

Astrophysique Nucléaire

Executive summary

Interdisciplinaire par excellence, l'astrophysique nucléaire s'enrichit du fruit des recherches en physique nucléaire, en modélisations astrophysiques et en observations astronomiques allant des ondes Radio jusqu'aux rayonnements gamma, rayons cosmiques et des neutrinos et de l'étude des compositions météoritiques. Grâce à cette interaction entre différentes communautés, l'astrophysique nucléaire a déjà répondu à bien des grandes questions liées à l'origine des éléments au cours du 20^{ème} siècle et on sait qu'il existe trois grands sites de nucléosynthèse : deux thermiques, le Big Bang et les étoiles, et un non thermique, le milieu interstellaire (rayons cosmiques). Si la nucléosynthèse primordiale et les grandes lignes des phases successives de combustion hydrostatique dans les étoiles sont aujourd'hui bien connues, des grandes inconnues en revanche persistent concernant les sites de combustion explosive comme les novae, les sursauts X et les supernovae et la nucléosynthèse des éléments lourds.

En France, l'astrophysique nucléaire trouve ses racines dans les années soixante grâce aux travaux d'Hubert Reeves et de Jean Audouze sur la nucléosynthèse due aux réactions de spallation induites par les noyaux du rayonnement cosmique. Elle s'est caractérisée dès le début par une synergie étroite entre astrophysiciens et physiciens nucléaires des deux organismes CNRS (IN2P3, INSU) et CEA (DAPNIA), qui s'est poursuivie jusqu'à nos jours. Rappelons seulement trois autres thèmes où des collaborations ont conduit à des résultats majeurs :

- les neutrinos solaires : l'explication du déficit des neutrinos solaires passait par des progrès importants dans la connaissance des réactions thermonucléaires opérant au cœur du soleil et dans la modélisation du soleil. L'astrophysique nucléaire en France a joué un rôle important dans cette aventure par l'élaboration d'un modèle solaire standard au SAp-DAPNIA – dont les prédictions sont en excellent accord avec l'héliosismologie –, avec la participation dans la compilation européenne de réactions thermonucléaires NACRE et par une mesure précise de la section efficace d'une réaction clé pour la production des neutrinos solaires à l'IN2P3.
- l'astronomie gamma : en prévision du lancement d'Integral et de Rhessi, des études de modélisation et des mesures en laboratoire ont été réalisées en collaboration entre l'IN2P3, le DAPNIA, l'Espagne et les USA, en ce qui concerne l'émission gamma des novae et des éruptions solaires. Des physiciens ont ainsi pu mener à bien des projets cohérents, dans ces deux domaines, impliquant mesures de sections efficaces, calibration d'instrument (Integral), modélisation astrophysique *et* observations sur Integral (dans le cas d'une éruption solaire en attendant une nova proche).
- nucléosynthèse primordiale : une réanalyse cohérente de toutes les réactions thermonucléaires intervenant dans la nucléosynthèse primordiale a été entreprise par une collaboration franco-belge regroupant physiciens nucléaires expérimentateurs et théoriciens et astrophysiciens. Les prédictions avec les nouveaux taux de réaction sont actuellement confrontées avec les résultats de WMAP.

Actuellement de nouvelles questions et défis sont posés dans ces champs d'études où la communauté française devrait fortement s'impliquer. Ainsi la précision des prédictions de la nucléosynthèse primordiale et des résultats de WMAP fait apparaître un désaccord significatif

entre le lithium déduit du big bang et les observations des premières générations d'étoiles. Le succès du modèle standard du soleil ne doit pas masquer les incertitudes qui entachent les modélisations stellaires, notamment la convection, les effets de la rotation et du champ magnétique. Parallèlement des efforts grandissants portent, en France, sur l'étude des stades avancés de l'évolution stellaire et des sites de combustion thermonucléaire explosive. Si des modèles arrivent à expliquer au moins qualitativement la nucléosynthèse et la dynamique de l'explosion des novae, et (probablement) des supernovae thermonucléaires (SN de type Ia), il n'existe aujourd'hui aucun modèle capable de décrire correctement les supernovae à effondrement gravitationnel (SN Ib, Ic SN II) ou les sursauts gamma, probablement liés à l'un des types de SN Ib, Ic. Le site du processus r (capture rapide de neutrons), responsable pour la synthèse d'environ la moitié des éléments lourds au-delà du fer, reste un mystère, même si tout indique qu'il est lié aux SN gravitationnelles. L'origine et le mécanisme d'accélération du rayonnement cosmique galactique sont presque un siècle après sa découverte toujours inconnus, mais très probablement aussi liées aux SN.

La communauté française a acquis une maturité qui lui permet de s'attaquer à ces questions et bénéficie de nouveaux moyens d'observation et de mesure et d'une implication grandissante de théoriciens. Les principaux sujets de la communauté française qui se dessinent pour les dix années à venir sont :

- **L'évolution stellaire et héliosismologie**

Le développement de la sismologie avec SoHO (héliosismologie jusqu'en 2008) puis avec COROT (astérosismologie, lancement prévu pour 2006) suivi de GOLFNG et SDO (à partir de 2008) permettent d'avoir une vision observationnelle interne des étoiles, ce qui est important pour dépasser le cadre limité de l'évolution stellaire d'aujourd'hui qui ne tient pas compte des phénomènes dynamiques. Des progrès sur de nombreuses questions comme l'âge des étoiles, leur taux de rotation interne et leur déformation, l'extension convective, le champ magnétique et les vents stellaires encourage non seulement le développement d'activités magnétohydrodynamiques (MDH) mais crée aussi les conditions idéales pour relancer l'évolution stellaire vers les phases avancées. Ces études sont principalement poursuivies au SAp-DAPNIA (codes 1D CEASAM, 3D ASH) et ... ? Ils seront utiles non seulement pour l'astérosismologie mais aussi à terme pour aborder les supernovae de type Ib, Ic et II, en parallèle de codes 3D MDH au SAp-DAPNIA.

Certaines sections efficaces de réactions nucléaires des cycles pp, CNO et de la combustion de l'hélium vont certainement devoir être précisées pour accompagner les progrès en observation et en modélisation. Citons les réactions ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ et ${}^{22}\text{Ne}(\alpha,n){}^{25}\text{Mg}$. Ceci peut être le mieux accompli par des collaborations internationales comme entre théoriciens français (IreS) et belges (Bruxelles) pour améliorer les extrapolations de sections efficaces vers les énergies stellaires et des expériences auprès de l'accélérateur LUNA en Italie, qui va être bientôt le seul instrument européen dédié et adapté à de telles études.

- **Nucléosynthèse et astronomie gamma**

Avec le satellite INTEGRAL, l'astronomie gamma est clairement un grand thème fédérateur actuel pour l'astrophysique nucléaire en France. Les observations d'isotopes radioactifs dans la galaxie devraient permettre d'éclaircir et de tester en particulier la nucléosynthèse des étoiles massives et des sites explosifs novae et supernovae. Des nouvelles questions touchant l'astrophysique nucléaire sont déjà apparues avec la question sur l'origine de la formidable quantité de positrons dans le bulbe galactique, révélée par INTEGRAL à travers l'émission d'annihilation à 511 keV. Dans le futur une sensibilité accrue dans le domaine des rayons gamma (Advanced Compton telescope, lentille gamma MAX) devraient ouvrir de nouveaux horizons.

L'interaction des particules accélérées lors des éruptions solaires et surtout l'origine et la distribution spatiale du rayonnement cosmique galactique est un autre objectif de l'astrophysique nucléaire d'Integral, qui se prolongera jusqu'à 2008 et du satellite GLAST, dont le lancement est prévu 2006. Ces projets regroupent une considérable fraction d'astrophysiciens au SAp-Dapnia ainsi que plusieurs groupes à l'INSUE (CESR, IAP) et des physiciens à l'IN2P3 (CSNSM, IPN, LLR-> voir astroparticules) et ils vont certainement rester au cœur de l'astrophysique nucléaire française pour les dix ans à venir. Il est indispensable que, dans le cadre d'un lien étroit entre l'IN2P3, DAPNIA et l'INSUE, une collaboration forte demeure avec le programme d'astroparticules avec lequel l'astrophysique nucléaire partage de nombreux intérêts communs dans cette thématique. Cette communauté est structurée à l'heure actuelle dans le GDR PCHE.

Pour une interprétation pertinente des observations quelques mesures de sections efficaces de réactions thermonucléaires seront indispensables, en particulier pour des voies de réaction synthétisant les émetteurs gamma dans les novae. Comme pour les autres sites, la définition des réactions importantes à étudier doit provenir de l'utilisation de modèles astrophysiques évolués (Barcelone pour les novae). De telles mesures nécessitent, par ailleurs, une expertise étendue sur des méthodes directes et indirectes pour déterminer des sections efficaces extrêmement faibles impliquant des noyaux stables ou proche de la stabilité comme pour les réactions ${}^{18}\text{F}(p,\alpha){}^{15}\text{N}$ et ${}^{21}\text{Na}(p,\gamma){}^{22}\text{Mg}$. La situation en France est encore favorable pour de telles études puisque plusieurs groupes au CSNSM, et à l'IPN, possèdent cette expertise. Une autre voie est fournie par la théorie : modèle en couche, et modèle en amas (IreS). L'émission gamma induite par des particules énergétiques des éruptions solaires et du rayonnement cosmique est seulement partiellement connue, et une série de mesures sur des accélérateurs d'ions légers de type tandem et cyclotron est nécessaire.

- **Nucléosynthèse primordiale**

Le lancement de Planck en 2007 devrait constituer une relance des problématiques liées à la nucléosynthèse primordiale et au problème du lithium qui devrait s'enrichir de nouvelles observations au VLT d'étoiles de première génération. Une meilleure compréhension de la destruction du lithium dans les étoiles devrait permettre de contraindre la nucléosynthèse primordiale. La collaboration existante entre des chercheurs de l'IN2P3, l'INSUE, Bruxelles et les USA poursuivra ce thème, la nucléosynthèse primordiale restant un moyen précieux pour contraindre la nouvelle physique au-delà du modèle standard (quintessence, branes,...).

- **Supernovae de type Ia**

Une collaboration d'une dizaine de personnes entre le DAPNIA, l'équipe de M. Arnould à Bruxelles étudie dans cadre de l'ILP supernovae de type Ia. La structure de naine blanche, l'accrétion de la matière d'une étoile compagnon équation d'état, réseau de réactions nucléaires sont inclus dans un code hydrodynamique. Les étapes suivantes de ce projet bénéficieront de l'interaction des différentes communautés rassemblées à l'IPN et à Bruyères-le-châtel.

- **Micrométéorites**

La thématique que développe ce groupe au CSNSM englobe de nombreux aspects l'astrophysique nucléaire. Des collaborations avec d'autres groupes travaillant dans l'astrophysique nucléaire ont déjà été formées sur l'irradiation de la nébuleuse protosolaire ou sont en discussion au CSNSM et à l'IPN sur les abondances isotopiques témoignant de sites de nucléosynthèse particuliers. L'originalité des thèmes développés est une source de richesse potentielle pour l'astrophysique nucléaire dans les années à venir et de nouvelles collaborations au sein de l'IN2P3 et du DAPNIA sont à souhaiter.

- **Nucléosynthèse d'éléments lourds**

La moitié environ des éléments au-delà du fer sont produits par capture de neutrons dans des environnements stellaires en présence de flux importants de neutrons. Les pics d'abondance solaires, dont la position est corrélée avec les fermetures de couche en neutrons témoigne du fait que les captures de neutrons se sont déroulées loin de la vallée de stabilité nucléaire. Pourtant le(s) site(s) du processus r reste(nt) un des grands mystères de l'astrophysique même si tout indique qu'il est lié aux supernovae de type Ib, Ic et II. Dans les modèles actuels, le nombre de noyaux impliqués se chiffre par milliers et le flux nucléaire s'approche de la drip-line neutron. Les données nucléaires requises sont nombreuses : masses, sections efficaces de capture de neutron, périodes β et α , de fission, interaction avec les neutrinos etc. Elles ne peuvent évidemment pas être obtenues expérimentalement pour un nombre significatif de ces noyaux. Des études ciblées, visant d'abord à asseoir la validité des modèles théoriques, se feront en particulier auprès des futurs accélérateurs de noyaux exotiques lourds comme Spiral-II, GSI et surtout Eurisol en étroite collaboration entre expérimentateurs et théoriciens. Cette initiative est en bonne voie avec des collaborations se mettant en place entre l'IPN, Bruxelles, l'IreS... va surtout bénéficier des développements sur les supernovae à effondrement gravitationnel.

- **Supernovae Ib, Ic et II et objets compacts**

L'évolution des étoiles massives jusqu'au stade de pré-supernova, la physique de l'effondrement du cœur de fer et du rebond qui initie l'explosion des supernovae est aujourd'hui très mal compris. En fait, aucune modélisation est actuellement capable de produire une explosion réussie. Beaucoup de pistes sont à explorer, notamment les captures d'électrons précédents l'effondrement, l'équation d'état de la matière dense, l'interaction des neutrinos avec la matière et les effets de la rotation et du champ magnétique qui nécessitent des codes 2D et 3D. Des progrès substantiels sont attendus par l'astronomie X et γ , qui a déjà mis en évidence l'inhomogénéité des éjecta, mais aussi par une implication importante de la physique nucléaire théorique.

Ces dernières années un groupe important de théoriciens s'est formé à l'IPN, à Meudon et au CEA, qui étudie la propriété des noyaux exotiques impliqués dans le processus r, la structure et la dynamique des objets compacts et l'interaction des neutrinos avec la matière. L'étude de l'interaction des neutrinos avec la matière dense de l'étoile de neutron en formation et avec l'éjecta s'avérera certainement indispensable pour la compréhension du mécanisme d'explosion des SN de type gravitationnel. Ces études bénéficieront du développement des « β beams » de basse énergie dans un domaine d'énergie d'intérêt astrophysique pour améliorer notre connaissance des propriétés des neutrinos.

- **Processus s, sursauts X et processus rp**

La communauté française a peu de projets concernant ces sites, qui semblent d'un côté déjà très bien compris comme le processus s ou qui n'ont pas d'impact prévisible sur la nucléosynthèse comme le processus rp opérant dans les sursauts X. Mais de nouvelles observations (processus s) ou des progrès dans la compréhension des objets compacts (processus rp) pourraient relancer l'intérêt pour ces études.

Dans le texte qui suit nous avons souhaité faire un document complet décrivant les différents aspects thématiques qui intéressent les physiciens du DAPNIA et de l'IN2P3, en y précisant les résultats obtenus et les directions envisagées. Pour cela nous avons regroupé les thématiques en trois grands volets : nous origines, de la cosmologie au système solaire ; l'univers calme : la nucléosynthèse stellaire ; l'univers violent : les phases ultimes de l'évolution stellaire, novae, supernovae, les conditions ultimes de la matière.

L'astrophysique Nucléaire en France

Participants au groupe de travail : Didier Beaumel, Jean Pierre Chièze, Alain Coc, Jean Duprat, Cécile Engrand, Faïrouz Hammache, Matthieu Gounelle, Elias Khan, Jürgen Kiener, Annette Lefebvre, Jérôme Margueron, Nicolas Prantzos, Olivier Sorlin, Vincent Tatischeff, Sylvaine Turck-Chièze, Cristina Volpe.

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 (CSNSM, DAPNIA, IAP).

Les champs de recherche qui concernent la communauté française s'appuient sur un contexte très favorable aujourd'hui, grâce au développement de nouveaux moyens d'observation astronomique dans l'espace: SOHO et RHESSI avec le développement de la sismologie et des mesures coronales, XMM/Newton et INTEGRAL couvrant le domaine des hautes énergies. Ceux ci seront prochainement complétés par une instrumentation au sol spécifique X-Shooter (?), GOLF-NG (2005), puis par le lancement de COROT (2006, mission d'astérosismologie) suivi d'une grande mission européenne. L'astrophysique nucléaire bénéficie également de la mise en œuvre du VLT où les abondances des étoiles de premières générations sont compilées, ainsi que de l'instrument HARPS qui contribue au développement de l'astérosismologie par mesure de vitesse radiale.

Côté Physique Nucléaire, de nombreux progrès ont été réalisés dans le domaine de la connaissance des sections efficaces d'intérêt astrophysique. 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). **Il convient ici de mettre en regard les instruments de Physique Nucléaire**

Grâce aux nouveaux moyens d'investigation, l'astrophysique nucléaire est un domaine d'avenir. La communauté CEA/IN2P3 concernée croit et devrait contribuer à l'évolution de nombreux thèmes:

- 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/astérosismologie
 - 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
 - Sursauts gamma
 - Binaires X
- Analyses de matière extraterrestre
 - Grains présolaires
 - Micrométéorites, IDPs

Il est des domaines privilégiés, où des collaborations 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. Voici un premier bilan des collaborations réussies et des perspectives

La présentation se fera en trois parties :

Nos origines

L'univers calme

L'univers violent

I Nos origines

L'astrophysique nucléaire est présente dans de nombreux sites astrophysiques, elle joue en particulier un rôle important dans la compréhension de nos origines, à grande échelle (cosmologie) et à plus petite échelle (notre galaxie et surtout notre système solaire).

1 -Nucléosynthèse primordiale et cosmologie

La nucléosynthèse primordiale est l'« un des piliers » du Big-Bang standard (SBBN). Avec un seul paramètre libre, la densité baryonique, les abondances primordiales des « éléments légers » (^4He , D, ^3He et ^7Li) sont reproduites dans un domaine couvrant 9 ordres de grandeurs. Une collaboration 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 précision (4%) grâce au satellite WMAP. Il est donc important d'améliorer celle des 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 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 puisqu'un nombre plus important d'observations montre une grande uniformité (« Plateau des Spite »). Un moindre désaccord s'observe pour l'hélium. L'origine de ces désaccords 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) 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,...) mais aussi par sa destruction même si celle-ci 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 celle des plus vieilles étoiles du Plateau (Li) ou celle des nuages cosmologiques (D) environ un milliard d'années s'est écoulé. Se pourrait-il 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 pourrait elle être 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 .

Actuellement, aucune de ces solutions ne permet de résoudre le problème du lithium qui restera un thème de recherche pour les années qui viennent. La nucléosynthèse primordiale comparée aux résultats des observations du CMB par WMAP (et plus tard par Planck-HFI)

ouvrent donc des perspectives intéressantes dans des domaines variées et interdisciplinaires : problème du lithium et contraintes imposées par le BBN sur la « nouvelle physique ».

Références concernant la nucléosynthèse primordiale (à l'IN2P3) :

- *Big Bang Nucleosynthesis updated with the NACRE Compilation*, E. Vangioni-Flam, A. Coc and M. Cassé, *A&A* **360** (2000) 15-23.
- *Constraints on ${}^7\text{Li}$ from the nucleosynthesis of ${}^7\text{Li}$ in the standard big bang model*, A. Coc, E. Vangioni-Flam, M. Cassé and M. Rabiet, *PRD* **65** (2002) 043510-1:8.
- *Constraints on the variations of the fundamental couplings*, K.A. Olive, M. Pospelov, Y.Z. Qian, A. Coc, M. Cassé, E. Vangioni-Flam, *PRD* **66** (2002) 045022.
- *Updated Big Bang Nucleosynthesis confronted with WMAP and the abundances of light elements*, A. Coc, E. Vangioni-Flam, P. Descouvemont, A. Adahchour and C. Angulo, *ApJ* **600** (2004) 544-552.

2-Analyse isotopique de la matière extraterrestre (cette partie serait à réduire de 50% si possible)

L'analyse isotopique de la matière extraterrestre est une discipline qui couvre un vaste domaine allant de l'étude de grains réfractaires condensés dans différents sites stellaires (AGB, SN, Novae, ...) jusqu'aux fractionnements isotopiques # liés à la différenciation métal-silicate dans les corps massifs du système solaire (planètes, astéroïdes). Ici seront décrits les perspectives situées à la frontière de la physique nucléaire, et pour lesquelles il est possible à des équipes de l'IN2P3 ou du CEA d'apporter une contribution significative. Parmi les techniques expérimentales utilisés, les équipes de l'IN2P3 sont actuellement impliquées dans la Spectrométrie de Masse par Accélérateur (Tandétron de Gif sur Yvette) et la Spectrométrie de Masse par émission ionique secondaire (IMS-ORSAY).

En mesurant les rapports isotopiques d'un élément dans différents objets planétaires, on observe couramment des "fractionnements isotopiques", variations par rapport à la composition "solaire" de référence. Dans la plupart des cas, ces variations ne sont pas liées à un phénomène de nucléosynthèse : par exemple les phases de condensation/évaporation induisent des fractionnements isotopiques dépendant linéairement de la masse (« fractionnement en masse »). On parle d'**anomalies isotopiques** pour tous les phénomènes qui peuvent fractionner les isotopes indépendamment de la masse. Certaines anomalies signalent des processus nucléosynthétiques antérieurs à la formation de notre système solaire.

Ces anomalies isotopiques nucléosynthétiques sont observées dans des objets primitifs ayant été peu modifiés depuis leur formation dans les premières phases ($\sim 10^6$ ans) du système solaire. Les principaux objets primitifs disponibles en laboratoire sont :

- Les météorites du groupe des **Chondrites Carbonées (CC)**. Ce sont des objets de grande taille (cm et au delà), non-différenciés, et présentant des compositions déséquilibrées. Dans certaines CCs, on trouve, inclus dans leur matrice (mélange de phases minérales souvent hydratées formées à basse température), des **chondres** (petites sphères de phases silicatées formées à hautes températures, $T \sim 1500^\circ$), et des inclusions réfractaires "**CAIs**" (Ca, Al-rich inclusions, phases également condensées à hautes températures). La taille des chondres et des CAIs météoritiques varient de quelques dizaines de microns à des tailles centimétriques. Ces phases réfractaires sont parmi les premiers solides à s'être formés dans le système solaire, et n'ont pas, ou peu, été transformés depuis. Ce sont des objets privilégiés pour l'étude des premiers millions d'années du système solaire primitif. Par ailleurs, c'est aussi dans les CCs qu'ont été découverts¹ les **grains présolaires interstellaires** (SiC, graphite, nano-diamant, ...) de très petites taille (qqes nm à qqes μm). A ce jour, l'essentiel des

¹ Des grains présolaire ont depuis été identifiés dans autres type d'objets (Chondrites Ordinaires, IDPs)

anomalies isotopiques ont été découvertes dans les CAIs, les chondres et les grains présolaires des CCs

- Les **poussières interplanétaires (IDPs)**. Ce sont des grains de poussières d'origine extraterrestre de 1-30 μm , principalement collectes par la NASA lors de vols stratosphériques, ou obtenus par capture dans des capteurs d'aérogel exposés en orbite basse terrestre. Différentes études indiquent la présence de phases d'origine interstellaire dans ces grains. Certaines de ces poussières pourraient être d'origine cométaire. Récemment des grains de silicates présolaires interstellaires ont été observés in-situ dans des IDPs. Dans les années qui viennent, l'ensemble de cette discipline sera certainement marqué par une mission spatiale STARDUST (NASA) de retour d'échantillons cométaires (2006). Ce sera la première fois que des échantillons provenant d'une comète identifiée (Wild2) seront disponibles pour analyse en laboratoire. Une équipe du CSNSM est fortement impliquée dans le futur consortium français bâti pour disposer de l'ensemble des capacités analytiques pour avoir accès à ces échantillons.
- Les **micrométéorites**. Avec des tailles comprises entre 25-1000 μm , les micrométéorites forment une population d'objets extraterrestres primitifs intermédiaire entre les CCs et les IDPs. Elles représentent, de nos jours, l'apport dominant de matière extraterrestre sur Terre, de l'ordre de 10 000 tonnes/an par rapport à 30 tonnes/an pour les météorites, de plus grande taille². Leurs teneurs en isotopes cosmogéniques « vivants » (²⁶Al, ¹⁰Be, ²¹Ne, ...) indiquent que ces objets ne résultent pas de l'ablation ou de la fragmentation de météorites et que leur taille originale dans l'espace interplanétaire est inférieure à quelques cm. Les principales collections de micrométéorites (USA, France, Japon) ont été extraites des glaces et des neiges polaires (Arctique et Antarctique). L'origine de ces grains, cométaire et/ou astéroïdale, est encore très débattue.

Les grandes familles d'anomalies isotopiques liées à des processus nucléaires (nucléosynthèse stellaire, irradiation, ...) et quelques perspectives associées :

1) les anomalies des grains présolaires :

Les grains présolaires ont été obtenus par attaque acide de météorites primitives, après dissolution quasi totale de la roche ils ne restent que les phases plus résistantes et les plus réfractaires : SiC, Graphite, nano-diamant, Si₃N₄, TiC, Corindon (Al₂O₃), Spinelle (MgAl₂O₄),... Leur taille varie entre quelques nm et quelques μm et leur concentration en masse par rapport à la roche totale varie entre 10⁻⁹ et quelques 10⁻⁴. Ils ont été identifiés comme présolaires sur la base de leur anomalies isotopiques. Alors les objets du système solaire présentent des fractionnements isotopiques de quelques ‰, les anomalies isotopiques des grains présolaires sont de plusieurs ordres de grandeurs plus élevées. Ces anomalies sont observées dans la quasi totalité des éléments étudiés dans un grain (majeurs, mineurs, éléments en traces). Ces grains présolaires sont des phases minérales condensées dans différents environnements stellaires et qui ont survécu intactes jusqu'à nous. Ils présentent donc l'intérêt majeur de contenir chacun la signature isotopique d'un événement stellaire unique. La comparaison des signatures isotopiques en éléments tels que (Si, C, N, O, Xe, Al, Mg, ...) permet pour une partie de ces grains d'identifier, par comparaison avec les modèles, le site astrophysique d'origine (AGB, SN, Novae). Par exemple les grains de SiC dits de la séquence principale (mainstream) présentent un enrichissement systématique en isotopes s dans différents éléments (Kr, Xe, Ba, Nd, Sm, ...) alors que les SiC dits de type X présentent des signatures attendues par les modèles de SN (excès de ²⁸Si, présence de ⁴⁴Ti et ²⁶Al/²⁷Al = 0.1-1).

² La contribution des IDPs à ce flux en masse est négligeable.

La découverte des grains présolaires est sans doute l'un des résultats les plus impressionnants des 20 dernières années en cosmochimie. C'est un domaine qui évolue à grande vitesse avec le développement de nouvelles techniques d'analyses isotopiques à haute résolution spatiale (NanoSIMS), qui ont permis l'identification de grains présolaires *in situ* sans avoir à traiter chimiquement la majeure partie de la météorite. Ce domaine présente de nombreuses perspectives en astrophysique nucléaire, mais il faut garder à l'esprit qu'il exige des compétences expérimentales très poussées (extraction de grains submicroniques par attaques acides de roche totale, manipulation de grains submicroniques, Nanosims...). A priori, il n'y a aucune raison pour que les micrométéorites ne contiennent pas de grains pré-solaires, dans les années à venir, il serait intéressant effectuer une recherche de telles phases *in-situ* dans les micrométéorites de la collection du CSNSM. La mise en évidence de telles phases dans la collection du CSNSM permettrait aux équipes impliquées d'acquérir une expérience dans ce domaine puis d'y développer une thématique propre. Nous disposons, en collaboration étroite avec les équipes de l'INSU d'une palette de spectromètres de masse tout à fait adaptée à une telle recherche par imagerie ionique (IMS-ORSAY, IMS1270 au CRPG, futur NanoSims au Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris). Concernant la partie théorique, il faut aussi insister sur le fait que l'interprétation des anomalies isotopiques de ces grains nécessite des modèles stellaires capables de calculer les compositions isotopiques attendues dans les éjectas de différents types d'étoiles (AGB et SN). Grâce aux liens entre le CSNSM et le groupe de Barcelone, l'expertise dans le domaine des novae existe. Il est à noter qu'il s'agit de l'unique site pour lequel la formation de grains est attestée par l'observation (IR et UV). Par contre, probablement à cause de la faible masse éjectée, seuls 7 grains (SiC et C) sont actuellement attribués aux novae de part leur composition isotopique en C, N, Si et Al.

2) Les anomalies nucléaires « inconnues » (CAI-FUN)

La plupart des CAIs présentent de faibles anomalies isotopiques dans les noyaux légers : Ca, Ti, Cr. Ces anomalies varient de quelques 0.1 ‰ à quelques dizaines de ‰. Les inclusions présentant les plus fortes anomalies sont les hibonites ($\text{Ca,Al}_{12}\text{O}_{19}$) et les **CAI-FUN** (Fractionation and Unknown Nuclear). Extrêmement rares (quelques unités), l'origine des FUN est, à ce jour, mal comprise. A priori, il s'agit d'objets ayant condensés très tôt dans le système solaire primitif et ayant incorporé une composante isotopique anormale (qui n'avait pas été homogénéisée). Les deux cas emblématiques d'inclusions FUN sont l'inclusion EK1-4-1 et C1 qui ont toutes les deux été trouvées dans une Chondrite Carbonée (Allende). L'inclusion EK1-4-1 présente un intérêt particulier : on y observe un enrichissement systématique en « noyaux r » dans 3 séries isotopiques (Sm, Nd, Ba). Le fait que cette systématique des masses $A=130-150$, n'est pas observée pour les isotopes de Sr ($A=84-88$) a amené certains auteurs à suggérer des sites de nucléosynthèse différents pour ces deux régions de masse. Notons par ailleurs que les enrichissements relatifs en « noyaux r » observés sur la série des Sm est compatible avec les proportions relatives de ces mêmes noyaux dans le système solaire. Donc les anomalies isotopiques en noyaux lourds observées dans EK1-4-1 ne sont pas interprétées comme une signature d'un processus stellaire unique, mais plutôt comme un enrichissement local dans la composante globale en « noyaux r » du système solaire. L'inclusion EK1-4-1 présente aussi de fortes anomalies isotopiques dans les noyaux légers : ^{48}Ca , ^{50}Ti , ^{54}Cr , ... De tels enrichissements sont aussi observés dans d'autres CAIs mais avec des amplitudes inférieures. De nombreux modèles ont été proposés pour expliquer ces anomalies : captures de neutrons, captures de protons, capture électronique, équilibre nucléaire statistique ... L'un des modèles retenus pour expliquer l'ensemble des anomalies observées dans cette région de masse est un modèle d'équilibre nucléaire statistique dans un milieu riche en neutrons (MZM e-process pour Multiple Zone Mixing equilibrium). Si l'interprétation des anomalies isotopiques d'EK1-4-1 reste très intéressante, elle requiert

quelques précautions : (i) il s'agit d'un objet rare présentant des caractéristiques uniques³, (ii) a priori, elle résulte de la somme d'un nombre conséquent de contributions stellaires différentes les unes des autres.

3) Radioactivités éteintes et Système Solaire primitif

L'analyse de phases réfractaires de météorites primitives (de type chondrites carbonées) a révélé la présence durant les premières phases de notre système solaire d'isotopes à courte durée de vie ($\tau \sim 1\text{Ma}$). Cette présence a pu être clairement démontrée grâce à l'utilisation des microsondes ioniques, par l'observation d'excès des produits de décroissance de ces isotopes (par exemple le ^{26}Mg pour l'isotope radioactif ^{26}Al) dans des CAIs et des chondres. La corrélation linéaire observée entre l'excès du noyau fils (^{26}Mg) et la concentration de l'isotope stable (^{27}Al) dans différentes phases permet de déduire le rapport initial de l'isotope radioactif (i.e. $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 5 \cdot 10^{-5}$). Pour différents isotopes (^{26}Al , ^{53}Mn , ^{41}Ca , ...) les rapports ainsi obtenus sont, de plusieurs ordres de grandeur, supérieurs aux valeurs attendues de l'évolution chimique de la Galaxie. Il est donc nécessaire de trouver un site de nucléosynthèse de ces éléments quasi-contemporain de l'effondrement du nuage de gaz et de poussières qui forma notre étoile. Schématiquement, deux approches principales sont proposées : une nucléosynthèse stellaire de « dernière minute » par une étoile massive en fin de vie (AGB, SNII, ...) ou une irradiation *in-situ* des grains de poussières du disque circumstellaire par des particules solaires légères (p, α , ^3He). Actuellement ce sujet est particulièrement controversé, la seconde approche ayant été fortement renforcée par deux observations. Premièrement la découverte du ^{10}Be dans ces mêmes phases réfractaires (identifié par un excès de ^{10}B) plaide pour un scénario d'irradiation (le Be étant produit par spallation sur C et O et pas par nucléosynthèse stellaire). Plus récemment encore, une étude suggère la présence de ^7Be éteint dans ces mêmes inclusions. Avec une période de 53 jours, la présence de ce noyau ne peut être expliquée que dans le cadre d'un scénario d'irradiation. Deuxièmement, les observations d'étoiles jeunes de masses proches de celle du soleil ont révélé que ces objets traversent une phase d'activité X intense (jusqu'à 10000 fois plus intense que l'activité observée sur le soleil contemporain). Une telle activité X est expliquée par l'interaction magnétique de l'étoile avec son disque d'accrétion, elle implique très probablement l'accélération de particules chargées légères. Dans le cadre du modèle de vent X, développé par F. Shu, l'interaction de ces particules avec la matière du disque en accrétion est analysée et les calculs les plus évolués suivant cette approche montrent qu'il est possible, à un facteur 2 près, de reproduire les rapports isotopiques observés. Par ailleurs, la présence de ^{60}Fe ($\tau = 1.49\text{Ma}$) a été clairement établie dans différentes météorites. Ce noyau étant trop riche en neutrons pour être produit au niveau observé par réactions d'irradiation, ce nouveau résultat plaide fortement en faveur du modèle de nucléosynthèse stellaire (SNII). L'origine des radioactivités éteintes dans le système solaire primitif reste donc une question ouverte...

Dans les années qui viennent, différentes perspectives s'ouvrent pour des équipes de l'IN2P3 dans ce domaine. La plupart des résultats obtenus à ce jour sur les radioactivités éteintes (RE) ont été réalisées sur des météorites. De nombreuses études montrent que les micrométéorites diffèrent des météorites et, potentiellement, échantillonnent d'autres réservoirs du système solaire. Dans les années qui viennent une étude isotopique des phases réfractaires des micrométéorites de la collection du CSNSM sera entreprise pour y chercher la présence de RE. Au delà de son intérêt intrinsèque, cette étude permettra de vérifier ou d'infirmer l'hypothèse d'une distribution spatiale homogène des RE dans le système solaire

³ Ce qui n'est, par exemple, pas le cas des grains présolaires dont les différentes familles sont constituées de plusieurs centaines d'échantillons.

primitif. Cette hypothèse est, pour l'instant, communément admise pour bâtir une chronologie du système solaire primitif.

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. Ceci serait en accord avec les mesures récentes du CNO photosphérique solaire déduites de nouveaux modèles d'atmosphères. La réduction de 30% de ces éléments n'est plus compatible avec l'idée d'un site enrichi en oxygène par l'explosion d'une supernova.

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 par irradiation de certains noyaux tels ^{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 connues, 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. Ces sections efficaces sont mesurables par irradiation de cibles stables auprès du Tandem d'Orsay (spectrométrie γ et/ou irradiation puis mesures SMA).

4) Les anomalies isotopiques « vivantes »

Dans l'espace interplanétaire, la matière est irradiée par 2 types de rayonnements capables énergétiquement d'induire des réactions nucléaires de production d'isotopes : le rayonnement cosmique galactique (GCR) et les particules énergétiques solaires (SEP). Cette nucléosynthèse est observable sur certains isotopes radioactifs (^{26}Al , ^{10}Be , ^{53}Mn , ^{41}Ca , ...) ou stables (^{21}Ne , ^3He , ...). L'outil privilégié pour ce type de mesure est la Spectrométrie de Masse par Accélérateur (SMA), car il s'agit de mesurer des rapports isotopiques de l'ordre de 10^{-15} . A partir des concentrations en ces différents isotopes il est possible de calculer des temps d'irradiation des corps parents du matériau étudié. De telles études ont été menées avec succès sur des micrométéorites, des IPDs, des échantillons de sol lunaire, des météorites. L'IN2P3 possédait une équipe internationalement reconnue dans ce domaine (le groupe SMA du CSNSM), avec leur départ à la retraite, nous perdons leur expertise.

II- L'Univers calme

A la base du développement de l'Astrophysique nucléaire, la compréhension des étoiles a nécessité de mettre en place un formalisme théorique mettant en évidence la compétition entre distribution de vitesse et interaction coulombienne pour définir l'énergie (dite de Gamow) où avait lieu de façon privilégiée. Aujourd'hui vérifiable in situ, l'exigence de la connaissance des réactions nucléaires reste élevée et se généralise aux différentes étapes d'évolution.

1- Les réactions de fusion dans les étoiles

L'astrophysique nucléaire repose sur la connaissance de sections efficaces et sur la transposition de celles-ci au domaine astrophysique. Pendant de nombreuses années celle-ci s'est faite de façon purement théorique, tout en sachant qu'il convient de faire face à plusieurs difficultés. Les premières chaînes de combustion ont lieu à des températures situées sous la barrière coulombienne, correspondant à des énergies généralement inaccessibles en laboratoire, il faut donc en général extrapoler les mesures de laboratoire au domaine astrophysique en s'appuyant sur des modèles théoriques. De plus la plupart des mesures se faisait entre atomes dans le laboratoire et entre ions dans les étoiles, ce qui change les effets coulombiens, enfin il faut tenir compte du rôle des électrons libres et des ions avoisinants car les réactions nucléaires dans les étoiles se font dans un plasma.

Au cours de ces dix dernières années il a été possible de vérifier pour la chaîne pp (et partiellement pour la chaîne CNO) la justesse des différentes étapes conduisant à l'évolution de la température centrale des étoiles grâce à un nombre de moyens accrus dans 3 disciplines : Astrophysique (GOLF/SoHO, première pierre angulaire de l'ESA), Physique Nucléaire (mesure de sections efficaces) et Physique des Particules (détection de neutrinos). La communauté française a joué un rôle fondamental dans cette étape de validation.

Pour la première fois, il a été possible d'exploiter la mesure des ondes acoustiques pour tester le comportement moyen du cœur nucléaire. En effet le satellite SoHO a permis une mesure continue de ces modes, la comparaison entre plusieurs instruments de mesures (GOLF et MDI) et la recherche systématique de biais qui empêche l'extraction des données dans le cœur nucléaire solaire. C'est après s'être débarrassé de ces biais, liés principalement aux variations de surface et aux cycles d'activité, qu'il a été possible d'extraire la vitesse du son jusqu'à 0.06 rayon solaire avec une précision telles que l'ensemble des processus nucléaires ont pu être testés. Il a été permis d'étudier la sensibilité de cette variable aux différentes sections efficaces et en particulier aux sections efficaces pp, (^3He , ^3He), (^3He , ^4He).

Les résultats sismiques ont permis :

- de définir la section efficace pp à 1% près alors que celle-ci est inatteignable en laboratoire,
- d'apporter des contraintes sur les processus d'accélération liés aux électrons libres, le plasma étant en effet considéré comme faiblement couplé pour l'interaction des deux protons mais couplé de façon plus complexe pour les autres réactions.
- de valider l'hypothèse d'une distribution maxwellienne des vitesses dans le cœur solaire.

Plusieurs sections efficaces ont été remesurées, en particulier (^3He , ^3He). Celle fut mesurée jusqu'à quelques dizaines de keV (domaine astrophysique). La section efficace $p + ^7\text{Be}$ a aussi été reconsidérée, elle est la section efficace indispensable pour estimer le flux de neutrinos émis par la désintégration du ^8B . Le remarquable accord entre les données sismiques et l'ensemble des détections de neutrinos montre la maîtrise de cette partie fondamentale du calcul des réactions nucléaires dans les étoiles. L'ensemble des mesures met de fortes contraintes sur les effets de couplage du plasma pour les réactions du cycle CNO.

Rajouter une figure

Avec ces succès la sismologie est devenu un outil extrêmement précieux et unique pour sonder les régions nucléaires des étoiles. Ceci encourage une mesure précise de l'ensemble des réactions nucléaires. La mesure très récente de la section efficace $^{12}\text{C} + \text{p}$ a conduit à une réduction d'un facteur 2 avec une conséquence importante pour l'âge des amas globulaires, d'autres mesures vont suivre dans les années à venir.

L'avenir de ce domaine va se nourrir d'une physique de l'intérieur des étoiles de plus en plus complexe, en effet certains indicateurs, tels le lithium 7 ou le carbone 13 ou l'azote 15 montrent depuis longtemps la limite des hypothèses de l'évolution stellaire classique. Ces anomalies d'abondance traduisent en fait des problèmes de géométrie : déformation des étoiles massives, maintenant parfaitement mise en évidence par des mesures de rayon, mais aussi présence de rotation et de champ magnétique qui vont modifier les conditions dans lesquelles les réactions nucléaires vont prendre place. Si a priori l'on pourrait penser que les problèmes d'évolution stellaire se déplacent vers des problématiques magnétohydrodynamiques et non d'astrophysique nucléaire, il convient de noter au contraire que ce nouveau champ d'investigation, fortement soutenu dans le futur par les missions canadiennes MOST (lancement effectué en 2003) puis européennes COROT (étude sismique de dizaines d'étoiles) et probablement EDDINGTON (étude sismique de millions d'étoiles couvrant l'ensemble du diagramme échelle) va conduire à de plus en plus de diagnostics et donc d'exigence dans les ingrédients nucléaires à intégrer dans les modèles d'évolution stellaire. Ceci conduit clairement à une nouvelle orientation des priorités vers les phases avancées de l'évolution stellaire et les milieux très denses et très chauds en l'absence ou présence de champ magnétique. Cet inflexion fait partie des priorités du Programme National de Physique Stellaire, mentionnées lors de sa prospective en 2002.

Quelques références concernant les phases initiales d'évolution stellaire (CEA-IN2P3) :

- *The screened nuclear reaction rates and the solar neutrino puzzle*, Dzitko, H, Turck-Chièze, S., Delbourgo-Salvador, P., Lagrange, Ch., ApJ, **447**,(1995), 428- 442.
- *Solar fusion cross sections*, Adelberger, E. G., ... Bogaert, G.,... Turck-Chièze, S., et al., Rev. Mod. Phys., **70**, (1998), 1265-1291.
- *The solar neutrino problem: low energy measurements of the $^7\text{Be}(p,\gamma)^8\text{B}$ cross section*, Hammache, F., Bogaert, G., Aguer, P., ...; Chemin, J.F., et al., Phys. Rev. Lett., **86**, (2001) 3985-3988.
- *Global Oscillations at low frequency from the SOHO mission*, Gabriel, A.H., Grec, G., Charra, J., Robillot, J-M, Roca-Cortes, T, Turck-Chièze, S., et al., Sol. Phys., **162** (1995), 61-99.
- *Solar Internal Composition and Nuclear Reaction Rates in the Light of Helioseismology*, Turck-Chièze S., Nghiem P., Couvidat S., Turcotte S., 2001, Sol. Phys., 200, 323
- *Solar neutrino emission deduced from a seismic model*, Turck-Chièze S., Couvidat S., Kosovichev A. G., et al. 2001, ApJ, 555, L69

Le projet COROT : A proposal to study stellar convection and internal rotation, Catala, C., ...Baglin, A., ... Turck-Chièze, S., et al., GONG conférence, (1995), 426.

2-Méthodes indirectes pour l'Astrophysique Nucléaire

Les réactions nucléaires mises en jeu dans les scénarios astrophysiques sont souvent difficiles à mesurer du fait de leur faible valeur et/ou de la nature radioactive des espèces concernées, souvent éloignées de la vallée de la stabilité. Des méthodes indirectes ont ainsi été développées pour contourner ces difficultés expérimentales. Elles consistent essentiellement à

étudier une réaction alternative et à en déduire la section efficace de la réaction d'intérêt astrophysique par une analyse appropriée des données. Au cours des dix dernières années, l'essor des faisceaux radioactifs en physique nucléaire a accéléré le développement et les applications de telles méthodes, tendance qui devrait se prolonger dans les années à venir.

Le premier exemple de réaction alternative est la dissociation coulombienne, qui est en quelque sorte la réaction inverse des réactions de capture radiative telles que (p,γ) , (n,γ) et (α,γ) qui interviennent dans la nucléosynthèse des éléments légers comme des lourds. L'intérêt de cette méthode réside dans le fait que les sections efficaces de dissociation coulombienne sont directement reliées à celles de la réaction inverse mais avec un facteur amplificateur. La dissociation coulombienne a constitué une application directe et naturelle pour les accélérateurs de moyenne et haute énergie où les faisceaux d'ions radioactifs sont produits par fragmentation ou par fission en vol. Elle a été appliquée avec succès au Ganil, GSI, MSU et RIKEN pour l'étude des sections efficaces des réactions d'intérêt astrophysique ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$, ${}^{13}\text{N}(p,\gamma){}^{14}\text{O}$ et ${}^{22}\text{Mg}(p,\gamma){}^{23}\text{Al}$.

Ainsi, pour la synthèse de nombreux éléments lourds, par capture rapide de neutrons, au-delà du fer (processus r), des études expérimentales de taux de certaines réactions s'avèrent nécessaires pour valider les modèles théoriques. En effet, les estimations fournies par le modèle statistique Hauser-Feshbach deviennent insuffisantes dans quelques cas de réactions impliquant des noyaux loin de la stabilité. Ces réactions sont à identifier en collaboration avec les théoriciens et les astrophysiciens. Le développement actuel des faisceaux radioactifs riches en neutrons à GSI devrait offrir la possibilité de déterminer expérimentalement les sections efficaces de ces réactions en utilisant la méthode de la dissociation coulombienne. Les mêmes dispositifs expérimentaux que ceux utilisés pour étudier la structure nucléaire des états du continu par la méthode de la masse invariante (e.g. le dispositif ALADIN (spectromètre) + LAND (multidétecteur de neutrons) à GSI) pourraient être mis à profit.

A plus basse énergie, les réactions de transfert peuvent être, avantageusement utilisées pour déduire des sections efficaces pour l'astrophysique. L'extraction des facteurs spectroscopiques permet d'obtenir : (1) les largeurs partielles des états au dessus du seuil pour les réactions résonantes, et (2) de calculer les sections efficaces de capture radiative directe pour les états liés. Les réactions de transfert ont été intensivement utilisées par le passé avec des cibles stables et des faisceaux d'ions légers, apportant de nombreuses informations sur la structure des noyaux autour de la vallée de stabilité et sur les réactions astrophysiques telles que ${}^{15}\text{N}(\alpha,\gamma){}^{19}\text{F}$ et ${}^{31}\text{S}(p,\gamma)$. On sait maintenant les étudier avec des faisceaux d'ions radioactifs de faible intensité ($\sim 10^6$ pps) comme pour la réaction ${}^{18}\text{F}(p,\alpha)$ à Louvain-La-Neuve.

Une nouvelle méthode d'extraction des sections efficaces de capture radiatives de particules chargées à partir des réactions de transfert a récemment été proposée. Cette méthode dite des ANC (Asymptotic Normalisation Coefficient) suggère d'extraire des sections efficaces de transfert non pas les facteurs spectroscopiques mais les coefficients de normalisation asymptotique à partir desquels la section efficace de capture directe peut être calculée avec une bonne précision. Comme pour la dissociation coulombienne, cette méthode a été mise à profit pour extraire le facteur astrophysique de la réaction ${}^7\text{Be}(p,\gamma)$ qui constitue un cas d'application très favorable. Dans le cas de la capture de neutrons (capture neutrons), cette méthode n'est applicable que dans un nombre limité de cas.

Une troisième approche très récente, est développée pour l'étude des réactions nucléaires non radiatives à basse énergie, c'est la méthode dite de "Cheval de Troie". Dans cette méthode on

extrait la dépendance en énergie de la section efficace d'une réaction de particules chargées $\{A+x \rightarrow c+C\}$ à basse énergie à partir d'une réaction à trois corps $\{A+a \rightarrow b+c+C\}$ où la particule b , couplée à x forme le noyau $a=b+x$ qui joue le rôle de spectateur. Le but est d'obtenir, à partir de la section efficace de coïncidence mesurée, des informations sur la section efficace de la réaction $A(x,c)C$. L'intérêt de la méthode est "d'introduire" la particule x dans la zone d'interaction via le projectile a , à une énergie supérieure à la barrière coulombienne, donc avec une section efficace très supérieure à celle de la réaction $A+x \rightarrow c+C$ que l'on cherche à étudier. Le prix à payer est une dépendance des résultats vis-à-vis de modèles de réactions. Cette méthode a été utilisée dans l'étude des réactions ${}^6\text{Li}(d,\alpha){}^4\text{He}$ et ${}^7\text{Li}(p,\alpha){}^4\text{He}$ et les résultats obtenus sont en bon accord avec ceux déduits de l'extrapolation des mesures directes. L'autre avantage de cette méthode est qu'elle n'est pas sensible aux effets d'écrantage électronique pour lesquels les mesures directes doivent être corrigées. Ainsi elle peut donc être utilisée comme outil pour comprendre les effets d'écrantage. La validité de cette méthode n'est pas encore totalement établie et son champ d'application est encore très limité. Si elle continue de s'avérer convaincante, elle constituera un axe de développement pour les années à venir.

Que ce soit pour extraire les facteurs spectroscopiques (ou les ANC), ou appliquer la méthode du Cheval de Troie, les réactions de transfert doivent être préférentiellement mesurées à basses énergies (quelques MeV à quelques dizaines de MeV). Elles seront étudiées auprès du Tandem d'Orsay, Spiral II et plus tard Eurisol et bénéficieront de la mise en œuvre d'instruments en cours de réalisation tel que MUST 2 ou Exogam.

III- L'Univers Violent

L'Astrophysique Nucléaire est entrain de se donner les moyens en France d'étudier de façon quantitative ces phases difficiles et ultimes de la matière et de l'évolution stellaire grâce au développement de moyens observationnels, de modélisations magnétohydrodynamiques et de mesures en laboratoire. L'importance de la physique nucléaire détaillée dans l'abondance finale des éléments peut apparaître de second ordre, surtout au regard des problèmes liés à la modélisation de l'explosion. Cependant, le rôle des captures d'électrons semble important pour définir la dynamique et la nucléosynthèse dans les SNIa. La production d'éléments varie en effet fortement en fonction du nombre relatif d'électrons Y_e , de faibles valeurs peuvent mener à l'éjection d'éléments stables enrichis en neutrons comme le ^{48}Ca , ^{64}Ni ... Des valeurs de $Y_e = 0.5$ donnent des noyaux moins enrichis en neutrons. Dans le cas de faibles Y_e , le rôle des captures de neutrons sur des noyaux instables, proche de la vallée de stabilité, devient important si l'équilibre nucléaire statistique n'est pas présent de façon homogène. Ceci illustre l'intérêt d'attaquer le problème de l'Univers violent par divers fronts.

1-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 moins dépendantes des conditions thermodynamiques des milieux émetteurs. Ainsi, l'astronomie gamma constitue un outil privilégié de l'astrophysique nucléaire, permettant 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 tester 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.

La collaboration entre physiciens nucléaires et astrophysiciens de l'IN2P3 et du DAPNIA s'articule aujourd'hui autour de l'observatoire INTEGRAL de l'ESA. Cette collaboration concerne des mesures spécifiques de sections efficaces de réaction, ainsi que l'analyse et l'interprétation des données du satellite. 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 concernent l'émission gamma

1. **L'explosion des novae et des supernovae.** L'observation de radio-isotopes émetteurs γ 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 γ à haute résolution (**MAX ?**) 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 ^{26}Al et le ^{60}Fe constituent des traceurs 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 γ en gestation devrait permettre de détecter l'émission γ 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 γ 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.

Références concernant l'astronomie gamma (IN2P3+DAPNIA) :

- *First identification and modelling of SPI background lines*, G. Weidenspointner, J. Kiener, M. Gros, P. Jean, B.J. Teegarden, C. Wunderer, R.C. Reedy, D. Attié, R. Diehl, C. Ferguson, M.J. Harris, J. Knödlseher, P. Leleux, V. Lonjou, J.P. Roques, V. Schönfelder, C. Shrader, S. Sturmer, V. Tatischeff, G. Vedrenne, A&A 411 (2003) L113.
- *SPI instrumental background characteristics*, P. Jean, G. Vedrenne, J.P. Roques, V. Schönfelder, B.J. Teegarden, A. von Kienlin, J. Knödlseher, C. Wunderer, G.K. Skinner, G. Weidenspointner, D. Attié, S. Boggs, P. Caraveo, B. Cordier, R. Diehl, M. Gros, P. Leleux, G.G. Lichti, E. Kalemci, J. Kiener, V. Lonjou, P. Mandrou, Ph. Paul, S. Schanne, P. von Ballmoos, A&A 411 (2003) L107
- *INTEGRAL/SPI ground calibration*, D. Attié, B. Cordier, M. Gros, Ph. Laurent, S. Schanne, G. Tauzin, P. von Ballmoos, L. Bouchet, P. Jean, J. Knödlseher, P. Mandrou, Ph. Paul, J.P. Roques, G. Skinner, G. Vedrenne, R. Georgii, A. von Kienlin, G. Lichti, V. Schönfelder, A. Strong, C. Wunderer, C. Shrader, S. Sturmer, B. Teegarden, G. Weidenspointner, J. Kiener, M.-G. Porquet, V. Tatischeff, S. Crespín, S. Joly, Y. André, F. Sanchez, P. Leleux, A&A 411 (2003) L71

2- 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 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 γ (^7Be , ^{18}F , ^{22}Na , ^{26}Al) observables par des satellites présent ou futurs (INTEGRAL, RHESSI, MAX). 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.

Actuellement, plusieurs groupes (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 γ 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 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 inexplicés. 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 nucléaires sera bientôt entièrement d'origine expérimentale. Ce n'est pas pour autant que ce phénomène soit 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 γ (^{22}Na avec INTEGRAL, ^{18}F avec RHESSI 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 avec INTEGRAL. Le CSNSM fait partie de la collaboration d'observation des novae avec SPI/INTEGRAL de type « Target Of Opportunity » : lorsqu'une nova explosera dans des conditions favorables, le CSNSM participera à l'interprétation des données. En attendant, les études réalisées dans le cadre de cette collaboration ont permis d'identifier les quelques réactions nucléaires qui justifient une étude expérimentale dans ce domaine : captures de protons sur ^{18}F , ^{21}Na , ^{25}Al et ^{30}P . On peut raisonnablement penser que dans les dix ans à venir ces sections efficaces auront été déterminées expérimentalement.

Références concernant la nucléosynthèse et l'astronomie gamma des novae (à l'IN2P3) :

Théorie

- *ONeMg novae: nuclear uncertainties on the ^{26}Al and ^{22}Na yields*, A. Coc, R. Mochkovitch, Y. Oberto, J.-P. Thibaud and E. Vangioni-Flam, *A&A* **299** (1995) 479-492.
- *On the ^7Li and ^7Be synthesis in novae*, M. Hernanz, J. José, A. Coc and J. Isern, *ApJ* **465** (1996) L27-L30.
- *Nuclear uncertainties in the NeNa-MgAl cycles and production of ^{22}Na and ^{26}Al during nova outbursts*, J. José, A. Coc and M. Hernanz, *ApJ* **520** (1999) 347-360.
- *Influence of new reaction rates on ^{18}F production in novae*, A. Coc, M. Hernanz, J. José and J.P. Thibaud, *A&A* **357** (2000) 561-571.
- *$^{21}\text{Na}(p, \gamma)^{22}\text{Mg}$ thermonuclear rate for ^{22}Na production in novae*, N. Smirnova and A. Coc, *PRC* **62** (2000) 045803.
- *Synthesis of intermediate-mass elements in classical novae: from Si to Ca*, J. José, A. Coc and M. Hernanz, *ApJ* **560** (2001) 897-906.

Mesures

- *$D(^{18}\text{F}, p)^{15}\text{N}$ reaction applied to nova γ -ray emission*, N. de Séréville, A. Coc, C. Angulo, et al., *PRC* **67** (2003) 052801-1:4 (R).
- *Explosive hydrogen burning of ^{17}O in novae*, C. Fox, C. Iliadis, A.E. Champagne, A. Coc, J. José, R. Longland, J. Newton, J. Pollanen, and R. Runkle, *PRL* (2004) sous presse

Il est instructif de connaître l'évolution des modèles de nucléosynthèse dans les novae. Les premiers modèles, exploratoires, se limitaient à une zone avec des température et densité considérées comme paramètres (prenant souvent des valeurs extrêmes). Ils conduisaient à la notion de « chemin » et de « points d'attente » gouvernant la nucléosynthèse. Avec les modèles plus élaborés, multizones, des profils de température et densité évoluant avec le temps suivant les équations de l'hydrodynamique et de la thermodynamique, la convection modifiant les profils de composition, les chemins s'élargissent et les points d'attente sont contournés. De plus, dans les modèles actuels, les températures moyennes obtenues sont bien

inférieures à celles postulées, faute de contraintes, dans les calculs paramétrisés, modifiant ainsi drastiquement la nucléosynthèse. Il est néanmoins étonnant de constater que des mesures de sections efficaces sont encore justifiées par les résultats maintenant obsolètes de ces modèles paramétriques. Cela concerne par exemple la recherche des « fuites du cycle CNO » pour expliquer les observations de néon dans certaines novae alors que l'explication (astrophysique, le néon vient de la naine blanche) est connue depuis vingt ans. Cela souligne la nécessité d'une collaboration véritable entre physiciens nucléaires et astrophysiciens.

3- Sursauts-X et gamma

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 où 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'aux masses $A \approx 100$ (de l'ordre d'un millier de noyaux impliqués). La plupart des résultats de nucléosynthèse dans les sursauts-X proviennent de calculs paramétrisés qu'il convient maintenant de valider ou 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 γ .
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 réaction de captures de protons et les périodes, en général théoriques, pour un millier d'isotopes.
6. D'après ces calculs, les conséquences observables de modifications significatives de la nucléosynthèse se limitent à une distorsion de la « courbe de lumière » qu'il sera 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 du laboratoire 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.....

Longtemps la nature des sursauts γ 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 γ 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.

4-Nucléosynthèse des éléments lourds

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 par particule chargée 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 concernés, les propriétés des noyaux sont altérés : peuplement thermique des états excités, modifications des périodes de désintégration _ par ionisation,....

1. Processus *s*.

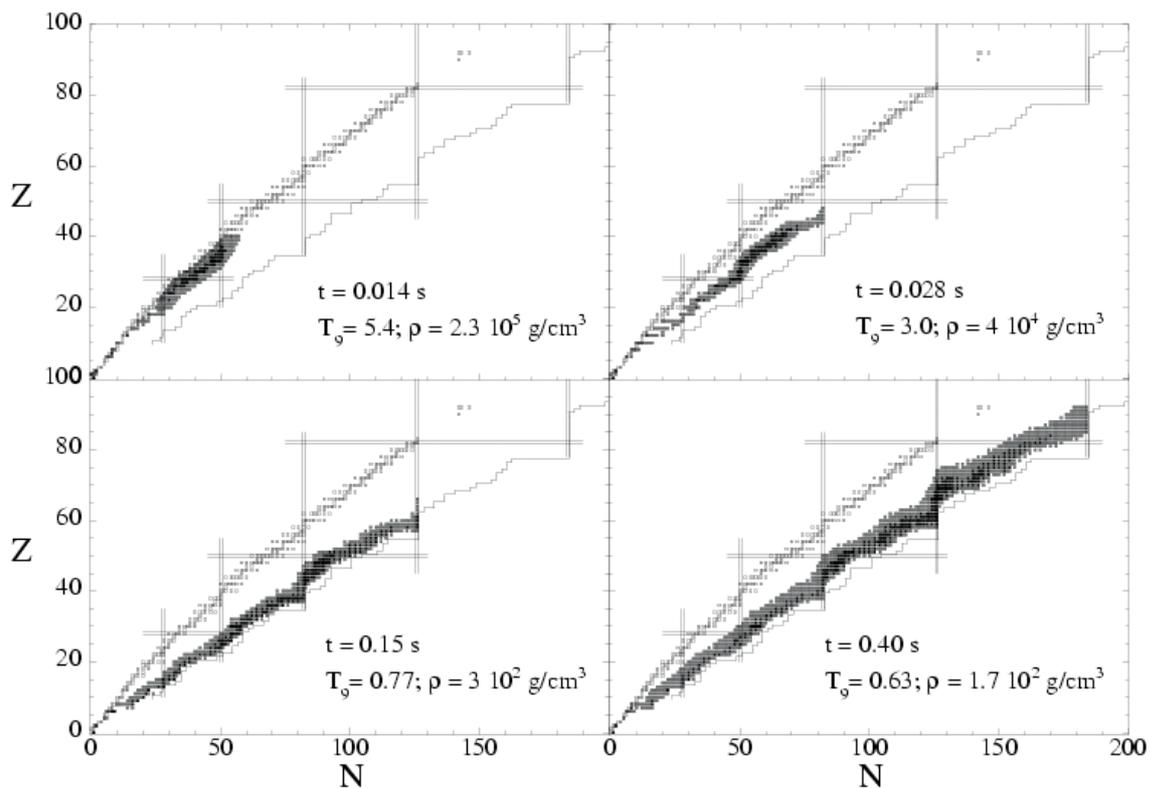
Les isotopes situés au centre de la vallée de stabilité sont produits par capture lente (par rapport aux périodes de désintégrations _) de neutrons. Les sites astrophysiques du processus *s* ont été identifiés : la combustion centrale de l'hélium dans les étoiles massives et les zones d'ingestion de 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 quelques centaines d'isotopes impliqués dans le processus *s* se trouvent sur ou au voisinage de la stabilité. Leurs propriétés nucléaires (sections 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*.

La moitié environ des éléments au-delà du Fe sont produits par capture de neutrons dans des environnements stellaires en présence de flux importants de neutrons. L'existence de pics d'abondances solaires, dont la position est corrélée avec les fermetures de couche en neutrons, témoigne du fait que les captures de neutrons se sont déroulées loin de la vallée de stabilité nucléaire. Contrairement au processus *s*, le site du processus *r*, reste un des grands mystères de l'astrophysique. Il semble plus probablement associé aux supernovae gravitationnelles (SNII) : couches d'hélium ou de carbone ou bien situé dans le « 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 (voir Figure). 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' α , de fission retardée, 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 est 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*.

La composition en éléments du système solaire est issue de nombreux processus stellaires divers dont les abondances respectives se sont diluées avant la formation du système solaire. C'est pourquoi d'autres types d'observables telles que celles des étoiles pauvres en métaux sont importantes car elles contiennent une empreinte plus directe d'un nombre restreint d'événements stellaires. La possibilité récente de déterminer des abondances *isotopiques* d'Eu et de Ba, constituent des découvertes prometteuses quant à notre connaissance du processus *r* et notre vision de l'évolution chimique des éléments qu'il serait intéressant de pouvoir étendre à d'autres séries isotopiques.



Légende ????

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. 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. 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 reste inexpliquée. Au-dessous de $A=130$, on observe une assez large dispersion entre les observations. Ceci laisse penser que plusieurs conditions d'irradiation ont lieu pour produire ces éléments.

Même si les vents neutriniques dans les supernovae ou les coalescences d'étoiles à neutrons 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 carte des noyaux dépend des conditions de densité, de température, de temps caractéristique dans lequel il se

déroule. Dans des sites très chauds 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 .

Les couches externes de supernovae peuvent contenir des flux de neutron plus faibles, la nucléosynthèse explosive de l'hélium peut produire des neutrons en quantité importante. Lors de ce processus, des points de branchement peuvent le cheminement de ce processus aux endroits de la carte 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.

Sur le plan expérimental, la production et l'étude des noyaux du processus r peut s'avérer extrêmement difficile, voire même hors de portée au-delà de la fermeture de couche $N=126$. Il convient donc d'étudier certains noyaux clef afin de pouvoir valider et contraindre les modèles théoriques 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 les modèles théoriques. Cependant, une grande partie des noyaux (noyaux réfractaires du Mo au Pd) sont pour le moment inaccessibles, 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 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 carte 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 majeurs. Une telle disparition, très débattue, 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 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 des centaines de nouveaux noyaux sur le trajet du processus r.

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). Les impossibilités technologiques de ces mesures peuvent être en partie contournées par réaction de transfert (d,p). Ces mesures nécessitent des accélérateurs tels que ceux de SPIRAL 1 et REX-Isolde qui produisent des noyaux aux énergies de $\approx 3-10$ A.MeV jusqu'à la masse atomique $A \sim < 60$. 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 pourrait permettre de mieux comprendre le rapport isotopique de $^{48}\text{Ca}/^{46}\text{Ca}=250$ dans certaines inclusions de météorites réfractaires riches en Ca-Al (CAI-FUN) **si le site astrophysique était connu** (?). 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, pourraient aussi se trouver dans l'équilibre nucléaire statistique ou la capture électronique dans les SNIa. Des expériences 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. Au delà de $N=126$, les noyaux sont principalement fissiles. La capture de neutrons stoppe et la nucléosynthèse reprend, quand le flot de neutrons perdure, sur les noyaux issus de la fission. La fission nucléaire peut changer les abondances r en Th et U. Ceci changerait le rapport 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.

Il faut néanmoins bien constater que la majorité des isotopes intervenant dans le processus r resteront, probablement pour toujours, expérimentalement hors d'atteinte. Les progrès dans ce domaine sont donc surtout à attendre de la théorie. L'évolution dans ce domaine consiste à passer de modèles phénoménologiques reproduisant avec une précision raisonnable les données expérimentales à des modèles microscopiques de précision moindre mais croissante, permettant une extrapolation vers les régions inaccessibles de la carte des noyaux. La validation des propriétés prédictives de ces modèles ne peut se faire qu'en repoussant de plus en plus les limites des régions expérimentalement connues grâce aux nouveaux instruments.

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. Il 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 (décrit précédemment) impliquant aussi des noyaux riches en protons, les noyaux produits restant confinés à la surface de l'étoile à neutrons et ne contribuant donc pas à l'enrichissement galactique. Le processus p est initié par la photoérosion (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 il existe des données expérimentales, toutefois de multiples réactions de photoérosions ne sont pas connues expérimentalement. Un ensemble de mesures (p, γ) ont été réalisées 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 de la production des éléments lourds.

Références pour le processus r :

- *Implications of isotopic anomalies for nucleosynthesis*, T. Lee in *Meteorites and the early solar system* University of Arizona Press, 1988, p. 1063-1089.
- *Molybdenum and Zirconium isotopes from a supernova neutron burst*, B. S. Meyer, D. D. Clayton and L. -S. The ApJ 540 (2000) L49.
- *Stellar Nucleosynthesis and the Isotopic Composition of Presolar Grains from Primitive Meteorites*, E. Zinner, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Volume 26, pp. 147-188.
- *The origin of the Ca-Ti-Cr-Fe-Ni isotopic anomalies in the inclusion EK-1-4-1 of the Allende meteorite*, O. Sorlin, L. Gaudefroy, K.-L. Kratz, T. Rauscher, C.R. Physique 4 (2003) 541.
- *Europium isotopic abundances in very metal poor stars*, C. Sneden et al., Ap.J. 566 (2002) L25.
- *The r -process and the neutrino-heated supernova ejecta*, S.E. Woosley et al. , Ap. J 433 (1994) 229.
- *Neutrino capture and r -process nucleosynthesis*, B. Meyer, G.C. McLaughlin and G. M. Fuller Phys. Rev. C 58 (1998) 3696.

5- Neutrinos

A l'interface entre astrophysique, physique nucléaire et physique des neutrinos, deux projets d'expériences sont actuellement en phase d'étude pour un démarrage à l'horizon 2015 : le

projet Mégatonne et les « beta beams » de basse énergie. Mégatonne est un détecteur Tcherenkov gigantesque (volume fiduciel 20 fois plus grand que celui de Super Kamiokande). Installé dans une version agrandie du Laboratoire du Fréjus, ce détecteur serait le seul permettant de détecter des neutrinos émis lors de l'explosion d'une supernova en dehors de la Galaxie. Les « beta beams » de basse énergie sont une nouvelle manière de produire des neutrinos dans un domaine d'énergie d'intérêt astrophysique pour améliorer notre connaissance des propriétés des neutrinos (moment magnétique, interactions des neutrinos avec les noyaux).

6 – Les supernovae de type Ia

Le vif intérêt suscité par les supernovae de type Ia tient à plusieurs facteurs. En premier lieu, la physique de ces objets est contrôlée par plusieurs types de processus dont la maîtrise nécessite le rapprochement de spécialistes de plusieurs domaines:

- astrophysique nucléaire : variations de la synthèse des éléments en adoptés pour décrire l'explosion,
- physique des plasmas denses : équation d'état, processus de refroidissement par émission de neutrinos, processus URCA convectif ...,
- hydrodynamique et processus de transport : phase d'ignition en régime de convection réactive,
- physique de la combustion : détonations, détonations cellulaires et déflagrations, combustion turbulente ...,
- transfert radiatif : courbes de lumière.

En second lieu, l'importance des SNIa en tant que chandelles standard cosmologiques rend absolument nécessaire une bonne compréhension de la physique de ces objets, afin de contrôler quantitativement les effets possibles d'évolution (notamment ceux liés à la composition chimique des progéniteurs de redshifts élevés). On voit que notre compréhension du déroulement de l'explosion d'une SNIa, même et surtout si elle réclame encore beaucoup d'efforts, est un des fondements de l'évaluation du contenu énergétique de l'univers. C'est la raison qui pousse à un rapprochement, entre cette fois-ci, les communautés de cosmologie, de physique des particules et celle de la physique stellaire, qui aborde les SNIa non pas en tant qu'indicateurs cosmologiques, mais en tant qu'objets stellaires.

En troisième lieu, les deux grands programmes de Fusion par Confinement Inertiel, le Laser Mégajoule à Bordeaux et le National Ignition Facility à Livermore, qui ont pour objectif de réaliser l'ignition thermonucléaire dans un plasma fortement comprimé de deutérium-tritium, partagent pour une bonne part les défis scientifiques soulevés par l'étude des supernovae thermonucléaires. Ces programmes expérimentaux ambitieux sont naturellement accompagnés d'un effort considérable dans le domaine de la théorie et de la modélisation de la combustion thermonucléaire en régime dynamique, effort qui inclut l'étude des SNIa (on se reportera par exemple au programme "FLASH"). Enfin, l'accès aux grands moyens de calcul actuels et du futur proche rend réellement crédible la modélisation quantitative des phénomènes complexes liés à la combustion thermonucléaire, c'est-à-dire l'enchaînement des processus d'ignition, de détonation, de déflagration, et l'effet des instabilités qui les affectent. Toutes les spécialités mentionnées précédemment peuvent effectivement trouver leur place en contribuant à l'élaboration soit de modèles détaillés, dits sub-cellulaires, soit de modèles multi-dimensionnels s'alimentant des résultats des premiers. La pluridisciplinarité apparaît donc réellement à la base de ce projet. C'est la raison pour laquelle nous avons constitué, au sein de la Fédération de recherche « ILP-Recherche » (FR 2707) un groupe d'une trentaine de

personnes dont les diverses spécialités sont directement pertinentes pour le projet " Combustion et Supernovae ".

Une analyse menée en 2002 a montré qu'il était envisageable, sur la base d'une collaboration pluridisciplinaire active, de mettre en place, dans un premier temps, un modèle intégré monodimensionnel de SNIa, permettant d'évaluer les caractéristiques de la courbe de lumière de ces objets en fonction de paramètres de base fournis en entrée (masse, métallicité ...) et d'un choix raisonné du mécanisme d'explosion⁴. En parallèle, le rassemblement des compétences doit permettre de progresser sur la compréhension fine du phénomène "SNIa" en maintenant dans ce domaine notre communauté à un niveau équivalent à celui de nos collègues étrangers.

Les progéniteurs et leur évolution

Une des premières questions que pose l'étude des supernovae thermonucléaires porte sur la nature et la variété de leurs progéniteurs, qui n'ont encore jamais été observés. Cet aspect est essentiel, notamment vis-à-vis des implications cosmologiques. On considère généralement que les modèles les plus prometteurs sont :

- l'explosion d'une naine blanche avec une masse de Chandrasekhar, composée d'un mélange de Carbone et d'Oxygène,
- l'explosion d'une naine blanche de plus petite masse, toujours composée d'un mélange C+O, mais enveloppée d'une couche d'Hélium.
- L'explosion suivant la coalescence d'un couple serré de naines blanches.

Dans ce cadre déjà restreint, il reste à connaître la composition chimique de la naine blanche, qui dépend de la composition initiale et de l'évolution (en masse) de l'étoile parente. La composition chimique est importante pour plusieurs raisons. Citons entre autres que le rapport C/O détermine la nucléosynthèse des SNIa, donc en partie l'énergie de l'explosion, et affecte les courbes de lumière; et que les abondances des paires URCA de masse atomique 21, 23 et 25 contribuent (dans un sens qui est encore un vif sujet de débats !) à la détermination de la structure en température des modèles initiaux, et, par la suite, à l'évolution thermique qui conduit à la topologie de l'ignition puis à la nature de l'explosion.

Ce type d'étude nécessite la modélisation des phases avancées de l'évolution des étoiles massives, membres d'un système binaire, souvent caractérisées par une succession de flashes ou d'emballlements thermiques. Si l'on tient compte des exigences élevées que requiert la modélisation de ces étoiles et de la nécessité de plus en plus pressante d'adopter dans ce domaine une approche hydrodynamique, il semble évident qu'il faille faire porter un gros effort sur la modélisation hydrodynamique de l'évolution stellaire.

La question de l'accrétion

La plupart des naines blanches sont formées avec une masse proche de 0,6 masse solaire. L'ignition du carbone dans des étoiles de si faible masse n'est possible que si de la matière est transférée depuis un compagnon. Différents modes de transfert de masse sont envisageables. Ils peuvent être rangés en quatre catégories:

a) la coalescence de deux naines blanches formant un système binaire. Ce scénario baptisé "Double Degenerate" présente le grand avantage de rendre compte naturellement de l'absence

⁴La réalisation d'un tel modèle est actuellement engagée au sein du groupe « Combustion & Supernovae ».

d'hydrogène qui caractérise précisément les spectres des SNIa. La pierre d'achoppement réside dans l'évaluation du taux de transfert de masse d'une étoile à l'autre via un disque d'accrétion. Les taux élevés qui ont été calculés semblent conduire à l'effondrement du système et à la formation d'une étoile à neutrons. Ce scénario présente encore beaucoup d'aspects à explorer.

b) le déclenchement, par la détonation d'une couche d'hélium accrétée, de l'explosion d'une naine blanche de masse inférieure à la masse de Chandrasekhar (modèles "sub-Chandrasekhar"). Là encore, il existe de multiples possibilités. Les modèles 1-D sont généralement favorables, car ils forcent l'allumage du carbone dans le cœur du fait de la convergence rigoureusement sphérique des ondes de pression générées en surface par la combustion de l'hélium. Dès que l'on passe à des simulations multi-dimensionnelles, la situation se complexifie: l'ignition du carbone peut se produire soit directement à l'interface hélium-carbone, soit par convergence de chocs, soit pas du tout ... En tout état de cause, une haute résolution numérique est un atout déterminant pour le succès de la modélisation.

c) l'accrétion de matière par un compagnon jusqu'à ce que le cœur C+O atteigne la masse de Chandrasekhar, stade auquel débute l'ignition. Bien que ce scénario soit actuellement privilégié, il souffre de contraintes extrêmement fortes sur le taux d'accrétion. S'il est trop faible, on a affaire à une nova récurrente; s'il est trop élevé, la naine blanche s'entoure d'une enveloppe d'hydrogène très étendue, qui devrait manifester des traces spectroscopiques dans la courbe de lumière.

d) un scénario récent, fondé sur la constatation qu'un vent issu de la naine blanche (et non pas une enveloppe hydrostatique) se développe pour un taux d'accrétion suffisamment élevé, permettrait de limiter (contrôler) le taux d'accrétion de matière issue de l'étoile compagne, remplissant son lobe de Roche. *Ce scénario, qui lèverait une des principales difficultés du "modèle standard", n'a pas encore été étudié en trois dimensions, comme il le devrait.*

L'évolution du cœur vers l'ignition

Selon le scénario standard, la masse de la naine blanche C+O croît par accrétion d'hydrogène et ou d'hélium. La combustion en couche de cette masse accrétée accroît la masse du cœur C+O d'environ $10^{-7} M_{\odot}$ par an. L'équilibre hydrostatique général exige que la densité du cœur croisse dans le même temps. En fait, la densité diverge quand la masse de l'étoile se rapproche de la masse asymptotique de Chandrasekhar (environ $1,4 M_{\odot}$). L'équilibre thermique est régi par la compression gravitationnelle, le débit d'énergie thermonucléaire, et l'émission de neutrinos de plasmons. A haute densité, l'écrantage électronique devient important: la barrière coulombienne est fortement abaissée. Finalement, c'est la somme (pertes neutriniques) + (chauffage par compression) + (chauffage thermonucléaire) qui détermine le point d'ignition, voisin de $\rho \sim 2 \cdot 10^9 \text{ g cm}^{-3}$ et $T \sim 3 \cdot 10^8 \text{ K}$. En fait, la condition $\rho \sim 2 \cdot 10^9 \text{ g cm}^{-3}$ semble requise par la nucléosynthèse ultérieure et permet d'éviter l'effondrement de l'étoile par capture électronique.

Pendant 100 à 1000 ans la combustion du carbone est lente. Elle est stabilisée par la convection, pendant laquelle le processus URCA est censé limiter la température des cellules convectives. Les pertes neutriniques conduisent probablement à une inversion de température centrale. Au-delà de $T \sim 4 \cdot 10^8 \text{ K}$, le refroidissement par les neutrinos diminue, et la combustion du carbone s'accélère. Vers $T \sim 7 \cdot 10^8 \text{ K}$, le temps caractéristique de combustion devient comparable au temps de Brunt-Väisälä, caractéristique du temps de retournement de la convection. La modélisation de cette étape cruciale de convection réactive est un sujet entièrement ouvert.

La propagation du front de combustion

C'est vers 10^9 K que la combustion du carbone et de l'oxygène, qui devient extrêmement rapide ($\ll 0,01$ s), se découple de la convection. L'échelle de longueur sur laquelle elle se déroule (de l'ordre de 10^{-4} cm) est contrôlée par les temps caractéristiques de combustion et de conduction de la chaleur par les électrons dégénérés. La combustion se propage alors soit par une flamme, ou déflagration subsonique, soit par une détonation, supersonique.

La dynamique de l'explosion thermonucléaire de la naine blanche est une étape clef dans la compréhension des supernovae puisqu'elle détermine la densité, la température, la vitesse et la composition chimique des éjecta. Ces informations peuvent ensuite être utilisées pour calculer la courbe de lumière, le spectre, et la composition isotopique des éjecta qui peuvent être comparés aux données observationnelles.

La déflagration

La combustion s'effectue dans un milieu pré mélangé, de densité et de température élevées, initialement fortement dégénéré. Le régime de propagation subsonique par une flamme est entretenu par la valeur élevée de la conduction électronique, qui chauffe le combustible en amont jusqu'au seuil de combustion. Les taux de réactions nucléaires dépendant très fortement de la température ($\propto T^\alpha$, avec $\alpha > 12$), la combustion a lieu sur un front très mince, au voisinage d'une température critique. S'il s'agit d'une flamme issue de l'évolution de la convection réactive, il est vraisemblable que les points d'ignition soient multiples, et distribués hors centre. L'épaisseur, l_{th} et la vitesse u_{lam} de propagation d'une flamme laminaire sont déterminées par les temps caractéristiques de diffusion thermique et de combustion thermonucléaire. Les équations qui gouvernent l'évolution du front de combustion sont les équations de l'hydrodynamique radiative incluant la gravitation, la viscosité, la diffusion de la chaleur et des espèces, ainsi qu'un réseau complexe de réactions nucléaires. L'intégration de ces équations nécessite, entre autres, la connaissance de l'équation d'état complexe du plasma de la naine blanche, des opacités et des taux de réactions. *La modélisation de la propagation d'une flamme laminaire, et notamment le suivi de sa largeur, est la pierre angulaire de tous les travaux sur la combustion. Ce travail a pour but de recenser et quantifier l'effet des divers mécanismes de transport, locaux et non locaux. Leur traitement est un sujet en développement.*

Une flamme initialement laminaire est sujette à plusieurs types d'instabilités, décrites analytiquement en régime linéaire dans le cas des flammes minces. L'instabilité de Landau-Darrieus (LD) en présence d'un champ de gravité (équivalente à l'instabilité de Rayleigh-Taylor (RT) pour les petites vitesses de flamme) se déclenche à toutes les échelles, pour des flammes montantes, pour $l_M > 100 l_{th}$ (échelle de Markstein). Dans le régime non linéaire, l'instabilité de Kelvin-Helmoltz (KH) entre également en jeu. Cependant, la formation de cuspides (rapidement brûlées) lors du développement de l'instabilité LD conduit à l'apparition de l'amortissement de Zeldovich, qui stabilise le front de flamme qui présente alors une structure cellulaire (LDZ). La vitesse de la flamme ainsi déformée, u_{cell} est supérieure à celle d'une flamme sphérique. La pression d'un gaz dégénéré ne dépend que faiblement de la température, de sorte que, dans le cas des SNIa, le facteur d'expansion est limité.

La présence d'un champ de gravité induit la rupture "alla R-T" de la structure cellulaire LDZ stabilisatrice. Les instabilités hydrodynamiques à grande échelle conduisent à une cascade turbulente. La déformation du front de flamme par l'instabilité de RT a fait l'objet de nombreuses études: des bulles de fluide brûlé montent dans le combustible alors que des colonnes de combustible dense descendent. Ceci a deux conséquences notables. D'une part

cela provoque un mélange important des espèces qui permet d'expliquer certaines données observationnelles, et d'autre part les instabilités secondaires qui naissent de la déformation importante du front rendent rapidement l'écoulement turbulent.

La vitesse de propagation d'une flamme turbulente, u_t , est naturellement supérieure à la vitesse laminaire. Dans le cas d'une turbulence très développée, la vitesse de propagation du front devient pratiquement indépendante de u_{th} , et donc de la micro-physique du front de flamme.

Pour obtenir à la fois une nucléosynthèse correcte et une vitesse des éjecta compatible avec les observations, il est nécessaire que la vitesse de la flamme turbulente u_t atteigne des valeurs de l'ordre de 30% de la vitesse du son. Or, dans tous les calculs tridimensionnels, la vitesse turbulente reste très inférieure à cette valeur... Il n'est même pas acquis que l'étoile ne reste pas gravitationnellement liée. Cependant la physique et la modélisation des flammes turbulentes sont extrêmement complexes et de nombreux mécanismes sont envisagés pour accélérer la vitesse de la flamme. Il semble clair que la simulation de la combustion en régime turbulent est une priorité.

La détonation

Si la surpression qui résulte de la combustion est suffisante, une onde de choc peut se former (notamment dans l'atmosphère de la naine blanche). En se propageant, elle va amorcer la combustion par compression. Une détonation a lieu lorsque l'onde de choc peut être autoentretenu par l'énergie dégagée par la combustion. Sa vitesse dépend essentiellement du débit d'énergie par unité de masse et peut être estimée, pour le cas monodimensionnel, de manière fiable par la condition de Chapman-Jouguet. Les vitesses importantes observées des éjecta (> 5000 km/s) sont en assez bon accord avec les valeurs obtenues dans les modèles de détonations. Cependant, un front de détonation se propageant à une vitesse supersonique, le combustible ne peut pas se détendre avant le passage du front. Cela signifie que la combustion a lieu à des densités élevées produisant ainsi des éléments dans des proportions proches de celles correspondantes à l'équilibre nucléaire statistique (éléments proche du pic du fer). C'est en contradiction apparente avec les observations qui témoignent de la présence en quantités importantes d'éléments de masses intermédiaires (Si, Ca, Mg, S, O ...) dans les éjecta. Il semble nécessaire, pour reproduire ces abondances, que l'étoile passe par une phase de détente afin que la combustion ait lieu à des densités plus faibles.

Les travaux sur la propagation multidimensionnelle du front de détonation font apparaître une structure cellulaire complexe et son étude nécessite la prise en compte d'une microphysique très détaillée (équation d'état, réseau de réactions nucléaires...). Dans les supernovae la combustion se produit en trois étapes: combustion du carbone, de l'oxygène puis du silicium. Les échelles de temps et de longueur associées à ces trois étapes sont très différentes. En particulier, la taille des cellules de détonation varie de moins d'un millimètre pour le carbone à quelques 10^7 cm pour le silicium. Il est donc possible que le front de détonation laisse derrière lui des poches de combustible non brûlé ou partiellement brûlé, ce qui modifierait à la fois les abondances obtenues et la vitesse de propagation du front. Les effets seront notamment importants pour le silicium dont la combustion produit des cellules de détonation de taille relativement proche du rayon de la naine blanche. *La collaboration rassemble de fortes compétences dans la modélisation de la structure multidimensionnelle cellulaire des détonations. Les applications à la physique spécifique des supernovae sont engagées.*

La transition déflagration-détonation

Au vu de ce qui précède, un mécanisme séduisant pour expliquer les propriétés observées des supernovae est celui de la transition déflagration-détonation. Dans ce type de modèle, la

combustion dans les SNIa commence par une phase de déflagration, qui permet au combustible de se détendre (la nucléosynthèse a donc lieu aux densités requises); cette déflagration dégénère ensuite en une détonation qui fournit l'impulsion nécessaire aux éjecta. De telles transitions déflagration-détonation ont été observées dans des explosifs terrestres, mais toujours induits par la présence d'obstacles ...

Les mécanismes physiques à l'origine de la transition déflagration-détonation sont encore très mal maîtrisés. Lorsqu'une flamme est soumise à une turbulence très importante, le front de combustion peut se transformer en une région étendue de combustion. Les modèles mettant en œuvre une telle transition, toujours de manière *ad hoc*, ont permis de reproduire à la fois les abondances et les vitesses observées. La flamme se propage initialement lentement (1% de la vitesse du son) puis à une densité critique de l'ordre de 10^7 g cm^{-3} la transition vers la détonation a lieu. La densité de transition est un paramètre du modèle qui permet notamment d'expliquer des explosions d'intensité différentes pour une même masse initiale.

Bibliographie succincte:

1. *Type IA Supernova Explosion Models* : Hillebrandt, W. et Niemeyer, J.C., *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 2000, **38**, p 191-230
2. *The delayed-detonation model of a type IA supernovae* : Arnett, D. et Livne, E., *Astrophysical Journal*, 1994, **427**, p 315-341
3. *Multilevel Structure of Cellular Detonations in Type IA Supernovae* : Gamezo, V.N., Wheeler J.C., Khokhlov, A.M. et Oran, E., *Astrophysical Journal*, 1999, **512**, p 827-842

7- 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.

Rayonnement cosmique

La nature spatio-temporelle du rayonnement cosmique galactique est un sujet d'actualité brûlante. La nature, l'origine et la propagation des rayons cosmiques d'énergie extrêmement élevée suscite de nombreuses questions aujourd'hui. C'est le cas aussi pour 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 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 cela jusque dans la région de masse Fe/Ni/Zn. Par contre de 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 γ et X apparaissent comme des outils de choix pour sonder cette région énergétique des rayons cosmiques par leurs interactions avec le milieu interstellaire. En particulier, la détection et la spectrométrie de raies atomiques et de raies γ nucléaires induites par collision et la cartographie de l'émission γ 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 (voir compte rendu Astrophysique Hautes Energies). Pour interpréter les observations, il faut pouvoir calculer l'émission γ produite par collision des protons et particules α 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 ne sont pas connues avec 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 – devraient continuer auprès des dispositifs performants de séparateurs et de détecteurs de fragments auprès des grandes accélérateurs d'ions lourds en Europe.

Phénomènes de haute énergie dans le système solaire

Pendant certaines éruptions solaires, qui sont parmi les événements les plus violents dans le système solaire, des ions sont accélérés 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 γ 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 γ 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 γ fine des éruptions solaires est devenue possible pour la première fois. Des analyses détaillées des profils de raie γ 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 γ avec SPI/INTEGRAL et RHESSI et la modélisation de raies γ nucléaires. Des mesures expérimentales et des calculs sur les profils de raies γ induits par collision de protons, ^3He et particules α 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.

Rayonnement cosmique de très haute énergie

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 K. Les processus d'interaction mettent en jeu la résonance géante dipolaire (prédominante), l'émission de quasi-deutéron, 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

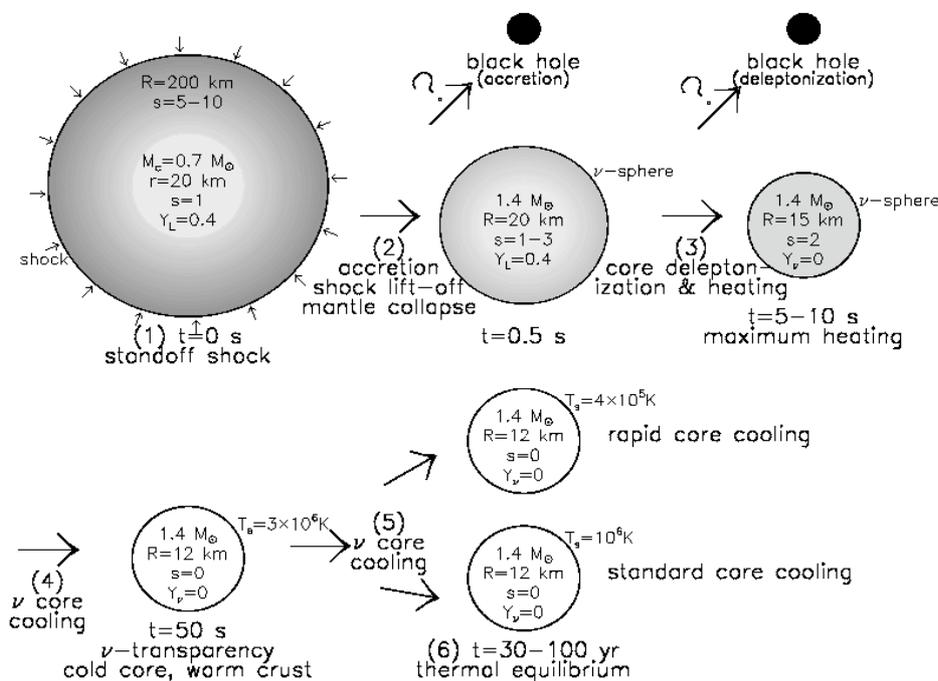
Références concernant les phénomènes non-thermiques (à l'IN2P3+DAPNIA) :

- *Shape of the 4.438 MeV γ -Ray Line of ^{12}C from Proton and α -Particle Induced Reactions on ^{12}C and ^{16}O* , J.Kiener, N.de Sereville, V.Tatischeff, PRC 64 (2001) 025803
- *Directionality of Solar Flare-accelerated Protons and α -Particles from γ -Ray Line Measurements*, G.H. Share, R.J. Murphy, J. Kiener, N. de Séréville, ApJ 573 (2002) 464.
- *Cross sections relevant to γ -ray line emission on solar flares: ^3He -induced reactions on ^{16}O nuclei*, V. Tatischeff, J. Duprat, J. Kiener, M. Assunção, A. Coc, C. Engrand, M. Gounelle, A. Lefebvre, M.-G. Porquet, N. de Sereville, J.P. Thibaud, C. Bourgeois, M. Chabot, F. Hammache, J.-A. Scarpaci, PRC 68 (2003) 025804.

8- Supernovae de type II, matière dense et structure des noyaux

Ces recherches concernent la modélisation des supernovae de type II, les propriétés des étoiles compactes et la structure nucléaire des noyaux stables et instables. Elles se proposent de fournir une approche complète depuis le processus d'effondrement gravitationnel jusqu'à la nucléosynthèse des éléments plus lourds que le fer.

Le scénario général du processus de supernova est relativement bien compris et il existe un consensus sur le rôle essentiel que jouent les neutrinos dans le mécanisme *retardé*. Les neutrinos provenant de supernovae proches pourraient être observés en très grand nombre dans les nouveaux détecteurs comme Superkamiokande ou les futurs projets comme le détecteur Mégatonne. Les spectres d'émission de neutrinos, en fonction du temps ou de leur énergie permettront de livrer des informations sur la température, la densité, les effets hydrodynamiques dans la matière dense ainsi que l'angle de mélange θ_{13} de la matrice MNS associée aux oscillations de neutrinos.



Evolutions du résidu central d'une supernova de type II (M. Prakash).

Il y a une dizaine d'années, le développement et l'incorporation du transport des neutrinos dans un modèle à une dimension a constitué une avancée importante. Malgré des progrès significatifs, ces modélisations ne parviennent pas à expulser la matière provenant de l'enveloppe de l'étoile génitrice. Cela signifie t-il que certains ingrédients de microphysique considérés par les modèles sont imprécis, ou bien faut-il en déduire que le succès de

l'explosion repose sur des effets multi-dimensionnels? Ces questions fondamentales sont encore ouvertes. D'un côté, un traitement multi-dimensionnel, qui jusqu'à présent traite de façon approximative le transport des neutrinos, nécessite des temps de calcul très importants et constitue un grand défi pour les prochaines générations de super-ordinateurs. D'un autre côté, l'essentiel des aspects microphysiques d'intérêt reposent sur le processus d'interaction faible pour les noyaux et pour la matière nucléaire dans des conditions extrêmes (de densité, température et asymétrie), ainsi que sur les modèles d'équation d'état de la matière nucléaire. Les progrès liés aux avancées de calcul numérique, au développement de nouveaux modèles du problème à N corps, à la compréhension du ou des différents rôles que jouent les neutrinos dans le processus explosif, et probablement le plus important, les nouveaux instruments d'investigations expérimentales, permettront de réduire les incertitudes reliées à la physique nucléaire. Par la suite, nous allons passer en revue les différents axes de recherche ouverts à la communauté des théoriciens nucléaires.

Rôle de l'interaction faible

Dans les conditions de l'effondrement gravitationnel, la capture électronique est dominée par les transitions Gamow-Teller. Les taux de capture d'intérêt ont récemment été recalculés par K. Langanke et G. Martinez-Pinedo en combinant des résultats de nouveaux modèles nucléaires (Modèle en Couches Monte Carlo associé à la RPA) et des données expérimentales disponibles. Ces nouveaux résultats sont très différents des données phénoménologiques précédemment fournies par Fuller, Fowler et Newman dans les années 80. Ces travaux soulignent l'importance des processus d'interaction faible pendant la phase d'effondrement et ouvre la voie à un important programme expérimental qui consisterait à vérifier les prédictions des nouveaux modèles théoriques. Ces informations peuvent être obtenues par des réactions d'échange de charge avec des noyaux stables. Cependant, dans les conditions de l'effondrement ce sont les noyaux riches en neutrons qui sont impliqués dans les captures électroniques. Ceci motive donc l'étude des transitions Gamow-Teller avec des faisceaux radioactifs en cinématique inverse.

Dans la matière homogène dense et chaude, l'énergie caractéristique des neutrinos est de quelques dizaines de MeV. Ils peuvent donc exciter des modes collectifs du milieu nucléaire et donner lieu à une diffusion cohérente sur l'ensemble des nucléons. Les modèles nécessitent donc non seulement une bonne connaissance de l'interaction faible entre les neutrinos et les nucléons, mais aussi une bonne description des corrélations dans la matière nucléaire. L'extrapolation des interactions nucléaires et des techniques du problème à N corps au delà des régions où elles sont bien maîtrisées (noyaux à la densité de saturation et à température nulle) constitue un sujet de recherche majeur pour les théoriciens de physique nucléaire.

Les neutrinos qui s'échappent massivement de la proto-étoile à neutrons interagissent avec les couches externes de l'étoile (scénario retardé). Le rôle des réactions neutrino-noyaux n'est pas encore complètement compris. Des calculs précis de la diffusion neutrino-noyau sont donc nécessaires ainsi que les études expérimentales indirectes (car il n'existe pas encore de faisceau de neutrinos) qui pourraient leur servir de tests.

L'émission des neutrinos est responsable du refroidissement des étoiles à neutrons pour les 10^5 premières années de leur vie. Il est nécessaire d'effectuer un calcul précis de ce processus qui dépend principalement du modèle d'interaction forte et de la phase superfluide des nucléons. Les observations prochaines du refroidissement des étoiles à neutrons dont on connaît la distance et l'âge seront décisives et apporteront de fortes contraintes aux modèles théoriques. De plus, les découvertes d'étoiles jeunes permettront de statuer sur la présence de processus de refroidissement non standard dans le coeur comme le processus URCA-direct

impliquant les nucléons, les pions ou bien les condensats de kaons, ou bien encore la possible matière de quarks.

Equation d'état de la matière nucléaire et modèles d'étoiles compactes

Les proto-étoiles à neutrons sont chaudes, riches en leptons et leur durée de vie est de quelques minutes. Elles sont constituées du coeur de l'étoile qui s'est stabilisé au moment du rebond et contiennent l'équivalent en masse du Soleil dans une sphère de 10 km de rayon.

La phase d'évolution qui suit est appelée la phase de Kelvin-Helmholtz. Elle comprend la phase de déleptonisation durant laquelle les neutrinos diffusent des régions centrales de l'étoile vers les régions périphériques. Cette diffusion provoque le réchauffement du coeur de la proto-étoile alors que la fraction des leptons et des protons diminue très fortement (neutronisation). Puis vient la phase de refroidissement durant laquelle l'entropie décroît. Deux ingrédients essentiels gouvernent l'évolution de la proto-étoile à neutrons dans la phase de Kelvin-Helmholtz : l'équation d'état et l'opacité par rapport aux neutrinos. Il est donc nécessaire de développer des modèles fiables pour évaluer l'interaction des neutrinos avec la matière dense.

Les étoiles à neutrons résultent du refroidissement des proto-étoiles à neutrons. Elles constituent un champ d'étude des propriétés de la matière à très haute densité et sont des candidats idéaux pour tester les théories de relativité générale. Deux régions principales composent les étoiles à neutrons : la croûte et l'intérieur. La croûte forme une couche extérieure d'environ 1 km d'épaisseur. Elle est composée de noyaux atomiques immergés dans un gaz d'électrons denses et de neutrons, et la densité ρ est supérieure à 10^{11} g/cm^3 . Ces noyaux sont décrits par des formules de masse nucléaires et il est essentiel qu'elles soient fiables aux environs de $Z/A = 0.3$ pour la modélisation de la croûte. Cette modélisation permet d'interpréter la température de surface des étoiles à neutrons, déduite des observations de raies X. A la frontière entre la croûte et l'intérieur, la densité atteint 10^{14} g/cm^3 et la matière ne contient plus que quelques % de protons, et les noyaux très massifs (A environ 2000) sont immergés dans un gaz de neutrons. La structure de cette croûte interne ne peut plus qu'être obtenue de façon théorique. Cette région de l'étoile est très importante pour comprendre des phénomènes comme les "glitches" observés pour les pulsars radio (voir ci-après). En particulier, il est nécessaire de contrôler l'appariement dans la matière de neutrons par un calcul 'ab initio' utilisant l'interaction nucléaire nue, ainsi que les modèles macroscopiques qui décrivent l'interface entre la croûte des étoiles à neutrons et l'intérieur, c'est-à-dire l'interaction entre les vortex superfluides de neutrons et les noyaux qui forment un réseau cristallin. L'intérieur de l'étoile est alors un liquide nucléaire essentiellement composé de neutrons de densité

supérieure à la densité de saturation de la matière nucléaire, qui est censé contenir environ 95% de la masse de l'étoile. L'équation d'état de la matière nucléaire constitue la base principale des modèles théoriques, en particulier pour la détermination de la masse maximale des étoiles à neutrons. Au fur et à mesure que la densité augmente (à proximité du centre), les muons et les hypérons apparaissent en proportions non négligeables. La densité au centre de l'étoile pourrait atteindre entre 5 et 10 fois la densité nucléaire. A ces densités, les modèles théoriques sont très incertains. Certains de ces modèles prédisent que le centre est composé de kaons ou d'un condensat de pions, ou peut être même de quarks (**étoiles mixtes hadrons/quarks**). Les tests de ces prédictions constituent un des enjeux principaux des prochaines années. Par exemple, l'étude du plasma de quarks et de gluons permettrait d'améliorer notre connaissance de cette nouvelle phase de la matière.

Les étoiles de quarks constituent un état de la matière particulièrement intéressant puisqu'il serait constitué de quarks déconfinés lié par l'interaction gravitationnelle. Le consensus général est que l'observation d'une étoile compacte ayant un rayon apparent inférieur à 11 km

serait une preuve fiable de l'existence d'étoiles de quarks. Une question théorique importante concerne la stabilité de ces étoiles par rapport à leur conversion en trou noir.

Depuis leur découverte en 1967 par Bell et Hewish, environ 1200 **pulsars (étoiles doubles)** ont déjà été identifiés. Leur axe de rotation et leur axe magnétique n'étant pas alignés, ils émettent une radiation dipolaire dans le domaine radio. La période de ces pulsars varie entre 1.5 ms et 8.5 s. La période de rotation des pulsars est extrêmement régulière sauf à de rares moments où la variation relative de la période atteint environ 10^{-8} - 10^{-6} . Ce phénomène est connu sous le nom de "glitch" et suggère que l'étoile à neutrons possède une croûte

solide et un intérieur super-fluide de neutrons. Les détecteurs de rayon X embarqués dans des satellites depuis les années 70 ont permis d'identifier environ 200 pulsars de rayons X. On suppose que ce sont des étoiles à neutrons accrétant la matière d'un compagnon. On connaît aussi 6 systèmes binaires d'étoiles à neutrons, avec des masses de $1.36 \pm 0.08 M_{\odot}$. La coalescence finale d'un système double d'étoiles à neutrons est considérée comme la source la plus intéressante d'ondes gravitationnelles qui seraient détectables sur Terre dans les prochaines années (VIRGO,...).

Physique nucléaire "classique" appliquée à l'astronucléaire

Les états fondamentaux. Des modèles de masses ont récemment été développés sur la base des approches microscopiques comme le modèle non-relativiste Hartree-Fock avec des interactions de Skyrme ou bien le modèle Hartree relativiste. La méthode de Bogoliubov permet ici de traiter de façon consistante le champ moyen et les propriétés d'appariement. Ces modèles permettent maintenant une reproduction globale des propriétés des noyaux avec des précisions supérieures aux formules empiriques inspirées du modèle de la goutte liquide. Des développements futurs de cette méthode sont attendus pour effectuer des extrapolations vers la drip-line des neutrons. En approche relativiste les rôles des termes de Fock et du couplage pseudo-vecteur (pion-nucléon) jusqu'ici négligés doivent être éclaircis. De plus, les interactions effectives utilisées dans les modèles de champ moyen doivent aussi être améliorées pour décrire simultanément plusieurs observables comme les résonances géantes, les excitations Gamow-Teller et l'équation d'état de la matière nucléaire très asymétrique.

Les fonctions de réponse. Le taux de capture radiatif des neutrons aux énergies d'intérêt astrophysique est très sensible à la région de basse énergie de la résonance géante dipolaire, en particulier la présence de résonances pygmées a récemment été proposée dans le voisinage du seuil d'émission de neutrons. Dans la croûte interne des étoiles à neutrons, l'étude de la réponse des supernoyaux immergés dans le gaz de neutrons reste un domaine encore vierge. Du fait de l'importance de la fonction de réponse nucléaire pour toutes sortes de phénomènes, les modèles doivent être améliorés. Dans le cadre d'un modèle QRPA avec une interaction de type Skyrme, une première systématique a été réalisée pour la fonction de réponse E1. Des calculs futurs avec un modèle étendu HFB-QRPA pourraient prendre en compte les corrélations d'appariement de façon plus consistante. Il faudra aussi inclure les effets de déformations nucléaires jusqu'ici peu traités ainsi que les effets QRPA d'ordre supérieurs. Ces calculs permettraient d'améliorer la fiabilité des modèles actuels.

Références des travaux réalisés en France sur les supernovae de type II :

"An asymptotic self-similar solution for the gravitational collapse ",

Blottiau, P.; Chièze, J.-P.; Bouquet, S., 1988 A&A 207 24

"Neutrinos in supernovae. An exact treatment of transport ",

Mellor, P.; Chièze, J.-P.; Basdevant, J. L., 1988 A&A 197 123

"A hydrodynamical model of Kepler's supernova remnant constrained by X-ray spectra. ", Ballet, J.; Arnaud, M.; Chièze, J.-P.; Magne, B.; Rothenflug, R., 1988 IAU 101 141

"Simulation of neutrino transport in supernovae ",

Chièze, J.-P., Dark matter; Proceedings of the Twenty-third Rencontre de Moriond (Eighth Moriond Astrophysics Workshop), Les Arcs, France, Mar. 8-15, 1988 (A90-12876 02-90). Gif-sur-Yvette, France, Editions Frontieres, 1988, p. 477-485

9 - Besoins et manques (à compléter)

Dans certains pays comme en Allemagne ou aux Etats-Unis, une nouvelle communauté d'astrophysique nucléaire renforcée est en train de se constituer, et se regroupe au sein d'instituts virtuels (NEW-GSI, JINA). Nous pensons que l'ensemble de la communauté française d'astronucléaire devrait elle aussi adapter son mode de fonctionnement à celui de ses voisins. Il serait possible d'opérer cette mutation dans le cadre d'un GDR français ou en associant d'autres pays européens comme l'Espagne et l'Italie au sein d'un GDR Européen. Un GDR permettrait de rassembler ces communautés qui sont actuellement disséminées dans divers laboratoires et sous différents organismes de tutelle comme le CNRS (IN2P3, SDU, SPM) et le CEA. Ce GDR aura pour but de définir et coordonner les efforts, en donnant une plus grande cohérence aux multiples initiatives d'échanges inter-disciplinaires existantes. Il permettra à cette communauté de disposer de moyens d'organisation propres et fédérateurs. Il pourra promouvoir l'astrophysique nucléaire auprès de grands projets, en initier ou/et soutenir d'autres et défendre une vision à long terme. Il favorisera les échanges technologiques qui concernent plusieurs disciplines gérées par des organismes de recherche différents. Il permettra également la mise en commun d'outils théoriques qui sont abordés dans diverses communautés. Enfin, il pourra s'impliquer dans la diffusion des connaissances, essentielle à la nature interdisciplinaire de l'astrophysique nucléaire, grâce notamment à l'organisation d'ateliers et d'écoles thématiques, de séminaires communs dans des pôles géographiques proches ...