Contribution aux exercices de prospective nationale 2020-2030

Accélérateurs et instrumentation associée

BOOSTER DE CHARGES : NOUVELLE CONCEPTION

Auteur principal

Nom : L. Maunoury¹, J. Angot² Affiliation : ¹GANIL, ²LPSC Email et coordonnées : <u>laurent.maunoury@ganil.fr</u>; Bd Henri Becquerel, 14076 Caen Cedex 05 Julien.angot@lpsc.in2p3.fr; 53 Avenue des Martyrs, 38000 GRENOBLE

Co-auteurs

- M. Baylac, LPSC, Grenoble
- P. Delahaye, GANIL, Caen
- M. Dubois, GANIL, Caen
- T. Thuillier, LPSC, Grenoble

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

1. Informations générales

Titre : Booster de charges : nouvelle conception

Acronyme : COOL_CB

Résumé

Dans la méthode ISOL, la production d'ions radioactifs est souvent réalisée par des ensembles cible-source délivrant des faisceaux d'ions mono chargés. Afin de les post-accélérer, il faut augmenter leur état de charge grâce à un booster de charges, caractérisé par son acceptance, son efficacité, son temps de processus, son taux d'ajout de contaminants et sa facilité de réglage. Afin d'améliorer les performances des boosters de charges ECR actuels, nous proposons 2 directions d'évolution de l'architecture de la source, une « multi-étages » et une « nouvelle génération ».

Préciser le domaine de recherche (plusieurs choix possibles)

• Physique des accélérateurs (nouveaux concepts machines, optique et dynamique des faisceaux...)

Préciser la motivation principale visée par la contribution :

• Accélérateurs pour la physique nucléaire

2. Description des objectifs scientifiques et techniques

La méthode Isotope Separation On Line (ISOL) est utilisée pour produire des ions radioactifs pour la communauté de physique nucléaire et astrophysique et pour produire, notamment, des isotopes pour des applications médicales [1]. Les noyaux radioactifs sont produits par fragmentation ou fusion-évaporation d'un faisceau primaire accéléré bombardant une cible de production. Ces noyaux sont ionisés une fois, transportés à basse énergie vers un postaccélérateur, accélérés et dirigés vers les aires expérimentales. Le booster de charges est un maillon de cette chaine de production. Positionné entre l'ensemble cible-source et le postaccélérateur, il permet d'augmenter l'état de charge des faisceaux radioactifs produits afin de rendre possible la post-accélération. Ses performances ont un impact direct sur le taux d'ions radioactifs post-accélérés (10⁴ pps nécessaires au minimum pour la réalisation d'expériences de physique). Deux technologies existent pour cet instrument, les booster EBIS (Electron Beam Ion Source) et ECRIS (Electron Cyclotron Ion Source). Les boosters EBIS sont principalement utilisés dans les installations ayant de faibles taux de production d'ions radioactifs car cette technologie a pour avantage d'être efficace et propre, mais elle n'accepte pas de fortes intensités ($\approx 10^5$ pps). Les boosters ECR peuvent accepter des faisceaux plus intenses ($\approx 10^{12}$ pps) et sont plus robustes mais ont pour inconvénient d'ajouter une plus grande quantité de contaminants et l'état de charge optimum est plus difficile à contrôler. Cette contamination doit être gérée en aval par un système de filtrage en masse de l'ordre de $\frac{M}{\Lambda M}$ ~10000. Pour la génération actuelle de booster de charges ECR, fonctionnant à 14 GHz, les performances sont de l'ordre de [2,3] :

- Efficacité globale comprise entre 50 et 70 % pour les ions métalliques allant jusqu'à 85 % pour les gaz.

- Efficacité sur un état de charge comprise entre 10 et 20 %
- Temps de processus d'ionisation de 5 à 50 ms par charge
- Capacité maximum d'ions injectés sans perte de performance de l'ordre 5×10^{12} pps
- Taux de contamination total de l'ordre de 10⁹ à 10¹⁰ pps

La technologie des boosters existants utilise le savoir-faire des années 1990, tandis que les performances des sources d'ions ECR se sont grandement améliorées depuis. Les études expérimentales menées sur les boosters ECR montrent qu'une amélioration substantielle de leurs performances est possible [9]. Les paramètres clés sont l'amélioration de la capture des ions 1+ par le plasma, la réduction du temps de confinement des ions dans le plasma et l'amélioration de la gamme d'état de charge N+ admissible. De telles améliorations seront primordiales pour les programmes de physique menés sur Spiral 1 (Ganil) et SPES (LNL) ainsi que pour les futurs projets SPIRAL 2 (GANIL) et EURISOL. La présente prospective présente deux scénarii d'évolution de booster, proposés d'une part par le GANIL (L. Maunoury) et le LPSC (J. Angot). Le point commun de ces deux approches est d'augmenter le pouvoir d'arrêt du faisceau d'ions 1+ dans le plasma. La méthode pour y parvenir diffère cependant. Dans la première, une solution de source à 2 étages est associée à un cooler (système de réduction d'émittance) pour améliorer la capture du faisceau injecté et obtenir une plus grande gamme de réglage de l'état de charge majoritaire N+. Dans la deuxième, le plasma ECR est allongé pour garantir une haute capture et agrandi pour minimiser la contamination. Le réglage de l'état de charge et du temps de confinement est facilité par l'utilisation d'un hexapole supraconducteur. Il faut noter que le cooler peut être utilisé dans les deux scénarii.

2.1 Architecture multi-étages (L. Maunoury, GANIL)

Pour les Booster ECR, les efficacités peuvent décroitre d'un facteur 2 à 3 pour les éléments légers [1]. De plus, II a été montré [4] que l'efficacité de transformation était d'autant plus grande que l'émittance du faisceau d'ions mono-chargé injecté était petite, une valeur idéale d'émittance géométrique étant de quelques π .mm.mrad. Un autre point important est de pouvoir facilement modifier l'état de charge majoritaire en sortie du booster de charges pour obtenir, après le post-accélérateur, une grande gamme de faisceaux d'ions post-accélérés. Sachant que pour un cyclotron $E_{final} = K^*(Q/M)^2$ (Q et M charge et masse de l'ion, K facteur lié au cyclotron), Il faut pouvoir optimiser le booster de charges sur un état de charge faible, moyen ou élevé.

Nous proposons donc une nouvelle conception de booster de charges comprenant un cooler pour diminuer l'émittance du faisceau d'ions mono chargé et une solution à deux étages pour séparer la partie capture de la partie multi ionisation. La figure 1 présente un schéma de principe.



Figure 1. Schéma de la nouvelle structure du booster de charges proposé

Cette proposition est le résultat de la combinaison de plusieurs résultats scientifiques ou techniques :

 Dans le brevet FR 2 933 532 – B1 [5], une source à deux étages a été testée expérimentalement. Le 1^{er} étage était un plasma chauffé à 14 GHz (densité n~ 10¹¹ cm⁻³ et de longueur L~1 cm), le deuxième un plasma à 2,45 GHz (n~10¹⁰ cm⁻³ et L~5 cm). Il a été montré, pour l'injection d'atomes neutres de plomb, une augmentation significative de l'intensité de Pb^{2+} (2.7), Pb^{3+} (3.1), Pb^{4+} (\approx 2) entre le fonctionnement avec et sans le premier étage. Ceci s'explique par le fait que l'ajout du 1^{er} étage augmente l'épaisseur de plasma traversé par le faisceau 1+ (épaisseur caractérisée par le produit $n \times L$). Ceci prouve qu'un booster à deux étages doit fonctionner avec une augmentation de l'efficacité globale.

- 2) Comme expliqué dans [1, 4], ce sont surtout les collisions ions-ions qui sont à l'origine de la capture des ions 1+ par un plasma RCE; augmenter la densité ionique (donc la densité électronique ni = ne/<Z>) permettra d'augmenter également la probabilité de capture qui est au maximum de 50% pour les éléments légers. Le document [7] démontre que l'augmentation de la densité électronique d'un facteur 2.5 (cas de ²³Na⁺ dans un plasma d'He) augmente la capture d'un facteur 1.75. D'autre part le document [6] montre bien la difficulté d'obtenir des efficacités importantes pour les ions de masse légère. Selon les lois de Geller, la densité électronique est proportionnelle à la fréquence au carré de l'onde RF envoyée donc en augmentant la fréquence de fonctionnement, la densité électronique accroîtra également.
- 3) Le document [4] démontre que la diminution de l'émittance du faisceau 1+ permet, dans le cas du faisceau de ²³Na¹⁺, d'augmenter le taux de capture de 0.8 à 20.5% pour une émittance diminuant de 80 à 10 π.mm.mrad. Les coolers [8] sont des appareils utilisés depuis de nombreuses années. Ils permettent de diminuer significativement les émittances de faisceaux d'ions (facteur 30) avec des transmissions comprises entre 80 et 100%. Il faut noter que l'ajout d'un cooler est générique et peut être appliquée aux deux scénarii d'évolution de booster proposé.
- 4) Les documents [2, 3] tendent à prouver que pour une configuration magnétique donnée et une fréquence de fonctionnement fixe, les boosters de charges classiques vont préférentiellement vers la production d'états de charge avec une distribution fixe dont l'état de charge maximum, selon Geller, est proportionnel à $\ln \omega_{RF}^{7/2}$ et $P_{RF}^{7/2}$. Le volume du plasma joue aussi un rôle important.

L'idée est donc de préparer le faisceau d'ions mono-chargés en le faisant passer à travers un cooler pour obtenir une émittance de quelques π .mm.mrad avant son injection dans le booster de charges. Celui-ci comporte deux étages (voir schéma figure 1): un premier étage appelé haute densité où une fréquence élevée de fonctionnement est appliquée (typiquement 20-28 GHz) pour obtenir une grande efficacité de capture ; un deuxième étage appelé multiionisation où une fréquence variable est appliquée (10-18 GHz) pour optimiser le fonctionnement sur un état de charge couvrant une large gamme (faible, moyen et fort). La figure 2 montre le champ magnétique axial typiquement recherché. Le transport des ions 1+ capturés du premier étage vers le deuxième étage se fera grâce au gradient de champ magnétique aidé par un champ électrostatique les attirant plus rapidement vers le deuxième étage (grille de contrôle fixée à un potentiel variable).



<u>Fiqure 2.</u> Champ magnétique typique que l'on cherche à produire avec le schéma de la figure 1

L'objectif à terme sera d'atteindre pour les ions métalliques et spécialement ceux de masse légère une efficacité globale de 70% et des efficacités d'environ 20% dans un état de charge (actuellement le cahier des charges du booster de SPIRAL1 demandait une valeur de 7%). Un objectif opérationnel sera d'avoir un booster de charges avec un minimum de paramètres de réglage.

Si ce développement s'avère concluant, il pourra être testé comme méthode alternative pour la production d'ions métalliques stables intenses. Dans ce cas, le cooler sera enlevé et un four créant des vapeurs métalliques sera placé proche du premier étage.

2.2 Booster de charges nouvelle génération (J. Angot, LPSC)

L'architecture « nouvelle génération » vise à améliorer les performances du Booster de charges ECR en tirant profit des progrès réalisés ces dernières années sur la compréhension des processus mis en jeu dans les booster de charges (capture, multi-ionisation) [9, 10]. L'efficacité de capture est améliorée au-delà de 90% grâce à un allongement du plasma qui atteint environ 40 cm contre 18 cm actuellement. Une réduction des taux de contaminant est obtenue i) en augmentant le diamètre de la chambre à plasma (\varnothing 200 mm contre \varnothing 72 mm aujourd'hui), ii) en utilisant un unique matériau léger sans isotopes (ex : béryllium métal) pour la chambre à plasma et toutes les pièces mécaniques en vue du plasma (aussi bien du côté de l'injection que celui de l'extraction des ions) iii) en utilisant une injection de gaz hélium purifié par un piège cryogénique iv) en utilisant les techniques ultra vides et en étuvant le booster. L'état de charge est contrôlé par l'adaptation du temps de confinement du plasma, lui-même réglé par l'intensité du champ magnétique hexapolaire et l'intensité du champ magnétique axial d'extraction des ions du plasma. L'indice de confiance dans le fonctionnement du booster de nouvelle génération est évalué comme très élevé car il s'appuie sur du savoir-faire déjà existant. Le risque projet de l'instrument est évalué comme faible car il utilise des technologies existantes très bien maîtrisées aujourd'hui.

La Figure 3 montre la configuration proposée pour une nouvelle génération de booster de charges.



Figure 3. Vue en coupe de la configuration de la nouvelle génération de booster de charges ECR.

Dans cette conception, la source possède une structure magnétique entièrement supraconductrice pour moduler indépendamment les champs magnétiques axial et radial et ainsi obtenir une plus grande souplesse de réglage. Elle permet un fonctionnement à une fréquence comprise entre 14 et 18 GHz, sélectionnée pour optimiser des performances ciblées (haut état de charge, court temps de processus...) et minimiser le taux de contamination du plasma qui est proportionnel à la densité du plasma. La structure magnétique axiale, composée de 9 bobines, au lieu de 3 classiquement, permet de générer une zone ECR 3 fois plus longue par rapport aux sources actuelles, améliorant ainsi la capture du faisceau injecté (voir la figure 3 gauche). Elle offre aussi la possibilité de tester un champ magnétique plat au centre ou bien l'idée de booster 2 étages proposée dans la partie 2.1 (voir la figure 3 droite). Il faut noter que le champ magnétique utile est de l'ordre de 2.5 T maximum axialement et de 1.4 T radialement, ce qui rend la conception des bobines confortable quant à la marge de fonctionnement admissible des câbles supraconducteurs en NbTi (taux de charge estimé à 60% avec une densité de courant maximale de 200 A/mm²).



<u>Figure 3</u>. Gauche. Profil de champ magnétique axial permettant d'obtenir un plasma de 400 mm de long à 14 GHz (courbe rouge) et 18 GHz (noir). Les champs magnétiques de résonances associés sont indiqués en pointillés. Droite. Illustration de la flexibilité du profil magnétique axial avec un champ "plat" (noir), et le profil nécessaire pour tester l'idée du booster 2 étages de L. Maunoury (rouge). Les résonances 18 et 28 GHz sont indiquées respectivement en noir et rouge pointillé.

Des techniques d'ultra vide sont mises en œuvre dans les caissons amont et aval pour réduire le vide résiduel et ainsi diminuer la contamination qui en découle.

Le

Tableau 1 présente l'augmentation des performances, à plusieurs fréquences, attendues par rapport à la génération actuelle de booster de charges.

Les résultats sont extrapolés jusqu'à une fréquence de 28GHz, même si la fabrication d'une source fonctionnant à cette fréquence serait très coûteuse et présenterait des facteurs de risque "projet" très accrus. On voit qu'augmenter la fréquence ECR permet de réduire le temps de charge breeding mais par contre cela réduit le gain en réduction des contaminants par rapport à des fréquences ECR plus basses. Le meilleur compromis pour le projet est trouvé à 18 GHz.

f _{ECR} [GHz]	14	18	28
efficacicé 1+/N+	+20%	+20%	+20%
Temps de charge breeding relatif	0%	-40%	-75%
τ _{св}			
Plus haut état de charge N+	+20%	+20%	+20%
Densité des contaminants	-80%	-67%	-20%
pulvérisés dans le plasma			
Densité des gaz contaminants	÷1000	÷1000	÷1000
Contamination spectrale d'ions	÷100 ÷1000	÷60÷600	÷25÷250
pulvérisés			

Tableau 1 : amélioration des performances de la nouvelle génération de booster ECR par rapport à lagénération actuelle prise comme référence.

3. Développements associés, calendrier et budget indicatifs

Les phases de projet des deux prospectives de boosters sont présentées en une seule partie étant donné que l'idée multi-étage est un cas particulier du booster de charges nouvelle génération. Cette idée fera donc partie de la partie expérimentale – tests.

Le cooler sera développé à partir de ceux existant construits au LPC Caen et adapté à un booster de charge. Il sera testé sur un booster de charges existant. Ce développement va nécessiter un PostDoc de 2 ans : simulations et réalisation. Le coût est d'environ 300 k€.

La conception du nouveau booster de charges se déroulera sur une durée de 2 ans avec le support d'un post doctorant. La structure magnétique supraconductrice sera développée en collaboration avec le CEA IRFU. La fabrication durera 3 ans et les tests sur le banc expérimental 1+N+ du LPSC 2 ans soit une durée totale de 7 ans. Le budget estimatif pour la conception et la fabrication de ce Booster de charges est de 2 M€ hors salaire.

4. Impact (0.5 page max.)

Ces développements bénéficieront tout d'abord aux plateformes nationales (particulièrement l'installation SPIRAL1) mais pourront être étendus à d'autres installations européennes comme SPES ou internationales comme Texas A&M. Selon les opportunités de développement dans GT02 et les implications sur la construction de nouvelles installations, ces opportunités d'évolution du booster de charges pourront permettre des gains en terme d'intensité finale sur les futurs faisceaux d'ions radioactifs qui seront produits dans le futur par ces nouvelles installations. Finalement ces développements pourront être transférés vers l'industrie (via la société Pantechnik) pour être valorisés (projets en cours ou futurs à l'international comme RAON, Corée du Sud ou BISOL China etc...).

Références

- 1) Thèse Nicolas Chauvin, "LA TRANSFORMATION D'ÉTAT DE CHARGE 1+/n+ POUR L'ACCELERATION DES IONS RADIOACTIFS", Université Joseph-Fourier Grenoble I, Grenoble (2000)
- 2) L. Maunoury et al., « Charge breeder for the SPIRAL1 Upgrade: preliminary results», Review of Scientific Instruments **87** 02B508 (2016)
- 3) J. ANGOT et al., « Recent improvements of the LPSC charge breeder », AIP Conference Proceedings 2011, 070005 (2018).
- 4) Thèse Arun Annaluru, "Beam optics transport and fundamental processes involving a charge breeder in the upgraded SPIRAL1 facility", Université de Caen Normandie (2019)
- 5) JY Pacquet et G. Gaubert, "Dispositif générateur d'ions a resonance cyclotronique électronique", Brevet FR 2 933 532 B1 (2010)
- 6) P. Delahaye et al., « Optimizing charge breeding techniques for ISOL facilities in Europe: Conclusions from the EMILIE project», Review of Scientific Instruments 87 02B510 (2016)
- O. Tarvainen et al., « Diagnostics of charge breeder electron cyclotron resonance ion source helium plasma with the injection of 23Na1+ ions », Physical Review Accelerator and Beams 19 053402 (2016)
- 8) A. Kellerbauer et al., « Buffer gas cooling of ion beams», Nuclear Instruments and Method in Physics Research A 469 (2001) 476
- 9) O. Tarvainen et al., « Injected 1+ ion beam as a diagnostics tool of charge breeder ECR ion source plasmas», Plasma Sources Sci. Technol. 24 (2015) 035014
- 10) T. THUILLIER et al., « Challenges and prospects of electron cyclotron resonance charge breeders applied to radioactive ion beam facilities », 2019 JINST 14 P02030.