

Nucléosynthèse et origine des éléments

1. Contexte général :

Depuis les premières secondes du Big-Bang qui a créé l'hydrogène et l'hélium jusqu'à la génération actuelle d'énergie dans notre Soleil, la physique nucléaire a joué un rôle fondamental dans l'évolution de l'Univers. En effet, les réactions nucléaires régissent la vie et la mort des étoiles, déterminent l'évolution chimique des galaxies et produisent les éléments à partir desquels nous sommes fabriqués. Pour comprendre l'origine des éléments et les divers processus de nucléosynthèse mis à l'œuvre dans l'Univers, il est nécessaire de mesurer de nombreuses données nucléaires (taux de réaction, masses et décroissances β) afin de confronter les résultats obtenus à l'aide de modèles astrophysiques aux abondances observées. La physique nucléaire, la modélisation astrophysique et les observations astronomiques ont fait l'objet de grands progrès ces trente dernières années; néanmoins, un grand nombre de questions restent ouvertes, qu'il s'agisse de la nucléosynthèse primordiale (problème du ${}^7\text{Li}$ cosmologique), de la nucléosynthèse stellaire dans des sites "calmes" (étoiles massives...) ou de celle opérant dans des sites explosifs (novæ, supernovæ, sursauts X, accrétion de deux étoiles à neutrons...).

2. Questions ouvertes sur les différents processus de nucléosynthèse et projets expérimentaux:

a) Nucléosynthèse stellaire calme dans les étoiles massives : IPHC : S. Courtin, D. Curien, M. Heine, M. Moukkadam, J. Nippert ; IPNO : S. Della Negra, F. Hammache, N. de Séréville

Les réactions pour lesquelles une mesure directe près de la fenêtre de Gamow est réalisable sont peu nombreuses. Parmi celles-ci les réactions de fusion ${}^{12}\text{C}+{}^{12}\text{C}$, ${}^{12}\text{C}+{}^{16}\text{O}$ et ${}^{16}\text{O}+{}^{16}\text{O}$ occupent des places très importantes [1]. Nous avons récemment mesuré la section efficace de la réaction de fusion ${}^{12}\text{C}+{}^{12}\text{C}$ à des énergies proches de la fenêtre de Gamow avec une précision de mesure exceptionnelle, grâce à l'expérience STELLA à Andromède. Ces mesures ont montré une possible influence de résonance et de l'effet de suppression de la fusion aux énergies très en dessous de la barrière de Coulomb. Cet effet, identifié dans plusieurs systèmes de masses moyennes, mais peu connu encore dans les systèmes légers, d'intérêt astrophysique, pourrait avoir des conséquences majeures sur le cycle de vie des étoiles massives. Ce phénomène est à l'origine de collaborations entre expérimentateurs et théoriciens (calculs TDHF) que nous souhaitons poursuivre et renforcer.

Par ailleurs, le système ${}^{12}\text{C}+{}^{12}\text{C}$ est fortement sensible aux résonances moléculaires dans ${}^{24}\text{Mg}$. Nous étudions ce type de résonances de longue date et souhaitons mesurer et caractériser celles-ci dans les systèmes d'intérêt astrophysique, en particulier si elles persistent à basse énergie.

Auprès d'installations de faisceaux stables intenses, nous sommes en mesure dans les années qui viennent d'identifier les effets combinés de suppression de la fusion et de résonances de manière précise dans le système ${}^{12}\text{C}+{}^{12}\text{C}$ ainsi que dans les systèmes voisins ${}^{12}\text{C}+{}^{16}\text{O}$, ${}^{16}\text{O}+{}^{16}\text{O}$ et d'étudier leur impact sur l'astrophysique en collaboration avec les astrophysiciens spécialistes de l'évolution stellaire.

[1] C. Rolfs and W. Rodney. *Cauldrons in the Cosmos*, The University of Chicago Press, 1988, B. Back et al., Rev. of. Mod. Physics 86, 2014.

b) Production des noyaux plus lourds que le Fe avec le processus s, r et i :

b.1 Mesures indirectes de sections efficaces induites par neutrons par la méthode de substitution. CENBG: B. Jurado, P. Marini, L. Mathieu, I. Tsekhanovich; IPNO: L. Audouin; CEA-DAM: A. Chatillon, L. Gaudefroy, V. Meot, O. Roig, J. Taieb

Les sections efficaces induites par neutron sur des noyaux à courte durée de vie sont essentielles pour la compréhension des processus de nucléosynthèse s et r. Cependant, la mesure directe de ces sections efficaces neutroniques s'avère très compliquée, voire impossible, à cause de la radioactivité des cibles nécessaires. Pour faire face à ces difficultés, nous proposons d'utiliser la méthode de substitution. Cette méthode consiste à mesurer les probabilités de désexcitation induites par des réactions de substitution (typiquement des réactions de transfert ou de diffusion inélastique) qui conduisent aux mêmes noyaux que ceux formés suite à l'absorption d'un neutron. Les probabilités de désexcitation (par fission, émission de rayons gamma ou de neutrons) du noyau formé par la réaction de substitution sont très utiles pour contraindre les paramètres des modèles et permettent des prédictions précises des sections efficaces neutroniques d'intérêt. Dans ce cadre nous développons actuellement un projet innovant pour réaliser des mesures de substitution en cinématique inverse auprès des anneaux de stockage de GSI/ FAIR. Notre projet permettra de mesurer avec une très bonne précision les probabilités de désexcitation d'un grand nombre de noyaux radioactifs qui ne sont pas mesurables avec les techniques existantes, par exemple on pourra mesurer pour la première fois les probabilités de fission des actinides et pré-actinides déficients en neutrons autour d'une fermeture en couche, notamment N=126. Ces études, permettront d'améliorer significativement les prédictions des sections efficaces près de la fermeture en couche N=184, qui sont essentielles pour le processus r. En outre on utilisera la réaction (d,p) pour déduire les sections efficaces (n, γ) des ^{135}I , $^{136,139}\text{Cs}$, ^{140}Ba qui sont importantes pour la compréhension du processus i de nucléosynthèse. Les possibilités uniques offertes par les anneaux de stockage pour l'étude des réactions nucléaires avec des faisceaux radioactifs sont discutées dans la contribution à ces perspectives sur les installations nationales.

b.2) Mesures avec la technique TAGS: Subatech : M. Estienne, M. Fallot, A. Porta; GANIL: B. Bastin, A. Fantina; LPC Caen : F. Gulminelli

La technique Spectroscopie Gamma par Absorption Totale (TAGS) est l'outil privilégié pour accéder expérimentalement à la distribution de force bêta, une observable microscopique qui fournit une contrainte aux modèles théoriques nucléaires complémentaire aux grandeurs intégrales comme les demi-vies ou Pn. Ces modèles théoriques interviennent de manière essentielle dans les calculs de capture électronique pour la dynamique d'effondrement des étoiles massives et du processus de nucléosynthèse de capture rapide de neutrons, le processus r. Ces deux phénomènes impliquent de nombreux noyaux inaccessibles expérimentalement à l'heure actuelle. Nous proposons d'utiliser cette technique pour :

- étudier les propriétés de capture électronique de certains noyaux qui jouent un rôle important dans la modélisation de l'effondrement des supernovas. Des mesures ciblées sur quelques noyaux clés autour du ^{78}Ni et ^{126}Pd notamment sont envisagées auprès des installations

IGISOL et ALTO (avec purification des faisceaux assurée par des doubles-pièges de Penning)
- mesurer l'émission gamma provenant d'états non-liés neutron peuplés par désintégration bêta afin de contraindre les valeurs de taux de captures neutroniques pour les noyaux très riches en neutrons loin de la vallée de stabilité.

b.3) Mesure de spectroscopie des noyaux riches en neutrons par décroissance bêta:

CENBG: T. Kurtukian, P. Ascher, B. Blank, S. Grévy ; CSNSM: R. Lozeva, D. Lunney;
IPNO: E. Minaya Ramirez,

Les propriétés des noyaux autour des couches fermées $N=50$, 82 et 126 ainsi que l'évolution de la structure nucléaire le long de la carte des noyaux influencent l'abondance des éléments lourds dans l'univers et par suite celles observées dans le système solaire. La recherche effectuée par nos équipes sera conduite auprès des grands instruments tels que les accélérateurs de particules ALTO et SPIRAL2/GANIL avec DESIR et S3 en France, GSI / FAIR en Allemagne, RIKEN au Japon, JYFL en Finlande ou le CERN en Suisse. La désintégration bêta ainsi que les masses de noyaux clés y seront étudiées (Ex : schémas de désintégration autour de $A=90$ et 100 pour comprendre la surproduction de Sr, Y, Zr, Mo et Ru dans les étoiles UMP (ultra-metal poor), mesures de masse et décroissance beta autour de $N\sim 126$, région connue comme la terra incognita, ainsi que sur la région de $N=82$ et $Z=50$)

b.4) Mesures de résonances pygmées: IPNO: I. Matea, Y. Blumenfeld; Ganil: O. Sorlin; LPC: J. Gibelin; Subatech: M. Fallot

La présence d'une faible partie (3-6%) de la force dipolaire (PDR) autour du seuil d'émission de neutron a été mise en évidence expérimentalement dans des noyaux riches en neutrons (e.g., dans les isotopes de Ni, Sn, Pb ...). Certains calculs théoriques (e.g. S. Goriely et d'autres) prédisent que sa présence proche du seuil d'émission neutron tend à augmenter les taux de réactions (n,γ) et par conséquent change l'abondance des noyaux lourds de manière radicale dans certaines conditions de température et de densités de neutrons. Il convient dans un premier temps de mieux caractériser ce mode, de vérifier qu'il apparaît effectivement proche du seuil d'émission pour des noyaux très riches en neutrons, et est suffisamment collectif pour engendrer une décroissance gamma plutôt que neutron. Ces études peuvent être réalisées via des réactions d'excitation Coulombienne sur des cibles lourds ou d'excitation nucléaire sur des cibles isoscalaires (^{12}C , par exemple) auprès des installations telles que RIKEN, GSI ou GANIL.

Plus récemment il a été proposé (Scheck et al, PRL116, 132501, 2016) que la décroissance bêta pourrait également peupler ces états. Pour ce type d'étude, des noyaux très riches en neutrons doivent être produits pour avoir une fenêtre en énergie suffisamment grande pour la décroissance bêta au dessus du seuil d'émission neutron. Ceci est possible auprès des installations de type ISOL (e.g., ALTO, SPES ...).

c) Nucléosynthèse explosive

c.1 Nucléosynthèse du ^{44}Ti : Subatech: M. Fallot; Ganil: F. de . Oliveira

L'étude de l'isotope ^{44}Ti est d'intérêt en astrophysique car il est produit dans les supernovas à effondrement de cœur. La compréhension de sa production nécessite de mesurer les énergies d'excitation et les rapports de branchement gamma et proton de noyaux mis en jeu dans les réactions ayant un impact sur l'abondance du ^{44}Ti . Des mesures, avec la méthode TAGS, de

l'émission gamma d'états non-liés proton peuplés par désintégration bêta de ces noyaux clés seront effectués dans le futur

c.2. Abondances et origine des noyaux p: Ganil: B. Bastin F. de Oliveira Santos, J.C Thomas; IP2I Lyon: C. Ducoin, B. Rebeiro, J. Dudouet, D. Guinet, N. Redon, O. Stezowski; IPNO: F. Hammache, N. de Séréville, LPC Caen: L. Achouri

Nous proposons un programme expérimental pour mesurer les réactions (p,γ) , (p,n) and (α,γ) ayant un fort impact sur les modèles décrivant les abondances des noyaux appelés p. Les sections efficaces de la plupart des réactions ne sont pas connues dans la gamme d'énergie d'intérêt et les taux de réactions utilisés pour déterminer l'abondance des noyaux p reposent sur des calculs du modèle statistique (type Hauser-Feshbach).

L'intensité sans précédent du faisceau de protons et de particules alphas à basse énergie prévue à SPIRAL2 LINAC procure une opportunité unique de réaliser des mesures précises dans la gamme d'énergie d'intérêt astrophysique et d'améliorer ainsi la compréhension des abondances des noyaux p. Trois campagnes expérimentales sont envisagées : une utilisant la méthode d'activation et deux utilisant les techniques in-beam. Alors que la technique d'activation est indiquée pour étudier les réactions conduisant à des noyaux de courte durée de vie, plusieurs réactions d'intérêts conduisent à des noyaux stables et la mesure de leur section efficace nécessite une spectroscopie in-beam en utilisant soit la méthode de mesure de distribution angulaire ou la technique des gammas-somme. Parallèlement, des expériences préparatoires seront menées dans de petites et moyennes installations (pourvues de tandems et cyclotrons). De plus, en collaboration avec des théoriciens de l'ULB et de Democritos, des mesures expérimentales visant à définir un potentiel optique alpha fiable à utiliser dans les calculs HF sont prévues dans les années à venir. Une première expérience est envisagée au tandem d'Orsay auprès du spectromètre Split-Pole.

c.3. Novæ et sursauts X: IPNO: F. Hammache, N. de Séréville, I. Stefan; GANIL: B. Bastin, F. de Oliveira, O. Sorlin

La combustion explosive de l'hydrogène se produit dans les sites astrophysiques tels que les novæ classiques et les sursauts X. Dans ce type de scénarios un objet compact (naine blanche ou étoile à neutron) accrète la matière principalement hydrogénée de son étoile compagnon.

Novæ: Lors de la combustion explosive de l'hydrogène, les noyaux fraîchement synthétisés sont éjectés dans le milieu interstellaire. Leur observation, aussi bien à travers leur émission gamma que dans les grains pré-solaires, permet d'étudier la dynamique de l'explosion ainsi que l'abondance d'isotopes produits. Afin de bien interpréter ces observations il est nécessaire de réduire les incertitudes nucléaires des réactions mises en jeu. Suite aux nombreux travaux expérimentaux existants, la plupart des réactions impliquées dans la nucléosynthèse des novæ sont connues expérimentalement. Cependant, quelques réactions comme $^{18}\text{F}(p,\alpha)^{15}\text{O}$, $^{25}\text{Al}(p,\gamma)^{26}\text{Si}$ et $^{30}\text{P}(p,\gamma)^{31}\text{S}$ nécessitent encore une étude détaillée et représentent un des derniers enjeux dans les études de ces objets, pour mieux comprendre le flux gamma produit par les novæ, leur contribution à l'émission gamma de l' ^{26}Al dans la galaxie ainsi que leur capacité à produire des grains aux rapports isotopiques caractéristiques.

Sursauts X: Les principaux enjeux de l'étude des sursauts X sont la compréhension de leur courbe de lumière ainsi que l'étude de la nucléosynthèse associée. Les courbes de lumière ont pour origine l'énergie libérée par certaines réactions de type (α,p) et (p,γ) induites sur des noyaux radioactifs de masse $A \leq 59$. Les réactions les plus importantes dont les sections

efficaces doivent être précisées sont $^{14}\text{O}(\alpha,p)$, $^{17}\text{F}(\alpha,p)$, $^{18}\text{Ne}(\alpha,p)$, $^{22}\text{Mg}(\alpha,p)$, $^{30}\text{S}(\alpha,p)$, $^{56}\text{Ni}(\alpha,p)$, $^{23}\text{Al}(p,\gamma)$, $^{31}\text{Cl}(p,\gamma)$, $^{35}\text{K}(p,\gamma)$, $^{56}\text{Ni}(p,\gamma)$, $^{59}\text{Cu}(p,\gamma)$ et $^{61}\text{Ga}(p,\gamma)$ d'après les études de sensibilités de Cyburt et al. [1]. Concernant la nucléosynthèse celle-ci met en jeu des réactions (p,γ) loin de la vallée de la stabilité lors du processus rp mais seul un petit nombre de ces captures radiatives affecte de manière significative les abondances finales ; parmi elles, les captures de protons sur le ^{56}Ni , ^{61}Ga , ^{65}Ge , ^{67}As , ^{57}Cu , ^{55}Co et ^{59}Cu . Pour la plupart de ces réactions, la masse des noyaux mis en jeu est très incertaine et leur spectroscopie très peu connue.

Le programme expérimental de détermination des sections efficaces précédentes repose sur des mesures directes et des approches indirectes nécessitant à la fois des faisceaux stables et le développement de faisceaux radioactifs intenses. L'instrumentation de choix associée à ces mesures est les spectromètres magnétiques (Split-Pole, VAMOS par exemple), les multi détecteurs silicium (GRIT) et gamma, un système de détection efficace des noyaux de reculs à 0 degrés à LISE et une cible à jet gazeux supersonique.

[1] R. H. Cyburt et al., *Astro. Phys. J* 830 (2016) 55

3. Nucléosynthèse primordiale dans le cadre du Big-Bang inhomogène: Idée de A. Arbey, J. Auffinger, J.F. Coupechoux (IPII Lyon)

La nucléosynthèse primordiale soulève encore un grand nombre de questions concernant les phénomènes pouvant expliquer l'abondance du lithium ou l'universalité de la nucléosynthèse. En particulier, le modèle de nucléosynthèse inhomogène postule que de petites bulles d'Univers pourrait avoir des propriétés différentes du reste de l'Univers, telles qu'une grande quantité de baryons. Les premières études [1] prévoient que la production d'éléments lourds qui mènerait à la formation d'étoiles (voire anti-étoiles composées d'antimatière) de première génération riche en éléments lourds, y est possible. Pour étudier un tel scénario, il faut étendre les réseaux nucléaires présents dans les codes de nucléosynthèse primordiale, en incluant les processus p et r.

[1] S. Matsuura et al., *Phys. Rev. D* 72 (2005) 123505.

4. Besoins expérimentaux

4.a Faisceaux:

- SPIRAL2-faisceaux stables (avec aussi besoin d'énergies plus basses que 0.75 AMeV)
- Faisceaux radioactifs ($^{23,25}\text{Al}$, ^{30}P , ^{31}Cl , ^{30}S , ^{56}Ni , $^{59}\text{Cu}, \dots$) à des énergies entre 10 et 15 AMeV, des intensités $> 10^5 - 10^6$ pps et une pureté $> 80\%$ (LISE-upgrade, SPIRAL1)
- Maintien des petites installations type Tandem à Orsay

4.b Dispositifs expérimentaux

- Modernisation de Split-Pole (demeurant à ce jour le seul opérationnel en Europe qui soit couplé avec un tandem de 14 MV) et du système de détection du plan focal associé.
- Détection efficace des noyaux de reculs à 0 degrés à LISE

- Une amélioration des performances des spectromètres à absorption totale TAGS existants avec l'objectif d'aborder des noyaux plus éloignés de la stabilité

- Mise en service rapide du MLLTrap

-Construction d'un dispositif pour l'étude des réactions de substitution auprès de l'anneau CRYRING de GSI/FAIR et éventuellement construction d'un anneau de stockage pour GANIL qui fournit des faisceaux très complémentaires avec ceux produits à FAIR.

4.c Cibles

- Un soutien pour la fabrication des cibles solides difficiles et leur caractérisation est nécessaire

- Cibles cryogéniques

- Développement d'une cible à jet gazeux supersonique