

Astrophysique nucléaire

Elisabeth Vangioni-Flam, Michel Cassé et
Jacques Paul, I.A.P.¹

ARTICLE DE FOND

Cet article nous fait prendre conscience de l'importance de l'astrophysique nucléaire dans la compréhension de notre Univers.

Il y est question de la nucléosynthèse stellaire, responsable de la majorité des espèces atomiques et de la nucléosynthèse spallative, à l'origine des noyaux de lithium, beryllium et bore.

Les auteurs développent l'astronomie gamma nucléaire et présentent la mission INTEGRAL-Curie.

Introduction.

L'existence des atomes, la spécificité de leurs noyaux ainsi que leurs sources sont désormais solidement établies. En effet, l'une des plus grandes découvertes du 20^e siècle est que les atomes qui constituent le support matériel de toute chose, y compris de nous-mêmes, sont essentiellement le fruit du labeur de générations et de générations d'étoiles.

La source de chaque espèce nucléaire est clairement identifiée : Les noyaux les plus simples, tels l'hydrogène (76% de la matière ordinaire) et l'hélium (24% en masse) ainsi qu'une pincée de lithium, ont émergé du Big-Bang voici quelque 15 milliards d'années et servent ensuite de combustible aux réacteurs nucléaires que sont les étoiles.

Les atomes de la vie tels, carbone, azote, oxygène, calcium et fer, sont le fruit des fusions thermonucléaires successives dans les creusets stellaires. Les éléments plus lourds, comme l'uranium et le plutonium sont produits au cours de l'explosion

des étoiles massives à travers des captures de neutrons par des noyaux complexes (essentiellement le fer). Une fois synthétisés et éjectés dans le milieu environnant, les noyaux s'entourent d'électrons pour devenir atomes, qui eux-mêmes se structurent en molécules.

De leur côté, le lithium (pour une partie), le beryllium et le bore, ont une origine non stellaire. Ils sont engendrés par un processus de brisure des noyaux d'azote, de carbone, d'oxygène, appelé "spallation".

Aujourd'hui, après quinze milliards d'années d'évolution, la matière ordinaire, sous forme d'atomes, est composée de 70% d'hydrogène, 28% d'hélium ; seuls 2% de la matière originelle ont été transformés en éléments plus complexes (fig. 1 ci-contre).

Ainsi, le moteur essentiel de la complexification de la matière, nécessaire à la vie, est nucléaire. La physique nucléaire est par conséquent l'une des clés de la compréhension du monde, de son origine et de son devenir. En effet, l'Univers est en

évolution dans toutes ses régions sous l'influence de processus qui impliquent en particulier les noyaux d'atomes.

Aujourd'hui, l'activité nucléaire de la Galaxie n'est pas éteinte ; les indices les plus probants en sont :

- i) la présence d'étoiles massives (de courte durée de vie), lieu privilégié de transmutation des éléments dans le disque de notre Galaxie,
- ii) l'émission gamma (fig.2 et encadré 1) en provenance des noyaux radioactifs fraîchement synthétisés dans les étoiles et expulsés dans le milieu environnant. C'est pourquoi, les indices observationnels de l'activité nucléaire présente du ciel sont à rechercher dans le domaine spécifique des rayons gamma. Le satellite européen INTEGRAL-Curie est destiné à ouvrir largement ce champ de connaissance (voir encadré 2). Il devrait notamment permettre d'accéder à la compréhension fine des événements cosmiques les plus énergétiques, telles les explosions d'étoiles.

Nécessité d'une source d'énergie nucléaire

Dès la fin du XIX^e siècle, l'étude de la radioactivité naturelle de la Terre a fourni des indices sur l'âge de notre planète. A partir de la désintégration de l'uranium en plomb, les géophysiciens calculèrent que la Terre avait quelques milliards d'années. Les physiciens du début du XX^e siècle, pensaient que le Soleil tirait son énergie d'une combustion chimique ou d'une lente contraction gravitationnelle, mais ces dernières se révélèrent incapables d'assurer la longévité requise.

La solution du problème résidait en fait dans un mécanisme d'une toute autre nature : la fusion nucléaire. Ce mécanisme mettait en jeu une échelle de temps de quelques milliards d'années compatible avec le calcul des géophysiciens alors que les processus chimique et gravitationnel invoqués se limitaient à quelques millions d'années.

La source d'énergie de type nucléaire qui sévit au sein des étoiles est considérablement plus puissante que celle qu'offre la chimie. Une réaction chimique fait intervenir les électrons

Logarithme des abondances dans le système solaire

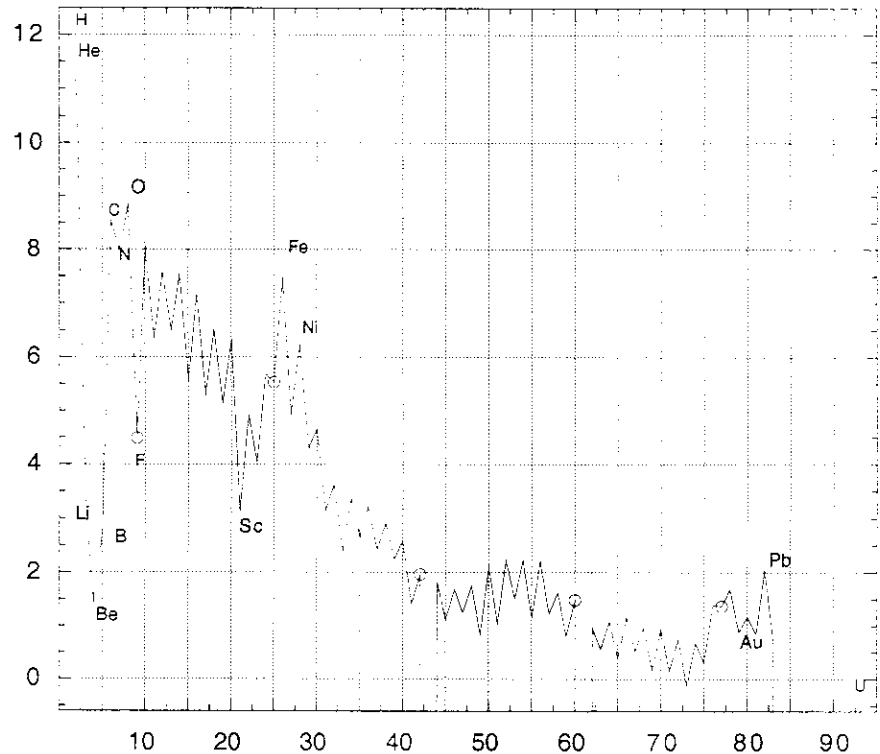


Fig.1. Répartition de l'abondance des éléments dans le Système Solaire. Ce diagramme porte pour chaque élément, en abscisse le numéro atomique et en ordonnée le logarithme de l'abondance, normalisé à 10^{12} atomes d'hydrogène. Les éléments légers, Lithium, Béryllium et Bore montrent une grande déficience qui s'explique par leur fragilité nucléaire. D'une façon générale, les noyaux les plus abondants sont aussi ceux qui ont un noyau solidement lié.

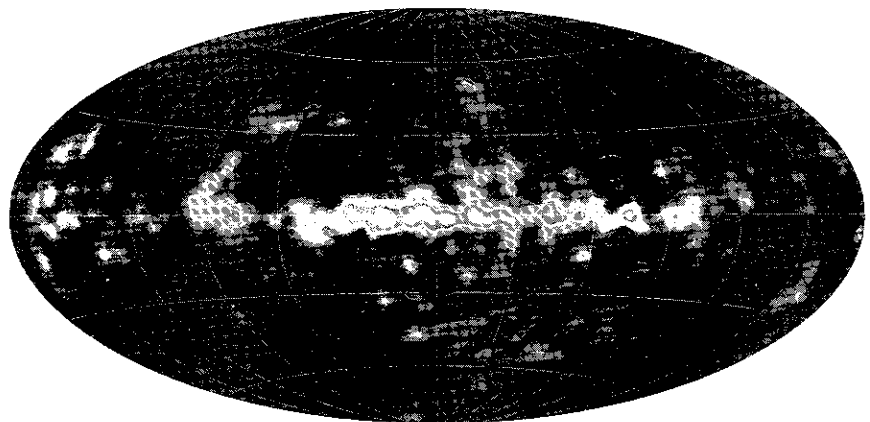


Fig. 2. Distribution le long de la Voie Lactée de l'émission gamma produite par désintégration de l'aluminium 26, bâtie à partir des données recueillies par l'expérience COMPTEL à bord du Compton Gamma-Ray Observatory dans une bande d'énergie de 200 keV centrée sur 1,8 MeV.

périphériques des atomes sous l'action de la force électromagnétique. Une réaction nucléaire implique le noyau de l'atome et ses constituants, les neutrons et les protons ; les modifications au sein du noyau s'effectuent par le truchement de l'interaction nucléaire forte.

L'interaction nucléaire faible vient parfaire la stabilité de la structure nucléaire nouvellement élaborée. La masse des produits de réaction est inférieure à celle des réactifs : l'excès de masse est converti en énergie, selon la célèbre formule $E = mc^2$; c'est pour cela que les étoiles brillent.

Les réactions nucléaires produisent environ un million de fois plus d'énergie que les réactions chimiques. L'unité d'énergie nucléaire est le méga-électron-volt (MeV).

Une étoile comme le Soleil, âgée de 4,6 milliards d'années, qui brûle de l'hydrogène selon ce principe de fusion nucléaire, possède une réserve suffisante pour encore 5 milliards d'années, environ.

Les êtres vivants sont eux-mêmes constitués des cendres des combustions nucléaires. Tous les noyaux d'atomes fabriqués dans la nature correspondant à des éléments chimiques qui trouvent leur place dans la table périodique dite de Mendeleïev. La fusion nucléaire, de surcroît, approvisionnant les étoiles en énergie pendant des milliards d'années sans interruption, donne à la vie et à l'intelligence le temps de se développer.

Synthèses successives des noyaux d'atomes dans les étoiles.

Aux températures stellaires (quinze millions de kelvins au centre du Soleil par exemple), les atomes perdent leurs électrons. La vitesse thermique des protons permet de circonvenir leur répulsion coulombienne (électrique), si bien que le rapprochement de quelques-uns d'entre eux permet la manifestation des interactions nucléaires forte et faible, de très courte portée ; ainsi, la fusion opère pour donner des noyaux plus complexes.

Par une suite de réactions nucléaires opérant dans le cœur de l'étoile, quatre noyaux d'hydrogène fusionnent en un noyau d'hélium avec émission de deux positons et deux neutrons et de l'énergie sous forme de photons gamma. Ces derniers, tout en se propageant vers l'extérieur de l'étoile, interagissent continuellement avec les électrons du milieu et perdent ainsi de l'énergie, passant du statut de photons gamma à celui de photons X, UV, visible et infrarouge, au terme d'environ 300 000 années. Ce sont ces derniers rayonnements qui s'échappent de l'étoile et elle apparaît alors lumineuse dans ces gammes d'énergie. Après la longue étape de fusion de l'hydrogène, pendant laquelle l'hélium s'accumule dans le cœur, l'étoile change en ses tréfonds : son cœur se contracte et s'échauffe. La température et la densité augmentent jusqu'à ce que la pression thermique s'oppose à la contraction gravitationnelle. La région centrale devient de plus en plus dense et chaude. La fusion nucléaire de l'hélium s'amorce ainsi. La collision de deux noyaux d'hélium produit d'abord le béryllium 8, instable. Un autre noyau d'hélium peut entrer en collision avec cette cible de courte durée de vie : un noyau de carbone se forme. Cette collision fructueuse a une probabilité extrêmement faible de se produire. Cependant, une concordance subtile entre les énergies de l'hélium, du béryllium instable et du carbone ainsi produit, permet la création de ce dernier. Tandis que le cœur se contracte, les couches externes enflent, jusqu'à atteindre 50 fois le rayon initial, environ. Une étoile de la taille du Soleil se transforme alors en une géante rouge, plus froide dans sa périphérie, et plus lumineuse.

Au-delà de la fusion de l'hélium, les étoiles de type solaire mettent un terme à leur existence en laissant s'envoler leur enveloppe. Le phénomène, visible dans le ciel, porte le nom de nébuleuse planétaire ; cette appellation ancienne est un abus de langage pour la raison que les dites nébuleuses sont le fruit de l'évolution des étoiles et non des planètes. Le cœur dénudé apparaît alors sous la forme d'une naine blanche, petite étoile compacte et chau-

de. Les nébuleuses planétaires disséminent ainsi dans l'espace l'hélium, l'azote et le carbone produits dans le cœur des petites et moyennes étoiles.

Les étoiles plus massives que le Soleil (plus de dix fois la masse de notre astre) atteignent en leur centre des températures de plusieurs dizaines (voire plusieurs centaines) de millions de kelvins. Elles sont capables de déclencher des fusions nucléaires faisant intervenir des noyaux toujours plus lourds, tels le carbone, l'oxygène, le néon et le silicium. Dans ces objets rares mais efficaces, l'ensemble de l'œuvre nucléaire, fusion de l'hydrogène comprise, s'effectue en un temps très court (quelques millions d'années) comparé à celui du soleil (10 milliards d'années).

La fusion du silicium étant engagée, le fer s'accumule au cœur de l'étoile : c'est l'agonie car il est incombustible. En effet, c'est le noyau d'atome dont la cohésion est la plus grande. Sa fusion est endothermique. L'équilibre entre la pression thermique, entretenue par les réactions nucléaires et la gravitation est rompu. Dès lors, le cœur de l'étoile est tyrannisé par la gravitation ; il est condamné à s'effondrer pour devenir une étoile à neutrons : la matière est alors on ne peut plus compacte ; elle atteint la densité des noyaux d'atomes. Ce cœur poussé à ses extrêmes limites, subit une détente brutale, engendrant une onde de choc qui balaie l'étoile ; Les couches extérieures sont alors expulsées violemment : l'implosion se double d'une explosion, une supernova fleurit dans le ciel. Il ne s'agit pas d'une étoile de plus, mais d'une étoile de moins.

L'onde de choc engendrée par l'explosion rallume les réactions nucléaires dans les couches externes de l'étoile, les réactions produisent à nouveau le fer, ou plus exactement son père radioactif, le nickel-56. Les neutrons libérés, se greffant sur le fer préexistant, produisent toute la succession des noyaux lourds jusqu'à l'uranium. Ce stade est qualifié de nucléosynthèse explosive.

Pendant quelques semaines, la supernova brille comme des milliards de soleils. Ces explosions de supernovae sont les moteurs principaux de la

complexification nucléaire dans l'univers, car elles inséminent le cosmos de leurs noyaux fraîchement synthétisés. Ces noyaux sont donc éjectés dans le milieu interstellaire, milieu à partir duquel se formeront de nouvelles étoiles et planètes. C'est ainsi que les supernovae jouent un rôle crucial en particulier dans la formation et l'éjection des noyaux radioactifs qui peuvent justement être détectés par les instruments dévolus à l'astronomie gamma.

Spécificité des atomes lithium, béryllium, bore.

Comme on vient de le voir, la nucléosynthèse stellaire est responsable de la majorité des espèces nucléaires mais certaines d'entre elles - très rares - échappent à sa juridiction.

Le lithium, le béryllium et le bore, Li-Be-B, dont les noyaux sont plus légers que celui du carbone, sont très peu liés et ne résistent pas aux températures stellaires. La quantité de ces trois éléments est faible dans la nature en raison de la fragilité de leur structure nucléaire (figure 1). De fait, leur origine n'est pas la fusion thermonucléaire, mais au contraire la brisure (spallation) de noyaux plus lourds (C, N, O). La synthèse des noyaux lithium, béryllium et bore est imputée à l'interaction entre noyaux rapides et le milieu interstellaire, comme par exemple l'interaction du Rayonnement Cosmique Galactique, RCG (protons et noyaux d'hélium d'environ 1 GeV par nucléon, 1 milliard d'électron-volts par nucléon) avec le milieu interstellaire diffus. Il faut noter que le ${}^7\text{Li}$ est un noyau d'origine multiple ; outre cette formation spallative, il est aussi engendré au cours de la nucléosynthèse du Big-Bang (un noyau de ${}^7\text{Li}$ pour 10 milliards d'atomes d'hydrogène) et dans les phases avancées de la nucléosynthèse stellaire (un noyau de ${}^7\text{Li}$ pour un milliard de noyaux d'atomes d'hydrogène).

La physique qui nous intéresse ici est celle des accélérateurs d'ions. Elle implique un faisceau de noyaux rapides (injecté puis accéléré), une cible et une interaction entre les deux. Le résultat

de la collision du projectile et de la cible dépend :

- i) de la composition du faisceau de noyaux rapides,
- ii) de la probabilité d'occurrence des diverses réactions nucléaires, laquelle dépend de la vitesse relative des noyaux projectile et cible et donc du spectre d'énergie du faisceau,
- iii) de la composition de la cible.

Par opposition à la nucléosynthèse stellaire impliquant des basses énergies (1 keV-100 keV) et des hautes densités (10^2 - 10^9 g cm^{-3}), la nucléosynthèse spallative implique des hautes énergies (1 MeV-100 GeV) et des basses densités (1 - 10^3 atomes cm^{-3}).

Le Rayonnement Cosmique Galactique (RCG, seul échantillon de matière provenant de l'extérieur du système solaire, est composé de particules très rapides, essentiellement protons et particules alphas (α / p vaut environ 10%). Sa densité d'énergie (1 eV. cm^{-3} environ), semblable à celle de la lumière des étoiles et du champ magnétique galactique en fait une composante importante pour la dynamique de la Voie Lactée.

Le spectre d'énergie du RCG se laisse décrire par une loi de puissance en énergie (flux proportionnel à $E^{-2.7}$ au-dessus de quelques GeV/nucléon). Au-dessous de 1 GeV/nucléon, les noyaux sont repoussés par le vent solaire et il est difficile de restituer le spectre en dehors de la cavité solaire.

Ce RCG, en percutant les noyaux de carbone, d'azote et d'oxygène du milieu interstellaire est à l'origine des noyaux légers, Li-Be-B, du disque galactique.

De façon symétrique, lorsque des noyaux de He, C et O sont éjectés à des énergies de 10 à 30 MeV / nucléon par des étoiles massives (étoiles Wolf-Rayet et / ou supernovae), leur fragmentation sur l'hydrogène et l'hélium circumstellaires peut produire ces mêmes éléments légers. A tout instant, le flux de He, C et O rapides est proportionnel au taux de supernovae, et, dans ce cas, les noyaux cibles sont H et He, hérités du Big Bang. Ce processus est responsable de la formation du

Lithium-Béryllium-Bore dans les premières étapes de l'évolution de la Galaxie lorsque le milieu interstellaire est encore pauvre en éléments C, N, O.

Astronomie gamma nucléaire.

L'astronomie gamma nucléaire se donne pour but l'étude détaillée de la production des noyaux atomiques par voie thermique (fusion thermonucléaire, capture radiative de neutrons, photodésintégration dans les étoiles, novæ et supernovae) et par voie non-thermique (spallation, fragmentation) dans les milieux interstellaire et circumstellaire. L'intensité et le profil des raies permettent d'identifier sans ambiguïté les isotopes émetteurs, d'estimer leur abondance et d'accéder à la connaissance des conditions physiques du milieu source (vitesses d'ensemble, potentiel gravitationnel, densité et température, géométrie du champ magnétique, spectre des particules énergétiques).

Les raies gamma sont le résultat de la désexcitation de niveaux nucléaires préalablement excités, lesquels sont peuplés, soit par la désintégration d'une espèce radioactive parente fraîchement synthétisée dans les étoiles et éjectée par leurs vents et / ou explosions, soit par collision noyau-noyau dans le milieu interstellaire.

La condition sine qua non pour que brillent les sources gamma nucléaires est que le rayonnement gamma ne soit point converti en quelque forme moins énergétique et donc que les noyaux émettent leurs photons dans des milieux de basse densité (enveloppes, débris d'étoiles ou milieu interstellaire). Cette condition est satisfaite par deux types de nucléides :

- a) les noyaux radioactifs de vie suffisamment longue pour être portés loin de leurs sources par les vents et explosions d'étoiles, ceci avant de se désintégrer (voie thermique).
- b) Les noyaux stables excités par collision nucléaire dans les milieux de basse densité (voie non thermique). Ce mode de production de raies gamma met en jeu des faisceaux de noyaux énergétiques naturels, analogues à ceux

que produisent par exemple les éruptions solaires.

Si le Soleil est opaque aux rayons gamma issus des réactions thermonucléaires centrales, il n'exerce aucune censure sur ceux qui sont produits par des phénomènes éruptifs dans son atmosphère ténue qui libère des particules de relativement haute énergie (au delà du MeV), lesquelles interagissent avec la matière environnante.

Les raies gamma résultent de collisions entre particules accélérées et noyaux au repos dans les couches externes du Soleil. Les protons et noyaux d'hélium rapides excitent les noyaux de C, O, Ne, Mg, ... Fe ; inversement ces mêmes espèces présentes dans la population des noyaux accélérés s'excitent en vol par collision avec les noyaux d'hydrogène (protons) et d'hélium au repos.

La désexcitation en vol produit des raies larges (par effet Doppler), la désintégration des espèces au repos produit des raies plus fines.

Les éruptions stellaires offrent l'archétype de l'excitation nucléaire et de l'émission gamma qui s'ensuit.

Au delà de l'exemple solaire, la spectroscopie nucléaire offre des perspectives prometteuses sur la compréhension des processus physiques de haute énergie dans le cosmos. Le satellite INTEGRAL-Curie (voir encadré 2) fleuron de l'astronomie spatiale européenne est dévolu à cette tâche et l'on espère recueillir une moisson de résultats à court terme.

Conclusion

L'astrophysique nucléaire est l'une des plus belles sciences qui soit, car elle jette une passerelle entre le microcosme subatomique et le macrocosme céleste et statue sur l'origine des éléments qui composent le réel immédiat, du plus simple, l'hydrogène jusqu'au plus complexe, l'uranium. Son ambition est encore plus vaste car son but est non seulement de déterminer l'origine mais aussi l'évolution des éléments chimiques dans le cosmos. Il a été montré au vingtième siècle que la complexification nucléaire est un phénomène universel qui concerne toutes les galaxies, la nôtre y compris.

De générations en générations d'étoiles, une galaxie ne cesse de s'enrichir en éléments chimiques complexes. Le recensement de ces derniers au moyen des plus grands instruments astronomiques est engagée, cela à différentes époques de l'évolution cosmique, de notre proche environnement jusqu'aux plus lointains nuages pré/proto galactiques. La détermination du rythme de transformation des atomes simples en atomes complexes mobilise tous les efforts, afin de retracer l'histoire chimique globale de l'univers.

En partant d'une substance simple (pour ne pas dire élémentaire), composée de photons, électrons, neutrinos, neutrons et protons, la nature construit tous les éléments de la table périodique et leur confère leurs propriétés chimiques distinctives, et à partir de celles-ci, elle forme les molécules simples comme l'eau (H₂O), le monoxyde de carbone (CO) et les molécules plus complexes à base de carbone, nécessaires à la vie sur Terre. L'ADN n'est, à tout prendre, qu'un arrangement particulièrement heureux d'électrons, de protons et de neutrons. En somme, la composition de la Terre et des hommes sur cette Terre est une conséquence naturelle de la production des éléments chimiques au sein des étoiles par le travail incessant des forces nucléaires ainsi que des vagues successives de formation et de disparition de générations entières d'étoiles dans les galaxies.

L'astrophysique nucléaire nous ouvre ainsi à l'histoire universelle de la matière. Ce champ de recherche s'enrichit au fil des découvertes. Aujourd'hui l'ère de l'astronomie gamma porte des promesses de moisson abondante. La détection de rayons gamma émanant de sources cosmiques, souvent violentes, au moyen du satellite INTEGRAL est désormais attendue avec fébrilité.

Note : Michel Cassé et Jacques Paul travaillent aussi au Service d'Astrophysique DSM/CEA, Orme des Merisiers, 91191 Gif-sur-Yvette.

Table 1. Origine des éléments chimiques

Processus	Site	produits
Nucléosynthèse primordiale	Big-Bang	H, ⁴ He traces de D, ³ He, ⁷ Li
fusion de l'hydrogène	Etoiles	⁴ He, N
fusion de l'hélium	Géantes Rouges	C
fusion de l'hélium fusion du carbone fusion de l'oxygène	Supergéantes	O, C, Ne, Na, Mg, Si
fusion du silicium	Supernovae	Fe, Co, Ni
capture lente de neutrons	Géantes rouges	Cu, Zn, Pb
capture rapide de neutrons	Supernovae	Au, Pt, U
spallation	Interaction de noyaux rapides avec le milieu interstellaire	Li, Be, B

La radioactivité de la Galaxie

Il existe plusieurs types de radioactivité. Celle qui nous concerne est liée au fait que certains noyaux éjectés par les astres et éparpillés dans le milieu interstellaire sont riches en protons, trop riches pour être stables. Ces noyaux ont tendance à transformer en leur sein un proton en neutron. Le noyau résultant est la plupart du temps dans un état excité et recouvre l'état fondamental en émettant un photon de haute énergie appelé photon gamma. Rappelons que les photons sont les particules associées au rayonnement électromagnétique. Il existe des photons de toute énergie, depuis les photons radio (les moins énergétiques) jusqu'aux photons gamma (les plus énergétiques) en passant par les photons infrarouge, visibles, ultra-violet et X. Chaque gamme d'énergie peut être observable par des instruments astronomiques appropriés et l'on peut alors mettre en évidence différentes facettes du cosmos tant au plan du contenu que des processus physiques mis en jeu. En particulier, l'astronomie gamma nous ouvre aux événements les plus violents qui se produisent dans l'Univers.

Comme on l'a déjà mentionné, une étoile massive connaît plusieurs stades d'évolution. L'une des premières phases correspond au stade Wolf-Rayet, du nom de leurs découvreurs, (W-R). Ces étoiles entretiennent un vent puissant chargé de noyaux radioactifs comme l'aluminium-26 produit par la réaction $^{25}\text{Mg} + p \rightarrow ^{26}\text{Al} + \gamma$ dans le cœur de l'étoile. Ce dernier est mis à nu par le vent qui emporte cet isotope au loin et le dépose dans le milieu interstellaire où il se désintègre (période de l'ordre de 1 million d'années) par radioactivité β^+ en magnésium-26 excité, lequel recouvre l'état fondamental en émettant un rayon gamma caractéristique (1,809 MeV). Les étoiles W-R sont présumées être en partie responsables de l'émission gamma de la Galaxie à cette énergie (fig. 2).

Les supernovae correspondent de leur côté à la phase ultime de l'évolution de deux catégories d'étoiles. Leur luminosité augmente très rapidement lors de l'explosion.

Les supernovae dites de type Ia mettent en jeu des étoiles de petite masse en système double tandis que les supernovae dites de type II incriminent des étoiles massives. Dans les deux cas, cette explosion se solde par l'éjection de noyaux radioactifs.

Comment différencier les supernovae de type Ia et les supernovae de type II ? Si le spectre d'une supernova arbore les raies de l'hydrogène, elle est classée II, dans le cas contraire elle appartient au type Ia. Mais cette classification spectroscopique se voit avantageusement remplacée par une classification physique. Il est, en effet, préférable de distinguer les explosions d'après le mécanisme qui les provoque, thermonucléaire (Types Ia) ou gravitationnel (Type II).

Dans les couples serrés d'étoiles dont l'un des membres est une naine blanche (étoile compacte dont la masse est inférieure à 1,4 fois la masse du soleil - M_{\odot}) la substance aspirée par la naine blanche l'alourdit et l'entraîne à dépasser une certaine masse critique dite de Chandrasekhar. L'étoile entière est détruite dans une gigantesque explosion nucléaire. Une bonne moitié est incinérée et transformée en ^{56}Ni radioactif, lequel se désintègre successivement en ^{56}Co et ^{56}Fe (environ 0,6 masse solaire de fer), avec émission concomitante de rayons gamma.

Les SNII (gravitationnelles) sont imputées à l'implosion soudaine du cœur des supergéantes (étoiles de masse supérieure à $8 M_{\odot}$). Une étoile à neutrons se forme au centre alors que l'enveloppe de la supergéante est éjectée à une vitesse de 10^4 km par seconde environ. L'énergie cinétique de la matière expulsée (10^{51} erg ; un erg correspond à une énergie de 10^{-7} Joule) est une faible fraction de celle qui est libérée sous forme de neutrinos (10^{53} erg).

Si l'on se rapporte précisément à la théorie de la nucléosynthèse explosive, les isotopes du pic du fer ne sont pas produits en tant que tels, mais sous la forme de leur générateur radioactif riche en protons. Par exemple, le fer synthétisé de manière explosive sous la forme de Nickel-56, est éjecté dans l'espace. En l'occurrence, six mois après l'explosion de la supernova SN1987A (voir encadré 3), ont été mis en évidence les rayons gamma émis lors de la décroissance du Cobalt-56 en Fer-56 selon la chaîne : $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co}$ (par capture électronique). puis $^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ (ici un proton se transforme en neutron, c'est la radioactivité β^+).

La quantité estimée de ^{56}Ni synthétisée au cours des explosions respectives est de 0,6 masse solaire pour les SNIa contre 0,1 masse solaire environ pour les SN II. D'autre part, les masses des enveloppes éjectées étant très différentes les SNIa deviennent transparentes aux rayons gamma bien plus vite que les SNII car i) elles sont moins massives et présentent aux rayons gamma une quantité moindre de matière absorbante (1,4 masse solaire pour les SNIa contre environ 10 masses solaires pour les SNII) et ii) elles se diluent plus vite que les SNII car leur vitesse d'expansion est plus grande. De ce fait, il est prédit que les SNIa sont bien plus lumineuses dans le domaine gamma que les SNII.

Finalement, les explosions de supernovae laissent des traces de deux sortes : une étoile à neutrons qui est le résidu compact de l'étoile initiale (dans le cas des SNII) ainsi qu'une enveloppe de matière en expansion appelée vestige ou reste de supernova, qui contient entre autres les éléments radioactifs forgés au cours de la nucléosynthèse explosive ; dans le cas des SNIa, seul le reste de supernova persiste car l'étoile a été totalement volatilisée au cours de l'explosion.

La mission INTEGRAL - Curie

La mission d'astronomie gamma INTEGRAL (International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory), dont l'objectif principal est l'exploration approfondie des sites célestes émissifs dans la bande spectrale de 15 keV à 10 MeV, est la prochaine grande mission astronomique de l'Agence Spatiale Européenne (ASE). Le satellite INTEGRAL (fig. 3) utilise une plate-forme spatiale du même type que celle de XMM/Newton, le satellite européen d'astronomie X lancé avec succès en décembre 1999. Le lancement du satellite est prévu à l'automne 2002 ; il sera assuré par une fusée PROTON fournie par l'Agence Spatiale Russe. La mission est conçue pour durer au moins cinq ans.

Le télescope français SIGMA à bord du satellite russe GRANAT a démontré dans le passé que la pratique des ouvertures codées est bien adaptée aux observations dans la bande des rayons gamma de basse énergie. La charge utile de la mission INTEGRAL (fig. 4) a donc été fondée sur l'utilisation simultanée de deux dispositifs à ouverture codée : IBIS (Imager on Board the INTEGRAL Satellite), apte à fournir des images à haute résolution angulaire et une information spectrale à moyenne résolution, et SPI (Spectrometer for INTEGRAL) chargé de la spectroscopie gamma à très haute résolution. La mission INTEGRAL inclut également deux instruments complémentaires : JEM-X (Joint European Monitor) et OMC (Optical Monitor Camera), opérant respectivement dans la bande des rayons X au-delà de 2-3 keV et dans le domaine visible, de 550 à 850 nm. La nature observatoire de la mission repose sur l'ISDC (INTEGRAL Science Data Center situé près de Genève) qui permettra aux non-spécialistes de mener des observations avec INTEGRAL.

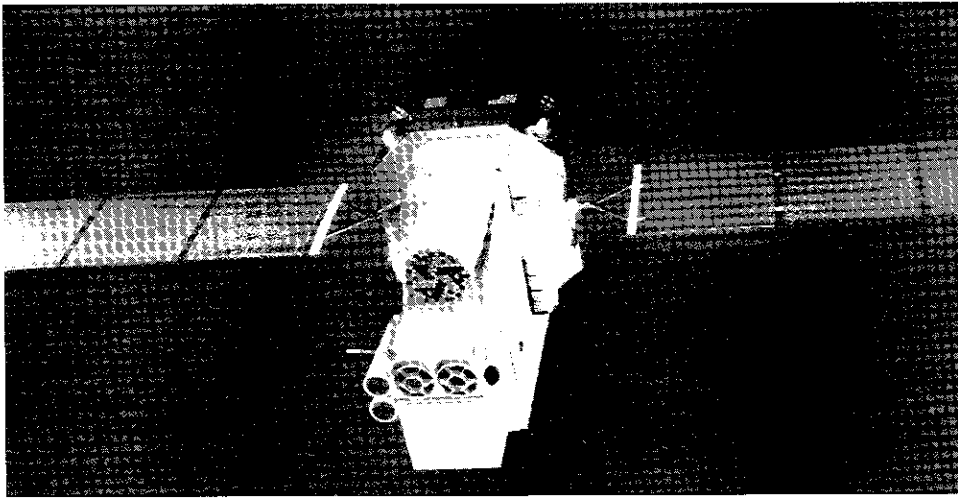
C'est par le truchement du spectromètre SPI que la mission INTEGRAL se propose de répondre aux nombreuses interrogations soulevées dans cet article. Fruit d'une vaste collaboration internationale¹, le spectromètre SPI est réalisé sous la maîtrise d'œuvre du Centre National d'Études Spatiales (CNES). Forts des résultats récents sur l'émission à large échelle de la Voie lactée produite par désintégration de l'aluminium 26, les concepteurs de SPI ont adopté un champ de vue le plus vaste possible au détriment du pouvoir séparateur, l'effort portant avant tout sur la résolution en énergie dans la gamme 15 keV-10 MeV. Le plan détecteur de SPI est donc constitué d'un réseau hexagonal de 19 semi-conducteurs de germanium couvrant une surface utile de 500 cm². Les détecteurs en germanium sont montés dans un cryostat qui les maintient à une température de 85 kelvins par une combinaison de dispositifs réfrigérants actifs et passifs. Ils confèrent à SPI un pouvoir de résolution $E/DE \approx 650$, ceci à une énergie de 1,33 MeV, quinze fois meilleur que celui du spectromètre OSSE à bord de l'Observatoire de Rayons Gamma Compton. L'aptitude du spectromètre SPI à produire des images à grand champ repose sur son ouverture codée à base d'éléments de tungstène montés à 1,7 m du

plan de détection. Ce dispositif lui procure un pouvoir séparateur assez modeste (~ 2 degrés), bien meilleur toutefois que celui du spectromètre OSSE, ainsi qu'un champ de vue à mi-sensibilité de 490 degrés carrés.

A l'instar de la plupart des nouvelles branches de l'astronomie, celle des rayons gamma doit se pratiquer pour l'essentiel à bord de véhicules spatiaux, car en dépit de leur grand pouvoir de pénétration, les rayons gamma sont totalement absorbés par l'atmosphère terrestre. Les télescopes gamma et les véhicules spatiaux où ils sont embarqués sont de ce fait exposés aux particules d'origine cosmique ainsi qu'à celles qui sont piégées dans les ceintures de radiation de la Terre. Le bruit de fond intense qui en résulte est fort difficile à atténuer, même au prix de blindages massifs. Afin de réduire le bruit de fond de SPI, bouclier adapté enveloppe complètement le dispositif de détection. On peut envisager ainsi une sensibilité de détection des raies gamma les plus fines accrue de plus d'un ordre de grandeur par rapport à celle du spectromètre OSSE embarqué sur le satellite Compton GRO. En se prolongeant loin au-dessus du plan de détection, ce blindage actif contribuera également à réduire la susceptibilité du spectromètre aux rayonnements émis en dehors du champ de vue de l'appareil.

Une fois monté dans les locaux du Centre Spatial du CNES à Toulouse, le spectromètre SPI a été l'objet d'une campagne intensive d'étalonnage. Il n'est en effet pas possible d'estimer la réponse instrumentale des télescopes gamma avec les seuls photons émis par les sites cosmiques eux-mêmes. Les sources gamma célestes émettent en effet beaucoup trop peu de photons et sont pour la plupart d'entre elles beaucoup trop variables pour garantir un étalonnage satisfaisant des télescopes. Avant la mise en orbite, il est donc nécessaire de mesurer la réponse instrumentale du spectromètre en l'exposant à des faisceaux de rayons gamma produits au sol. Les étalonnages de SPI ont été menés en avril 2001 au Centre d'Études Nucléaire de Bruyères-le-Châtel au moyen de sources radioactives, dont certaines, très intenses, ont été disposées à grande distance de l'instrument pour simuler l'effet d'une source cosmique située à l'infini. Le spectromètre a été également exposé à des faisceaux de photons gamma monoénergétiques obtenus en bombardant une cible mince faite d'un matériau donné avec des protons accélérés à des énergies judicieusement ajustées, ce qui a pour effet d'exciter les noyaux du matériau cible. Par retour à l'état fondamental, ces noyaux émettent alors par désexcitation nucléaire les photons gamma monoénergétiques dans une gamme d'énergie s'étendant jusqu'au seuil haut du spectromètre SPI.

INTEGRAL est un observatoire ouvert à une très large communauté scientifique. En dépit de la spécificité des équipements, l'accès aux paramètres physiques des



Vue d'artiste
du satellite
INTEGRAL
en orbite.

sources observées sera ouvert à tous. Une partie du temps d'observation sera toutefois réservée aux groupes impliqués dans la réalisation de la mission. Ce temps garanti sera dévolu pour l'essentiel à un balayage de la Voie lactée incluant une observation approfondie des régions centrales de la Galaxie et de la région des Voiles (Vela).

Ainsi, sans conteste, les rayons gamma, qui sont comme on l'a vu les photons les plus énergétiques du spectre électromagnétique, constituent l'indice le plus direct des mécanismes de synthèse fraîche des noyaux d'atomes dans l'Univers. En effet, l'énergie précise des rayons gamma est une signature indubitable des noyaux radioactifs émetteurs et cela parce que les raies ne sont pas modifiées par la traversée du milieu interstellaire. Par ailleurs, les noyaux incriminés sont de vie relativement courte par rapport à l'âge de la Galaxie. Par conséquent ils révèlent les phénomènes les plus actuels.

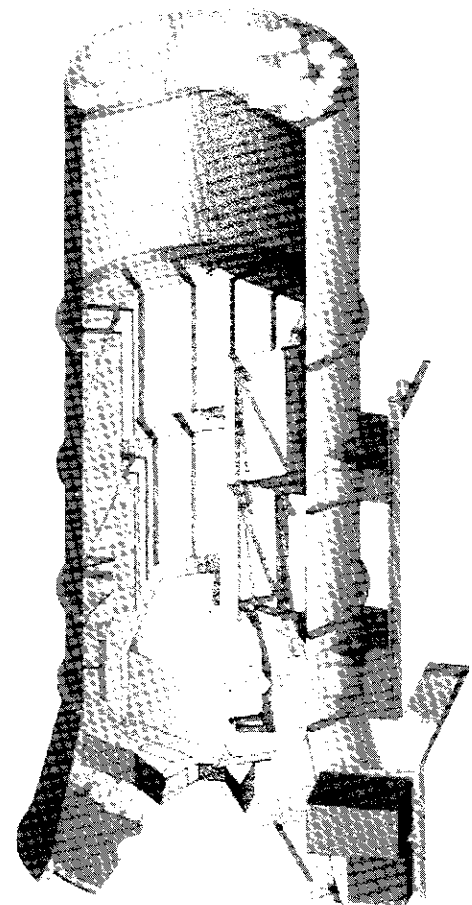
L'objectif essentiel du spectromètre d'INTEGRAL est de détecter et mesurer les raies gamma émanant de sources cosmiques. La spectroscopie gamma devrait permettre de découvrir des indices récents de nucléosynthèse et de situer ses foyers dans notre Galaxie et au-delà, et de mesurer la quantité de divers isotopes radioactifs libérés par les explosions d'objets célestes, supernovae de tous types et novæ ainsi que par le vent des étoiles massives dans la phase Wolf-Rayet.

Note :

Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements, Toulouse, Service d'Astrophysique du Commissariat à l'Energie Atomique, Saclay, France ; Max Planck Institut für Extraterrestrische Physik, Garching bei München, Allemagne ; Université de Valence, Espagne ; Instituto di Fisica Cosmica e Tecnologia Relative, Milan, Italie ; Université de Louvain-la-Neuve, Belgique ; Université de Birmingham, Royaume-Uni ; Université de Californie, San Diego, Université de Berkeley, Nasa Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Etats-Unis.

Fig.4. Spectromètre INTEGRAL SPI

Le spectromètre SPI de haute résolution spectrale est composé d'un masque codé situé au sommet de l'appareil permettant de définir la position angulaire des sources. Les photons atteignent ensuite un plan composé de 19 détecteurs de germanium. Là s'effectue la mesure d'énergie. Afin de ne prendre en compte que les rayonnements ayant traversé le masque, un détecteur appelé blindage actif forme le corps cylindrique du spectromètre.



SN 1987A et les supernovae de type II

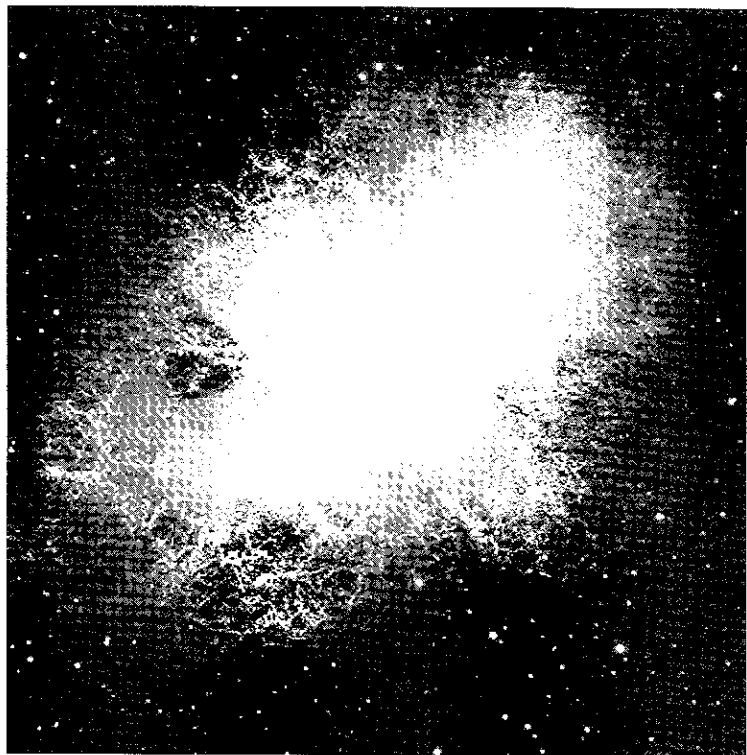
A la Renaissance, Tycho Brahé et Johannes Kepler furent chacun les témoins émerveillés de l'apparition d'une supernova. Le télescope n'était pas encore inventé. En 1987 une supernova visible à l'œil nu se présenta à nous, dans le Grand Nuage de Magellan, galaxie satellite de la nôtre, située à 170 000 années-lumière. Le déclin de son éclat et les moindres inflexions de son rayonnement furent analysés en détail par les grands télescopes. Les gigantesques détecteurs de neutrinos, à l'affût sous terre, capturèrent son signal. Ses rayons X et gamma furent enregistrés par des dispositifs satellisés.

Le message de la supernova magellanique arrivait au bon moment: celui où les hommes s'étaient donné des modèles physiques et des ordinateurs capables de restituer l'évolution des étoiles. Message différé de 170 000 ans, certes, mais message exact : les neutrinos arrivèrent avec quelques heures d'avance sur la lumière et avec le nombre attendu. La brillance de l'objet dans le ciel déclinait au rythme de décroissance d'un certain isotope radioactif qu'on eut tôt fait d'identifier au cobalt-56, fils du nickel-56 et père du fer-56. Et fut vérifiée cette prédiction extravagante : le fer, roi de la création nucléaire, le plus solide des noyaux d'atomes, n'est pas créé en tant que fer, mais en tant que nickel radioactif. Ainsi fut confirmée la théorie de la nucléosynthèse explosive des étoiles massives.

Rappelons que les supernovae de type II résultent de l'explosion d'astres dont la masse est supérieure à 8 masses solaires. Faute de réactions nucléaires exothermiques, le cœur de fer (dont la masse dépasse la limite de Chandrasekhar) s'effondre soudainement pour atteindre l'incompressibilité (la densité est alors supérieure à celle du noyau de l'atome). Ce cœur, protoétoile à neutrons, se refroidit en émettant en une dizaine de secondes une formidable bouffée de neutrinos et antineutrinos. En se détendant, ce cœur hyperdense engendre une onde de choc à laquelle les neutrinos impriment une impulsion supplémentaire. Cette onde de choc, réchauffe la matière dans son sillage et rallume les réactions nucléaires dans les couches profondes du manteau produisant tout un cortège d'éléments parmi lesquels les isotopes radioactifs qui intéressent l'astronomie gamma nucléaire. Se dispersent alors manteau et couches supérieures de l'étoile. L'intense émission lumineuse qui s'ensuit (jusqu'à un milliard de luminosités solaires) est la signature visible de l'événement "supernova". Au bout de quelques jours, la radioactivité interne prend le relais de l'onde de choc pour nourrir l'éclat de la supernova. Comme la décroissance du Cobalt-56 en est le moteur principal, le déclin de luminosité suit celui de cet isotope radioactif dont la vie moyenne est de 79 jours, puis vient le tour du ^{57}Co (271 jours) et enfin celui du ^{44}Ti (68 ans).

Quelques mois plus tard, l'enveloppe, diluée par l'expansion, devient transparente aux rayons gamma et donc potentiellement observable par les télescopes appropriés, pour peu que la supernova ne soit pas trop distante. Ainsi l'émission gamma de la supernova de 1987 put-elle être enregistrée, confirmant la chaîne de raisonnement développée ci-dessus.

Les radio-isotopes de vie plus longue que ceux du cobalt (^{44}Ti , et ^{26}Al) également produits par l'explosion se désintègrent dans un milieu très dilué parfaitement transparent aux rayons gamma.



**Fig. 5 La nébuleuse du Crabe (VLT-ESO).
Vestige d'une supernova gravitationnelle .**