
Contribution aux exercices de prospective nationale 2020-2030

Accélérateurs et instrumentation associée

OPTIMISATION DES SYSTEMES ISOL POUR LA PRODUCTION D'IONS METALLIQUES RADIOACTIFS DE COURTE DUREE DE VIE

Auteur principal

Nom : JARDIN

Affiliation : CNRS/IN2P3/GANIL/DOD/GCS

Email et coordonnées : jardin@ganil.fr

Co-auteurs

Noms : MacCormick Marion, Jean-Charles Thomas, Mickaël Dubois, Brigitte Roussière, Julien Guillot

Affiliation :

Email et coordonnées : maccorm@ipno.in2p3.fr; thomas@ganil.fr; dubois@ganil.fr;
roussier@ipno.in2p3.fr; guillotjulien@ipno.in2p3.fr

Proposition associée à

- Proposition de L. Maunoury, GT7.
- GT2. Regroupement 9 : Quel développement des installations nationales ?

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 : Optimisation des systèmes ISOL pour la production d'ions radioactifs de courte durée de vie

Acronyme : (optionnel)

Résumé (max. 600 caractères espaces compris)

La production de faisceaux d'ions radioactifs repose sur la production de noyaux radioactifs (NR) qui sont ensuite séparés. L'intensité disponible de NR est égale au produit du nombre de noyaux produits par l'efficacité du séparateur. Aujourd'hui, l'augmentation de l'intensité des faisceaux de NR repose très majoritairement sur une augmentation du nombre de réactions nucléaires. L'objectif de cette proposition est d'augmenter l'intensité des faisceaux d'ions métalliques radioactifs de courte durée de vie par une optimisation des instruments de production.

Préciser le domaine de recherche

- Production d'ions radioactifs

Préciser la motivation principale visée par la contribution :

- Accélérateurs pour la physique nucléaire

2. Description des objectifs scientifiques et techniques

La production de faisceaux d'ions radioactifs (IR) est basée sur la production de réactions nucléaires entre un faisceau dit « primaire » d'ions ou d'électrons et les noyaux d'une cible. Deux méthodes sont très répandues, qui comprennent une cible et un séparateur situé en aval de la cible. La méthode en vol consiste à profiter de l'énergie cinétique des produits de réaction au-delà de la cible pour les séparer et les transporter jusqu'à l'expérience de physique. La méthode dite ISOL (Isotope Separator On Line) utilise un dispositif généralement appelé « ensemble cible-source (ECS) » qui consiste à arrêter les produits de réaction dans de la matière d'où ils sont relâchés avant d'être ionisés, accélérés et séparés. Dans les deux cas, l'intensité finale des faisceaux d'IR résulte du produit du nombre de noyaux produits dans la cible par l'efficacité du séparateur.

La solution la plus répandue pour augmenter l'intensité finale est une augmentation de l'intensité du faisceau d'ions primaire et de son énergie : 200 kW de deutons sur cible carbone pour le futur GANIL/SPIRAL2ph2, 200 kW d'uranium sur cible de carbone à MSU, 400 kW d'uranium sur cible de carbone à Riken, 50 kW de protons sur cible d'éléments lourds à TRIUMF.

Le recours à de telles puissances présente plusieurs inconvénients. Elles induisent une production de radioactivité artificielle dont le volume soumet la construction et l'exploitation des installations à des exigences de sûreté qui détournent des ressources au profit de la construction de bâtiments nucléaires et de la gestion des exigences de sûreté. Une fois l'installation réalisée, les opérations techniques sont ralenties par les procédures de sécurité et de sûreté et le temps de faisceau finalement disponible pour les expériences est limité. Enfin, l'augmentation d'intensité du faisceau primaire nuit généralement à l'efficacité du dispositif, en termes de rapport de l'intensité d'IR produits sur l'intensité du faisceau primaire. Ces conséquences inévitables interrogent sur la pertinence du recours à des intensités et énergies de faisceau toujours plus importantes pour produire des IR.

Est-il possible de faire autrement ?

Les dispositifs ISOL de production d'IR sont généralement conçus pour produire des noyaux dans une région déterminée par le couple projectile cible. Le noyau d'intérêt est extrait de l'ensemble des noyaux produits par l'utilisation de différents systèmes (sélection chimique, thermique, ionisation sélective, séparation magnétique, temps de vol...). Dans la plupart des installations, le couple faisceau primaire-cible est peu adapté à la production du noyau d'intérêt car ces installations disposent de peu de latitude sur le choix du couple faisceau primaire-cible. Les faisceaux primaires (nature, énergie) y sont uniques. Pour maximiser la production du noyau d'intérêt, le faisceau dont l'installation dispose interagit avec une cible dimensionnée pour supporter le maximum d'intensité, augmentant la production de noyaux radioactifs dans tout le spectre sans distinction. En dehors du noyau d'intérêt, la production des autres noyaux est superflue, et peut nuire à la séparation du noyau d'intérêt et des contaminants.

L'intensité et l'énergie du faisceau primaire ont aussi une influence sur la durée de vie des IR produits, via les dimensions de l'ensemble cible source. Ces dimensions croissent

avec la puissance du faisceau primaire pour limiter la température de la cible, et entraînent un allongement du temps de transformation des atomes en ions. Les noyaux radioactifs de courte durée de vie subissent alors des pertes qui réduisent l'efficacité du dispositif.

La production des noyaux très exotiques, métalliques et réfractaires constitue le challenge le plus ambitieux des installations ISOL. Pour réussir à dépasser les limites de production actuelles, il est nécessaire d'abandonner l'approche qui consiste à maximiser la production dans la cible puis à tenter d'optimiser l'efficacité de transformation des atomes en ions. Puisque l'intensité d'IR finale augmente avec le taux de production dans la cible et que l'efficacité de transformation tend à diminuer avec ce taux, un optimum d'intensité existe nécessairement pour chaque IR. Pour l'atteindre, il faut optimiser le dispositif de production dans son ensemble dès le début de sa conception. Cette optimisation au cas par cas sera facilitée grâce aux puissances de calcul actuelles qui permettent de simuler les comportements des processus de transformation et ainsi de limiter les tests expérimentaux. Pour une installation ISOL, l'optimisation implique de disposer de faisceaux primaires variés (en énergie, en nature et en intensité) et de cible variées pour bénéficier de sections efficaces maximales. De plus, l'installation d'irradiation doit permettre l'accueil de dispositifs variés, basés sur les technologies les plus appropriées à la transformation des atomes radioactifs en ions.

Les installations GANIL/SPIRAL1 et IPNO/ALTO possèdent les caractéristiques requises pour l'optimisation des dispositifs de production et ont la possibilité de relever ce challenge plus que beaucoup d'autres installations mondiales.

Un cas d'école est traité dans le cadre du projet ANR TULIP (collaboration GANIL/IPNO) pour démontrer l'intérêt de l'optimisation d'un dispositif de production. Ce projet devrait permettre à court terme de démontrer le bénéfice de la démarche en termes de rapport entre intensité de faisceaux d'ions métalliques très exotiques et intensité du faisceau d'ions primaires.

La transposition de cette démarche à la production d'autres ions très exotiques sera évidemment confrontée à de nombreux obstacles techniques. Ces obstacles pourraient probablement être surmontés à l'aide d'innovations instrumentales, dont le coût humain et matériel pourrait être partiellement financé par l'économie faite sur l'intensité des faisceaux primaires et sur ses conséquences.

Cette technique, propre à la méthode ISOL, est une piste importante à étudier pour les ions exotiques produits à basse énergie que cela soit par un mécanisme de fusion-évaporation, de transferts-multi-nucléoniques ou de fission. Ces considérations font partie des réflexions du GT2.

3. Développements associés, calendrier et budget indicatifs **(1 page max. incl. figures)**

Au-delà de la démonstration faite dans le projet ANR TULIP (début 10/2019, fin 2023) pour la production des ions $^{74}\text{Rb}^+$, $^{100-105}\text{Ag}^+$ et d'ions dans la région du $^{100}\text{Sn}^+$, toutes les régions très exotiques de la carte des noyaux peuvent être considérées. L'approche impliquant l'optimisation de paramètres physiques et techniques, il est essentiel que le développement se fasse en collaboration étroite entre physiciens et ingénieurs.

L'objectif à atteindre à l'échéance de 2030 devra être extrait des demandes de la communauté de physiciens nucléaires. L'ambition technique pourrait être la transformation d'atomes radioactifs en ions avec une efficacité de l'ordre de 10%, pour des noyaux ayant une durée de vie de l'ordre d'une dizaine de ms et une température de fusion de l'ordre de 2000°C. Cette efficacité est importante pour pallier aux sections efficaces de production, en très forte diminution lorsque l'exotécité croît. Pour les mesures de précision et de découverte, un taux de production allant d'un ion par jour à quelques centaines par seconde est suffisant. Pour les expériences demandant des faisceaux ré-accélérés, une intensité plus importante est nécessaire et doit être déterminée au cas par cas.

Le nombre de cas étudiés et la vitesse de progression dépendront des moyens engagés. A titre indicatif, l'étude d'un nouveau dispositif de production d'ions radioactifs à GANIL nécessite au minimum 3 ans avec les ressources suivantes : 100 k€ en matériel, un doctorant ou post-doctorant pendant 3 ans, 1H.an ETP au total pour les ressources techniques internes aux laboratoires (études mécaniques, thermique, montages et tests sur bancs), 0.3 ETP pour les études de sûreté, et 0.8 ETP/an par ECS pour l'encadrement de la R&D. Le temps consacré par le physicien associé à la R&D dépend principalement du choix de la réaction nucléaire et de l'évaluation de sa section efficace.

4. 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.

En changeant de démarche pour le développement des dispositifs ISOL, des régions de la carte des noyaux aujourd'hui très difficilement accessibles pourraient être explorées, et les intensités de faisceaux d'ions radioactifs obtenues aujourd'hui pourraient être augmentées sans avoir recours à des intensités de faisceaux primaires supérieures à celles déjà disponibles.

Ce changement d'approche nécessite une souplesse des moyens techniques dont peu d'installations disposent. Les installations ISOL GANIL/SPIRAL1 et IPNO/ALTO ont cette souplesse et peuvent donc ensemble relever ce défi, moyennant de changer leur approche des systèmes de production.

Au-delà de la satisfaction de besoins de la communauté de physique nucléaire, la réalisation de dispositifs optimisés permettra de limiter les ressources investies dans la nucléarisation des installations, au profit d'un ré-investissement dans des activités de R&D innovantes.

Références

AAPG ANR 2018 : Target Ion Source for Short-Lived Ion Production TULIP.