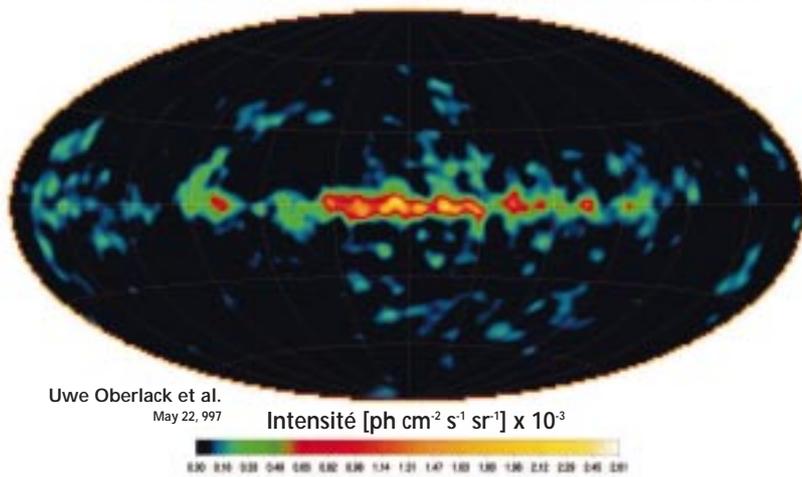


Voir l'invisible cosmique

L'Astronomie gamma

Réunir un astrophysicien et un physicien nucléaire c'est facile : il suffit de les faire parler de nucléosynthèse cosmique, la formation des noyaux atomiques dans le cosmos. Ils vous diront que les noyaux légers et intermédiaires se forment dans les étoiles par fusion thermonucléaire¹, sauf l'hydrogène, carburant stellaire de base, le lithium, le béryllium et le bore issus de la brisure de noyaux de carbone par les rayons cosmiques. Pour fabriquer les noyaux plus lourds il faut des corps célestes plus énergiques, étoiles massives, novae ou supernovae².

CGRO / COMPTEL 1.8 MeV, Temps d'observation : 5 ans



Distribution le long de la Voie lactée de l'émission gamma d'aluminium 6, d'énergie $1,8 \pm 0,1$ MeV obtenue par l'expérience COMPTEL CGRO.

Détecter une supernova, cette extraordinaire-ment brutale et soudaine explosion d'une étoile en fin de carrière, est une aubaine à la fois pour les astrophysiciens, les physiciens des particules, les physiciens nucléaires et les « instrumentalistes associés » contents que leurs instruments aient bien instrumenté. Une supernova est aussi bien un fantastique étalon lumineux cosmique³ qu'un geyser à neutrinos, et dans cette fournaise d'apocalypse naissent toutes sortes de noyaux stables et la plupart des noyaux radioactifs. Une concentration de ces derniers dans une région de l'espace signale qu'une étoile y a probablement explosé.

Heureusement, car s'il se produit entre 2 à 4 supernovae par siècle dans notre galaxie, on en détecte actuellement fort peu, car la lumière

de l'explosion, qui pourtant brille comme un million de soleils, est, bien souvent, absorbée par la matière interstellaire. Or, beaucoup de noyaux radioactifs émettent des rayons gamma, sorte de super-lumière invisible constituée de photons des millions de fois plus énergiques et pénétrants que ceux de la lumière visible⁴. Chacun de ces noyaux émetteurs possède une « signature » particulière : le nombre de photons émis dans chaque tranche d'énergie. C'est ce qu'on appelle son spectre gamma, un ensemble de « raies » caractéristiques du noyau en question. La détection de ces raies signale la présence du noyau. Le flash de l'explosion est fugace à l'échelle des temps astronomiques mais le rayonnement gamma persiste, perçue la matière interstellaire et témoigne longtemps après qu'une étoile a jadis explosé en ces lieux.

Voilà une des raisons pour laquelle « l'Astronomie gamma » est un indispensable outil d'exploration cosmique. Le prochain programme d'envergure dévolu à cette nouvelle discipline est le projet INTEGRAL (INTERNATIONAL Gamma-Ray Astrophysics Laboratory), une mission de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) à laquelle participe le DAPNIA. Il s'agit d'un laboratoire satellisé qu'évoquent deux articles dans ce numéro : « L'Astronomie gamma nucléaire » de Michel Cassé et Jacques Paul (SAP) et « Des photons de l'espace à domicile » de Pascale Deck (SIG), consacré au simulateur de l'environnement spatial d'INTEGRAL. Bel exemple de symbiose d'apocalypse pour détecter des vestiges de supernovae, fabuleux phénomènes cosmiques qui intéressent tout le DAPNIA, mais dont la plupart échappent encore à notre vue.

Le petit Prince avait raison : l'essentiel est invisible pour les yeux...

Joël Martin (ScintillationS)

¹ Voir ScintillationS n° 21 – ² Voir l'encart – ³ Voir n° 31, page 5 – ⁴ Voir Excitation nucléaire ou Spectroscopie gamma dans le glossaire.

L'astronomie gamma nucléaire

Les mots en rouge sont expliqués dans le Glossaire

En raison des explosions continues de supernovæ, novæ (voir l'encart) et autres processus de haute énergie, notre galaxie, la Voie lactée, est en permanence radioactive. Un témoignage de cette radioactivité est l'émission gamma céleste. Sans conteste, les rayons gamma, photons les plus énergiques du rayonnement électromagnétique, constituent l'indice le plus pur des mécanismes de synthèse des noyaux d'atomes dans l'Univers (nucléosynthèse) car ces gammas sont caractéristiques des noyaux radioactifs qui les émettent. Aussi, la spectroscopie gamma devrait-elle permettre de découvrir des traces fraîches ou plus anciennes de nucléosynthèse et de situer ses foyers dans notre galaxie et au delà.

Les observations spectroscopiques du satellite INTEGRAL, projet clé de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) éclaireront des questions fondamentales touchant aux

deux types de nucléosynthèse stellaire et interstellaire, thermique et non thermique. L'objectif essentiel du spectromètre d'INTEGRAL est de détecter et mesurer les raies gamma émanant de sources cosmiques. L'intensité et le profil des raies permet d'identifier sans ambiguïté les isotopes émetteurs, d'estimer leur abondance et d'accéder à la connaissance des conditions physiques du milieu source (vitesse d'ensemble, champ de gravitation, densité et température, intensité et géométrie du champ magnétique, spectre des particules énergiques qui l'irradient).

Les premiers noyaux atomiques formés peu après le Big-Bang, puis dans les étoiles sont nés de la fusion thermonucléaire (voir Scintillation n° 21) : dans cette nucléosynthèse thermique, deux ou plusieurs noyaux, qui se rencontrent à vitesse suffisante pour surmonter leur répulsion électrique, fusionnent en un ou des noyaux plus lourds. Juste après le Big-Bang, seuls les éléments les plus légers ont pu se constituer, car la densité a chuté si brutalement que la réaction de fusion de trois noyaux d'hélium 4 en un noyau de carbone 12 n'avait plus aucune chance de se produire. Dans les étoiles, en revanche, les conditions physiques sont favorables pour former des noyaux lourds en raison du chauffage et de la compression de la matière.

Les supernovæ et novæ jouent un rôle crucial dans la formation et l'éjection des noyaux stables ou radioactifs. Les étoiles consacrent le plus clair de leur vie à brûler l'hydrogène et le transformer en éléments plus lourds jusqu'à l'émergence du fer. À ce stade, plus aucune fusion ne se produit, la source d'énergie se tarit, et les étoiles les plus massives (plus de 8 masses solaires) explosent de manière cataclysmique. Les noyaux au delà du fer sont engendrés par capture de neutrons essentiellement dans cette phase explosive. Les éléments plus lourds que l'hélium sont en grande partie éjectés dans le milieu interstellaire, milieu à partir duquel se formeront de nouvelles étoiles et planètes.

On pense que les supernovæ se succèdent dans notre galaxie au rythme de deux à quatre par

siècle. Pourtant, le vestige de supernova le plus jeune jamais observé, Cas A, détecté dans Cassiopée, est vieux de plus de 300 ans. Il semble donc que la majorité de ces explosions stellaires restent invisibles en raison de l'absorption de leur lumière par les nuages interstellaires.

Fort heureusement, ces cataclysmes cosmiques laissent d'autres traces que la lumière fugitive de l'explosion. En particulier, les noyaux radioactifs éjectés émettent des rayons gamma pendant toute leur durée de vie. Ainsi, le noyau de titane 44 a une vie moyenne de 68 ans. L'observation de la raie gamma accompagnant la désintégration de ce noyau serait la meilleure manière de détecter les supernovæ passées inaperçues, car les gammas percent les nuages interstellaires et constituent une trace observable tant que vit le noyau.

Or justement, on a détecté les raies gamma caractéristiques de la désintégration du titane 44 dans les directions de Cas A et de RX J0852.0-4622, un autre vestige de supernova vieux de quelques 700 ans, récemment découvert dans la constellation des Voiles. Ces raies ont l'intensité espérée. Il appartient maintenant à l'astronomie gamma de dresser une carte détaillée de ces régions et de bien d'autres.

INTEGRAL aura la sensibilité requise pour observer les vestiges d'explosion vieux de 500 ans et moins (en vieillissant, leur trace s'estompe progressivement), jusqu'à une distance de 30 000 années de lumière* et ainsi mesurer directement la cadence réelle d'apparition des supernovæ dans la Voie Lactée.

Les novæ galactiques, particulièrement celles qui sont riches en oxygène, néon et magnésium, produisent, pense-t-on, des quantités significatives de néon 22. INTEGRAL sera capable d'observer les raies gamma de désintégration de ce noyau jusqu'à des distances de plusieurs milliers d'années de lumière. De telles observations augmenteront substantiellement notre compréhension des novæ en nous permettant d'accéder aux quantités d'isotopes produits et à la dynamique de l'expansion de leur enveloppe.

* C'est environ un tiers du diamètre de notre galaxie. Une précision : lorsqu'on dit qu'un vestige est vieux de 500 ans, il faut entendre que ce vestige témoigne d'une explosion d'étoile observée sur Terre voici 500 ans. Mais les gammas d'une explosion produite à une distance de 30 000 années de lumière ont mis 30 000 ans à nous parvenir. L'explosion a donc eu lieu en fait 30 000 plus tôt.

Quelques unités de longueur

Unité astronomique (ua) :

demi grand axe de l'orbite terrestre (149,6 10⁶ km)

Année de lumière (a.l.) :

distance que parcourt la lumière en une année (9,46 10¹² km, ou 63 242 ua)

Parsec (pc) : 3,26 a.l.

Taille de quelques structures cosmiques

Système solaire :

100 ua (au niveau de l'orbite de Pluton, la planète la plus lointaine)

Nébuleuse protosolaire :

1000 à 100 000 ua

Nuage interstellaire « typique » :

plusieurs dizaines d'a. l.

Voie lactée (notre galaxie) :

100 000 a.l.

Univers observable :

10 à 15 milliards d'a.l.

D'autres noyaux contribuent à la radioactivité de notre galaxie. La plus grande découverte du satellite américain HEAO-3 est peut-être d'avoir mis en évidence dans le milieu interstellaire l'omniprésence d'aluminium 26 radioactif dont le temps de vie est de un million d'année. La distribution de l'émission de la raie gamma de cet isotope α , par la suite, été cartographiée par l'expérience COMPTEL à bord du satellite CGRO (Compton Gamma Ray Observatory, voir *ScintillationS* n° 9 et 13). On peut y discerner des motifs structurés le long du plan galactique (Photo p. 1). Ces inhomogénéités signalent peut-être la présence de vestiges d'explosions stellaires. Mais notre vision de ces traces doit être affinée.

Or le spectromètre d'INTEGRAL possède une capacité d'imagerie qui lui permettra de tracer les contours de l'émission avec des détails beaucoup plus fins. De plus, par le biais de la mesure précise de l'énergie des raies gamma et de celle, par effet Doppler de la vitesse des noyaux qui les émettent, il permettra d'établir la répartition en trois dimensions des sources gamma. En comparant avec les distributions des étoiles de types variés (Wolf-Rayet, étoiles massives, novæ, supernovæ, pulsars et géantes rouges), INTEGRAL pourra établir statistiquement des corrélations significatives entre les répartitions de populations stellaires jeunes et vieilles. Ainsi espère-t-on identifier les sources de l'aluminium radioactif.



Modèle structurel et thermique du satellite INTEGRAL en cours de montage dans un hall du centre thermique de l'Agence Spatiale Européenne à Noordwijk (Pays-Bas).

L'univers offre un second mode de nucléosynthèse, *non thermique*, associé au rayonnement cosmique galactique. C'est la **spallation** (voir *ScintillationS* n° 22 et 39) et menant à la fragmentation des noyaux. En effet, le disque galactique est sillonné par des particules **relativistes**, essentiellement des protons et des noyaux d'hélium 4 (particules alpha) qui entrent parfois en collision avec les noyaux du milieu interstellaire, par exemple le carbone et l'oxygène.

Les données récentes laissent supposer l'existence dans la galaxie de noyaux accélérés autres que le rayonnement standard de protons et d'alphas, sans que l'on puisse en tirer de conclusions précises.

Ces indices d'irradiation « exotiques » suggèrent l'existence d'un mode inhabituel de nucléosynthèse non thermique qui pourrait être une source prolifique de lithium, béryllium et bore. En effet, une supernova libérerait dans l'espace une population enrichie en hélium et en oxygène de noyaux très rapides. Les ondes de choc produites par des supernovæ voisines et des « vents supersoniques » émanants d'étoiles de Wolf-Rayet leur communiqueraient une énergie de quelques dizaines de MeV.

Ces noyaux rapides se fragmenteraient à leur tour par collision sur les atomes d'hydrogène et d'hélium du milieu environnant et produiraient, par le biais de l'**excitation nucléaire**, un flux observable de rayons gamma, ainsi que différents isotopes de noyaux légers dans des proportions caractéristiques du milieu qui les a produits.

Ce modèle développé à Saclay et à l'Institut d'Astrophysique de Paris explique les teneurs particulières en éléments légers, lithium, béryllium, et bore, d'étoiles d'âges variés. Ses auteurs espèrent qu'il sera validé par l'astronomie gamma.

Par ailleurs, si le Soleil a été formé au sein d'un ensemble d'étoiles massives, ce qui est plausible, la **nébuleuse protosolaire** a été soumise à une semblable irradiation exotique. Le mécanisme proposé par notre modèle pourrait être responsable de nombreuses autres **anomalies isotopiques** (en particulier des teneurs en béryllium 10, aluminium 26, calcium 41 etc. différentes de celles observées sur Terre) qu'il est tentant de comparer avec celles que l'on

découvre dans certaines météorites. Leur identification conduirait à conclure que la nébuleuse protosolaire a été elle-même bombardée par des ions lourds rapides provenant d'une supernova survenue dans le même nuage interstellaire que le Soleil.

Ce mode d'interaction entre particules rapides et milieu environnant est susceptible de donner naissance à de nombreuses raies gamma d'origine nucléaire observables par INTEGRAL.

Ce satellite-laboratoire est un projet majeur de l'Agence Spatiale Européenne. Il emporte le télescope IBIS et le spectromètre SPI, deux instruments gamma de haute sensibilité et de haute précision. Le spectromètre SPI, plus particulièrement dévolu à l'astronomie gamma nucléaire, donc destiné à répondre, entre autres, aux nombreuses interrogations soulevées dans cet article, est développé sous la maîtrise d'œuvre du CNES (Centre National d'Études Spatiales) avec la contribution (pour la France) du DAPNIA et du CESR (Centre d'Étude Spatiale des Rayonnements) à Toulouse. Résumons ses objectifs principaux :

- Mettre en évidence la nucléosynthèse particulière aux novæ, supernovæ et étoiles de Wolf-Rayet.
- Observer les constellations d'Orion, des Voiles et autres pépinières d'étoiles afin de détecter les indices flagrants d'irradiation et d'en déduire le spectre énergétique et la composition des rayonnements qui s'en dégagent.
- Établir la spectroscopie nucléaire de l'environnement des objets compacts, **étoiles à neutrons** et trous noirs, afin de mettre en lumière (invisible...) les processus de haute énergie mis en jeu.

Michel Cassé et Jacques Paul (SAP)

Les flashes lumineux de la plupart des supernovæ nous ont échappé. Mais on peut prendre « intégralement » des « photos » retardées de ces apocalypses cosmiques dont témoignent les gammas des noyaux radioactifs fossiles alors engendrés. C'est un peu comme une météorite radioactive abîmée sur Terre et à jamais désintégrée. Le choc date du fond des âges mais l'impact demeure et continue d'émettre ses gammas.

La Rédaction

UN GRAND GLOSSAIRE

Anomalie Isotopique – Voir **Isotopes**

Effet Doppler – Wiiiiiiiiiiiiouaaaaaa ! La sirène de ambulance qui vous croise passe brusquement de l'aigu au grave. Explication : les ondes sonores de la sirène qui vient vers vous vous parviennent à cadence plus rapide que lorsque l'ambulance s'éloigne (la houle tape votre voilier à un rythme plus élevé lorsque il va à sa rencontre que lorsque il vogue dans le même sens). Ainsi, la *fréquence* du son, donc sa hauteur, baisse brusquement dès le croisement. Les deux notes aiguë puis grave vous paraissent d'autant plus différentes (la différence des fréquences est d'autant plus grande) que la voiture va vite par rapport à vous. La mesure de cette différence donne la vitesse. Les astrophysiciens connaissent bien ce phénomène, qui se produit aussi pour la lumière émise par les corps célestes. Lorsqu'un émetteur lumineux s'éloigne, la fréquence de sa lumière reçue est plus basse que lorsque l'objet est immobile. Or chaque fréquence lumineuse correspond à une couleur. Le violet vibre en gros deux fois plus vite que le rouge. Ce glissement vers les basses fréquences fait que les couleurs naturelles d'un astre qui s'éloigne de nous ont tendance à « rougir ». C'est ce qu'on appelle le *déplacement vers le rouge*, en anglais « *redshift* ». D'une façon générale l'effet Doppler est une méthode merveilleuse pour mesurer avec précision la vitesse d'un objet céleste. La mesure de la vitesse d'un astre de la Voie lactée par rapport à un observateur terrestre, associée à un modèle théorique du *champ de vitesse* de la Galaxie (qui estime la vitesse de tout point de la Galaxie en fonction de son emplacement) permet d'estimer la distance à la Terre de l'astre en question.

Émetteur gamma - Voir **excitation nucléaire**

Étoile à neutrons – Boule de environ dix kilomètres de rayon dont la masse vaut de 1,5 à 2 masses solaires. C'est le résidu compact de l'évolution d'une étoile massive consécutif à l'effondrement gravitationnel de son cœur, précédant l'explosion de supernova. Son extrême densité – celle de la matière nucléaire, soit environ 10^{15} (un million de milliards) de fois celle de la matière ordinaire – vient de ce qu'elle est constituée essentiellement de neutrons agglutinés les uns aux autres et de quelques noyaux en surface. Si la Terre était ainsi tassée, son rayon serait de

environ 60 mètres. Une étoile à neutrons est une sorte de gigantesque noyau atomique.

Excitation nucléaire – S'il reçoit de l'énergie, un électron d'un atome peut sauter d'une « orbite » sur une autre, plus « haute » (on parle aussi de *couches* ou de *niveaux d'énergie*). Dans ce cas, on dit que l'atome est « excité ». C'est un état instable et l'électron tend à retomber sur sa bonne vieille couche. Il restitue alors l'énergie reçue, de l'ordre de l'électron-volt ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ joules), sous forme d'un grain de lumière, un *photon*. C'est ainsi que fonctionnent les ampoules électriques. Il peut se passer la même chose dans un noyau : un *nucléon* du noyau (proton ou un neutron), s'il reçoit assez d'énergie, saute d'un niveau d'énergie à un niveau d'énergie supérieure. Le noyau se retrouve excité et instable – c'est cela, l'*excitation nucléaire* et le nucléon retombe à son niveau initial en émettant, lui aussi, un photon. Grosse différence : ce photon « nucléaire » est environ un million de fois plus énergétique que le photon atomique. Son énergie est de l'ordre du MeV (Mégaélectron-volt : $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$). C'est un **rayon gamma**. Toute région du cosmos où s'opère des excitations nucléaires est un **émetteur gamma**.

Géante rouge – Étoile qui brûle l'hélium en son centre et l'hydrogène dans une couche enveloppant son cœur à la suite d'une période de contraction gravitationnelle de ce dernier. La pression qui s'exerce sur l'enveloppe s'accroît au point que son rayon augmente jusqu'à atteindre cinquante fois sa valeur initiale. L'étoile est alors si démesurée qu'en dépit de sa plus grande luminosité, sa température de surface est plus basse, d'où l'émission d'une lumière plus rouge.

Isotopes – Deux ou plusieurs noyaux ayant le même nombre de protons et des nombres différents de neutrons, sont dits *isotopes* du même élément. Par exemple : les noyaux d'hydrogène, de deutérium et de tritium ont tous trois un proton, mais respectivement zéro, un et deux neutrons. Le tritium est radioactif. Les éléments chimiques rencontrés sur Terre sont, pour la plupart, des mélanges de plusieurs isotopes, dont certains radioactifs, chacun dans une proportion bien déterminée. On trouve certains de ces éléments dans le cosmos ou dans des météorites (blocs de matière qui traversent l'espaces et parfois s'abîment sur Terre en brûlant totalement ou partiellement dans l'atmosphère. Ce sont les étoiles filantes). Dans certaines météorites, le mélange isotopique diffère de celui rencontré sur Terre. C'est une **anomalie isotopique**.



(Avec l'aimable autorisation de l'auteur)

Nébuleuse protosolaire – C'est une portion localement plus dense de nuage de matière inter-stellaire qui a donné naissance au Soleil par effondrement gravitationnel.

Nucléosynthèse primordiale – Synthèse des premiers noyaux atomiques juste après le « Big-Bang », l'explosion primordiale.

Pulsar – Étoile à neutrons qui tourne sur elle-même à cadence infernale (entre un et mille tours par seconde !). Elle développe, tel un gigantesque aimant, un énorme champ magnétique (cent millions de teslas à la surface !) qui concentre les rayons émis près de l'étoile en un étroit faisceau extrêmement intense qui balaye l'espace comme un phare de marine (voir *Scintillation* n° 9 et 13).

Rayons gamma – Photons d'énergie supérieure à quelques dizaines de keV (1 keV, ou kiloélectron-volt est égal à mille eV). Ils constituent la partie la plus énergétique du rayonnement électromagnétique qui s'étend (par énergie croissante) des ondes radio aux rayons gamma en passant par l'infrarouge, la lumière visible, l'ultraviolet et les rayons X. Tous ces rayonnements sont de même nature, à l'énergie près. L'astronomie gamma nucléaire, sujet de l'article de ce numéro, s'intéresse surtout aux gammas jusqu'à quelques MeV d'énergie qu'émettent les noyaux qui se déséxcitent. Il existe dans le cosmos de sources de rayon gamma de beaucoup plus haute énergie (jusqu'à des millions de MeV), associées à des astres, tels que pulsars et quasars, sites reconnus d'accélération de particules.

Relativiste – Se dit des particules de matière dont la vitesse est une fraction notable de celle de la lumière (300 000 km/s). On parle alors de *vitesse relativiste*. Ce sont de ce fait des particules très énergiques.

Spallation – Cascade de réactions nucléaires que peuvent initier des collisions entre des pro-

tons et des noyaux d'hélium très fortement accélérés et des noyaux plus lourds d'un milieu cible, ou, à l'inverse, entre des noyaux lourds rapides et des noyaux cibles d'hydrogène ou d'hélium. Dans les deux cas, ces chocs peuvent conduire à la fragmentation des noyaux lourds pour former des noyaux plus légers. Dans le cosmos, ce processus peut engendrer des espèces de noyaux que les étoiles ne peuvent produire. Sur Terre, on envisage d'utiliser la spallation pour produire en abondance des neutrons de quelques MeV destinés à la transmutation des déchets à vie longue de centrales nucléaires (voir *ScintillationS* n° 22 et 39).

Trou noir – Objet céleste si compact et si dense qu'il creuse dans la structure même de l'espace-temps un trou si profond que rien, même la lumière, ne peut s'en échapper (voir *ScintillationS* n° 36).

Vent stellaire – Flux intense de particules émises par des étoiles. Ce vent peut engendrer des ondes de choc dans la matière interstellaire si sa vitesse est supérieure à la vitesse de propagation des ondes de pression dans ladite matière. Par analogie avec le « bang » (pas big) des avions qui volent plus vite que le son, on parle de **vent supersonique**. Mais les vitesses sont bien supérieures.

Vie moyenne (d'un noyau radioactif) – Temps au bout duquel il ne reste plus que les 369 millièmes (et des poussières) du nombre initial des noyaux d'un échantillon. La radioactivité de l'échantillon est réduite dans la même proportion. Ne pas confondre avec la **demi-vie** (voir *ScintillationS* n° 39) qui est le temps au bout duquel l'échantillon radioactif est réduit de moitié. La demi-vie, temps un peu plus court que la vie moyenne puisqu'il reste plus de noyaux d'un même échantillon, vaut 0,693 fois la vie moyenne.

Wolf-Rayet (étoiles de) – Type d'étoiles que les astronomes français Charles Wolf et Georges Rayet furent les premiers à décrire. On admet généralement que ce sont des étoiles massives en cours de combustion d'hélium qui, ayant perdu leur atmosphère en raison de leur puissant **vent stellaire**, font apparaître à leur surface des milieux dont la composition chimique s'est profondément modifiée sous l'effet des réactions de fusion thermonucléaire.

Novæ et Supernovæ

Novæ et supernovæ sont des étoiles qui soudain se mettent à briller d'une lumière extraordinairement plus intense¹ lors de phases éruptives (novæ) ou explosives (supernovæ). Les novæ et supernovæ de type Ia mettent en jeu des étoiles de petite masse en système double tandis que les supernovæ de type II marquent le terme de l'évolution des étoiles les plus massives.

Dans une étoile double dont l'une des composantes est une naine blanche – étoile compacte dont la masse est inférieure à 1,4 masses solaires (limite dite de Chandrasekhar) –, les conditions sont parfois réunies pour que la naine blanche capture les couches externes de son étoile compagnon. En tombant à la surface de la naine blanche, la matière ainsi « accrétée » s'échauffe et se comprime au point de déclencher des réactions thermonucléaires explosives. Quand ces dernières n'affectent que la périphérie de la naine blanche (c'est le cas des *novæ*), une quantité de matière de l'ordre de un cent millième de masse solaire est éjectée à des vitesses comprises entre quelques centaines et quelques milliers de kilomètres par seconde. Mais pour peu que la masse de la naine blanche soit voisine de la limite de Chandrasekhar, le même mécanisme d'accrétion peut conduire à une conflagration thermonucléaire générale débouchant sur l'explosion de l'étoile dont toute la matière est éjectée à plus de 20 000 km/s (cas des *supernovæ de type Ia*). Au cours de cet événement, il se forme environ une demi masse solaire (soit 10^{27} tonnes) de nickel 56 radioactif.

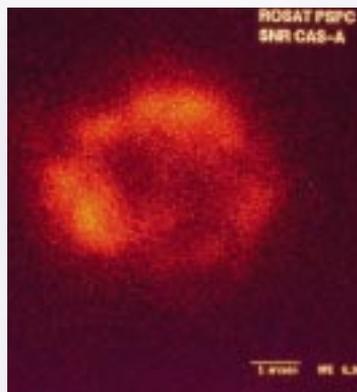


Image du vestige de supernova Cas A enregistré en rayons X par le satellite allemand ROSAT. Cette bulle de gaz surchauffée à plusieurs millions de degrés témoigne de l'explosion d'une étoile distante d'environ six mille années de lumière, passée curieusement inaperçue à la fin du XVII^e siècle, époque à laquelle la formidable bouffée de lumière soufflée par l'explosion avait fini par atteindre la Terre.

Les *supernovæ de type II* résultent par contre de l'explosion d'une étoile dont la masse est supérieure à 8 masses solaires. Faute de réactions nucléaires exothermiques – la chaudière stellaire s'est éteinte – le cœur de fer, dont la masse dépasse la limite de Chandrasekhar, s'effondre en une infime fraction de seconde pour atteindre un niveau de compression maximale : sa densité est alors supérieure à celle du noyau de l'atome. Ce cœur effondré, appelé protoétoile à neutrons, se refroidit en émettant en une dizaine de secondes une formidable bouffée de neutrinos et antineutrinos des trois saveurs (voir le tableau des particules dans *ScintillationS* n° 5 ou 19) ; une pincée d'entre eux fut détectée en provenance de la supernova de 1987. En se détendant, ce cœur hyper dense engendre une onde de choc qui rallume les réactions nucléaires dans les couches profondes du manteau, produisant tout un cortège d'éléments, jusqu'aux plus lourds, parmi lesquels les isotopes radioactifs qui intéressent l'astronomie gamma nucléaire. L'onde de choc, à laquelle

les neutrinos impriment une impulsion supplémentaire, disperse le manteau et les couches supérieures de l'étoile tout en les portant à haute température. L'intense émission lumineuse qui s'ensuit, un milliard de luminosités solaires, est le signe évident d'une supernova. Au bout de quelques jours, la radioactivité intérieure prend le relais 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 demi-vie est de 77 jours. Quelques mois plus tard, l'enveloppe, diluée par l'expansion, devient transparente aux rayons gamma et donc potentiellement observable par les télescopes gamma, pour peu que la supernova ne soit pas trop distante. Pendant un siècle environ, l'onde de choc balaye le milieu interstellaire avoisinant tandis que la matière éjectée se propage sans entrave. Pendant les dix millénaires suivants, l'expansion de la matière se ralentit, une fraction de l'énergie étant mise au service de mécanismes d'accélération de noyaux. Ce n'est qu'au terme de un million d'années environ que le vestige de l'explosion ne se distingue plus du milieu environnant.

Michel Cassé et Jacques Paul (SAP)

Michel Cassé (SAP), Joël Martin (SPhN)
et Jacques Paul (SAP)

¹ Nova signifie nouvelle en latin. De par son exceptionnelle luminosité, une nova, ou mieux encore, une supernova, apparaît soudain aux observateurs comme une étoile nouvelle dans le ciel.

Des photons de l'espace à domicile ?

(simulation de l'environnement du laboratoire spatial INTEGRAL/SPI)

Le spectromètre INTEGRAL (voir l'article de Michel Cassé et Jacques Paul dans ce numéro) se compose de deux instruments principaux :

- un télescope imageur IBIS chargé de produire une carte détaillée du champ visé ainsi que des spectres X et gammas avec une précision meilleure que 2 % ;
- un spectromètre SPI dont la mission est d'affiner les spectres à mieux que 0,1 %.

Un *masque codé* (voir « Comment ça marche »), constituant le « couvercle » du spectromètre, permet de définir la position angulaire des sources dont le rayonnement est situé dans le champ d'observation (Fig. 1). Les photons atteignent ensuite un plan composé de 19 détecteurs au germanium destinés à mesurer leur énergie et leur provenance, sur lequel est visualisée une image caractéristique de la position de la source. Des préamplificateurs, fonctionnant à très basse température, transmettent les signaux fournis par les détecteurs au germanium à des modules électroniques qui numérisent l'énergie. En parallèle, un autre ensemble analyse finement la forme des signaux, ce qui permet une analyse temporelle plus précise de certains événements (PSD, voir Fig. 1). Afin de ne prendre en compte que

les rayonnements ayant traversé le masque, un détecteur appelé *blindage actif*, forme le corps cylindrique du spectromètre (Fig. 1). Ce détecteur produit une impulsion électrique à chaque passage d'un photon indiquant au système que ce photon est à rejeter. Le SAP est responsable de l'étape finale de l'électronique : le boîtier DFEE (Digital Front End Electronic), qui synthétise toutes ces informations avant de les transmettre à l'ordinateur de bord.

Des photons fictifs

Dans le cadre de ce projet, le « groupe électronique » du SIG a été chargé d'étudier et de réaliser un équipement de test permettant de simuler l'environnement électronique du DFEE (étudié et développé par le SEI). Cet équipement qu'impose le cahier des charges de tout module de vol a pour but de vérifier le bon fonctionnement du DFEE avant le départ de la mission. Pour cela, il doit être capable de simuler toutes les impulsions et anomalies que produiront effectivement les détecteurs au cours de la mission.

Perspectives ?

Ce système est opérationnel depuis avril 1998. Il sera utilisé pour mettre au point

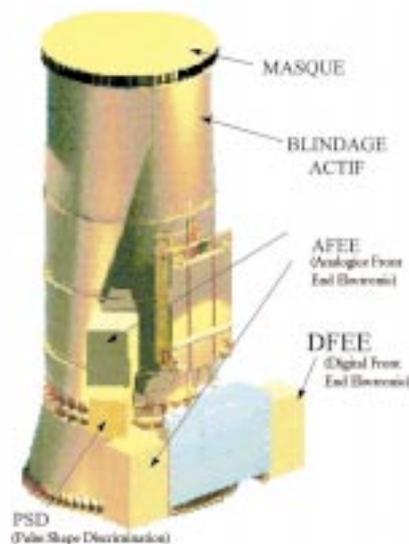


Fig. 1 : Vue du spectromètre INTEGRAL

et valider le DFEE au cours de différents tests d'environnement (thermique, vibrations, électrique...).

Lors de l'assemblage du spectromètre, il permettra une mise en place progressive du DFEE. En effet, il servira d'élément de référence pour régler les nombreux paramètres de ce dernier. Par la suite, il sera utilisé pour vérifier les performances scientifiques lors de l'utilisation réelle du spectromètre. Le générateur de stimuli (voir encadré) aidera à établir la corrélation entre les données scientifiques issues du DFEE et les événements gamma détectés en validant les hypothèses émises par les scientifiques.

La philosophie de conception, alliant la structure modulaire du générateur de stimuli à une programmation aisée, pourra être réutilisée pour concevoir des appareils de test pour des projets futurs.

Pascale DECK (SIG)

Saluons la performance du groupe électronique du SIG. Quel bel exemple de symbiose d'apiculture entre physique et instrumentation que d'avoir conçu et réalisé dans les délais prescrits ce complexe équipement de test capable de faire croire au dernier étage de l'électronique d'INTEGRAL qu'il est vraiment dans l'espace en train de digérer ses bouffées de photons sidéraux. Bravo de si bien simuler les messages spatiaux.

La Rédaction

L'équipement de test

Le cœur de ce système de test est un générateur de stimuli capable de construire de manière non aléatoire, des séquences d'événements qui se produisent aux entrées du DFEE.

Nous nous sommes astreints pour cette étude à utiliser des produits industriels courants au CEA (châssis VME, logiciel LABVIEW, etc.), de travailler avec des moyens de conception et de simulation actuels permettant la réalisation d'une électronique fiable.

Pour faciliter la mise au point et la maintenance, ce générateur de signaux logiques programmables est construit à partir de modules semblables.

L'utilisateur élabore une bibliothèque de fichiers décrivant des séquences qu'il peut charger dans le générateur de stimuli puis exécuter. Ce travail se fait à l'aide d'une application développée avec le logiciel LABVIEW. Cette application contient un éditeur graphique, et permet la programmation complète du générateur de stimuli. Le logiciel

implanté dans un micro-ordinateur de type PC dialogue avec le générateur grâce à un contrôleur de châssis VME. Dans le module de génération de signaux sont incluses huit cartes électroniques. La carte de base, dite «carte mère», réalise l'interface avec le bus VME et le contrôle des éléments du générateur. Les sept autres cartes, éléments modulaires dites «cartes filles», mémorisent les données des séquences. Chacune d'elles engendre jusqu'à 15 signaux logiques. Sur chacun des éléments modulaires sont implantés six composants programmables de haute densité ayant chacun la capacité d'effectuer 30 000 fonctions logiques élémentaires. À l'origine, ces composants sont tous identiques et inutilisables dans l'état. Un travail de conception, à l'aide d'un logiciel, permet de les adapter à leur tâche.

Pour la simulation complète des détecteurs, ce système peut produire 101 signaux programmables tous différents, produits avec une résolution temporelle de vingt-cinq nano-secondes.

COMMENT ÇA MARCHE

Le masque à ouverture codée

INTEGRAL est voué à prendre des vues spatiales spéciales : au lieu de les prendre en lumière ordinaire, il les prend en lumière invisible bien plus énergétique, celle des rayons X et des rayons gamma. Ce sont les meilleurs détectives pour la chasse aux trous noirs et aux étoiles à neutrons. Mais toute médaille a son revers. Les rayons X, et plus encore les rayons gammas encore plus énergiques, se prêtent très mal à l'optique ordinaire car ils passent au travers de la matière opaque à la lumière ordinaire. Totalement transparent aux X et aux gammas, votre appareil «reflex» habituel ne vous serait d'aucun secours.

Il existe pourtant une solution inspirée de la bonne vieille «boîte noire» dont une face est

percée d'un petit trou en son centre et la face opposée est remplacée par une plaque photographique. Il suffit que les parois de la boîte soient assez épaisses pour arrêter les gammas et le tour est joué.

Enfin presque. Car avec ce système, très peu de « lumière » vient impressionner la plaque, d'autant que si l'on veut une photo bien nette, il faut que le trou soit très fin.

Monsieur de La Palisse est un grand homme, qui inspira la solution : si l'on veut beaucoup de lumière, il faut percer beaucoup de trous. Le hic, c'est qu'on aura alors autant d'images que de trous.

Qu'à cela ne tienne : on perce les trous selon un «code» précis : on prend la photo puis on

«décode» la bouillie obtenue en utilisant le même code en sens inverse. C'est l'équivalent photo de la cryptologie chère à tous les James Bond du monde.

Vous trouverez plus de détails dans l'ouvrage de Jacques Paul (auteur, avec Michel Cassé, de l'article sur l'astronomie gamma dans ce numéro) : L'homme qui courait après son étoile, chez Odile Jacob (voir la plume du DAPNIA dans ScintillationS n° 38). Ces lignes sont directement et sans vergogne inspirées de cet excellent polar spatial (avec quand même la bénédiction de l'auteur).

Les James Bond de l'Univers que sont Michel et Jacques aiment leurs aises : ils codent sur de confortables banquettes, mais il est possible qu'en lisant cela, Michel et Jacques hurlent une fois fini de bosser... (NDLR).

BRÈVES ... BRÈVES ... BRÈVES ... BRÈVES ...

La pêche sous-marine au neutrino

Un test décisif pour le projet ANTARES (voir *ScintillationS* n° 33) vient d'être réalisé avec succès fin 1998.

En quatre plongées auxquelles 2 membres d'ANTARES, dont Patrick Lamare (SIG), eurent le privilège de participer, le *Nautille*, sous-marin habité de l'IFREMER, a permis de vérifier qu'une connexion électrique par 2500 mètres de profondeur était réalisable et d'effectuer une observation détaillée du site de mouillage des lignes de détection.

Deux essais identiques, consistant à venir chercher le câble préalablement enroulé sur un touret et à effectuer des opérations

de connexion/déconnexion, ont permis de valider les choix techniques des matériels et leur mise en œuvre par un sous-marin. Cette opération est indispensable pour raccorder le câble électro-optique venant de la terre aux différentes lignes.

Une reconnaissance complète de la zone a permis d'éditer une carte des fonds marins, de recenser les objets présents sur le fond, de faire connaissance avec la faune, et de prélever des sédiments et des échantillons d'eau pour analyse.

Sources (du baigneur qui crawlé près du fond) : Patrick Lamare (SIG)



Prix

Le Prix 1998 de Communication du DAPNIA est revenu à Jacques Paul (SAP) et Jean-Luc Sida (SPhN) dont les auditeurs des conférences de Kéroul ont pu apprécier le très beau travail de vulgarisation. Toutes nos félicitations.

Rencontres, commissions et colloques

Deuxième Atelier MICROMEGAS

Organisé par Yannis Giomataris (SED), cet atelier s'est déroulé à Saclay les 4 et 5 février 1999 à Saclay. Micromégas, détecteur révolutionnaire, simple et robuste, capable d'encaisser les énormes flux de particules qu'engendrent les explorations actuelles de l'infiniment petit (voir n°38), est promis à la même brillante destinée que sa glorieuse ancêtre, la chambre à fils. D'où la présence de Georges Charpak, Prix Nobel de Physique 1991.

Cette rencontre réunissant tous les groupes qui travaillent ou vont travailler sur MICROMEGAS fut l'occasion de présenter les nouveaux résultats des diverses équipes de Saclay, Nantes, Mulhouse-Strasbourg,



(de g. à d.) Yannis Giomataris et Georges Charpak.

Collège de France, Lausanne, Bruxelles et d'autres.

Y furent décrites les différentes expériences qui utilisent ou pourraient utiliser MICROMEAS : COMPASS, ALICE, HELLAZ, LHCB, CMS, TESLA, LENS ainsi que les électroniques utilisées, en cours de développement ou en projet.

D'autres domaines que la physique des particules furent abordés, sur lesquelles travaillent des entreprises comme BIOSPACE, EURISYS, INEL etc.

Le « club MICROMEAS » a pu ainsi se rendre compte des progrès accomplis, des difficultés rencontrées, de ce qui reste à faire.

Source : Michèle Ulma (SEI)

Le Thé de la Cosmologie

La cosmologie est une discipline appelée à un grand développement dans la décennie à venir. Trois services de la DSM, (le SAp, le SPP, côté DAPNIA, et le SPhT) organisent des séminaires centrés autour de la cosmologie.

Les rencontres ont lieu le mardi après-midi. Le programme trimestriel ainsi que les résumés des séminaires sont disponibles sur le serveur de la DSM à l'adresse: <http://www-dsm.cea.fr/Seminaires/seminaires.html>

Les Bars des Sciences

Créées à l'initiative de la Société Française de Physique, les Bars des Sciences attaquent leur troisième année. Ces rencontres où dialoguent des chercheurs avec le public, dans une atmosphère détendue, se multiplient.

On en compte aux Ulis, à Caen, Lyon, Strasbourg, Gentilly, Poitiers, Aix, Montpellier, Paris... et même à Leeds (Grande-Bretagne).

Les prochains bars parisiens qu'anime Marie-Odile Monchicourt, chaque premier mercredi du mois à 19h30 auront lieu au café Au Père tranquille, 16, rue Pierre Lescot, Paris 75001 (face au forum des Halles).

Renseignements : 01 69 15 42 75 ou <http://sfp.in2p3.fr/SFP/Bar/Paris>

Yves Sacquin (SPP)

Regrets

Marc David, du SPP, vient de nous quitter brusquement Samedi 23 Janvier. C'était un physicien très estimé pour ses grandes compétences et son grand dévouement à son travail de recherche, tout en restant d'une modestie et d'une simplicité très appréciées de ses nombreux collègues du DAPNIA, du CERN, à Genève et de DESY, à Hambourg. Au cours de ses 36 années au CEA il participa activement à plusieurs expériences sur les particules « charmées » WA11 et NA14, au CERN, puis H1 (physique électron-quark) au collisionneur HERA de DESY (voir *ScintillationS* n° 27 et 28).



Marc David (à d.) avec Gérard Villet, son "frère en physique" de toujours.

En début de carrière et dans le cadre de sa thèse d'État, Marc avait fortement contribué à l'étude de l'interaction pion-pion (le « pion » ou méson π est un porteur de la force de cohésion des noyaux atomiques), à partir de mesures réalisées à Saturne. Au cours de ces dernières années il s'était particulièrement investi, par un travail d'analyse minutieux des données de H1, dans la recherche de particules nouvelles, thème de recherche auprès de HERA qui le passionnait.

En début de carrière et dans le cadre de sa thèse d'État, Marc avait fortement contribué à l'étude de l'interaction pion-pion (le « pion » ou méson π est un porteur de la force de cohésion des noyaux atomiques), à partir de mesures réalisées à Saturne. Au cours de ces dernières années il s'était particulièrement investi, par un travail d'analyse minutieux des données de H1, dans la recherche de particules nouvelles, thème de recherche auprès de HERA qui le passionnait.

Georges Cozzika (SPP)

Toute l'équipe de *ScintillationS* se joint à tous les amis du DAPNIA de Marc pour présenter à sa famille ses plus vives condoléances.

Va-et-vient

Novembre 1998 – Nous saluons avec joie les recrutements de Florian Bauer (SPP), Bertrand Baudouy (STCM), Diane Dore (SPhN), Magali Reytier (STCM) et Zhihong Sun (SGPI). La parité hommes/femmes est en bonne voie au DAPNIA. Sylvie Daghljan est mutée du SEI au SIG et Jérôme Martignac du SEA au SAp. Emmanuel Polacco après un passage au DRECAM revient au SPhN. Youpie ! Gérard Tauzin (SED) passe Annexe 1. Toutes nos félicitations. Côté départs, Jean-Louis Faure (SPP) est détaché au LPHE, et (plus qu'un, allez) Alain Pluquet (SPP) est muté à la DTA. Enfin, Ali Bourakba (SGPI), Maryse Diguët (SPhN), Claude Jollec (SEI) et Gérard Villet (SPP) partent en retraite. Ce n'est qu'un au revoir.

Décembre 1998 - Les retraités de cette fin d'année : André Cosbann (SIG), Roland Muller (SED) et Marcel Rostaing (SIG). Bonne continuation. Michel Chalifour (SED), à dater du 1^{er} juillet, et Jérôme Martignac (SAp) passent Annexe 1. Un grand bravo ! Bienvenue aux petits nouveaux du mois : Jean-Paul Charrier et Rémi Granelli recrutés respectivement au SIG et au SED, et à François Damoy muté de UEGD (Saclay/DIR) au nouveau service du DAPNIA, le SDA (Service de Déclassement des Accélérateurs), dont on parlera plus en détail dans le n° 42.

CEA - DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION : Joël FELTESSE
COMITÉ ÉDITORIAL : Joël MARTIN (porte-parole), Claire ANTOINE, Pierre BORGEAUD, François BUGEON, Rémi CHIPAUX, Nathalie COLOMBEL, Thierry FOGLEZZO, Elizabeth LOCCI, Marc PEYROT, Franck QUATREHOMME, Yves SACQUIN, Angèle SÉNÉ, Thierry STOLARCZYK, Christian VEYSSIÈRE
SECRÉTAIRE DE RÉDACTION : Maryline BESSON
MAQUETTE : Christine MARTEAU
MISE EN PAGE : TOTEM
CONTACT : Joël MARTIN

Tél. 0 69 08 73 88 – Fax : 0 69 08 75 84

E.mail : jmartin@cea.fr

Dépôt légal mars 1999

7 !