

Contribution CSNSM/AN Version 1/6/2004 (AC,JK,VT)

Introduction : (en construction)

L'astrophysique nucléaire est une discipline déjà ancienne puisqu'un des articles fondateurs date de 1957 (Burbridge, Burbridge, Fowler & Hoyle). Le 20^{ème} siècle a déjà répondu à bien des grandes questions relatives à la nucléosynthèse, c'est à dire l'origine des noyaux d'atomes ; on sait désormais qu'il existe trois grands sites de formation : deux thermiques, le « Big Bang » et les étoiles, et un non thermique, le milieu interstellaire (rayons cosmiques). Ce panorama est avéré jusqu'au pic du fer, en revanche de grandes inconnues persistent concernant la nucléosynthèse des noyaux lourds.

En France, l'astrophysique nucléaire trouve ses racines dans les années soixante grâce aux travaux d'Hubert Reeves et de Jean Audouze, élève de William Fowler, Prix Nobel de Physique, l'un des pères fondateurs de l'astrophysique nucléaire. Elle a débuté sur les thèmes de la nucléosynthèse par spallation des éléments légers et la nucléosynthèse primordiale. De nature intrinsèquement interdisciplinaire, elle s'est caractérisée dès le début par une synergie étroite entre astrophysiciens et physiciens nucléaires (IAP, CSNSM, DAPNIA). Les champs de recherche qui concernent cette communauté s'appuient désormais sur un contexte très favorable, s'agissant des moyens d'observation astronomique, avec la mise en service de grands observatoires spatiaux couvrant le domaine des hautes énergies (XMM/Newton, INTEGRAL) qui seront prochainement complétés par une instrumentation au sol spécifique (X-Shooter). L'astrophysique nucléaire bénéficie également de la mise en œuvre du VLT où les abondances des étoiles de premières générations sont compilées.

Lors de ces dernières dizaines d'années, dans le monde, de nombreux progrès ont été réalisés dans le domaine de la connaissance des sections efficaces d'intérêts astrophysiques par des voies expérimentales. Par exemple, les taux de réactions thermonucléaires concernant la combustion explosive de l'hydrogène dans les novae, sont en voie d'être issus totalement de données expérimentales. Néanmoins, l'astrophysique nucléaire expérimentale est limitée par la faiblesse des sections efficaces sous coulombiennes (réactions captures d'alpha par exemple) et/ou le nombre quasi-astronomique de données nucléaires requises (nucléosynthèse des éléments lourds).

L'astrophysique nucléaire reste toutefois un domaine d'avenir grâce au développement de thèmes plus ou moins récents (en vrac) :

- de physique nucléaire théorique
 - extrapolation vers les énergies astrophysique,
 - données pour la nucléosynthèse des éléments lourds,
 - altération des propriétés nucléaires dans les conditions astrophysiques,
 - interaction avec les neutrinos
- d'observation (en particulier grâce aux techniques spatiales)
 - astronomie gamma
 - hélio/astéroséismologie
 - astronomie X
 - anisotropies du CMB
- de lien avec les astroparticules
 - neutrinos solaires, des supernovae

- nucléosynthèse primordiale et « nouvelle physique »
- rayonnement cosmique de très haute énergie
- de nouveaux objets
 - GRB
 -

et bien sûr,

- des nouveaux instruments et techniques de physique nucléaire
 - faisceaux radioactifs (...)
 - détecteurs (....)
 - méthodes indirectes

Il est des domaines privilégiés, où des collaboration entre astrophysiciens et physiciens nucléaires ont pu s'étendre des mesures de sections efficaces à la modélisation astrophysique, aux calibrations d'instrument spatiaux puis aux observations. Des exemples peuvent se trouver, en particulier dans le domaine de l'astronomie gamma.

Astronomie gamma :

Contrairement aux émissions de raies atomiques et moléculaires observées en radio, infrarouge, optique, ultra-violet et rayons X, dont l'interprétation nécessite bien souvent une modélisation détaillée des environnements astrophysiques, les émissions de raies gamma sont généralement moins dépendantes des conditions thermodynamiques des milieux émetteurs. Ainsi, l'astronomie gamma constitue-t-elle un outil privilégié de l'astrophysique nucléaire, permettant entre autres la détermination d'abondances isotopiques et l'identification de processus de nucléosynthèse. Les observations les plus significatives effectuées jusqu'alors sont les suivantes.

1. Les émissions diffuses d'isotopes radioactifs (^{26}Al , ^{60}Fe) constituent des traceurs privilégiés de l'enrichissement du milieu interstellaire par l'activité de nucléosynthèse des étoiles massives.
2. La raie d'annihilation à 511 keV témoigne d'une formidable production de positrons dans les régions centrales de la Voie lactée. L'origine de cette anti-matière demeure inconnue.
3. La détection de radio-isotopes synthétisés dans des supernovae proches (^{44}Ti , ^{56}Co , ^{57}Co) a permis de préciser les modèles d'explosion, en mettant notamment en lumière la nécessité de développer des simulations tri-dimensionnelles.
4. Les émissions de raies gamma nucléaires associées aux éruptions solaires les plus violentes permettent de mieux comprendre les processus d'accélération de particules.

Une collaboration entre physiciens nucléaires et astrophysiciens de l'IN2P3 et du DAPNIA est plus que jamais à l'œuvre sur ces thèmes de recherche. Elle s'articule notamment autour de l'observatoire INTEGRAL de l'Agence Spatiale Européenne, qui est aujourd'hui la mission spatiale principale de la communauté astrophysique nucléaire en France. Cette collaboration concerne des mesures spécifiques de sections efficaces de réaction, ainsi que l'analyse et l'interprétation des données du satellite. Outre INTEGRAL, les astrophysiciens nucléaires sont fortement intéressés à certains aspects des observations qui sont menées par le truchement d'autres missions d'astronomie à haute énergie comme RHESSI, XMM/Newton et HETE-2.

Plusieurs objectifs scientifiques de l'astrophysique nucléaire sont directement liés au satellite INTEGRAL et aux prochaines missions d'astronomie gamma.

1. **L'explosion des novae et des supernovae.** L'observation de radio-isotopes émetteurs gamma fraîchement synthétisés dans de tels sites astrophysiques permet de sonder les conditions physiques de la matière (température, densité, entropie, excès de neutrons) au cœur de l'explosion. Le développement de spectromètres gamma à haute résolution devrait également permettre d'accéder aux propriétés cinématiques des noyaux émetteurs, qui témoigneront alors de la dynamique de l'explosion et des processus de mélange.
2. **La nucléosynthèse et la formation d'étoiles.** Les radio-isotopes comme l' ^{26}Al et le ^{60}Fe constituent des traceurs uniques des régions de formation d'étoiles, qui sont souvent obscurcies par le milieu interstellaire dans d'autres longueurs d'onde. De telles études pourraient dans le futur être nettement approfondies et étendues à d'autres galaxies, permettant alors de nouvelles mesures de l'activité stellaire dans l'univers local.
3. **L'origine du rayonnement cosmique.** Près d'un siècle après sa découverte, l'origine du rayonnement cosmique demeure mystérieuse. Le gain en sensibilité de différents télescopes gamma en gestation devrait permettre de détecter l'émission gamma nucléaire produite par interaction des rayons cosmiques avec le milieu interstellaire. Une telle détection sera d'une grande importance pour étudier tant le spectre et la composition du rayonnement cosmique que les différentes phases du milieu interstellaire.
4. **L'origine de l'anti-matière.** La nature de la source galactique intense de positrons pourrait être révélée au travers d'études détaillées de la morphologie et des propriétés spectrales de la raie d'annihilation à 511 keV. Le rôle éventuel de la matière noire dans la production de positrons au cœur de la Voie lactée sera ainsi élucidé.

Ces objectifs scientifiques nécessitent un gain d'environ un ordre de grandeur en sensibilité dans le domaine des rayons gamma du MeV. Deux concepts d'instruments apparaissent aujourd'hui prometteurs pour obtenir un tel gain : une lentille gamma spatiale permettant de focaliser le rayonnement sur un petit détecteur à haute résolution et un télescope Compton de nouvelle génération constitué d'un ensemble de détecteurs semi-conducteurs de grande granularité. Ces deux concepts sont tout à fait complémentaires, le premier étant adapté pour des sources ponctuelles comme les supernovae, le second étant approprié pour des émissions diffuses comme celle produite par le rayonnement cosmique.

Novae :

Le scénario des novae classiques est maintenant bien établi dans ses grandes lignes. Elles se produisent dans des systèmes binaires serrés composés d'une naine blanche et d'une étoile de la séquence principale. (Le taux d'accrétion détermine le destin de ces systèmes doubles : nova ou supernova thermonucléaire, SNIa.) L'accrétion de matière riche en hydrogène à la surface de la naine, en provenance de sa compagne, peut donner lieu à un emballement thermonucléaire et une l'explosion de l'enveloppe ($T \sim 10^8 \text{K}$) facilité par l'état dégénéré de la matière. Cette enveloppe, correspondant à la mince pellicule ($\sim 10^{-5} \text{ Mo}$) de matière accrétée mélangée à de la matière provenant des couches superficielles de la naine blanche est éjectée dans le milieu interstellaire. Les novae sont ainsi, probablement, à l'origine de quelques isotopes peu abondants : ^{13}C , ^{15}N et ^{17}O . Elles sont aussi des sources potentielles d'isotopes émetteurs gamma (^7Be , ^{18}F , ^{22}Na , ^{26}Al) observables par des satellites présent ou futurs

(Integral, Rhessi,...). Ce domaine a bénéficié, en Europe, d'une collaboration fructueuse entre astrophysiciens (Barcelone) et physiciens nucléaires (CSNSM) qui a permis de progresser dans les domaines de la modélisation, de l'identification des sections efficaces cruciales, de leur étude expérimentale, en attendant de futures observations (Integral).

Actuellement, plusieurs groupes de part le monde (Arizona, Israël, Espagne) ont développé des codes de simulation 1D ; les tentatives de développer des codes multidimensionnels n'ont pour l'instant pas été couronnées de succès. Des spectres synthétiques d'émission gamma ont aussi pu être calculés (Barcelone). Des observations en optique et UV ont permis de déduire les abondances des éléments présents dans la matière éjectée en rapport compatibles avec les résultats des modèles. De ces trente dernières années d'études on peut extraire les conclusions suivantes.

1. Les abondances élevées en éléments CNO, Ne, ... observées ne peuvent pas s'expliquer par la combustion de matière de composition solaire. Elles proviennent de la combustion explosive de l'hydrogène mélangée à la matière de la naine blanche (^{12}C , ^{16}O , ^{20}Ne , ...) qui fournit les catalyseurs du cycle CNO et les « graines » pour la production des éléments « lourds ».
2. Les modèles et les observations indiquent que la nucléosynthèse ne dépasse pas la région du soufre faute de température suffisamment élevée ($T < 3.5 \cdot 10^8 \text{K}$) pendant un temps suffisamment long. Pour les mêmes raisons, les « fuites du cycle CNO » sont négligeables : le néon observé provient de la naine blanche et le flux nucléaire devient négligeable au delà d'une unité de masse par rapport à la vallée de stabilité.
3. Les réactions nucléaires impliqués concernent donc des captures de protons sur des noyaux stables ou très proches de la stabilité. En conséquence, les taux de réactions thermonucléaires correspondant sont majoritairement bien connus. Quelques réactions dont les taux étaient incertains ($^{21}\text{Na}(p, \gamma)^{22}\text{Mg}$, $^{17}\text{O}(p, \gamma)^{18}\text{F}$ par exemple) sont en cours d'études proches d'aboutir. Une réaction pose encore problème : $^{18}\text{F}(p, \gamma)^{15}\text{O}$. Elle gouverne l'émission gamma des novae dans les premières heures (^{18}F), mais malgré des progrès récents, son taux demeure hautement incertain (interférences entre niveaux) et reste un défi expérimental et théorique.
4. Ces progrès récents dans ce domaine ont été rendus possible grâce à l'avènement, de part le monde, d'accélérateurs de faisceaux radioactifs adaptés à l'astrophysique nucléaire des novae. On peut ainsi citer Louvain-la-Neuve pour ^{13}N et ^{18}F , Oak Ridge pour ^{18}F et ^{17}F , et TRIUMF pour ^{21}Na .
5. En dépit de l'accord raisonnable entre modèles et observations, il reste des divergences ou des aspects encore inexpliqués. La masse éjectée observée est significativement plus élevée que les prédictions des modèles. Le mécanisme de mélange entre matière accrétée et matière de la naine blanche n'est pas encore définitivement établi. Les courbes de lumières sont mal reproduites par les modèles.
6. Il est fort probable que les novae sont à l'origine de ^{15}N et ^{17}O et en partie de ^{13}C mais cela reste difficile à quantifier à cause de leur nature binaire qui rend encore plus difficile la modélisation de l'évolution de leur population. Ainsi suivant le choix des paramètres, à la suite de l'évolution de la Galaxie, surproduire ou sous-produire ces isotopes par rapport aux abondances actuelles.

Les novae sont, pour longtemps, le seul site de nucléosynthèse explosif pour lequel l'ensemble des données nucléaire sera bientôt entièrement d'origine expérimentale. Ce n'est

pas pour autant que ce phénomène sera entièrement compris. De nombreux problèmes restent non résolus : mélange lors de l'accrétion, quantité de masse éjectée, composition initiale de la naine blanche, démarrage de l'explosion, évolution des systèmes d'étoiles doubles,.... L'observation de raies gamma (^{22}Na avec Integral, ^{18}F avec Rhesi par exemple) ou l'identification d'un plus grand nombre de grains météoritiques présolaires attribuables aux novae pourrait permettre une calibration de la nucléosynthèse par les abondances *isotopiques*. Peut-être pourrait on ainsi progresser dans la résolution des questions évoquées ci-dessus. Une équipe de l'IN2P3 contribue à ces études depuis les mesures de sections efficaces jusqu'aux observations acceptées sur Integral.

Sursauts-X :

Le scénario des sursauts-X de type I possède de nombreuses similitudes avec celui des novae mais aussi des différences importantes. Il s'agit de systèmes doubles ou l'objet accrétant est cette fois une étoile à neutrons. L'explosion se produit pour une masse accrétée beaucoup plus faible que dans le cas des novae mais les densités (10^6 g/cm^2) et températures ($\sim 10^9 \text{ K}$) atteintes y sont plus élevées donnant lieu au processus « rp » (capture rapide de protons) se déroulant sur le flanc riche en proton au delà de la vallée de stabilité jusqu'à aux masses $A \approx 100$ (de l'ordre d'un millier de noyaux impliqués). La plus part des résultats de nucléosynthèse dans les sursauts-X proviennent de calculs paramétrisés qu'il convient maintenant de valider ou d'invalider par la modélisation hydrodynamique qui ne fait que débiter.

1. Les sursauts-X sont des objets de grand intérêt astrophysique puisque les phénomènes dont ils sont le siège se déroulent dans les conditions extrêmes régnant à la surface d'une étoile à neutrons. La densité, la température, les champs magnétiques intenses, y prennent des valeurs inhabituelles ; la transition écorce de l'étoile à neutron – couche d'hydrogène accrété est aussi un sujet fascinant.
2. L'essor de l'astronomie-X (XMM, Chandra, RXTE,...) devrait permettre une connaissance plus approfondie de ces objets.
3. La gravité à la surface semble être un obstacle rédhibitoire à l'éjection de matière rendant la contribution des sursauts-X à l'évolution chimique de la galaxie inopérante.
4. Le processus *rp* n'intervient donc que comme source d'énergie. Les isotopes produits restent donc, a priori, confinés en surface dans des zones denses et donc opaques aux émissions gamma.
5. Les premiers résultats hydrodynamiques semblent indiquer que l'on ne peut isoler des réactions gouvernant l'énergétique. Il faut donc considérer les taux de réactions de captures de protons et les périodes, en général théoriques, pour un millier d'isotopes.
6. D'après ces mêmes calculs, les conséquences observables de modifications significatives de la nucléosynthèse semblent se limiter à une distorsion de la « courbe de lumière » qu'il serait difficile de séparer d'autres origines dans un phénomène aussi exotique.

Les sursauts-X sont des objets de grand intérêt pour l'astrophysique et la physique puisqu'ils se déroulent dans des milieux aux conditions très éloignées de celles des laboratoires et peuvent bénéficier des progrès de l'astronomie-X. Les aspects de nucléosynthèse ne semblent pas être pertinents mais d'autres aspects nucléaires mériteraient certainement des études plus approfondies : interface étoile à neutron – couche d'hydrogène, réactions nucléaires en champ magnétique fort, présence de noyaux très riches en neutrons,.....

Sursauts-gamma : (en construction)

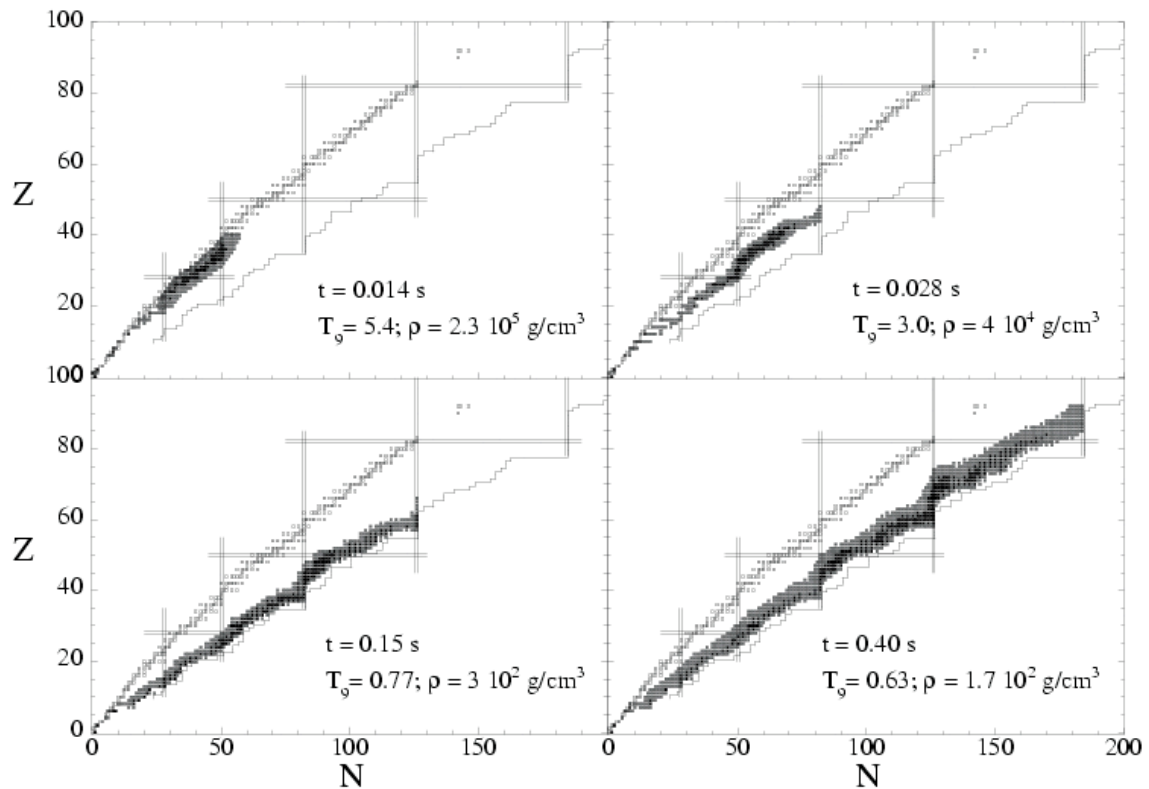
Longtemps la nature des sursauts gamma est restée un des mystères de l'astrophysique. Depuis l'identification de leur contrepartie dans d'autres longueurs d'ondes (X puis optique) souvent associées à des supernovae les sursauts longs ont été associés à des SN particulières où une grande partie de la matière est absorbée par le trou noir résiduel. Les sursauts-gamma longs pourraient être le siège de processus de nucléosynthèse (processus r , éléments légers). Ceci constitue un domaine émergeant en astrophysique nucléaire qui pourrait profiter de l'expertise française (IAP) reconnue pour ses aspects astrophysiques.

Nucléosynthèse des éléments lourds : (en construction)

La nucléosynthèse des isotopes des éléments lourds provient de trois processus « s », « r » et « p » correspondant (schématiquement) respectivement aux isotopes situés au centre ou sur les flancs riches en neutrons ou en protons. Pour ces éléments, la barrière coulombienne est trop élevée pour que la nucléosynthèse initiée par particule chargée y soit efficace. Ce sont donc les captures de neutrons ou la photodissociation qui sont à l'œuvre. Il faut noter que dans les milieux astrophysiques considérés ci-dessous, les propriétés des noyaux sont altérées : peuplement thermique des états excités, modifications des périodes de désintégration _ par ionisation,....

1. **Processus s .** Les isotopes situés au centre de la vallée de stabilité sont produits par capture lente (par rapport aux périodes de désintégrations _) de neutrons. Les sites astrophysiques du processus s ont été identifiés : la combustion centrale de l'hélium dans les étoiles massives et les zones d'ingestion de protons dans les couches riches en C des étoiles de la branche des géantes asymptotiques (AGB). Dans ce dernier cas l'observation d'un élément radioactif s (Tc) à leur surface a permis de le confirmer. Néanmoins, les modèles stellaires d'AGB, étoiles soumises à des instabilités hydrodynamiques récurrentes (« pulses thermiques »), ne sont pas encore à même de produire de façon consistante les abondances des isotopes s . Les isotopes impliqués dans le processus s , quelques centaines, se trouvent sur ou au voisinage de la stabilité. Leurs propriétés nucléaires (section efficaces de capture de neutron, période de désintégration _,...) sont pour une bonne partie connues expérimentalement mais dans certains cas particuliers des mesures seraient utiles bien que les incertitudes liées à la modélisation des AGB restent dominantes.
2. **Processus r .** Contrairement au processus s , le site du processus r , à l'origine de plus de 50% des isotopes plus lourds que le fer, reste un des grands mystères de l'astrophysique. Le site du processus r n'est pas connu mais il semble plus probablement associé aux supernovae gravitationnelles (SNII) : couches d'hélium ou de carbone ou bien dans la « vent neutrinique » à proximité de l'étoile à neutrons en formation. (D'autres modèles font appel à des scénarios plus exotiques.) Si l'on oublie les modèles de nucléosynthèse basés sur l'« approximation des points d'attente », la notion de « chemin du processus r » perd de sa pertinence. Dans les modèles actuels,..... le nombre de noyaux impliqués se chiffre par milliers et le flux nucléaire s'approche de la drip-line neutron (Figure X). Les données nucléaires requises sont nombreuses : masses, section efficaces de capture de neutron, périodes de désintégration _ et _, de fission, ainsi que celles relatives aux mécanismes d'émission de neutron(s), d'alphas, de fission retardés, interaction avec les neutrinos,

ne peuvent évidemment pas être obtenues expérimentalement pour un nombre significatif de ces noyaux souvent extrêmement exotiques. Le recours généralisé à la théorie nucléaire est donc inévitable. Il serait donc important qu'astrophysiciens, théoriciens nucléaires et expérimentateurs définissent les stratégies permettant de contraindre et valider ces modèles nucléaires par des études *ciblées*, en particulier auprès des futurs accélérateurs de faisceaux exotiques lourds comme Spiral-II, GSI et surtout Eurisol. Il serait ainsi possible d'améliorer les modèles nucléaires permettant le lien entre les expériences et leur application à la nucléosynthèse du processus *r*.



3. **Processus *p*.** Le processus *p*, est responsable de la production des isotopes peu abondants sur le flanc pauvre en neutrons (riche en protons) de la vallée de stabilité. Le processus *p* est, du point de vue astrophysique, le mieux connu des trois processus : les modèles reproduisent raisonnablement bien les abondances solaires à l'exception de quelques isotopes. (Il ne faut pas confondre le processus *p* avec le processus *rp* impliquant aussi des noyaux riches en protons. Ce dernier est la source d'énergie des sursauts-X mais les noyaux produits restent confinés à la surface de l'étoile à neutrons et ne contribuent donc pas à l'enrichissement galactique.) Le processus *p* est initié par la photo érosion (γ, n) de noyaux *r* et *s* initialement présents. Le site probable du processus *p* est à rechercher dans les couches d'oxygène et de néon des supernovae gravitationnelles ou dans les supernovae thermonucléaires (Ia). Les noyaux impliqués s'écartent peu de la vallée de stabilité et donc des données expérimentales existent mais de multiples réactions de photoérosions ne sont pas connues expérimentalement. Un ensemble de mesures (p, γ) ont été menées à bien récemment, permettant de valider les prédictions théoriques. Il n'en est pas de même des réactions (γ, γ) pour lesquelles de nouvelles mesures à basse énergie permettraient d'améliorer notre compréhension relative à la production des éléments lourds.

Nucléosynthèse primordiale :

La nucléosynthèse primordiale est l'« un des piliers » du Big-Bang standard (SBBN). Avec un seul paramètre libre, les abondances primordiales des « éléments légers » (^4He , D, ^3He et ^7Li) sont reproduites dans un domaine couvrant 9 ordres de grandeurs. C'était jusqu'il y a peu le principal moyen pour déterminer ce paramètre fondamental, la densité baryonique de l'Univers. Une collaboration de longue durée existe sur ce thème entre le CSNSM et l'IAP. Depuis quelques années, l'étude des anisotropies du rayonnement du fond diffus cosmologique (CMB) l'a supplanté en terme de précision (4%) grâce au satellite WMAP. Il est donc important d'améliorer la précision sur les résultats du SBBN pour pouvoir les comparer à ceux du CMB.

Cette comparaison donne des résultats contrastés. Partant de la valeur précise de la densité baryonique de l'Univers donnée par les observations de WMAP, on peut calculer les abondances primordiales dans le cadre du SBBN. L'accord est alors excellent pour le deutérium dont l'abondance primordiale est déduite d'observations de quelques « nuages cosmologiques » situés à grand redshift sur la ligne de visée de quasars. Par contre un désaccord flagrant s'observe pour le lithium : un facteur 3 entre la valeur prédite et celle déduite des observations des étoiles du halo de la galaxie. Il est à noter qu'a priori, la valeur primordiale du lithium est mieux définie que celle du deutérium puisque pourtant sur un nombre plus important d'observations montrant une grande uniformité (« Plateau des Spite »). Un moindre désaccord s'observe pour l'hélium. L'origine de ce désaccord reste mystérieuse : chacun des thèmes évoqués ci-dessous possède ses contradictions.

1. **Nucléaire.** Les taux de réactions du SBBN sont sous contrôle bien que les incertitudes puissent être encore réduites (expériences+théorie). Une réaction « oubliée », $^7\text{Be}(d,p)$, vient d'être mesurée (Louvain-la-Neuve), ce qui semble exclure toute solution nucléaire.
2. **Stellaire.** Les abondances de lithium observées pourraient être biaisées par les modèles d'atmosphères (1D/3D, non-équilibre thermodynamique local,...). La destruction du lithium dans ces étoiles semble être limitée par la faible dispersion du Plateau des Spite et quelques observations de ^6Li plus fragile que le ^7Li .
3. **Evolution prégalactique.** Entre l'époque de la nucléosynthèse primordiale et l'âge des plus vieilles étoiles du Plateau (Li) ou les nuages cosmologiques (D) environ un milliard d'années s'est écoulé. Il semble néanmoins improbable que des étoiles de première génération ou un « rayonnement cosmique primordial » aient pu altérer les abondances primordiales.
4. **CMB.** La détermination de la densité baryonique est-elle biaisée ?
5. **Nouvelle physique.** Extension de la Relativité Générale, « Quintessence », « Branés », asymétrie leptonique, variations des constantes fondamentales,... ont des conséquences sur la nucléosynthèse primordiale mais en général surtout sur l'abondance de ^4He .

La nucléosynthèse primordiale comparée aux résultats des observations du CMB par WMAP (et plus tard par Planck-HFI) ouvrent des perspectives intéressantes dans des domaines variés et interdisciplinaires : problème du lithium, tests de nouvelles théories en physique des particules....

Processus non thermiques :

A côté des processus thermiques de nucléosynthèse stellaire, les réactions nucléaires induites par des particules accélérées jouent un rôle important dans des sites assez variés, comme les éruptions solaires, le rayonnement cosmique galactique et éventuellement lors de la formation du système solaire. Pour tous ces processus des mesures de sections efficaces nucléaires sont indispensables pour pouvoir avancer dans la modélisation des sites et dans l'interprétation des observations.

1. Rayonnement cosmique

La nature spatio-temporelle du rayonnement cosmique galactique est un sujet d'actualité brûlante. L'origine du rayonnement cosmique galactique et la nature, l'origine et la propagation des rayons cosmiques d'énergie extrêmement élevée sont parmi des questions principales étudiées en ce moment. D'autres questions ouvertes sont liées à l'origine du lithium, du béryllium et du bore (LiBeB), produits par spallation dans les premières phases d'évolution des structures galactiques.

On connaît aujourd'hui assez bien le spectre en énergie globale à partir de environ 1 GeV et la composition isotopique entre quelques centaines de MeV et quelques centaines de GeV par nucléon du rayonnement cosmique arrivant dans le système solaire et ça jusque dans la région de masse Fe/Ni/Zn. Par contre des grandes incertitudes persistent en dehors de ce domaine, et notamment à basse énergie, pourtant d'une importance capitale pour l'équilibre énergétique du milieu interstellaire.

Les astronomies gamma et X apparaissent comme des outils de choix pour sonder cette partie des rayons cosmiques au travers de leurs interactions avec le milieu interstellaire. En particulier, la détection et la spectrométrie de raies atomiques et de raies gamma nucléaires induites par collision et la cartographie de l'émission gamma due à la décroissance des π^0 donneraient des informations inédites sur l'origine et la distribution du rayonnement cosmique dans notre galaxie ainsi que sur les conditions physiques du milieu interstellaire. Cette thématique est au centre d'une collaboration entre différents laboratoires de l'IN2P3 (IPN, CSNSM, LAPP), du SAP/Dapnia, de l'INSU (CESR, IAP) et de plusieurs laboratoires européens dans le cadre du GDR PCHE et bénéficiera des satellites récemment mises en orbite comme XMM, Chandra, INTEGRAL et dans le proche future de GLAST.

Pour interpréter les observations, il faut pouvoir calculer l'émission gamma produite par collision des protons et particules alpha avec tous les noyaux abondants (^4He , ^{12}C , ^{16}O , ^{20}Ne , ..., ^{56}Fe), entre quelques MeV jusqu'à quelques centaines de MeV par nucléon. A côté d'un gros effort en calculs de réactions nucléaires, des mesures sur différents accélérateurs d'ions légers comme des tandems et des cyclotrons, linacs seront indispensables pour déterminer cette émission.

Il est également à noter, que beaucoup de sections efficaces de spallation sont connues avec pas assez de précision ou de façon incomplète quant à la couverture en énergie et en masse de fragments. Ces lacunes limitent aujourd'hui l'analyse et l'interprétation des données de plus en plus précises de la composition isotopiques des rayons cosmiques obtenues avec des instruments embarqués comme Ulysses et ACE. Cette thématique – qui a une grande tradition en France – bénéficie et devraient continuer auprès des dispositifs performants de séparateurs et de détecteurs de fragments auprès des grandes accélérateurs d'ions lourds en Europe.

2. Phénomènes de haute énergie dans le système solaire

a)

Pendant certaines éruptions solaires, qui sont parmi les événements les plus violentes dans le système solaire, des ions sont accélérées jusqu'à des énergies dépassant le GeV par nucléon. L'origine est très probablement la libération de l'énergie magnétique dans la couronne solaire. L'émission gamma induite par l'interaction de ces particules énergétiques avec l'atmosphère solaire est observée depuis trois cycles solaires. L'analyse des raies nucléaires et du continuum X et gamma révèle des informations sur le spectre et la composition des particules énergétiques ainsi que sur la composition du milieu d'interaction et donne ainsi des indications sur le processus d'accélération.

Depuis le lancement des satellites RHESSI et INTEGRAL, qui comportent des détecteurs Ge à bord, une spectrométrie gamma fine des éruptions solaires est devenue possible pour la première fois. Des analyses détaillées des profils de raie gamma fournira des informations précises sur la distribution en énergie et en angle des particules accélérées dans ces éruptions et permettra de préciser la nature des ces phénomènes complexes d'accélération et transport de particules.

Ces études sont actuellement poursuivies en France par une collaboration entre des laboratoires de l'IN2P3 (CSNSM) et le service d'astrophysique du DAPNIA avec un laboratoire américain, qui inclut l'observation gamma avec SPI/INTEGRAL et RHESSI et la modélisation de raies gamma nucléaires. Des mesures expérimentales et des calculs sur les profils de raies gamma induits par collision de protons, ^3He et particules alpha avec quelques noyaux abondants (^4He , ^{12}C , ^{16}O , ^{20}Ne et ^{24}Mg) du seuil de réaction jusqu'à environ 25 MeV par nucléon sont nécessaires pour une bonne interprétation des profils observés. Ce programme est commencé auprès du tandem d'Orsay.

b)

Les particules énergétiques pourraient également avoir joué un rôle dans la formation du système solaire. Des surabondances de noyaux fils de décroissance de, entre autres, ^7Be , ^{10}Be , ^{26}Al , ^{41}Ca et ^{53}Mn dans des inclusions météoritiques spécifiques indiquent que ces radioisotopes ont dû être présents dans le système solaire en formation. Le scénario longtemps avancé était l'enrichissement de la nébuleuse solaire par une supernova proche. Un modèle alternatif décrit la production de ces radioisotopes in situ par des réactions de spallation et de transfert induites par des particules accélérées dans le disque de gaz et de poussière autour du jeune soleil.

Des observations récentes en rayons X par Chandra ont mis en évidence des éruptions intenses et fréquentes dans de jeunes systèmes stellaires. La similarité de ces éruptions avec des éruptions solaires, dont certaines sont très enrichies en ^3He , pointent sur une contribution potentiellement importante des réactions de transfert de cet isotope à la synthèse de certains noyaux radioactifs comme ^{26}Al et ^{41}Ca . Le deutérium, qui était encore présent dans le soleil, pourrait aussi avoir contribué à la synthèse in situ. Si les sections efficaces de spallation impliquant des protons sont généralement assez bien connu, des sections efficaces de spallation et de transfert induites par d, ^3He et ^4He sur des noyaux stables proches des radioisotopes cités ci-dessus sont en général encore à mesurer, typiquement du seuil de réaction jusqu'à quelques dizaines de MeV par nucléon.

Autres contributions :

Matière dense (Brandon Carter)

La matière des étoiles à neutrons consiste essentiellement de particules interagissant par le truchement de forces nucléaires. L'essentiel de ce que l'on sait vient des théories de la physique nucléaire et des expériences réalisées sur les noyaux atomiques terrestres, en particulier lors des collisions d'ions lourds (par exemple au GANIL). Il y a pourtant de nombreuses différences entre les propriétés des noyaux sur Terre et celles des étoiles à neutrons. Sur Terre, la matière nucléaire est plus ou moins symétrique (autant de protons que de neutrons), tandis que dans une étoile à neutrons il y a moins de protons. Par ailleurs, la densité augmentant, il y aura aussi des hypérons, que nous connaissons à l'état isolé, mais dont le comportement à haute densité sera certainement différent. Enfin, si la densité près du centre est suffisamment élevée, la matière va subir une transition vers une phase de quarks libres. On observe que les étoiles à neutrons se refroidissent assez rapidement (par émission de neutrinos), ce que l'on attribue au fait que les neutrons seraient dans une phase superfluide. En conséquence il y aura des couches solides, dont l'écorce ionique, et peut être aussi, les hypérons au centre. Les progrès récents des observations commencent à nous permettre de trier entre les différents scénarios théoriques, ce qui devrait apporter des informations importantes

Nucléosynthèse des éléments lourds (O. Sorlin)

La moitié environ des éléments au-delà du Fe sont produits par capture de neutrons dans des environnements stellaires de grande densité de neutrons. L'existence de pics d'abondances solaires, dont la position est corrélée avec les fermetures de couche nucléaire, témoigne du fait que les captures de neutrons se sont déroulées loin de la vallée de stabilité nucléaire. Toutefois, la composition en éléments du système solaire est issue de nombreux processus stellaires divers dont les abondances respectives se sont diluées lors de la formation du système solaire. C'est pourquoi d'autres type d'observables telles que celles des étoiles pauvres en métaux et des grains présolaires sont d'une importance capitale car elles contiennent une empreinte plus directe d'un événement stellaire donné. La possibilité récente de déterminer des abondances $\{ \text{bf isotopiques} \}$ de l'Eu et du Ba, constituent des découvertes extrêmement importantes quant à notre connaissance du processus r et notre vision de l'évolution chimique des éléments. Il serait très intéressant de pouvoir les étendre à d'autres séries isotopiques. Les lieux, au sein d'une étoile donnée, où se forment les grains présolaires sont encore mal connus. Une connaissance combinée de la minéralogie de ces grains et des réactions nucléaires qui rendraient compte de leurs abondances permettrait de progresser dans la compréhension de la nucléosynthèse stellaire. L'utilisation de technologies nouvelles en ce domaine, telles les nano-sondes ioniques, est essentielle pour révéler la composition isotopique et spatiale de ces grains pré-solaire de taille sub-millimétrique.

Les observations d'éléments r dans certaines étoiles du halo galactique très pauvres en métaux par le Télescope Hubble révèlent ce qui s'est déroulé tôt dans l'évolution galactique, lorsque les éléments r primordiaux ont été formés. Il est remarquable de voir que les abondances des noyaux lourds (au-delà de $A=130$) dans ces étoiles sont très similaires bien que ces étoiles proviennent de régions très différentes du halo galactique. De plus, ces abondances sont très semblables à celles des éléments r du système solaire. La préservation d'une courbe

d'abondance des éléments r au-delà de $A=130$ quasi-identique au cours du temps, laisse penser qu'ils ont été produit par un processus très robuste qui dépend fortement de la structure nucléaire des noyaux très riches en neutrons mais peu des conditions spécifique des étoiles qui les ont produits. Au-dessous de $A=130$, on observe une assez large dispersion entre les observations, qui laisse penser que plusieurs conditions d'irradiation ont lieu pour produire ces éléments. Ce type de processus, appelé r 'faible', a également été stipulée pour reproduire certaines observations météoritiques. En effet, de grandes anomalies isotopiques, comparées au système solaire, sont trouvées dans quelques grains. Elles indiquent l'existence de processus stellaires dans un milieu très riche en neutrons intermédiaire entre le processus s et r , pour lequel l'impact de la structure nucléaire semble déterminant.

Même si les sites de la bulle d'entropie chaude ou de deux étoiles à neutron coalescentes semblent des sites probables du processus r , le lieu où il se déroule reste un grand mystère à ce jour. Nous savons que le "chemin" emprunté par le processus r sur la charte des noyaux dépend des conditions de densité, de température, de temps caractéristique dans lesquels il se déroule. Dans des sites très chaud et de grande densité de neutrons, les captures de neutrons ont lieu sur des temps très courts et sont rapidement équilibrées par la photo-désintégration des noyaux ayant une faible énergie de séparation de neutron S_n . Dans de tels cas, les paramètres nucléaires essentiels à la modélisation du processus sont les masses nucléaires, qui fixent le lieu des points d'attente dans chaque chaîne isotopique, les temps de vie β et les valeurs de P_n , qui déterminent le taux de générateurs r accumulés et dans quelle proportion ils décroissent par émission β -neutron. Ces noyaux magiques (appelés points d'attente) ont une durée de vie plus longue que leurs voisins non-magiques et régulent le flot et la durée du processus r pour atteindre les éléments lourds.

Les couches externes de supernovae peuvent être composées de flux de neutron plus faibles (nucléosynthèse explosive de l'Hélium peut produire des neutrons en quantité importante). Ce pourraient être les endroits où les grains présolaires enrichis en isotopes riches en neutrons pourraient être produits. Lors de ce processus, des points de branchements peuvent le cheminement de ce processus aux endroits de la charte des noyaux où les temps de décroissance β (de l'ordre de quelques dizaines de ms) sont plus courts que les temps de capture de neutrons. Il est d'une importance majeure de déterminer au moins trois propriétés nucléaires (durée de vie, masses et section efficace de capture de neutron), tout particulièrement aux fermetures de couches nucléaires. Ces informations de structure nucléaire permettront de contraindre les flux de neutrons nécessaires à la production de noyaux riches en neutrons observés en sur-abondance dans certaines inclusion de météorites ou dans des grains présolaires.

Sur le plan expérimental, la production et l'étude des noyaux qui jouent un rôle essentiel dans le processus r peut s'avérer extrêmement difficile, voire même hors de portée pour ceux qui se trouvent au niveau la fermeture de couche $N=126$. Il est donc essentiel d'étudier au mieux certains noyaux clef afin de pouvoir valider et contraindre les modèles théoriques qui seront utilisés pour modéliser l'ensemble des noyaux.

La détermination récente de plus de 30 nouvelles durées de vie nucléaires de noyaux sur le chemin du processus r (autour de N=82) au CERN/ISOLDE, ajoutée aux mesures précédemment faites autour de la fermeture de couche N=50, permettent de contraindre sur les conditions astrophysiques pour construire les pics d'abondances r autour des masses atomiques A=80 et A=130. Cependant, une grande partie des noyaux (noyaux réfractaires du Mo au Pd) sont encore à N=82 pour le moment inaccessible, du fait de leurs propriétés atomiques qui les rendent difficile à extraire d'une cible de production de type ISOLDE. Un programme de recherche et développement sera entamé à partir de 2004 auprès de l'accélérateur ALTO à Orsay afin d'extraire ces noyaux sous forme moléculaire. Ces études seront également d'un apport précieux pour le projet SPIRAL2 au GANIL dont l'intensité de faisceau primaire sera 100 fois plus importante.

La détermination des masses atomiques pour des zones de la charte des noyaux non encore explorées est très importante. En particulier, la subsistance ou disparition des fermetures de couches majeures N=50, N=82 et N=126 est un des défis majeur à résoudre pour comprendre ce processus. Une telle disparition est très débattue, elle modifierait fortement la modélisation de la courbe d'abondance des éléments et en particulier la partie gauche des pics d'abondance des éléments. Ces dernières années, l'accélérateur GSI à Darmstadt a développé un programme de recherche sur détermination des masses de fragments de fission de courte durée de vie issus d'un faisceau de Pb de haute énergie par les méthodes de temps de vol et de Schottky. Plus de 70 nouvelles masses autour des régions N=50 et N=82 ont été obtenues. L'augmentation de l'intensité du faisceau primaire au GSI devrait permettre d'atteindre sous peu des centaines de nouveaux noyaux parmi lesquels des points d'attentes prévus du processus r. (Discuter avec D. Lunney de ce qui se ferait en France).

La mesure directe des sections efficaces de capture de neutrons sur les isotopes du processus r n'est techniquement pas réalisable (le neutron étant également instable). Pourtant, les taux de capture de neutrons sont importants à déterminer aux voisinages des fermetures de couche, où le processus r est partiellement en attente des décroissances β . Les impossibilités technologiques de ces mesures peuvent être contournées en simulant la capture de neutron via la réaction de transfert (d,p). Ces mesures nécessitent des accélérateurs tels que ceux de SPIRAL 1 et REX-Isolde qui produisent aux énergies de $\sim 3-10 A \text{ MeV}$ jusqu'à la masse atomique $A \leq 60$. Le projet SPIRAL2 est nécessaire pour l'étude des noyaux r dont la masse atomique se situe plutôt au-delà de ces masses atomiques. Les études expérimentales vont commencer cette année auprès de SPIRAL, en particulier pour mesurer la section efficace $^{46}\text{Ar}(n,\gamma)^{47}\text{Ar}$ dont la valeur permettra de mieux comprendre le rapport isotopique de $^{48}\text{Ca}/^{46}\text{Ca} = 250$ dans certaines inclusions de météorites réfractaires riches en Ca-Al, et de contraindre les conditions astrophysiques qui ont permis au ^{48}Ca d'être beaucoup plus abondant que le ^{46}Ca pourtant plus proche de la vallée de stabilité. Des expériences de type similaires pourront être effectuées auprès de SPIRAL2 afin de comprendre les anomalies en Mo/Zr et Te/Xe dans certains grains présolaires.

Il n'y a pour le moment pas d'information sur le processus r dans la région de la fermeture de couche $N=126$, qui est associée à la production du troisième pic d'abondance r à $A \approx 195$. Cette région pourrait être accessible par fragmentation d'un faisceau de Pb ou U au GSI. Ces expériences demandent des investissements importants pour identifier et étudier les noyaux produits, délivrant ainsi les premières durées de vies de points d'attente dans cette région. Au delà de $N=126$, les noyaux sont principalement fissiles. La capture de neutron stoppe et la nucléosynthèse reprend, au cas où le flot de neutron perdure, sur les noyaux issus de la fission. La fission nucléaire peut changer les abondances r en Th et U. Ceci changerait le rapport de d'isotopes r de Th/U qui est utilisé pour déterminer l'âge de la galaxie récemment déduit des observations de ces isotopes r dans des étoiles vieilles du halo galactique.

Rayonnement cosmique de très haute énergie (E. Khan)

Les noyaux atomiques sont des candidats pour les rayons cosmiques de ultra-haute énergie (10^{19} à 10^{21} eV). Dans cette hypothèse, ces noyaux vont se photodésintégrer en interagissant avec le rayonnement cosmique à 3 deg. K. Les processus d'interaction mettent en jeu la résonance géante dipolaire (prédominante), l'émission de quasi-deuteron, et à plus haute énergie, la photoproduction de pions. Il est donc nécessaire de modéliser ces processus nucléaires de la manière la plus fiable possible : des calculs phénoménologiques ou microscopiques de la réponse dipolaire du noyau peuvent être envisagés.

Méthodes indirectes en AN (Faïrouz Hamache et Didier Beaumel)

Météorites (Jean Duprat)