plasma RCE par simulation

Le projet d'étude du plasma RCE par simulation repose sur le travail de doctorants dont les sujets de thèse seront affinés en fonction des achèvements des thèses précédentes. Un premier livrable sera le développement d'un code de simulation PIC du plasma de source d'ions RCE en 3 dimensions, un deuxième livrable sera le développement d'un code PIC simulant spécifiquement la formation du faisceau d'ions dans la gaine du plasma RCE. Un budget sera nécessaire pour assurer le recrutement régulier de doctorants et post-doctorants pendant 10 ans pour progresser significativement sur ce front de recherche, très prometteur en termes de communications et de publications scientifiques. Le budget pour l'emploi de personnel étalé sur 10 ans est estimé à 6 thèses (~6×100 k€) et 4 ans de post doc (~4×50 k€) partagés entre le GANIL et le LPSC. Les frais de missions associés sont estimés à 50 k€ sur 10 ans. Le financement d'une ferme de calcul multi-cœurs (1000 cœurs) dédiée et partagée entre le GANIL et le LPSC est demandée pour un montant de 300k€.

Impact

(0.5 page max.)

Décrire les retombées espérées pour le développement de futures installations de recherche basées sur des accélérateurs ou pour d'autres applications sociétales.

Le cas échéant, préciser les partenariats industriels envisageables.

Le développement de la plateforme équipée d'une source 60 GHz permettra de faire avancer la compréhension des plasmas denses fortement magnétisés d'intérêt pour les communautés de physique des plasmas et des accélérateurs. L'installation permettra à la communauté des astrophysiciens d'étalonner leurs instruments afin de valider leurs mesures de la structure magnétique des étoiles lointaines. Dans le scénario de développement d'une source d'ions totalement supraconductrice, celle-ci une fois qualifiée pourrait être utilisée sur des accélérateurs existants là où des besoins accrus d'intensité sont requis et sur les futurs projets d'accélérateurs à partir de 2030. Le plan de développement de codes PIC débouchera à long terme (> 10 ans) sur des codes de simulation permettant d'expliquer le fonctionnement du plasma RCE de source d'ions en trois dimensions et de prédire la formation de l'émission des faisceaux d'ions extraits. Ces avancées réduiront les risques projets associés au développement des futurs accélérateurs de particules.

Références

- [1] R. Geller, *Electron Cyclotron Resonance Ion Sources and ECR Plasmas*, CRC Press, ISSN: 978-0-7503-0107-7, (1996).
- [2] T. Lamy et al., "60-GHz ECR Ion Sources", 13th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology (HIAT 2015), Yokohama, Japan, JACoW online proc., pp.277-281. [3] Hybrid
- [4] C. Lyneis, P. Ferracin, S. Caspi, A. Hodgkinson, and G. L. Sabbi, "Concept for a fourth generation electron cyclotron resonance ion source", *Rev. Scient. Instrum.* 83, 02A301 (2012); doi: 10.1063/1.3655527
- [5] ICFA Beam Dynamics Newsletter, April 2018, #73, published online : <http://icfa-bd.kek.jp/>
- [6] D. Wunderlich, S. Mochalsky, I. M. Montellano, and A. Revel, *Review of particle-in-cell modeling for the extraction region of large negative hydrogen ion sources for fusion*, *Review of Scientific Instruments*, 89, 052001 (2018) ; doi: 10.1063/1.5011799
- [7] F. Taccogna, Laurent Garrigues. Latest progress in Hall thrusters plasma modelling. *Reviews of Modern Plasma Physics*, Springer Singapore, 2019, 3 (1), 10.1007/s41614-019-0033-1. hal-02326278
- [8] V. Mironov, S. Bogomolov, A. Bondarchenko, A. Efremov, and V. Loginov, "Numerical model of electron cyclotron resonance ion source", *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 18, 123401 (2015)
- [9] A. Galatà, D. Mascali, G. Torrisi, L. Celona, L. Neri, and T. Podest, Status and perspectives of INFN simulation tools: From beam-plasma interaction to a self-consistent plasma-target modelling, *AIP Conference Proceedings* 2011, 020017 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5053259>