

# LA STRUCTURE NUCLEAIRE POUR L'ASTROPHYSIQUE

**Auteur : M. Fallot (Subatech), complété par les contributions de B. Bastin (GANIL), F. de Oliveira (GANIL) et J.-C. Thomas (GANIL), et la feuille de route écrite par la communauté ISOL France en 2017.**

**Ce document porte sur les activités françaises de physique nucléaire utilisant la méthode ISOL pour l'astrophysique.**

## Résumé (une page)

Les études de structure nucléaire à basse énergie consistent en la caractérisation des propriétés des états fondamentaux ou isomériques de noyaux exotiques (quand leur durée de vie excède quelques dizaines de millisecondes). Elles portent sur la détermination de l'énergie de liaison de ces états, déduite de mesures de masse et sur les caractéristiques de leur décroissance radioactive (durée de vie, modes de désintégration, rapports d'embranchement ou encore distributions des densités de niveaux). Du fait de la sélectivité de la décroissance bêta, la décroissance des noyaux radioactifs donne accès aux caractéristiques d'une partie des états excités ou fondamentaux des noyaux fils produits, voir pour les plus exotiques d'entre eux, à celles des petits fils dans le cas où la décroissance bêta est accompagnée de l'émission de particules légères (protons, neutrons ou agrégats).

Toutes ces propriétés, qu'il s'agisse de la structure nucléaire ou des caractéristiques de la décroissance des noyaux radioactifs produits auprès d'installations ISOL, ont leur importance dans le déroulement de nombreux processus de nucléosynthèse. Certains noyaux jouent un rôle particulièrement prépondérant tant dans la compréhension des mécanismes de productions des noyaux stables et radioactifs issus de ces processus de nucléosynthèse que dans la production d'énergie dans les scénarios astrophysiques associés.

Ces noyaux font l'objet d'études dédiées, préférentiellement à basse énergie, aux premiers rangs desquelles les mesures de masse et la caractérisation des propriétés des états le plus fortement impliqués dans des processus de capture de particules, c'est-à-dire proche en énergie des seuils d'émission de particules. Une détermination des distributions de force Gamow-Teller est aussi importante pour déduire, par exemple, les taux de capture électronique lors de l'effondrement du cœur de supernovae ou contraindre les modèles qui calculent les chemins du processus r. Les études de décroissance sont par ailleurs complémentaires de celles menées à plus haute énergie au moyen de réactions de transfert de particules et de diffusions (in-) élastiques résonantes ou encore d'échange de charges.

## 1. Enjeux scientifiques

La moitié des éléments de masse supérieure à 70 est créée par le processus r astrophysique, qui procède via des noyaux instables très riches en neutrons dans les explosions stellaires ou d'autres événements astrophysiques violents comme la coalescence d'étoiles à neutrons. L'identification de son lieu d'occurrence reste d'ailleurs l'un des défis majeurs de l'astrophysique nucléaire. Les avancées récentes dans la description de l'interaction des neutrinos avec la matière et son implémentation dans la modélisation des explosions de supernovae tendent à montrer que les explosions de supernovae ne contribuent

qu'à la production des éléments de  $Z$  inférieur à 50. Les coalescences d'astres compacts sont actuellement considérées comme les meilleurs candidats dans la détermination du site du processus  $r$  principal. Ces événements sont suspectés d'éjecter de grandes quantités de matière riche en neutrons où le processus  $r$  pourrait opérer. La désintégration bêta des noyaux figure parmi les processus importants qui influencent les abondances des éléments  $r$ , ainsi que les réactions de capture neutronique, la photodésintégration, la température et la densité. En particulier les mesures de périodes radioactives des progéniteurs des noyaux stables aident à déterminer leur abondance et sont ainsi d'importants ingrédients dans les calculs de nucléosynthèse qui tentent de les reproduire. Les abondances solaires montrent des pics proches des masses  $A=80, 130$  et  $195$  qui correspondent à des progéniteurs aux fermetures de couches  $N=50, 82$  and  $126$ . Les demi-vies des noyaux autour de ces fermetures de couche sont décisives, car on y trouve les taux de désintégration bêta les plus lents. Ils constituent ce qu'on appelle des points d'attente du processus. Ces taux de désintégration  $\beta$  lents sont ceux qui contrôlent la synthèse de tous les éléments plus lourds et ainsi contraignent les paramètres astrophysiques du processus  $r$ . A l'exception de quelques noyaux clés qui sont relativement proches de la vallée de stabilité, les demi-vies doivent être calculées à l'aide des modèles théoriques. Dans ce type de calcul, la distribution de la force Gamow-Teller  $B(GT)$  en fonction de l'énergie doit être calculées pour tous les états finals possibles. Il s'agit de déterminer quelle est la proportion de la force qui réside dans la fenêtre énergétique ouverte par les  $Q_\beta$ . Les mesures réalisées ou proposées par la communauté française auprès des installations ALTO, JYFL, ou ISOLDE fournissent d'excellents tests pour les modèles théoriques puisqu'elles permettent d'accéder à la distribution de force  $GT$  dans la fenêtre du  $Q_\beta$ . En plus des captures neutroniques et désintégrations bêta, les taux de fission et les taux de production d'éléments super-lourds sont des éléments fondamentaux pour la compréhension de la dynamique du processus  $r$  et de la nucléosynthèse. Les mesures de masse réalisées ou planifiées auprès de ces mêmes installations fournissent également des contraintes fortes aux modèles théoriques pour les calculs astrophysiques.

D'autres études réalisées au GANIL se focalisent essentiellement sur l'étude de deux mécanismes de nucléosynthèses : i) l'effondrement du cœur de supernovae, mobilisant en particulier des noyaux très riches en neutrons au voisinage du  $^{78}\text{Ni}$  et du  $^{126}\text{Pd}$  et ii) le processus  $rp$  de nucléosynthèse dont on suppose qu'il est étroitement lié aux sursauts- $X$  caractérisant certains systèmes binaires d'étoiles, et dont le flux de réactions se développe le long de la ligne  $N\sim Z$  : il mobilise quant à lui des noyaux légers à mi-lourds ( $A < 100$ ) déficients en neutrons. Plusieurs simulations et études de sensibilité ont permis d'obtenir la liste des noyaux les plus importants, c'est-à-dire des noyaux ayant le plus d'influence sur la courbe de luminosité de ces processus astrophysiques. Dans les deux cas, c'est la mesure de la masse des noyaux les plus importants qui est visée en premier lieu. Les activités de recherche sont axées ainsi (i) sur un programme de mesure de masse des noyaux au voisinage de la double fermeture de couches ( $N=50, Z=28$ ) à Jyväskylä (JYFL Trap) initié récemment (ii) et sur le développement au GANIL d'un dispositif de mesure de la masse des noyaux  $N\sim Z$  qui seront produits par les installations SPIRAL1 à compter de 2018 et S3-LEB à compter de 2020. Ces programmes sont détaillés par la suite. Ils seront complétés dans le futur de l'étude de la décroissance beta de noyaux impliqués dans les processus de capture électronique lors de l'effondrement de cœur de supernovae.

Deux autres programmes de recherche sont menés au GANIL, portant d'une part sur l'observation de la décroissance beta-retardée de particules et d'autre part sur l'étude de l'écrantage électronique. Ils sont pour l'instant menés à des énergies élevées en exploitant des faisceaux d'ions produits par fragmentation et des faisceaux d'ions post-accélérés. Ces études peuvent cependant être réalisées à basse énergie auprès des installations SPIRAL1, S<sup>3</sup> ou DESIR et elles sont pour cette raison décrites également.

## 2. Projets, Genèse et calendrier

### Mesures de masse au voisinage de $^{78}\text{Ni}$ (modélisation de l'effondrement du cœur de supernovae)

Les explosions d'étoiles de type supernovae (SNII) sont à l'origine de la moitié des éléments chimiques situés au dessus de la masse du fer. Aujourd'hui encore, les différentes simulations ne reproduisent pas bien ces explosions. Deux ingrédients essentiels sont l'équation d'état de la matière nucléaire et les taux d'interaction électrofaible, en particulier le processus de capture électronique, qui gouverne la neutronisation de la matière et la position de l'onde de choc, qui finalement induisent l'explosion de l'étoile. Les taux de capture électronique dépendent de la composition de la matière. Cette dernière peut être calculée en fonction de la température, de la densité de baryons et d'électrons, en utilisant les modèles de type « Nuclear Statistical Equilibrium » (NSE). Ces calculs dépendent fortement des masses des noyaux, et sont quasiment insensibles aux autres paramètres.

Un programme expérimental a démarré sur le sujet en 2016, complété d'un volet théorique en collaboration avec le LPC Caen. Une thèse est également en cours sur ce sujet. Théoriquement, il a été montré que les masses des isotopes autour de  $^{78}\text{Ni}$  et  $^{126}\text{Pd}$  sont les plus importantes pour les SNII, et aussi pour la structure nucléaire. Expérimentalement, il s'agit donc de faire des mesures de masse autour de ces noyaux. Une expérience a été acceptée à Jyväskylä pour étudier des noyaux riches en neutrons autour du  $^{78}\text{Ni}$  avec le double piège de Penning (JYFLTRAP) au sein de l'installation IGISOL [1]. Une première expérience exploratoire a été réalisée en juin 2017 afin de déterminer le meilleur couple cible-projectile à utiliser pour optimiser la production des noyaux d'intérêt. Les résultats en ligne suggèrent l'utilisation d'un faisceau de deutons ou protons sur une cible d'uranium. L'expérience de mesure de masse à proprement parler est programmée en novembre 2017. Des mesures de distributions de force Gamow Teller, à travers l'étude de la décroissance beta des noyaux d'intérêt, sont envisagées ensuite auprès de IGISOL ou ALTO afin de contraindre les taux de capture électronique.

[1] B. Bastin et al., *I220 experiment at JYFL*

*Coll : GANIL, LPC Caen, JYFL, CENBG, IPNL, LUTH, IFIN-HH*

### Mesures de masse le long de la ligne N~Z (modélisation du processus rp et compréhension du profil de luminosité des processus astrophysiques de type sursauts X) :

Il s'agit de faire des mesures de masse auprès de SPIRAL1 ( $Z \leq 39$ ) et de S3-LEB ( $Z \leq 54$ ) à l'aide du dispositif PILGRIM, un MR-TOF-MS offrant une précision typique de l'ordre de 50 keV, développé dans le cadre d'une thèse [2]. Le temps d'opération de ce dispositif, typiquement de l'ordre de 10 ms, est parfaitement adapté à la mesure de la masse de ces noyaux exotiques de courte durée de vie.

Les tests préliminaires réalisés au LPC Caen à l'aide de faisceaux pulsés (~100 ns) de  $^{39,40}\text{K}^+$  ont démontré rapidement que les performances du dispositif sont proches de celles visées, c'est-à-dire un pouvoir de résolution de  $m/\text{dm} \sim 100\,000$ . Elle permettra d'entamer le programme de mesure à partir de 2020 (SPIRAL1 + S3-LEB).

Ce programme expérimental de mesure de masse de noyaux riches en protons a été démarré, relativement récemment, à plusieurs endroits dans le monde (ISOLDE, Jyväskylä, Chine), mais seule l'installation S<sup>3</sup> de SPIRAL2 permettra d'atteindre les plus exotiques des noyaux, contribuant le plus à l'astrophysique des sursauts X, et en particulier les noyaux réfractaires (par exemple  $^{80}\text{Zr}$ ,  $^{87}\text{Tc}$ ,  $^{64}\text{Ge}$ ,  $^{48,49}\text{Fe}$ ). La précision demandée pour la masse des noyaux dans le processus rp est typiquement de l'ordre de 10 keV (effet visible sur la courbe de

luminosité). Des mesures de masse plus précises réalisées dans un second temps auprès de l'installation DESIR seront certainement nécessaires.

[2] *PILGRIM, a Multi-Reflection Time-of-Flight Mass Spectrometer for Spiral2-S3 at GANIL*, P. Chauveau et al, Nucl. Instrum. Meth. B376(2015)211.

*Coll : GANIL, LPC, CENBG, Univ Greifswald, MPIK*

### **Etude de décroissances beta-particule(s) retardée(s)**

Les décroissances beta permettent de peupler efficacement des états importants pour l'astrophysique. L'étude de ces états peut être faite via la mesure des particules beta-retardées. Pour aller mesurer ces particules de faible énergie, un dispositif particulier doit être employé, soit un système basé sur des détecteurs siliciums, mais qui restent perturbés par l'énergie déposée par les beta, soit un détecteur de type chambre TPC, beaucoup moins sensible aux beta. L'évaluation de tous les cas potentiellement intéressants pour l'astrophysique a été faite récemment.

Nous avons choisi d'étudier ([3]) le cas de la décroissance du  $^{46}\text{Mn}$ , pour mesurer les résonances importantes de la réaction astrophysique  $^{45}\text{V}(p,\gamma)^{46}\text{Cr}$ , une des réactions les plus importantes pour déterminer précisément la limite dans les supernovae entre la partie extérieure de l'étoile qui est expulsée et l'intérieur qui retombe sur l'étoile à neutron. Ce faisceau sera produit dans LISE, mais d'autres études de ce type sont envisagées pour le futur en utilisant les faisceaux ISOL délivrés par SPIRAL1 et par S<sup>3</sup>.

[3] *A.M. Sánchez-Benitez et al., proposal to the 2017 GANIL PAC*

*Coll : Univ. Huelva, GANIL, CENBG, IPNO, Vinca Institute, Serbie*

### **L'étude de l'écrantage électronique**

L'effet d'écrantage électronique est important dans les sites astrophysiques où la température est relativement faible, habituellement lors des combustions hydrostatiques. En effet les sections efficaces de réactions mesurées en laboratoire à basse énergie diffèrent de celles des réactions ayant lieu dans le plasma stellaire du fait de la présence des électrons qui ont un effet d'écrantage sur le potentiel répulsif coulombien.

L'effet d'écrantage peut également changer la durée de vie des noyaux radioactifs, c'est ce que nous avons choisi d'étudier avec deux noyaux,  $^{19}\text{O}$  et  $^{19}\text{Ne}$  (2 expériences, thèse de P. Ujic [4] - GANIL, thèse de C. Fontbonne [5] - LPC Caen). Nous avons développé une technique et un système de mesure ultra précis, utilisant l'acquisition ultra rapide FASTER, pour obtenir des précisions record. Nous avons constaté que l'environnement des noyaux n'influence pas leur durée de vie de façon importante, comme cela avait été prédit dans certains cas. Nous souhaitons terminer ce programme expérimental avec la démonstration de l'effet de l'environnement sur la durée de vie, en mesurant cet effet très petit, de l'ordre de quelques  $10^{-5}$ , ce qui sera également la mesure de durée de vie la plus précise jamais réalisée.

*Coll : GANIL, LPC Caen, Vinca Institute, Serbie, IPNO, CSNSM, CRISMAT/ENSICAEN, HHNIPNE, Roumanie*

[4] P.Ujic et al., Phys. Rev. Lett. 110, 032501 (2013)

[5] C. Fontbonne et al., soumis à Phys. Rev. C

### **Mesures de la distribution GT près de N=82 et N=50.**

La méthode TAGS est complémentaire aux mesures réalisées avec les détecteurs Germanium. Elle est particulièrement bien adaptée à la mesure de la distribution de la force Gamow-Teller (GT), une observable importante pour contraindre les modèles théoriques indispensables aux calculs de nucléosynthèse pour le processus r, ou encore à la mesure de gammas très énergétiques qui pourraient être émis par des noyaux de grands  $Q_\beta$ .

Cette proposition de campagne de mesures auprès du dispositif ALTO acceptée en 2014 [1], présente plusieurs intérêts pour l'astrophysique nucléaire (et la structure nucléaire) :

- proposition de mesurer les distributions de force GT sur des isotopes d'Sn et In près du point d'attente du processus r N=82, en vue d'apporter de nouvelles contraintes aux

modèles microscopiques ;

- proposition d'étudier la présence de modes pygmés dans ces noyaux via la désintégration bêta, et d'étudier les corrélations entre peau de neutron et modes pygmés. En effet, la présence de modes collectifs de basse énergie influe sur les sections efficaces de capture ( $n,\gamma$ ) qui entrent en jeu dans les calculs de nucléosynthèse.

Cette dernière motivation, proposée par le groupe nantais, était complètement nouvelle à l'époque de la proposition d'expérience, malheureusement le retard pris par le dispositif ALTO dans sa capacité à fournir les faisceaux demandés n'a pas permis d'en faire une première expérimentale. La première expérience TAGS auprès d'ALTO devrait se dérouler après mi-2018.

Parmi les noyaux proposés, nombre d'entre eux sont émetteurs de neutrons retardés. Récemment il a été observé dans un certain nombre de noyaux une émission de photons gamma de haute énergie au-dessus du seuil d'émission de neutrons supérieure aux prédictions des modèles statistiques [2]. La technique TAGS est particulièrement bien adaptée à ces mesures en raison de sa grande efficacité de détection. En associant les mesures TAGS à des mesures de  $P_n$  via des détecteurs comme TETRA ou BELEN, on peut alors accéder au rapport des largeurs  $\Gamma_\gamma$  versus  $\Gamma_n$  qui entrent dans les calculs de sections efficaces de captures radiatives de neutrons, importantes pour le processus r "froid" notamment.

L'analyse de cette expérience fera l'objet de plusieurs thèses (Subatech et IFIC).

Enfin une lettre d'intention pour une campagne de mesures de noyaux dans la région du  $^{78}\text{Ni}$  a été soumise au PAC en 2014, mais une extension des capacités de sélection de la source laser est nécessaire à leur réalisation.

[1] *M. Fallot, A. Porta, B. Rubio, J.-L. Tain, A. Algora et al., Proposal and LoI N-RI-6 (2014).*

[2] *J.-L. Tain et al, Phys. Rev. Lett. (2015)*

*Coll. TAGS : Subatech, IFIC Valencia, Surrey, Madrid...*

### **Mesures des formes des spectres des électrons émis lors des désintégrations interdites non-unique des produits de fission – E-Shape**

Les modèles microscopiques utilisés dans les calculs de nucléosynthèse du processus r peinent à reproduire à la fois les mesures expérimentales de période et de distribution de force Gamow-Teller pour un noyau donné. L'inclusion dans les modèles semi-microscopiques des transitions premières interdites ne semble pas permettre d'améliorer la situation. La prise en compte dans les calculs de nucléosynthèse à grande échelle des transitions premières interdites est encore rare mais émergente, en particulier avec des modèles plus microscopiques. L'impact de ces transitions sur le taux de désintégration bêta est quasi inexploré. La mesure de la forme des spectres en énergie des électrons émis dans les transitions interdites non-unique apportera de nouvelles contraintes pour les modèles théoriques qui permettront d'étudier leur impact sur le processus r. Nous avons proposé, en collaboration avec l'IFIC de Valencia et Surrey en 2015 de nouvelles mesures de spectres électroniques sur une liste de produits de fission présentant des branches premières interdites non-unique. Nous développons actuellement à Subatech le détecteur d'électrons et la chambre à vide associée. Le détecteur devrait être monté et testé en 2018 pour réaliser l'expérience en fin 2018 ou début 2019 à Jyväskylä.

[1] *A. Algora, M. Fallot et W. Gelletly et al., proposal to the JYFL PAC 2015*

*Coll. TAGS : Subatech, IFIC Valencia, Surrey, Madrid...*

### **Mesures de Masse dans les régions N=50 et N=82 auprès d'ISOLTRAP, de JYFL, d'ALTO, et de DESIR**

Les mesures de masse des noyaux exotiques révèlent les effets de structure, la déformation et permettent de tester les modèles. Elles sont particulièrement importantes pour la modélisation des processus astrophysiques. Les équipes françaises sont impliquées dans diverses mesures de masse utilisant des pièges de Penning, en particulier ISOLTRAP au CERN (CSNSM, CENBG), JYFLTRAP(CENBG) à IGISOL et dans un futur proche MLL-trap à ALTO (IPNO, CENBG). De plus, le piège de Penning PIPERADE Penning pourra servir de spectromètre de masse. Un commissioning offline pour les mesures de masse est envisagé au CENBG avec une source d'ions stables. PIPERADE sera installé à DESIR mais pourra être utilisé par d'autres installations comme SPES par exemple.

**Groupes impliqués dans ce type de mesures : CENBG, CSNSM, IPNO...**

### **Mesures de Périodes, de Pn et temps de vie d'isomères dans les régions N=50 and 82**

Comme déjà écrit précédemment, les propriétés de structure nucléaire des noyaux riches en neutrons sont fondamentales pour la compréhension et la modélisation du processus r. Les propriétés requises concernent les niveaux fondamentaux comme excités (masses, déformations, demi-vies, spectres d'états excités et densités de niveaux, Pn, temps de vie d'isomères), ainsi que des propriétés d'interaction avec des nucléons, des particules alpha et des photons. Des mesures ont été réalisées récemment auprès de l'ILL de Grenoble par l'équipe du CENBG. Une collaboration entre l'IPHC et l'IPNO réalise également de telles mesures auprès d'ALTO.

**Groupes impliqués dans ce type de mesures : CENBG, IPNO, IPHC**

## **3. État de l'art**

Le programme scientifique dans lequel la communauté française a un rôle leader se décline essentiellement dans trois régions de masses :

- (a) noyaux riches en neutrons de masse intermédiaire (incluant les produits de fission),
- (b) noyaux légers riches et déficients en neutrons,
- (c) les noyaux déficients en neutrons de masses intermédiaires et les noyaux lourds et super-lourds.

Ces trois domaines reposent sur trois modes de production en mode ISOL, et donc actuellement trois sites distincts, avec respectivement :

- (a) la photofission à ALTO,
- (b) la fragmentation des faisceaux des cyclotrons du GANIL à SPIRAL1 et
- (c) la fusion-évaporation utilisant les faisceaux de SPIRAL2/LINAG à S<sup>3</sup>-LEB.

L'objectif de la construction de DESIR au GANIL est précisément (idéalement) de pouvoir traiter ces trois volets de physique dans un lieu unique alimenté par les trois types de faisceau (voir document stratégique).

### ***Secteur des noyaux riches en neutrons, masses intermédiaires***

L'origine réelle, d'un point de vue microscopique, de la formation des fermetures de couches dites de « type spin-orbite » (nombres magiques 14, 28, 50, 126) reste mystérieuse et largement débattue. Les analyses les plus récentes au travers des théories effectives issues de la QCD montrent trois origines possibles : le terme spin-orbite à deux corps, la force tensorielle et les termes à trois corps. Ces effets de couches jouent un rôle essentiel dans les

processus de nucléosynthèse responsables de la formation des éléments du fer à l'uranium, car on s'attend naturellement à ce que l'interception du chemin du processus r par les lignes isotoniques correspondant à ces nombres magiques ait un rôle déterminant dans la formation des pics d'abondance. La région de la table des noyaux alimentée en méthode ISOL par la fission des actinides, en particulier par celle de  $^{238}\text{U}$  est particulièrement intéressante pour explorer ce domaine de physique car elle couvre les régions de formation des nombres magiques de spin-orbite 50 et 82. C'est cette région qui est en cours d'exploration à ALTO et fait l'objet de la phase 2 de SPIRAL2.

La première phase de prises de données à ALTO (phase «  $\beta$ -decay »), rendue possible par l'installation des dispositifs BEDO et TETRA, met en œuvre les techniques de spectroscopie  $\gamma$  et électrons  $\beta$ -retardée, et celles de mesure des probabilités d'émission neutron  $\beta$ -retardée. Les mesures ont dans un premier temps été focalisées sur la région de  $^{78}\text{Ni}$ ,  $N=50$ . Elles ont été couronnées de succès, en particulier avec l'obtention des premières indications d'une coexistence de forme et de l'existence d'une résonance Gamow-Teller Pygmée dans cette région. La toute première observation de rayonnements  $\gamma$  d'«ultra»-haute énergie dans la radioactivité de noyaux exotiques, interprétés comme une signature de la désexcitation d'une résonance dipolaire Pygmée, alimentée par décroissance  $\beta$ , a également été obtenue. La présence de cette résonance serait favorisée par l'apparition d'une peau de neutrons, immédiatement après la fermeture de couche  $N=50$ , dans la région de  $^{78}\text{Ni}$ .

La communauté française est par ailleurs impliquée dans des collaborations menant des mesures dans ce secteur de la carte des noyaux sur d'autres installations ISOL dans le monde. Ces mesures sont complémentaires au sens donné dans l'introduction de cette Section 2.3. A titre d'exemple on peut mentionner les mesures de spectroscopie laser dans la région de  $^{132}\text{Sn}$  ( $N=82$ ) avec le dispositif CRIS à ISOLDE, ou de masse dans la région  $N=32$  avec le dispositif TITAN à TRIUMF (Vancouver).

### *Perspectives*

A courte échéance plusieurs expériences proposant l'étude de noyaux autour de  $^{132}\text{Sn}$ , proches du chemin du processus r, devraient se dérouler auprès d'ALTO. On peut citer par exemple la campagne expérimentale TAGS qui propose de mesurer les résonances pygmées dans ces noyaux, alimentées par décroissance bêta, et d'étudier la corrélation avec la présence d'une peau de neutrons. L'étude de l'émission gamma au-dessus du seuil d'émission neutrons de noyaux émetteurs de neutrons retardés peut également fournir de nouvelles données pour le calcul des sections efficaces ( $n,\gamma$ ) importantes pour le processus r, si elles sont combinées à des mesures de probabilité d'émission de neutrons retardés (par ex. avec TETRA ou BELEN).

Une deuxième phase de mesures à ALTO est en cours de préparation avec l'installation :

- (a) d'un spectromètre de masse à piège de Penning : MLLTrap ;
- (b) d'un réfrigérateur à dilution pour des mesures de facteur g et de spin par orientation nucléaire à très basse température couplé à un système RMN : POLAREX ;
- (c) d'un système de spectroscopie et d'orientation nucléaire par pompage laser : LINO.

Cette deuxième phase permettra d'étendre considérablement le programme de mesures dans ce secteur de masse à ALTO et de l'ouvrir à d'autres types d'observables (voir tableau Section 2.1) inatteignables dans le cadre actuel du programme  $\beta$ -decay. En particulier la mise en service simultanée des dispositifs (b) et (c) donnera à ALTO la toute première place

mondiale dans le domaine de l'orientation nucléaire. Cette deuxième phase démarrera en 2019.

Dans l'hypothèse d'une phase 2 de SPIRAL 2 (et uniquement dans cette hypothèse), i.e. dans le cas où des faisceaux de masse intermédiaire riches en neutrons, deux ordres de grandeurs plus intenses qu'à ALTO, deviendraient disponibles à DESIR, l'ensemble de ce programme aurait vocation naturelle à être poursuivi sur le site du GANIL.

### *Secteur des noyaux légers riches et déficients en neutrons*

Dans le cadre des mesures des propriétés fondamentales du noyau atomique pour les études de structure et d'astrophysique nucléaires, un nombre limité d'expériences a été réalisé par le passé. Ce constat s'explique par le nombre modéré d'isotopes produits jusqu'ici par SPIRAL1 et de l'impossibilité d'installer des dispositifs expérimentaux autre que LPCTrap sur la ligne LIRAT.

Cette situation devrait s'améliorer dans le futur avec d'une part de nouveaux faisceaux intéressants développés à SPIRAL1 et d'autre part la construction de l'installation DESIR.

### *Perspectives*

Le programme scientifique dans le futur devrait s'articuler autour de mesures de masses de noyaux légers riches en neutrons (Ar, Cl, P et K) avec dans un premier temps le MR-TOF-MS PILGRIM et par la suite avec MLL-TRAP et PIPERADE sur DESIR ainsi que des mesures de décroissances  $\beta$ -proton pour des noyaux légers déficients en neutrons (ex :  $^{22}\text{Al}$ ,  $^{26}\text{P}$ ,  $^{31}\text{Ar}$ ,  $^{35}\text{Ca}$ ). Les projets d'astrophysique nucléaires concernés sont : les mesures de masse le long de la ligne N~Z (modélisation du processus rp et compréhension du profil de luminosité des processus astrophysiques de type sursauts X) et l'étude de décroissances beta-particule(s) retardée(s) avec en particulier le cas du  $^{46}\text{Mn}$  (problématique de la nucléosynthèse du  $^{44}\text{Ti}$  dans les supernovae).

### *Secteur des noyaux déficients en neutrons de masses intermédiaires et des noyaux lourds et super-lourds*

#### **Noyaux déficients en neutron de masses intermédiaires**

C'est dans ce secteur le plus éloigné de la stabilité qu'ont été mis en évidence de nouvelles radioactivités, la radioactivité 1 proton en 1981 et la radioactivité 2 protons en 2002 avec une contribution forte des équipes françaises. Ces nouvelles radioactivités sont également un outil puissant pour l'étude de la structure de ces noyaux.

Par ailleurs, les noyaux le long de la ligne  $N = Z$  présentent un intérêt particulier pour plusieurs raisons: (1) les protons et les neutrons occupent les mêmes orbitales. En conséquence, les effets de couches et de déformation sont amplifiés dans ces noyaux, (2) leur symétrie inhérente en fait des candidats idéaux pour les études des corrélations d'appariement n-p et la brisure de symétrie d'isospin, (3) ils se situent le long du chemin du processus astrophysique rp. Ainsi, les noyaux  $N = Z$  constituent de bons candidats pour tester la validité des modèles théoriques et la connaissance de leurs propriétés contribue également à la compréhension de ce processus astrophysique.

Les noyaux décroissant par la radioactivité un- ou deux-protons ne sont généralement pas accessibles par la méthode ISOL, car ils ont une durée de vie trop courte. Cependant les processus  $\beta$ -retardés ( $\beta 1p$ ,  $\beta 2p$ ,  $\beta 3p$ ) permettent l'étude des phénomènes d'impureté d'isospin, la caractérisation de niveaux importants pour les processus astrophysique et l'étude de



l'interaction faible. De telles mesures ont été menées à ISOLDE, Jyväskylä et au GANIL.

### ***Perspectives***

La disponibilité de nouveaux noyaux exotiques avec SPIRAL1 et la mise en service de S3 vont ouvrir de nouvelles perspectives dans ce domaine. Pour les expériences de mesures de masse ou de spectroscopie laser, la région des noyaux  $N = Z$  allant du  $80\text{Zr}$  jusqu'au noyau doublement magique  $100\text{Sn}$  va être accessible avec S3-LEB et DESIR. Dans la région de masses  $A \approx 80$ , les noyaux avec  $N \approx Z$  sont susceptibles de fournir des données pour la modélisation du processus astrophysique rp. Au voisinage de  $100\text{Sn}$  les informations spectroscopiques fourniront un test rigoureux pour les modèles nucléaires. L'ensemble de ces noyaux donne également l'opportunité d'étudier les effets des corrélations d'appariement neutron-proton pour les noyaux  $N=Z$  les plus lourds inaccessibles aujourd'hui.

### **Noyaux lourds et super-lourds**

L'étude des noyaux lourds et très lourds ne se limite pas à une course aux extrêmes mais aborde à travers leur spectroscopie les questions de la collectivité, de l'évolution des couches et des nombres magiques ..., ainsi que la dynamique des réactions. La spécificité de cette région de masse réside, d'une part, dans le fait que ces noyaux n'existent que grâce à des effets de couches, et, d'autre part, dans les faibles sections efficaces de production et faibles temps de vie qui requièrent la mise en œuvre de techniques spécifiques.

Certaines de ces techniques sont déjà maîtrisées (spectroscopie prompte et après décroissance auprès des spectromètres RITU, SHELLS, LISE et prochainement VAMOS-GF et SIRIUS@S<sup>3</sup>), d'autres doivent encore être mises en œuvre ou généralisées comme par exemple la spectroscopie laser ou les mesures de masse qui ont émergé récemment et ouvrent de nouvelles perspectives dans cette région.

### ***Perspectives :***

Avec le démarrage de SPIRAL2-Phase1 le programme scientifique autour des noyaux lourds/super-lourds s'articulera autour de S<sup>3</sup>. Le développement de la ligne basse énergie de ce nouvel instrument ouvre de nouvelles perspectives en physique nucléaire de basse énergie. En effet, pour la première fois, la structure de différents isotopes d'actinium a pu être étudiée grâce à des lasers, lors d'une expérience menée au Centre de Ressources du Cyclotron de Louvain-la Neuve (Belgique). Le succès de cette expérience réside notamment dans la technique expérimentale innovante utilisée, particulièrement performante qui est développée dans le cadre de la collaboration S<sup>3</sup>. Elle consiste à ioniser, au moyen de lasers, des atomes transportés dans un jet de gaz supersonique. Les perspectives qu'elle ouvre, notamment en regard du programme scientifique de l'installation S<sup>3</sup> de GANIL-SPIRAL2, est rapportée dans un article paru dans la revue Nature Communications\* et est reporté sur la figure suivante. Pour la première fois de nouvelles informations (forme du noyau, moments magnétiques,...), complémentaires à la spectroscopie nucléaire seront disponibles dans cette région.

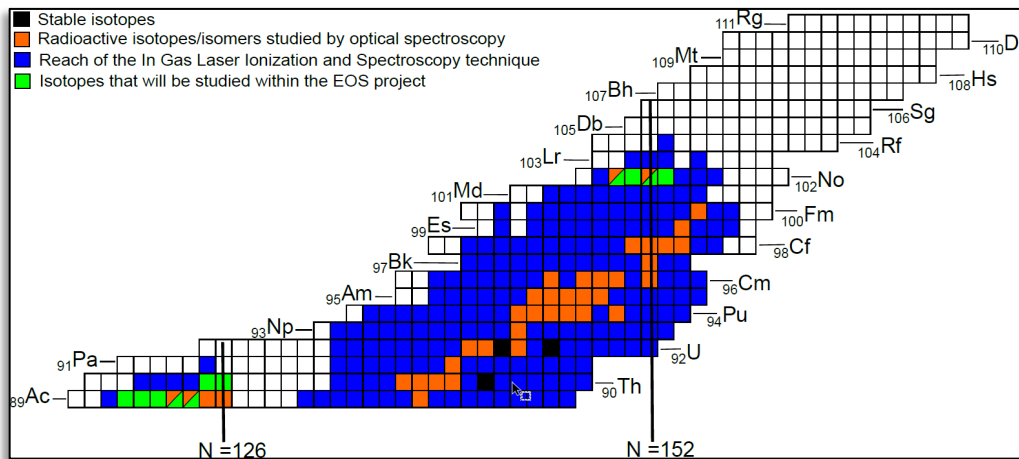


Tableau des nuclides montrant l'état actuel des isotopes étudiés par spectroscopie optique. Les carrés noirs représentent des isotopes stables ou à longue durée de vie, les carrés orange indiquent les isotopes / isomères radioactifs avec des informations spectroscopiques publiées. Dans la région des actinides et des masses plus lourdes, les carrés bleus (verts) sont des isotopes qui pourront être étudiés avec la ligne basse énergie de S3.

Par ailleurs, avec les pièges DETRAP à DESIR, les mesures précises de masse des noyaux les plus lourds produits par S<sup>3</sup>-LEB seront réalisables, ainsi que l'étude de leurs modes de décroissance au moyen de pièges à ions, complétant ainsi les mesures des propriétés fondamentales des noyaux dans ce secteur et apportant de nouvelles contraintes aux modèles de nucléosynthèse.

En attendant la mise en service de S<sup>3</sup> dans les années à venir, la communauté française poursuit des collaborations sur cette thématique auprès d'autres accélérateurs et notamment au GSI où récemment le schéma d'ionisation du Nobélium (Z=102) par spectroscopie laser a été mesuré pour la première fois, ouvrant des perspectives pour les mesures futures à S<sup>3</sup>.

#### 4. Ressources et moyens

Les laboratoires impliqués dans les études d'astrophysique nucléaire par la méthode ISOL sont : GANIL, CENBG, IPNO, SUBATECH, CSNSM, LPSC.

Le nombre d'ETP associé à ces activités est difficilement séparable du nombre d'ETP total fourni dans le document stratégique ISOL par laboratoire, s'agissant d'une activité interdisciplinaire avec la structure nucléaire.