

Les perspectives prometteuses d'INTEGRAL

PHILIPPE JAMET

L'étude des processus violents les plus énergétiques de l'Univers est un domaine où s'est illustrée l'Agence spatiale européenne depuis 1975 avec son satellite COS-B. Dans le domaine gamma, l'ESA est en train de réussir un nouveau pari avec INTEGRAL, lancé le 17 octobre 2002 avec une fusée russe Proton. Les premiers résultats viennent d'être présentés au siège de l'Agence à Paris.

Le rayonnement gamma consiste en une plage assez étendue de la partie la plus énergétique du spectre électromagnétique qui se produit au cœur ou autour d'objets soumis à des processus violents de très grande échelle. Pour les Européens, l'étude du rayonnement gamma relève désormais d'une tradition bien établie puisque leur satellite COS-B, lancé le 9 août 1975 sur une orbite de 434 km sur 101 570 km, emportait un télescope destiné à l'observation gamma céleste dans la gamme des énergies supérieures à 20 MeV. Grâce à COS-B, on a pu dresser la première carte du ciel dans ce domaine du spectre et mettre en évidence l'émission de rayonnement gamma des quasars.

Avec INTEGRAL, l'ESA relève un tout autre défi : faire de l'imagerie et de la spectroscopie fines afin de détecter des objets ou des processus qui ne l'avaient pas été par les deux grands observatoires gamma Granat-Sigma et Compton GRO (CGRO), ou par le satellite international High Energy Transient Explorer, lancé en 2000 avec à son bord un télescope gamma français. * INTEGRAL, observatoire dont la mission principale est prévue pour deux ans mais qui pourra fonctionner cinq ans si les responsables le décident, surpasse de loin les missions précédentes. Toutefois, pour ce qui concerne les énigmatiques sursauts gamma, il offre moins de possibilités que le futur satellite américain GLAST, fortement budgétisé par la NASA,

* La mission franco-soviétique Granat-Sigma avait débuté le 1^{er} décembre 1989 et devait durer dix-huit mois. Elle a en fait fonctionné jusqu'en 1998 ! Compton GRO, satellite américain à forte participation allemande, a été lancé en 1991 et a fonctionné jusqu'en 2000.

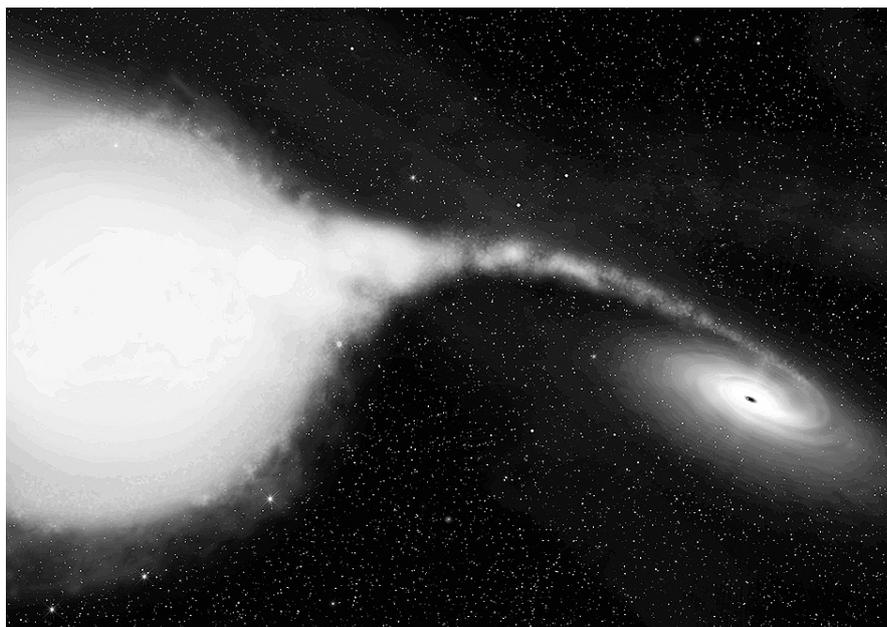
et qui devrait prendre la route de l'espace vers 2007-2008. En effet, INTEGRAL consacrera 40 % de ses observations sur des objets compacts (naines blanches, étoiles à neutrons et trous noirs), 30 % à l'étude d'objets extragalactiques comme les AGN (Active Galactic Nuclei ou noyaux de galaxies actives) et 25 % à l'étude de la formation des éléments, c'est-à-dire à la nucléosynthèse. Les sursauts gamma seront observés dans le cadre des 5 % résiduels.

Les satellites Granat-Sigma et CGRO nous ont apporté 80 % de nos connaissances sur les sources célestes émettant en gamma mais ils nous ont aussi montré nos insuffisances et la nécessité d'effectuer un bond qualitatif dans le domaine des techniques utilisées. INTEGRAL représente sans aucun doute la réponse à cette nécessité et est assuré de rester pour un certain temps sans concurrence, ce qui explique que les demandes d'observations parvenant à l'ESA viennent du monde entier. En fournissant le lanceur, la Russie a réussi à obtenir un quart du temps d'observation et participera au dépouillement des données d'un satellite qui, au départ, devait être américano-européen (car issu des études NAE et GRASP) mais que les institutionnels américains (NASA) ont abandonné en cours de route, même si des laboratoires d'outre-Atlantique conservent pour ce projet une collaboration avec l'Agence européenne. A côté de la France, de l'Allemagne et de l'Italie, on a vu l'Espagne, le Danemark, la Suisse et la Finlande reprendre le rôle de la Grande-Bretagne qui avait fait défection.

Sélectionné en 1993 par l'ESA en tant que mission de « taille moyenne » de son programme scientifique, INTEGRAL avait en fait commencé à

être mis sur les rails lors du colloque sur l'astrophysique des lignes de rayonnement gamma qui s'est tenu du 10 au 13 décembre 1990 à Saclay, suivi en 1992 d'une présentation détaillée à l'UNESCO et d'un Colloque qui s'est tenu du 2 au 5 février 1993 aux Diablerets en Suisse et qui s'intitulait « The Multi-Wavelength Approach to Gamma-Ray Astronomy ». Ce lourd satellite de 4 t, qui emporte avec lui plus de 2 t d'instruments scientifiques, constitue à la fois un défi scientifique, technologique et industriel. Selon l'ESA, « *l'observatoire de rayonnement INTEGRAL est en effet le plus puissant instrument d'étude de ce rayonnement et il est capable de détecter les phénomènes violents provenant des régions les plus reculées de l'Univers* ». Pour relever le pari, l'ESA a déboursé 330 millions d'euros et les Etats membres 200 millions d'euros. D'ores et déjà, les premiers résultats obtenus au moment de la recette du satellite en orbite et de la calibration de ses instruments permettent d'affirmer que ces sommes n'ont pas été déboursées en vain et que le pari sera tenu. Selon Arvind Parmar, responsable scientifique par intérim d'INTEGRAL : « *Les images et les spectres déjà obtenus prouvent qu'INTEGRAL pourra certainement s'acquitter de la mission qui lui a été confiée et même aller au-delà.* »

Pour étalonner ses principaux instruments, INTEGRAL a observé des régions du ciel déjà répertoriées comme émissives en rayonnement gamma comme Sgr A et l'intrigante source Cygnus-X1 découverte en 1966 dans la constellation du Cygne par le satellite HEAO-2 Einstein. Cette source est considérée comme recelant un trou noir stellaire qui, dans le cadre d'un système binaire, absorberait la matière d'une étoile géante chaude (HDE 226868) de type spectral O et d'une masse égale à cinq fois notre Soleil. Puis, en février 2003, le satellite européen a été pointé vers le fameux pulsar du Crabe, issu d'une explosion d'une étoile de grande taille qui se serait produite en 1054 et situé au cœur d'une nébuleuse de gaz en expansion. Il est très important d'étalonner les instruments d'INTEGRAL sur ces types d'objets car, en comprenant mieux comment ils fonctionnent, on améliorera la modélisation des trous noirs stellaires et des étoiles à neutrons qui seront, parmi d'autres objets compacts, des



L'intrigante source Cygnus-X1 est considérée comme recelant un trou noir stellaire qui, dans le cadre d'un système binaire, absorberait la matière d'une étoile géante chaude dont la masse est cinq fois celle de notre Soleil.

objets d'études majeurs pour l'observatoire européen.

Cette phase d'étalonnage a réservé une surprise de taille aux astrophysiciens avec l'observation d'un premier sursaut gamma. Ces très énergétiques explosions cosmiques, qu'aucun phénomène apparent ne laisse présumer, se produisent à des intervalles irréguliers et de façon isotrope, c'est-à-dire en venant de n'importe quelle région de l'Univers. Elles pourraient être provoquées par l'effondrement d'étoiles massives à des distances cosmologiques ou par coalescence entre deux étoiles à neutrons. L'astrophysicien polonais Bogdan Paczynski pense qu'il s'agirait d'hypernovae. Selon l'hypothèse émise par l'astrophysicien français Michel Cassé, certains de ces sursauts proviennent du halo galactique. INTEGRAL élucidera peut-être cette énigme même si, dans ce domaine particulier, il ne représente pas la quintessence technologique. Toujours lors de sa phase d'étalonnage, INTEGRAL a été pointé trente jours vers le centre de la galaxie dont on est sûr qu'il abrite un trou noir supermassif de trois millions de fois la masse solaire et dont le volume est plus petit que l'orbite de Pluton. Lors des phases ultérieures opérationnelles des instruments, les

scientifiques de l'ESA espèrent voir comment ce trou noir capture la matière alentour.

A la suite de cinq manœuvres consécutives faisant appel aux moteurs intégrés du satellite, INTEGRAL a atteint son orbite définitive de 9 000 km de périégée pour un apogée de 153 000 km autour de la Terre. Cela a pour conséquence que, 90 % de son temps, le satellite pourra éviter les ceintures de radiations entourant la Terre et pouvant aveugler ses détecteurs. Avec le même risque, il faut aussi tenir compte de minuscules particules d'origine solaire ou cosmique. JEM-X, l'imageur de rayonnement X d'INTEGRAL, s'est révélé assez sensible à cette forme de pollution et les scientifiques de l'ESA ont dû réajuster son réglage. INTEGRAL est sans doute le satellite gamma qui a subi le plus grand nombre de simulations et, malgré un certain nombre de tribulations, va se présenter comme un grand succès couronnant la motivation des scientifiques impliqués. L'expérience de la mise en œuvre d'un certain nombre de programmes d'astrophysique spatiale est là pour prouver qu'être scientifique dans le domaine spatial demande beaucoup d'opiniâtreté, comme l'a souligné David South-wood, directeur des

programmes scientifiques de l'ESA, lors de sa dernière rencontre avec la presse concernant le satellite européen.

Les nombreux objectifs scientifiques d'INTEGRAL

La mission première d'INTEGRAL est de faire de l'imagerie et de la spectroscopie fines concernant de multiples processus et objets impliqués dans des phénomènes produisant des émissions gamma. Le satellite emporte pour cela un imageur et un spectromètre ainsi qu'un moniteur de rayons X et un imageur en visible pour trouver, sur ces deux catégories de longueur d'onde, la contrepartie signée par un phénomène gamma. Les résultats des programmes mis en œuvre dans le passé ont montré la nécessité d'une meilleure résolution angulaire pour optimiser les résultats des générations suivantes de télescopes. Un bon exemple nous en est donné par le télescope Sigma (embarqué sur le satellite Granat), lequel a observé, vers le centre de notre galaxie, les sources GRS 1758-258 et 1E1740.7-2942. Si Sigma a réussi à montrer que la première source n'avait rien à voir avec la source GX51 (contrairement à ce que laissaient penser des observations antérieures avec d'autres satellites), il a par contre atteint ses limites pour ce qui concerne la deuxième. Celle-ci, dénommée par les astrophysiciens le « Grand Annihilateur », a été observée par Sigma pendant 7.10^5 s, correspondant à onze périodes d'observation. Pour dix périodes, le spectre en rayonnement X dur concorde parfaitement avec le modèle d'un disque d'accrétion subissant une comptonisation* avec une température de puissance 10 kt émettant sur 30 keV. Toutefois, lors d'une observation réalisée le 13 octobre 1990, les données ont révélé une caractérisation marquée avec un penchant positif (c'est-à-dire un accroissement du flux avec une augmentation de l'énergie des

photons) au-dessus de 200 keV et une forme de plus haute énergie se situant autour de 500 keV. De telles émissions sont la signature probable d'un plasma relativiste composé d'électrons et de positrons (antiparticules de l'électron). Par conséquent, il est tentant d'associer la source 1E1740.7-2942 avec une source variable sur 511 keV émise à partir de la même région du ciel. La raison pour laquelle Sigma avait des difficultés à positionner précisément sa source d'origine, tenait à la relativement moyenne résolution angulaire de l'instrument. A cause de cela, pour saisir les variations de la source, il était nécessaire d'effectuer des temps de pose assez longs pour l'instrument, et CGRO fit à peine mieux.

Les astrophysiciens attendent d'INTEGRAL une résolution complète de la source avec des temps de pose relativement courts. Pour cette source, le télescope gamma européen pourrait mettre en évidence une composante distribuée due à l'annihilation de positrons dans le milieu interstellaire, comme le pensent les astrophysiciens Ramaty et Nikos Prantzos (Institut d'astrophysique de Paris). Ce dernier pense que, toujours pointé vers le centre galactique, INTEGRAL pourrait, outre le trou noir central supermassif, mettre en évidence une composante gamma variable dans le temps et due à plusieurs sources compactes de type étoile à neutrons ou trous noirs stellaires. On peut même penser à des types d'objets que nos modèles ignorent encore actuellement, comme les fameuses étoiles à quarks imaginées par des physiciens américains.

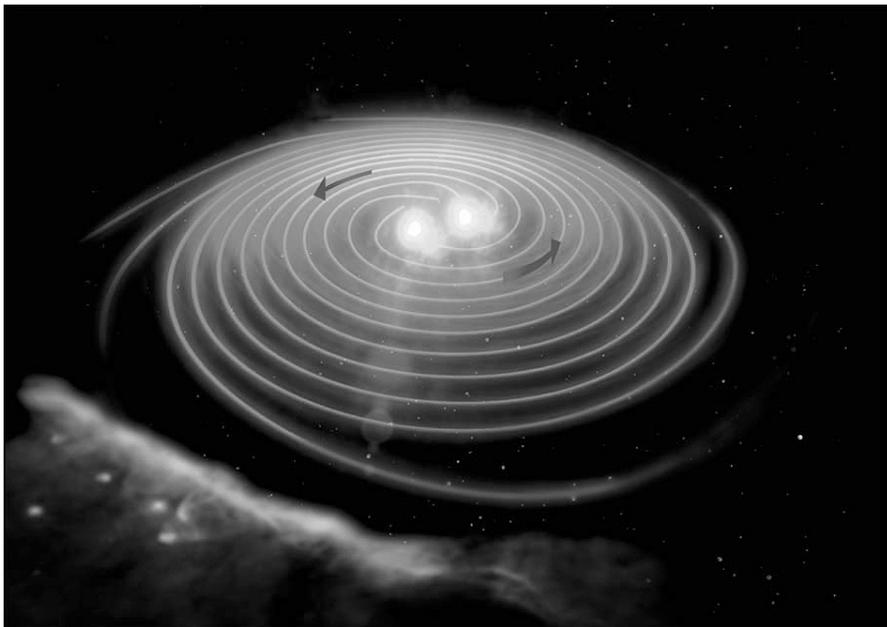
L'objectif scientifique principal d'INTEGRAL est de faire de l'astrophysique nucléaire, c'est-à-dire comprendre, grâce au rayonnement gamma, la synthèse des éléments fabriqués au cœur des étoiles massives et à la périphérie des objets compacts. Cependant, d'autres objectifs concernent à la fois l'astrophysique galactique (notre galaxie) et l'astrophysique extragalactique (AGN, c'est-à-dire noyaux de galaxies actives du type galaxies de Seyfert, radiogalaxies, quasars et objets BL Lacs, ainsi que des galaxies ordinaires au sein desquelles le satellite européen cherchera des trous noirs supermassifs). Tous ces objets, de

même que les amas de galaxies, sont le siège de puissantes émissions X et gamma spatialement très étendues. INTEGRAL est conçu pour embrasser une grande variété de processus très énergétiques comme l'excitation nucléaire, la radioactivité des éléments synthétisés au cœur d'étoiles massives, l'annihilation du positron, la diffusion Compton*. De plus, il étudiera le rayonnement de freinage dit « Bremstrahlung » (lorsqu'un électron relativiste passe à proximité d'un noyau de matière, il est fortement freiné et donne naissance à un photon gamma), la désintégration du pion $\text{Pi}0$ (collision d'un photon ou d'un noyau de rayonnement cosmique avec le gaz interstellaire créant des particules instables dont l'une se désintègre rapidement en deux photons gamma), le rayonnement synchrotron (dans lequel un photon gamma est émis par un électron interagissant avec un champ magnétique intense). A tous ces processus, il faut ajouter aussi le rayonnement cyclotron qui apparaît parfois autour d'étoiles fortement magnétisées comme certains pulsars et étoiles à neutrons. Dans ce cas-là, ce rayonnement électromagnétique est émis par les électrons voyageant sur des trajectoires circulaires ou hélicoïdales dans un champ magnétique. A cette grande variété de processus correspond une grande variété d'objets et de phénomènes astrophysiques : nucléosynthèse, novae, supernovae (explosions d'étoiles massives ou d'un membre de couple binaire), étoiles de Wolf-Rayet, étoiles AGB, milieu interstellaire, interaction du rayonnement cosmique et ses sources, les étoiles à neutrons, les pulsars, les trous noirs, les sursauts gamma, les noyaux galactiques et le rayonnement de fond cosmique. INTEGRAL a comme autre mission de voir si des objets déjà connus comme émetteurs de rayons X émettent aussi en gamma.

Bien entendu, INTEGRAL commencera sa mission en étudiant notre centre galactique où l'on pense qu'il existe, en plus du trou noir central supermassif, de nombreux objets

* Accélération d'électrons à des vitesses comparables à celle de la lumière par des collisions avec des photons de rayonnement gamma et X.

* Lorsqu'un électron relativiste, dont la vitesse est proche de la lumière, entre en collision avec un photon de basse énergie, l'électron transfère de l'énergie cinétique au photon en le transformant en rayonnement gamma.



Des étoiles à neutrons naissantes sont sans doute à l'origine de certains sursauts gamma.

compacts émettant sur diverses plages d'énergie, dont la fameuse émission à 511 keV caractéristique de l'annihilation électron-positron. Grâce à des observations effectuées par les fenêtres radio et infrarouge, on a pu établir depuis longtemps que le centre de notre galaxie est le siège d'une violente activité. Toujours dans ce centre galactique, et en plus des objets compacts qui trahissent leur nature par un nombre élevé de radiations, il existe également une émission prolongée dite « continuum », que les astrophysiciens Leventhal (1978) et Riegler (1981 et 1985) ont tenté de modéliser. Ceux-ci pensent que le continuum, lui-même aussi variable, est provoqué par plusieurs sources dont la plus notable pourrait être l'objet 1E17407.2942 que le télescope Sigma, trop limité en matière de résolution angulaire, n'a pu solutionner. Les instruments de CGRO ont identifié une douzaine de sources de ce type en direction du centre galactique et la région en question est totalement dominée par des émissions sur la bande énergétique allant de 20 à 30 keV. Toutefois, par rapport aux autres sources du même type, 1E1740 présente un spectre inhabituel dans son état normal allant jusqu'à plusieurs centaines de kiloélectronvolts, avec une forme et une luminosité similaires au candidat trou noir Cygnus-X1.

Ce qui est remarquable dans ce cas, c'est l'observation d'une contrepartie radio donnant à cette source l'apparence d'un mini-quasar avec une source compacte et deux lobes opposés, comme l'ont montré les travaux de l'astrophysicien Félix Mirabel. Selon l'hypothèse la plus couramment admise, la source en question, du fait des similitudes avec Cygnus-X1, serait un trou noir binaire.

La plupart de ces sources ont été observées par CGRO mais avec des succès mitigés à cause de problèmes de résolution angulaire et, dans un cas, parce que la source étudiée était gênée par GX5-1, une source fortement émettrice en X. La capacité d'INTEGRAL en résolution angulaire pourra résoudre ce problème et identifier des émissions sous forme de jets en basse énergie gamma, détectées par Sigma, comme provenant de sources situées au centre galactique et connues auparavant comme des sources binaires conventionnelles émettant en rayonnement X. D'autre part, une émission de continuum diffuse est connue pour être produite dans la région du centre galactique dans le domaine d'énergie X, avec un spectre où apparaissent aussi les lignes de fond et les caractéristiques de processus thermiques à des énergies supérieures à 100 MeV, signalées

après les observations de COS-B par l'astrophysicien du CEA Jacques Paul, et celles du satellite américain SAS-2 par Kniffer et Fichtel. INTEGRAL dressera une cartographie galactique de cette région sur une échelle d'environ 30° et sur la bande 10 keV-10 MeV. Les astrophysiciens pensent qu'il existe, au cœur de ces régions émissives en X et en gamma, ce que les physiciens appellent l'effet Compton inverse, processus au sein duquel se produit une collision entre un photon et un électron à haute énergie au cours de laquelle une partie de l'énergie de l'électron est transférée au photon et fait émettre à celui-ci un rayonnement gamma. Il est absolument nécessaire de posséder un grand nombre de mesures sur ce milieu complexe.

Par rapport à Granat-Sigma et à CGRO, INTEGRAL apporte une nouveauté : il sera possible à l'observatoire spatial européen de distinguer entre les sources auparavant non résolues et l'émission gamma diffuse. Les études menées sur le centre galactique (qui émet des rayonnements gamma de haute énergie sur la plage des mégaelectronvolts) serviront à étalonner les instruments d'INTEGRAL pour observer les noyaux des galaxies actives. Dans la région du centre galactique, il existerait aussi une source compacte émettant sur 511 keV, caractéristique de la radiation d'annihilation du positron, comme les objets compacts dont nous venons de parler mais avec certaines particularités. La nature et la localisation de la source, ou des sources, restent un mystère auquel INTEGRAL pourra s'attaquer du fait d'une combinaison adéquate de résolution angulaire et de sensibilité. Pour expliquer ces phénomènes, on utilise des modèles faisant intervenir des trous noirs avec des masses comprises entre 5 et 10 masses solaires (Lingenfelter et Ramaty), des supernovae (Colgate), des pulsars (Mastichiadis), des étoiles à neutrons (McClintock et Leventhal). La ligne à 511 keV offre un bon potentiel de diagnostic grâce à la capacité d'INTEGRAL de filtrer et de diminuer les émissions parasites.

L'étude des objets compacts, émetteurs en gamma, est l'un des objectifs majeurs d'INTEGRAL. Il s'agit d'une catégorie d'astres effondrés dans lesquels la matière est dégénérée et où se produisent, en raison

↗ d'intenses forces gravitationnelles, des transferts de matière. Il résulte de cela que la matière s'échauffe et émet en X et en gamma. Parmi ces objets, on peut mentionner : les naines blanches, les étoiles à neutrons et les pulsars, les binaires à rayons X (émettant des lignes de rayonnement cyclotron), les binaires LMXB (faciles à détecter par leur intense rayonnement X) et les candidats trous noirs stellaires, dont plusieurs centaines pourraient être mis en évidence par INTEGRAL. Tous ces types d'objets compacts sont des sources significatives d'émission à haute énergie. La capacité d'imagerie d'INTEGRAL permettra d'étudier comme jamais auparavant ces objets en gamma et sur d'autres longueurs d'onde. Sa capacité en spectroscopie permettra de produire les premiers diagnostics physiques détaillés de ces objets. Avec leur étude en rayonnement X dur et gamma de basse énergie, on sondera directement au cœur de processus astrophysiques se situant au contact des forts champs gravitationnels de ces objets où existent, à proximité, des plasmas thermiques à haute température et des accélérations de particules non thermiques. Les naines blanches isolées, composées de matière dégénérée d'électrons, n'émettent pas en principe de rayonnement gamma, mais il n'en est plus de même lorsqu'une de ces étoiles effondrées fait partie d'un couple d'étoiles binaires dans lequel la naine blanche accrète une étoile compagnon. Le fort et intense champ magnétique, pouvant atteindre 10^8 gauss et mis en évidence dans le cas de naines blanches magnétiques accrétantes ou dans des systèmes doubles de type AM Her, a montré qu'il était capable d'orienter le flux d'accrétion directement vers la surface de la naine blanche sans la présence d'une couche frontière faisant intervenir un disque d'accrétion. La température due au choc de matière peut approcher les 100 keV. La puissance de choc au moment de l'accrétion entraîne des processus d'accélération de particules à des vitesses et des énergies relativistes, lesquels produiraient des paires électron-positron se traduisant par des rayonnements gamma.

Les naines blanches accrétantes et les étoiles cataclysmiques variables sont d'excellents candidats pour l'étude des processus à haute

énergie. En outre, elles sont plus courantes dans la galaxie que les étoiles à neutrons. En effet, cent étoiles de type CV nous sont connues et se trouvent, par rapport à notre système solaire, dans une sphère de 500 parsecs * (pc). INTEGRAL est bien armé pour étudier de tels systèmes et étudiera les propriétés à hautes énergies des cataclysmiques variables de différentes intensités (comme les systèmes binaires de type DQ-Her et AM-Her) et des jets de rayons X, lesquels ont été détectés dans certains systèmes à naines blanches. Le satellite américain CGRO a détecté de tels jets ainsi qu'une émission à 511 keV pour certaines naines blanches associées et des systèmes à variables cataclysmiques. On soupçonne ces derniers d'être des émetteurs de rayonnement gamma à basse énergie et l'on attend confirmation de ce fait avec INTEGRAL. On ciblera notamment des objets de type LMXB comme LMXB 1H1822-57 (système binaire dont la période est de 5,6 h pour le compagnon en orbite), qui possède un disque d'accrétion similaire à la source Cygnus-X3 et CVV 1233 Sgr.

Plus encore que les naines blanches, les étoiles à neutrons sont des sources naturelles d'émission à haute énergie. Il est remarquable de constater que les binaires X n'émettent pas beaucoup en rayonnement gamma en comparaison aux étoiles à neutrons dont les températures, d'environ 100 MeV par nucléon, sont atteintes lors du processus d'accrétion grâce à la densité extrême de matière échauffée située à proximité de ces étoiles. Etudier celles-ci et leurs sources émissives en gamma constitue, pour INTEGRAL, une démarche particulièrement prometteuse. Une catégorie intrigante de ces étoiles à neutrons est nommée « radiopulsars ». Les premiers objets compacts identifiés comme étant des émetteurs d'énergie en rayonnement gamma furent les pulsars du Crabe et de Vela déjà connus optiquement et en radio grâce à SAS-2. Dans le cas de Vela, les émissions de rayonnement gamma ne sont pas en phase avec les émissions radio.

* Parsec : unité de distance utilisée en astronomie professionnelle équivalant à 3,2616 années-lumière. C'est la distance à laquelle un objet afficherait une parallaxe annuelle d'une seconde d'arc.

Les études des hautes énergies émises par les pulsars ont beaucoup progressé grâce aux satellites CGRO et Rosat. Après la confirmation que la nébuleuse du Crabe et la nébuleuse de Vela émettaient en rayonnement gamma, un troisième pulsar radio (PSR 1706-44) fut découvert par l'instrument Egret de CGRO comme rayonnant en gamma. Ce pulsar émet seulement sur la bande très énergétique à 100 MeV, en contraste avec le Crabe et le Vela qui émettent sur plusieurs bandes. Un quatrième pulsar émettant en gamma, et ayant aussi une contrepartie en rayons X, a été identifié comme la source brillante Geminga, découverte en 1972 par SAS-2. Geminga est un pulsar inhabituel parce qu'il émet presque toute son énergie sous forme de rayons gamma. Ses pulsations s'effectuent sur la bande 100 MeV et ont pu être observées par SAS-2 et COS-B. Un cinquième pulsar à haute énergie (PSR 1055-52), et qui pulse d'une manière similaire à PSR 1706-44, a été détecté par l'instrument Egret de CGRO ainsi qu'un autre (PSR 1509-58) pulsant sur 151 millisecondes qui a été détecté par les instruments Batse et Osse, toujours sur CGRO, mais pas par Comptel et Egret. CGRO a montré qu'un certain nombre de sources connues en rayonnement X étaient aussi émettrices en rayonnement gamma : c'est le cas de Cyg-X1, Cyg-X3, Gal 02514, Vela PSR, Eta Car, SS 433, Cir X1 ainsi que Cas A qui possède également une enveloppe de gaz et de poussières extrêmement denses que l'on peut repérer en infrarouge.

En ce qui concerne notre galaxie, il existe environ 1 000 pulsars radio répertoriés dans la base de données de l'université de Princeton et un catalogue australien, mais seuls une dizaine d'entre eux émettent en gamma. Ces pulsars représentent une catégorie particulière d'étoile à neutrons car certains astrophysiciens pensent qu'ils n'émettent en gamma que pendant une brève partie de leur existence. On constate des différences saisissantes entre les pulsars du Crabe, de Vela et Geminga, notamment dans le domaine des énergies égales ou inférieures à 10 MeV. La capacité de résolution en imagerie d'INTEGRAL va permettre de mettre en évidence des pulsars auparavant inconnus émettant à de basses énergies significatives et de

scruter dans le plan galactique, là où ces astres étranges semblent être les plus nombreux.

Pour des pulsars comme Geminga, le moniteur JEM-X donnera une couverture inestimable et décèlera la pulsation de pulsars non détectés auparavant dans le domaine des ondes radio. Alors que, par le passé, on cherchait à détecter le rayonnement gamma d'objets connus sur d'autres longueurs d'onde (étoiles à neutrons et potentiels trous noirs), INTEGRAL pourra directement détecter en gamma des objets pouvant se présenter comme des sources gamma et constituant des candidats parfaits pour les investigations du spectromètre d'INTEGRAL. Les simulations effectuées pour ce spectromètre montrent que sa sensibilité et son pouvoir de résolution nous permettront de lever le voile sur les mystères qui entourent encore les objets de ce type. Grâce à cette sensibilité, on étudiera les phénomènes de polarisation d'objets comme le Crabe et le Vela ainsi que la configuration du champ magnétique des pulsars en tant que sources des mécanismes d'émission de ces phénomènes. Il est probable que des phénomènes de courbure et des mécanismes synchrotron puissent générer des faisceaux de rayonnement gamma polarisés. INTEGRAL précisera aussi, toujours pour les mêmes objets, la géométrie des champs magnétiques et du mécanisme de radiation, tout en mettant en évidence, avec une meilleure sensibilité, des lignes de rayonnement synchrotron émises par les binaires à rayons X.

Grâce à JEM-X, INTEGRAL étudiera les rayons X durs émis par les étoiles LMXB. En effet, le spectre continu des binaires X à faible masse est, lui aussi, d'un intérêt significatif pour les rayonnements gamma et les X durs. Certains de ces objets émettent jusqu'à 100 keV, comme les objets GX 354-0, KS 1731-260 et les couples binaires dans l'amas globulaire Terzan 2. Les résultats obtenus montrent qu'il est crucial d'observer ces objets avec davantage d'études spectrales détaillées car certains des éléments relevés laissent penser qu'il existe, parmi cette population stellaire, de petits trous noirs. Selon les observations des satellites japonais Ginga et Tenma, on pourrait classer ces LMXB en plusieurs catégories dont certaines se rappro-



La nébuleuse du Crabe.

chent des étoiles à neutrons dites « accrétantes », voire de trous noirs. INTEGRAL effectuera une surveillance accrue du plan galactique où l'on trouve majoritairement ces astres, tout en s'intéressant bien sûr aux trous noirs stellaires pour lesquels nous connaissons déjà un certain nombre de candidats quasi certains. Les nombreuses observations réalisées depuis le début des années 90 laissent penser que les candidats trous noirs de systèmes binaires se caractérisent par une signature spécifique en rayonnement X ou gamma. Grâce à sa très haute sensibilité, le satellite européen pourra mener des investigations poussées sur un certain nombre d'objets de la galaxie que l'on soupçonne fort d'être des trous noirs.

En X, on distingue pour les mêmes objets une signature en rayons X basse énergie et une signature dominante en rayons X durs. Selon les données recueillies par Sigma, les candidats trous noirs posséderaient un spectre significativement plus plat que les systèmes d'étoiles à neutrons. Ainsi, le niveau de luminosité aux hautes énergies apparaît dans les bandes X durs et gamma basse énergie pour les candidats trous noirs. Il s'agira pour INTEGRAL de confirmer ces résultats en les approfondissant

et d'effectuer des mesures fines de la totalité des émissions gamma pour les systèmes d'étoiles à neutrons et les candidats trous noirs.

Une autre possibilité de signature pour les systèmes binaires à trou noir est offerte par une théorie qui a été développée pour la première fois en 1993 par l'astrophysicien russe Grebenev. Selon cette théorie, ces systèmes se caractériseraient par des oscillations quasi périodiques à une fréquence typique de 0,04 Hz. Pour les candidats trous noirs émettant le plus, mentionnons Cyg X1, Nova Muscae et Nova Persei. Certains ont un flux persistant presque constant (Cyg X1 ou GX3394) ou passent par des pics réguliers et des décroissances tout aussi régulières (Nova Muscae). Toutefois, en ce qui concerne le niveau de leurs émissions et les caractéristiques des phénomènes détectés, les trous noirs de systèmes binaires à oscillations quasi périodiques semblent fondamentalement différents des trous noirs isolés. Il semble que les candidats trous noirs se caractérisent souvent par des jets en rayonnement X dur et présentent aussi en gamma une émission variable autour de 511 keV. L'exemple connu le plus spectaculaire (avant les détections du satellite BeppoSAX) se produisit les 13 et 14 octobre

1990 avec la fameuse source 1E1740-7-2942 et Nova Muscae en 1991. La très grande sensibilité d'INTEGRAL va permettre de mesurer avec exactitude l'intensité des lignes d'émission dans leur pic au plus bas flux et d'établir la présence de cycles dans ces présumés événements d'injection de positrons. Les lignes de diffusion seront mesurées à la source. Il apparaît maintenant que la plupart des candidats trous noirs, émettant de façon caractéristique sur 511 keV, possèdent également des lignes de diffusion à 170 et 102 keV. Ces lignes, qui seront analysées à un niveau plus fin par INTEGRAL, vont permettre de déduire la géométrie de la source et les conditions régnant au cœur du milieu diffuseur. Dans ce domaine, grâce à CGRO, des études approfondies ont été effectuées par les astrophysiciens Lingenfelter et Hua. INTEGRAL étudiera, par exemple, une source comme EXS-1737-2952, qui est seulement entrevue sur une double ligne de rétrodiffusion à 102 keV. S'il se confirme, grâce à la détection d'un flux de basse énergie, que la source est dans une phase de faible activité, cela pourrait constituer une indication de la présence d'une population significative d'émetteurs de positrons dans le plan équatorial galactique. On pourrait ainsi expliquer les flux d'émission voisine de 511 keV mesurée par l'instrument Osse de CGRO. Une fois de plus, l'imageur d'INTEGRAL pourrait, grâce à sa sensibilité, détecter des objets de type EXS émettant en gamma à des niveaux très bas et le spectromètre pourra établir pour ceux-ci des modèles de rétrodiffusion et interpréter, grâce à la largeur des lignes d'émission, le milieu d'où elles sont émises.

Non seulement INTEGRAL va nous faire progresser en imagerie et spectroscopie gamma pour des objets compacts et connus (naines blanches, étoiles à neutrons et trous noirs) mais il va aussi nous permettre, grâce à sa résolution angulaire, des avancées pour des sources non identifiées avec des types d'objets déjà connus. Ceux-ci constituent un grand mystère et il n'est pas impossible qu'il existe d'autres types d'astres que ceux qui ont déjà été répertoriés. En 1981, l'équipe de l'astrophysicien Swannenburg, utilisant le satellite européen COS-B, a identifié sur 100 MeV

trente « sources complexes » qui furent ultérieurement retrouvées par l'instrument Egret de CGRO sans que l'on puisse se prononcer sur leur nature exacte. Il est vraisemblable qu'un grand nombre de ces objets, situés dans le plan galactique, sont semblables à Geminga, c'est-à-dire qu'ils sont des pulsars encore non identifiés comme tels. INTEGRAL permettra d'effectuer l'identification de pulsars encore inconnus directement en rayonnement gamma ou en se servant des indications obtenues en rayonnement X par le satellite européen XMM. INTEGRAL pourra aussi se servir de données auparavant obtenues en radio, optique et infrarouge.

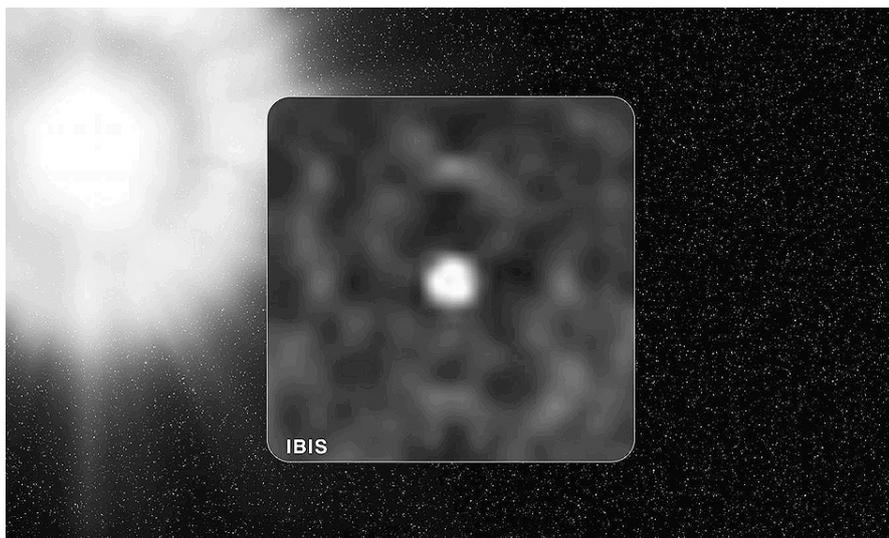
Genèse des éléments, nucléosynthèse explosive et milieu interstellaire

Les supernovae intéressent beaucoup les spécialistes de l'astrophysique gamma car elles sont le creuset où ont été synthétisés la plupart des éléments lourds de l'Univers. En explosant, ces étoiles massives rejettent dans le milieu interstellaire des éléments lourds qui participent à des processus de recombinaison et de formation de nouvelles étoiles. Il existe deux grands groupes de supernovae comprenant eux-mêmes des sous-groupes. Les supernovae de type Ia sont des naines blanches dans des systèmes binaires où se produit un transfert de masse d'une étoile compagnon vers une naine blanche. Au bout d'un certain temps, l'impact de la matière accrétée rencontre du carbone brûlant situé à la surface de la naine blanche. Ce processus est transformé en un formidable dégagement d'énergie au cours duquel un processus de nucléosynthèse extrêmement rapide crée une forte masse d'un isotope instable ^{56}Ni qui se dégrade successivement en ^{56}Co puis en ^{56}Fe . Les supernovae de type 2 sont issues de la désintégration puis de l'explosion d'étoiles massives (7 à 8 masses solaires) qui vont ultérieurement devenir des étoiles à neutrons ou des pulsars dans le cadre de la formation rapide de neutrons accompagnant un processus de cassure des noyaux du

fer. On peut mettre en évidence ce processus en faisant des observations sur les domaines X et gamma où rayonne un sous-produit de la nucléosynthèse, à savoir le ^{56}Co . La détection de lignes gamma (sur 0,847 MeV, 1,238 MeV et 2,599 MeV) issues de façon caractéristique de ce ^{56}Co , a permis pour la première fois un diagnostic direct de la nucléosynthèse dans les explosions de supernovae de type 2 (travaux de Matz, Cook, Sandie, Resler, Teegarden et Tueller à la fin des années 80 et au début des années 90). La plupart de ces travaux, effectués au moyen de ballons stratosphériques comme Gris et Hexagone, ont déblayé le terrain pour les programmes Granat-Sigma et CGRO.

INTEGRAL observera bien sûr la fameuse supernova 1987-A dont la vue de l'explosion nous est parvenue il y a un peu plus de quinze ans. Plusieurs modèles explicatifs retiennent comme hypothèse l'effondrement du cœur d'une étoile bleue supergéante de 15 masses solaires qui a produit 0,1 masse solaire de ^{56}Co , éjecté à une vitesse de 1 000 km/s, et du ^{44}Ti . Actuellement, ces matériaux émettent en gamma à des flux de 68 keV et 78 keV, et seront facilement détectables par le spectromètre d'INTEGRAL. Toujours pour la supernova 1987-A, il est important de déterminer l'émission en forme de *redshift* du cobalt observé sur 847 keV. En effet, il est essentiel de savoir si cette explosion était asymétrique et plus violente sur la face de l'étoile qui nous est la plus éloignée.

Du fait de l'encombrement dû aux masses éjectées, le flux de lignes de rayons gamma provenant des supernovae de type 2 (explosions d'étoiles massives) apparaît moins nettement car il est davantage freiné que pour les supernovae de type Ia. Les supernovae extragalactiques de type Ia constituent un objectif important pour INTEGRAL qui pourra repérer les flux d'émission attendus jusqu'à 20 mégaparsecs (Mpc). En général, une supernova de type Ia dont la magnitude bleue se situe aux alentours de 14, peut être détectable par INTEGRAL grâce à ses lignes d'émission. La mesure de la largeur et du profil des lignes nous donnera beaucoup d'informations détaillées sur le flux lui-même, comme l'ont montré les travaux des astrophysiciens Chan



Au centre, un sursaut gamma capté par l'instrument IBIS d'INTEGRAL le 25 novembre 2002. Il serait situé à 5 millions d'années-lumière.

et Lingenfelter.

INTEGRAL contribuera aussi à mieux comprendre les supernovae. Il existe en effet deux modèles explicatifs : le modèle par détonation (hypothèse de l'astrophysicien Woosley), où une masse correspondant à une masse solaire de ^{56}Ni est produite avec une grande vitesse des éjectas ; le modèle par déflagration (hypothèse de l'astrophysicien Nomoto), où seulement une masse égale à 0,5 masse solaire de nickel est synthétisée avec une masse comparable d'éléments plus légers. Dans ce dernier cas, la vitesse d'expansion des éjectas est seulement la moitié de celle défendue par le modèle de Woosley. Des différences de 10 à 20 keV sont attendues au niveau de l'ampleur de l'énergie et de son profil. Le spectromètre d'INTEGRAL pourra trancher distinctement entre les deux modèles en observant l'émission sur 812 keV. Pour les deux modèles, les lignes d'émission tendent très fort vers le bleu et émettent sur 750 keV et 812 keV (caractéristiques de la désintégration du ^{56}Ni), mêlées avec la ligne à 847 keV (caractéristique de la désintégration du cobalt). Une haute résolution spectroscopique est indispensable pour la mesure de ces lignes. INTEGRAL découvrira sans doute des supernovae galactiques encore inconnues et âgées d'environ cinquante ans (date de leur explosion) grâce à leur émission en gamma du ^{44}Ti . L'émission brillante en gamma de ces supernovae permettra de les

localiser à quelques minutes d'arc près grâce à l'imageur d'INTEGRAL.

Une éruption de nova – étoile associée dans un couple binaire et dont la luminosité augmente soudainement avant de décroître sur plusieurs mois – est un autre phénomène dans lequel un certain nombre d'éléments sont synthétisés durant une explosion, suite à la contraction de l'étoile. L'existence de noyaux instables a été mise en évidence et détectée grâce à la présence de rayonnements gamma caractéristique de l'annihilation du positron. Les lignes les plus vraisemblables apparaissent par leur détection à 1 275 keV pour ce qui concerne l'isotope ^{22}Na et sur 478 keV pour ce qui concerne l'isotope ^7Be . C'est l'astrophysicien américain Starfield qui a conçu des modèles de calcul des éléments produits lors de l'explosion d'une nova. Les scientifiques de l'ESA pensent que le spectromètre d'INTEGRAL découvrira un grand nombre de novae situées le long du plan galactique. Notons également que ce spectromètre permettra de mettre en évidence la nucléosynthèse de noyaux radioactifs comme ^{59}Fe , ^{60}Fe et ^{60}Co , que l'on retrouve principalement lors d'explosions d'étoiles massives comme les supernovae de type 2 et les étoiles de Wolf-Rayet (étoiles WC et WN). Ces dernières sont des étoiles massives pouvant atteindre les 40 à 50 masses solaires et qui épuisent leur combustible beaucoup plus rapidement que les autres étoiles, et dont les processus de nucléosyn-

thèse pourront être observés par INTEGRAL.

Le satellite américain HEAO-3 et CGRO a confirmé l'existence, dans notre galaxie, de lignes d'émission gamma diffuses comme la ligne à 1 809 keV ayant pour origine la désintégration radioactive de ^{26}Fe , ce qui avait été prévu, dès la fin des années 70, par les astrophysiciens Ramaty et Lingenfelter. Les émissions à 1 809 keV sont uniformément diffuses dans le plan galactique et il est possible de cartographier notre galaxie grâce à cet ^{26}Fe , de même que l'on peut le faire grâce à l'émission diffuse galactique sur 511 keV qui caractérise la réaction d'annihilation électron-positron. En fait, la raie sur 1 809 keV n'est pas exactement due au ^{26}Fe mais à la désexcitation du ^{26}Mg résultant de la désintégration radioactive de ^{26}Fe . La détection de ces deux lignes d'émission est d'une grande importance pour la nucléosynthèse stellaire et l'évolution galactique et, dans ces domaines, de nombreuses recherches ont été effectuées par les astrophysiciens Clayton, Woosley et Prantzos. En général, les émissions en ^{26}Fe peuvent être détectées par des détecteurs au germanium embarqués par des satellites qui ont montré combien cet élément était présent dans le milieu interstellaire. A partir de la distribution galactique connue des populations stellaires, on a pu établir une carte sur l'émission à 1,8 MeV qui permet aussi d'identifier le ^{26}Fe . Jusqu'à présent, les avancées les plus importantes dans ce domaine ont été effectuées par l'astrophysicien allemand Schönfelder au moyen de l'instrument Comptel de CGRO en 1992, 1995 et 1997. Toutefois, INTEGRAL fera beaucoup mieux puisqu'il permettra de cartographier la ligne à 1,8 MeV au moyen de son spectromètre et contribuera beaucoup à identifier ces sources. Du fait que la ligne à 1 809 keV est extrêmement proche, il faut un diagnostic sensible de la vitesse radiale de la source, de la même manière avec laquelle on opère en radioastronomie sur la ligne à 21 cm. INTEGRAL est sensible à une résolution de 3 keV, ce qui lui permet de faire la distinction entre des sources d'énergie à émission relativement proche. Les capacités d'INTEGRAL sont telles que les sources de ^{26}Fe dans la galaxie pourront être résolues.

Autre produit de la nucléosynthèse, le ^{60}Fe possède une durée de vie un peu plus élevée que celle de ^{26}Fe . Il peut également être produit par capture de neutrons au cours de processus se situant au cœur d'étoiles massives et lors du flash de l'hélium qui se produit quand des étoiles de grande taille ont épuisé tout leur combustible en hydrogène et en hélium. Selon les théoriciens, ces étoiles massives se situeraient dans une échelle de 15 à 40 masses solaires. Ce flux éjecté dans le milieu interstellaire, qui pourra être cartographié par INTEGRAL, est détectable sur 1,322 MeV et 1,113 MeV. Notre milieu interstellaire est le siège de bien d'autres phénomènes que les signatures de produits de nucléosynthèse souvent discernables sur 511 keV. Ces phénomènes peuvent servir de « traceurs » de l'évolution passée de certains astres et permettre un diagnostic sur les conditions régnant dans le milieu interstellaire.

En plus du composant de radiation annihilation sur 511 keV venu du centre galactique, il existe une autre composante distribuée le long du plan galactique. La source principale de ces positrons dans le milieu diffus interstellaire aurait comme cause la fuite des positrons produits par la désintégration radioactive de ^{56}Ni et de ^{56}Fe dans les éjectas de supernovae de type I. Des observations détaillées sur la ligne d'émission diffuse à 511 keV peuvent donner de nouvelles informations importantes sur la fraction de positrons échappés ainsi que sur la distribution de ^{56}Fe et de ^{44}Ti formés lors de processus de nucléosynthèse explosive. Il est en tout cas certain que des objets compacts sont à la source de ces positrons interstellaires. D'autre part, des lignes de rayonnement gamma sont produites par les réactions nucléaires provoquées par l'impact des rayons cosmiques avec la matière interstellaire. Une grande variété de lignes ont été détectées avec des profils voisins mais avec un montant assez élevé pour ce qui concerne ^{12}C sur 4,44 MeV et ^{16}O sur 6,13 MeV. Ces signatures résultent de la collision des rayons cosmiques avec les grains de poussières interstellaires, laquelle entraîne une désexcitation de ces noyaux avec une émission gamma se traduisant par des lignes caractéristiques.

En détectant ces lignes, on peut directement déterminer la composition, la taille et la distribution galactique des grains de poussières interstellaires comme source d'intensité et de distribution de rayons cosmiques à basse énergie. La sensibilité d'INTEGRAL permettra de surveiller le plan galactique dans ce domaine ainsi que de localiser les processus d'interactions et les nuages moléculaires.

Il existe aussi un continuum de rayonnement cosmique ayant des interactions avec la matière interstellaire et qui émet, dans notre galaxie, à des énergies élevées allant de 100 MeV à 1 GeV. Les principales observations dans ce domaine ont été effectuées par SAS-2 et COS-B mais la cartographie la plus complète a été réalisée par l'instrument Comptel de CGRO, sur la plage 1 MeV-10 MeV avec une résolution de 4° . On pense que ce phénomène est dû à des interactions de restes de supernovae avec les nuages interstellaires, ce qui pourrait expliquer la haute vitesse des nuages à l'intérieur du disque galactique. Ici encore, la résolution angulaire d'INTEGRAL permettra d'obtenir une meilleure estimation de la contribution totale des émissions galactiques gamma provenant de sources non résolues. On espère résoudre l'intrigant problème d'augmentation du niveau d'énergie des rayons cosmiques lorsqu'ils percutent les nuages.

Dans ce milieu galactique, il existe également des phénomènes à haute énergie éphémères qui posent problème. Ils affichent une variabilité sans précédent dans le domaine temporel et le domaine spectral, et sont comparables, à un niveau énergétique moindre, aux énigmatiques sursauts gamma (GRB ou Gamma Ray Bursts) qui varient en durée de quelques millisecondes à environ 100 s. Les autres phénomènes transitoires, principalement situés dans le plan galactique, se développent sur des échelles de temps inférieures à un jour, avec des déchaînements qui peuvent persister plusieurs semaines. Pour ces phénomènes éphémères, on retient deux types de sources : soit des pulsars à rayons X dans une étoile à neutrons accrétante qui absorbe la matière d'un compagnon stellaire, soit des systèmes binaires à trous noirs dans lesquels d'énormes explosions, dues à des instabilités, se

produisent dans le cadre de transferts de masse de l'étoile binaire compagnon ou dans la structure du disque d'accrétion.

INTEGRAL et l'astrophysique extragalactique

Des rayonnement gamma et des rayonnements X durs sont produits par les noyaux des galaxies actives. Avec des observations en rayonnement gamma, on constate un certain nombre de phénomènes provenant de ces objets et dont la compréhension est indispensable pour deux raisons principales :

- les photons gamma sont extrêmement pénétrants et fournissent une vue directe des régions les plus profondes des sources, là où se trouve la source de base émissive en énergie et où résident les mécanismes de radiation ;
- les données que nous possédons sur toutes les longueurs d'onde sur ces noyaux de galaxies actives indiquent qu'une part majoritaire de la luminosité de ces sources est émise sur les bandes X et gamma. C'est le cas par exemple des objets galactiques dits « QSO » et « BL Lacs » émettant fortement sur la plage des gigaélectronvolts, tandis que les galaxies de Seyfert et les radiogalaxies émettent sur la plage des kiloélectronvolts jusqu'aux mégaélectronvolts avec parfois des émissions proches de ce qui est observé dans notre galaxie (Cygnus-X1 et 1E1740.7-2942).

La luminosité extrêmement élevée et l'échelle de temps à courte variabilité observée dans la bande du rayonnement X indiquent que la région d'émission possède une haute densité de photons. Dans ces conditions, des paires d'électrons-positrons sont créées par des collisions entre photons. Le processus de création de ces paires affecte tout le spectre gamma en laissant fortement apparaître la ligne d'émission sur 511 keV. Ces noyaux de galaxies actives (AGN) sont également à l'origine d'un fond diffus de rayonnement cosmique observé sur la bande des 2 à 100 keV. Les résultats apportés par Sigma et CGRO tendent à montrer que le spectre gamma des

AGN est encore plus complexe et intéressant que prévu. C'est notamment le cas de NGC 4151, des quasars à rayons gamma et des objets BL Lacs découverts par CGRO. Pour tous ces objets, INTEGRAL sera mieux armé que l'instrument Egret de CGRO. Un autre objectif extragalactique d'INTEGRAL consiste à étudier des galaxies de Seyfert. La plus proche de ces galaxies – NGC 4151 – est située à 20 Mpc de notre système solaire et a été intensivement étudiée dans les rayons X durs et gamma du spectre. C'est aussi le cas de la radiogalaxie Cen-taurus A, située environ à 5 Mpc, qui est un des objets les plus brillants en X et en gamma. Le spectre de ces objets, étudié par les instruments Osse et Comptel de CGRO, s'est révélé extrêmement variable sur la plage énergétique des mégaélectronvolts, à l'instar de la source extragalactique OVV3279 et du quasar 3C273 situé à une distance de 600 Mpc.

INTEGRAL, par rapport aux instruments précédents plus limités, pourra étudier une centaine de ces AGN grâce à sa bande large en spectroscopie et ses capacités en imagerie. Ces capacités sont indispensables pour l'identification définitive d'AGN émettant en gamma mais offrent également l'opportunité de découvrir de nombreuses galaxies actives émettant en gamma, comme ce fut le cas en rayonnement X avec les satellites Einstein et Exosat. Avec la résolution angulaire permise par les masques codés de l'imageur, du spectromètre et du moniteur JEM-X d'INTEGRAL, on localisera une source émettant en gamma et en X avec une petite marge d'erreur de 1 à 5 min. d'arc en diamètre, dépendant de la puissance de la source, ce qui suffira pour découvrir et identifier des AGN encore inconnus. La capacité d'imagerie du satellite européen permet de séparer plusieurs sources, situées très proches les unes des autres, ce que ne pouvaient pas toujours Sigma et CGRO. L'imageur d'INTEGRAL, avec sa sensibilité sans précédent, détectera des objets émettant de quelques kiloélectronvolts à quelques mégaélectronvolts et pourra aussi résoudre des galaxies de Seyfert de type 2 comme NGC 4388, MKN3 et NGC 1068. Il est assez sensible pour détecter, malgré les grandes distances, des émissions sur 100-500 keV venues d'AGN brillants comme

3C273, NGC4151 et CEN-A. D'autre part, il offre des possibilités d'étudier les propriétés de polarisation de rayonnement gamma sur la plage d'énergie allant de 0,2 à 3 MeV dans des lieux où le mécanisme de diffusion Compton domine les phénomènes d'interaction. INTEGRAL étudiera les phénomènes de polarisation, propriétés des radiations émises de l'intérieur des disques d'accrétion des trous noirs supermassifs se trouvant au cœur des AGN. A partir des mesures de ces AGN, il sera possible de modéliser le rôle des différents types (Seyfert, Blazars, radiogalaxies) comme participant au rayonnement cosmique diffus.

Un des rôles du programme d'astrophysique extragalactique d'INTEGRAL est aussi d'étudier le fond de

C'est dans notre galaxie qu'INTEGRAL va nous permettre de lever le voile sur des astres et des processus encore inconnus. Pour notre seule galaxie, il existerait 8 milliards de naines blanches, 1 milliard d'étoiles à neutrons et plusieurs centaines de trous noirs stellaires !

rayonnement cosmique en X et en gamma. L'existence d'une intense émission dite « CDB », allant de photons de quelques kiloélectronvolts à plus de 100 MeV, est une évidence apparue dès les premières observations effectuées dans ces domaines du spectre. Différentes théories ont été avancées pour prendre en compte les phénomènes observés, comme celle attribuée à des mécanismes de diffusion par interactions de particules, défendue par l'astrophysicien Stecker, ou la théorie selon laquelle l'émission serait due à l'addition et à la confusion d'un grand nombre de sources individuelles non résolues. INTEGRAL observera ces émissions sur la plage 100 keV et sera également orienté vers les deux Nuages de Magellan (petites galaxies satellites de la nôtre) et les galaxies (proches) de l'Amas Local.

L'imageur, le spectromètre et le moniteur de rayonnement X d'INTEGRAL possèdent assez de sensibilité pour détecter dans des galaxies voisines des objets ayant une émission X et gamma comparable à Cyg-X1. INTEGRAL pourra même, malgré les distances, mener des investigations sur leur niveau de rayonnement cosmique, ainsi que distinguer entre le rayonnement gamma émis par des sources discrètes à l'intérieur des galaxies et celui du plasma situé à l'intérieur et autour de ces nuages de galaxies.

Cependant, c'est dans notre galaxie que le satellite européen va nous permettre de lever le voile sur des astres et des processus encore inconnus. L'astrophysicien Jean-Marc Bonnet-Bidaud pense que, pour notre seule galaxie, il existerait 8 milliards de naines blanches, 1 milliard d'étoiles à neutrons et plusieurs centaines de trous noirs stellaires ! Pour sa part, l'astrophysicien du CEA Jacques Paul, grand spécialiste de l'astrophysique gamma et conseiller scientifique pour la mission INTEGRAL, pense que l'on va découvrir des objets ayant des températures telles que spontanément se produit de l'antimatière.

Les astrophysiciens imaginent déjà à ce qui pourrait succéder un jour au satellite gamma européen. Il est difficile de mettre en évidence des objets extrêmes nécessitant une sensibilité beaucoup plus élevée car celle-ci est limitée par le bruit de fond. Réussir, par exemple, une performance quatre fois supérieure à INTEGRAL est difficile et les méthodes n'apparaissent pas vraiment. Il est nécessaire d'inventer autre chose mais les voies sont loin d'être au stade de projet. Il faut diminuer le bruit de fond, ce qui nécessite des études des interactions gamma avec la matière. Il faut également focaliser le rayonnement à l'image de ce qui est fait avec le rayonnement X : ceci est possible en gamma mais il faudrait des missions impliquant plusieurs satellites en formation. Il ne faut pas espérer un vrai successeur à INTEGRAL avant 2010-2012 mais, en attendant, l'astronomie gamma va vivre son âge d'or, comme le pense Robert Mochkovitch, chercheur à l'Institut d'Astrophysique de Paris. C'est sûr, INTEGRAL va continuer à nous faire rêver.