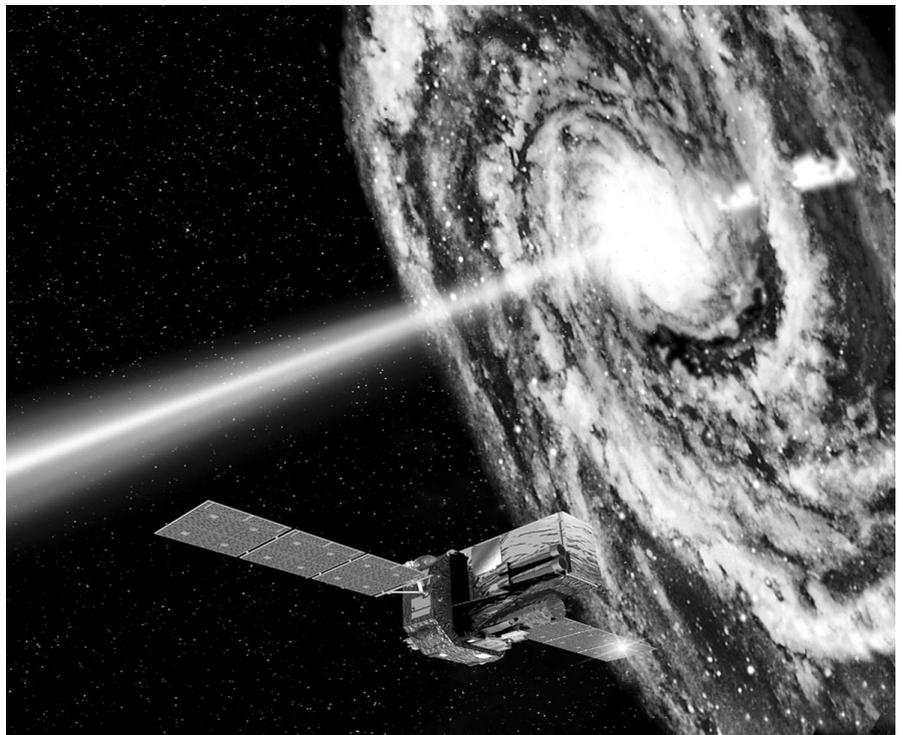


INTEGRAL : fleuron de l'astronomie gamma

PHILIPPE JAMET

Grâce à des satellites comme COS-B et XMM, l'ESA est depuis longtemps en pointe dans le domaine de l'astrophysique des hautes énergies. Toutefois, elle ne fait pas cavalier seul. Ainsi, en ce qui concerne le satellite INTEGRAL destiné à l'astrophysique gamma, les Européens se sont associés aux Russes pour le lancement par une fusée Proton, le dépouillement des résultats et une participation d'un quart du temps d'observation, ainsi qu'aux Américains pour la mise au point d'un certain nombre d'instruments et l'exploitation scientifique du satellite.



Devant en principe être mis en orbite le 17 octobre 2002 par un lanceur russe Proton depuis la base de Baïkonour, le satellite INTEGRAL (International Gamma Ray Astrophysics Laboratory) est le successeur tout désigné en astronomie gamma du satellite soviétique Granat (équipé du télescope français à masque codé Sigma) et du satellite germano-américain CGRO. Dans le domaine de l'astrophysique gamma, la plupart de nos connaissances viennent de Granat et de CGRO. Nous devons aussi mentionner les apports non négligeables du satellite européen COS-B et, dans une moindre mesure, ceux

des satellites américains de première génération, du japonais Ginga et des appareils placés sur des ballons stratosphériques, comme le programme Gris ou le projet Hexagone à forte participation française.

Par rapport à tous ces programmes qui nous ont considérablement apporté, le satellite INTEGRAL marque une rupture du fait de la sophistication de son équipement scientifique. Il pourra fournir, d'une part, des réponses à des problèmes non élucidés et, d'autre part, recueillir des données précieuses concernant des objets détectés par de précédents programmes mais insuffisamment observés faute de

moyens adéquats. On peut s'attendre aussi à ce qu'INTEGRAL découvre de nouvelles sources émettrices qui sont jusqu'ici passées au travers des filets de détection. De plus, les données obtenues par le satellite européen auront longtemps le statut de référence dans les congrès scientifiques consacrés à l'astrophysique des hautes énergies, étant donné qu'aucun satellite de ce type n'est prévu pour être mis en œuvre avant 2010-2012. On comprend mieux pourquoi un grand nombre d'équipes scientifiques non européennes ont répondu à l'appel à propositions de l'ESA. Avant même le lancement effectif du programme, celui-ci fut présenté, dès le départ, à l'agence par une équipe internationale où figuraient le Français Jacques Paul (une des chevilles ouvrières du télescope Sigma), le Britannique A.J. Dean, l'Irlandais Brian McBreen et l'Américain J.L. Matteson, l'un des fers de lance du programme CGRO.

La mission d'INTEGRAL

L'objectif d'INTEGRAL est de localiser et d'étudier les sources émettrices en gamma avec une résolution et une sensibilité d'un niveau jamais atteint auparavant. Les rayons gamma nous offrent l'occasion de pénétrer dans le domaine des événements cosmiques caractérisés par des processus mettant en jeu des quantités phénoménales d'énergie. L'Agence spatiale européenne possède une expérience certaine en matière d'astronomie gamma grâce à son satellite COS-B lancé le 9 août 1975. Ce satellite emportait avec lui un télescope destiné à l'observation du rayonnement gamma et opérant dans le domaine énergétique supérieur à 20 MeV. Le satellite européen a permis de dresser la première carte du ciel digne de ce nom dans ce domaine du spectre. Il a également mis en évidence l'émission du rayonnement gamma des quasars dont on sait aujourd'hui qu'ils sont les noyaux extrêmement brillants de galaxies actives très éloignées. Les progrès permanents en astronomie gamma ou même ses interférences avec le rayonnement x dur* ont permis aux astrophysiciens d'élaborer des modèles très fiables quant aux sources potentielles de ce rayon-

nement. Selon les astrophysiciens Ramaty et Prantzos, qui travaille à la fois à l'Institut d'astrophysique de Paris et au Service d'astrophysique du CEA, les sources de rayonnement gamma identifiées peuvent se décomposer de la façon suivante :

- radiation d'annihilation électrons-positrons galactiques dont la masse est totalement transformée en énergie ;
- lignes d'émission d'aluminium 26 galactique dont les sources peuvent être des novae x, des géantes rouges, des étoiles AGB, des étoiles de Wolf-Rayet et des supernovae de type 2 ;
- supernovae de type 1 ;
- pulsars de type nébuleuses du Crabe et Vela ;
- sursauts gamma brusques mais très courts dont les premières études ont été effectuées par les astrophysiciens Liang (laboratoire Lawrence Livermore) et Hartman (université Clemson), lesquels ont été, en collaboration avec Gerald Fishman, très impliqués sur CGRO ;
- nucléosynthèse (dans ce cas, les rayonnements gamma n'arrivent qu'en petites quantités à la surface des étoiles, sauf avec des étoiles de Wolf-Rayet qui éjectent des quantités considérables de matière et de rayonnement) ;
- éruptions solaires (dans ce cas, plutôt chromosphériques que coronales) dont deux des grands spécialistes sont l'astrophysicien allemand E. Rieger et l'Américain R. Murphy ;
- rayonnement diffus gamma dû à la rencontre entre électrons relativistes, rayons cosmiques et milieu interstellaire (ce type de rayonnement est aussi appelé « rayonnement de freinage » ou « *Bremstrahlung* », créant un continuum de fond diffus galactique) ;
- effet Compton inverse où la collision entre un photon et un électron à haute énergie crée une émission gamma ;
- rayonnement cyclotron où des particules gamma sont produites dans un champ magnétique intense autour d'un astre massif. Le rayonnement est émis par des électrons voyageant sur des trajectoires circu-

* Comme le cas du sursaut gamma observé le 11 décembre 2001 par le satellite XMM et qui présente tous les caractères d'une supernova entourée d'un nuage en expansion.

lares ou hélicoïdales dans ce champ magnétique.

Comme on le voit, l'étude des rayonnements gamma nous permet de pénétrer avec une perspicacité grandissante au cœur de phénomènes où toutes les lois habituelles de la physique sont en quelque sorte transcendées. Chaque étape technologique correspond à un satellite disposant de meilleures qualités de résolution angulaire et spectrale. INTEGRAL ne fait pas exception à la règle et surpasse donc les technologies l'ayant précédé, comme l'on a pu s'en rendre compte avec les présentations faites au Colloque organisé par l'ESA en 1993 aux Diablerets en Suisse.

L'apport de Granat-Sigma et Compton GRO

A l'heure où le satellite européen s'apprête à s'envoler des steppes du Kazakhstan pour rejoindre le firmament, il serait injuste de faire l'impasse sur l'apport du programme franco-soviétique Granat-Sigma et celui des Etats-Unis à forte participation allemande Compton GRO. En effet, une part notable des données sur lesquelles va travailler INTEGRAL, en essayant d'aller beaucoup plus loin, ont été acquises grâce aux deux programmes précédents.

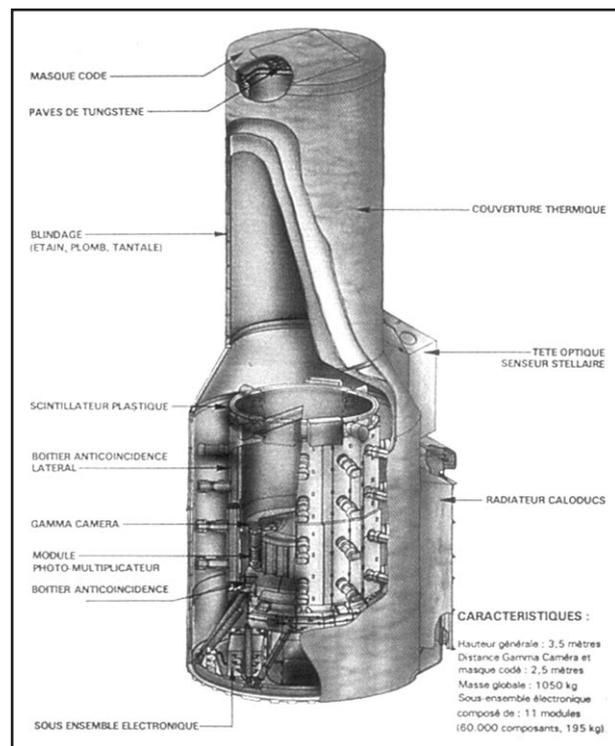
Lancé le 1^{er} décembre 1989 sur une orbite à 200 000 km d'apogée et 2 000 km de périégée, le satellite soviétique Granat, conçu pour la spectroscopie des émissions x et gamma, a considérablement fait progresser nos connaissances en emportant le télescope français Sigma, les télescopes soviétiques ART-P et ART-5 ainsi qu'un ensemble d'expériences françaises de détection de sursauts (Phebus) et soviétiques (Tournesol et Konus). Le télescope Sigma représentait la charge utile scientifique la plus importante et a été conçu, sous la direction du CNES, par le service d'astrophysique du CEA et le CESR de Toulouse pour fonctionner à cheval sur les plages x et gamma du spectre électromagnétique. Le système central du télescope consistait en l'association d'une gamma caméra (développée au départ pour faire de l'imagerie médicale en médecine nucléaire) et d'un masque codé qui

permettait, grâce à un traitement mathématique sophistiqué des données, d'obtenir une résolution angulaire jamais atteinte auparavant en astronomie gamma.

Les techniques utilisables en astronomie gamma sont spécifiques de ce type de longueur car les photons gamma ne se laissent pas dévier, ne peuvent être ni réfléchis ni réfractés. Ils ne peuvent même pas être étudiés par des télescopes « en incidence rasante » que l'on utilise pour le rayonnement x, par exemple sur des satellites comme XMM ou Axaf-Chandra. De plus, les photons gamma, pourtant très énergétiques, ne sont émis que parcimonieusement par les processus violents qui les engendrent. La solution trouvée consiste à faire transiter ces photons gamma dans une boîte relativement volumineuse où leur interaction avec un système conçu à cet effet, de type cellule photoélectrique, les recueille en émettant un flash qui peut être mesuré du point de vue énergétique. Les instruments additifs au télescope gamma servent surtout à tenter de déterminer l'origine et la position de la source.

Sigma a fonctionné dix-huit mois dans le cadre d'un programme centré à moitié sur des objets galactiques (systèmes binaires, pulsars, centre galactique) et extragalactiques (supernova 1987A, noyaux actifs de galaxies, quasars et radiogalaxies). Grâce à son masque codé et sa caméra à scintillation, Sigma a permis de dresser une carte de nombreuses sources galactiques et extragalactiques avec une haute résolution et une très grande sensibilité sur la plage de 20 à 2 000 keV. De plus, le télescope français a été braqué sur des objets « exotiques » insuffisamment étudiés jusqu'alors, apportant ainsi une meilleure compréhension de certains phénomènes étranges.

L'histoire des observations du télescope français a été ponctuée de quelques péripéties qui ont été relatées et expliquées par les astrophysiciens Jacques Paul et Pierre Mandrou dans les comptes-rendus de la *Vie des Sciences*. Dès le début de son entrée en fonctionnement sur le satellite Granat, en mars 1990, le télescope Sigma a été pointé en direction du centre galactique qui nous est opaque en lumière visible mais laisse des fenêtres de transparence, à la fois en infrarouge et en radio mais



Télescope Sigma. Le système central du télescope consistait en l'association d'une gamma caméra et d'un masque codé qui permettait, grâce à un traitement mathématique sophistiqué des données, d'obtenir une résolution angulaire jamais atteinte auparavant en astronomie gamma.

aussi aux plages plus énergétiques comme les rayonnements X et gamma. Le centre de notre galaxie est un site d'activité violente. Avant Sigma, des sources gamma avaient été observées dans les régions centrales de notre galaxie par des télescopes placés sur des ballons ainsi que par les satellites HEAO-3 et COS-B. Certes, les précédentes missions ne disposaient pas des combinaisons adéquates de sensibilité et de résolution pour permettre de révéler la nature exacte des sources détectées. Toutefois, les images réalisées du centre galactique en rayonnement X dur et dans la bande gamma avaient montré l'existence de régions complexes avec des sources persistantes, d'autres variables et d'autres éphémères.

Ainsi, grâce aux poses de Sigma effectuées au printemps 1990, les astronomes français et soviétiques ont obtenus une image sans précédent du centre galactique. Et ils sont allés de surprise en surprise avec un certain nombre de remises en cause. Par exemple, en ce qui concerne la source Sagittarius-A considérée prématurément comme pouvant être un trou noir galactique, Sigma ne détecta aucune émission en gamma. Grand désappointement des astrophysiciens puis euphorie générale quand on a découvert, située à plus de 50 min. d'arc du centre galactique, une forte source

émettrice en gamma et qui n'était auparavant connue qu'en rayonnement X dur. Dans le domaine de rayonnement gamma, 1E17407-2942 (tel est son nom) est l'un des objets parmi les plus émissifs de la Voie Lactée et situé à 25 000 années-lumière de notre système solaire. Selon les astrophysiciens Paul et Mandrou, codécouvreurs de la source en gamma : « *La source est variable : ainsi lorsque le télescope Sigma fut braqué sur celle-ci pendant 18 heures du 13 au 14 octobre 1990, la source 1E17407-2942 fut le siège d'un intense excès d'émission apparaissant sur les bandes 300 à 600 keV dans le spectre en énergie de la source.* »

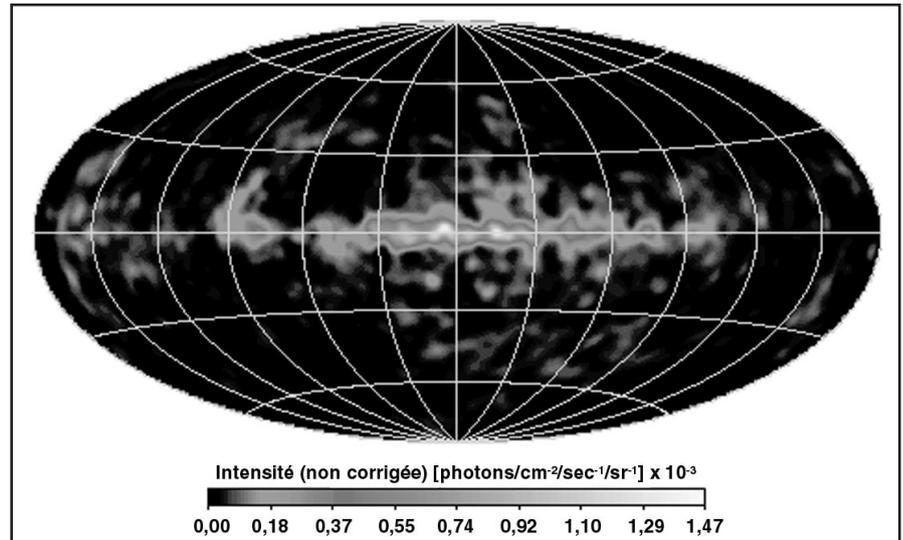
En février 1991, les responsables de Sigma ont reconfiguré le télescope français pour étudier à nouveau la source. Or cette dernière était devenue évanescence en gamma tout en étant fortement émettrice en X. Ironie du sort, c'est le satellite Compton GRO, dont le programme se déroulait partiellement en même temps que Sigma, qui a redécouvert la source, considérée depuis par les spécialistes comme un trou noir stellaire. Le télescope français trouvera toutefois une source à haute énergie inconnue auparavant, baptisée GRS 1758-258, mais à 300 années-lumière du centre de la galaxie et sur une ligne de visée proche de 1E17407-2942. A cheval sur le

domaine des x et des gamma, Sigma a étudié avec des résultats ambigus certains objets suspectés d'être des trous noirs potentiels : cas de LMC-X3, CIR-X1, GX339-4, Cygnus-X1, ce dernier étant historiquement le premier objet à avoir été considéré comme trou noir.

Pour revenir à la source 1E17407-2942, des campagnes d'observation ont été effectuées sur d'autres longueurs d'onde comme les ondes radio. Ces dernières mettent en évidence une structure en forme de mini-quasar interne à notre galaxie et dont certaines caractéristiques l'ont fait surnommer le « Grand Annihilateur ». Cette source est vraiment très bizarre et son trait caractéristique est d'émettre un spectre pouvant varier sur la plage 240 keV avec des lignes d'annihilation centrées sur 480 keV. Les observations montrent que les positons créés (antiparticules de l'électron) peuvent s'échapper de la source le long des jets symétriques de l'objet et qu'ils s'annihilent ultérieurement au contact de nuages moléculaires froids. A la suite de cette collision, la radiation à 480 keV passe brusquement à 511 keV à l'intérieur de ces nuages.

Sigma a également effectué trois observations marquantes pour ce qui concerne les sources 4U1700-377, GX339-4 et OAO 1657-415. Pour la première de ces sources, Sigma a réalisé six opérations d'imagerie et de spectroscopie caractérisées par quatre heures de pose pour chacune d'entre elles. Tout au long de cette séquence, on voit nettement une variation de l'intensité en gamma avec des pics et des phases décroissantes. Selon les astrophysiciens, un tel phénomène est la preuve que l'on a affaire ici à un système binaire où un objet compact effondré absorbe de la matière venue de l'étoile compagnon autour de laquelle il tourne. Une telle orbite n'est pas circulaire et, lorsque les deux astres se trouvent au point où ils sont le plus rapprochés, le transfert de matière vers l'objet compact produit au contact de celui-ci une intense émission de rayonnement gamma.

En ce qui concerne GX339-4, Sigma a mis en évidence un singulier comportement marqué par des phases d'émissions fortes, d'émissions faibles et de courtes périodes d'extinction. Il ne fait aucun doute



Le ciel gamma à 1,809 MeV, tel qu'il apparaît dans la longueur d'onde de l'aluminium 26. L'image est en coordonnées galactiques. L'équateur correspond au plan de la Voie lactée. La plupart des émissions proviennent de restes de supernovæ de la Voie lactée.

que cet objet est un trou noir stellaire et il est indispensable que cet astre complexe soit davantage étudié par INTEGRAL.

Toujours observée par Sigma, la source OAO 1657-415 est un pulsar (étoile à neutrons en rotation rapide) découvert par un satellite américain de la série HEAO et qui forme un couple avec une étoile de plus grande taille, laquelle alimente le pulsar en voyant arracher une partie de sa matière. La phase d'accrétion de la matière sur l'étoile effondrée y crée un rayonnement gamma incontestable.

Sigma, comme ultérieurement CGRO, a aussi détecté ces fameux sursauts gamma extrêmement brefs et puissants dont l'isotropie de la distribution (ils viennent de toutes les directions) a été relevée dès 1992 par les travaux des astrophysiciens Meegan et Fishman. Selon les astrophysiciens Nikos Prantzos et Michel Cassé, une partie de ces rayonnements pourrait venir du halo galactique où se situeraient plusieurs dizaines de milliers de vieilles étoiles à neutrons qui, sous une influence externe, se rallumeraient très brièvement en émettant un violent flash gamma. Toutefois, selon Meegan et Fishman, cette isotropie de la distribution des sursauts gamma semble bien confirmer le fait qu'une partie de ce type de rayonnement détecté est d'origine extragalactique. En ef-

fet, certains sursauts gamma, comme le flash GRB790613 étudié en 1993 par les astrophysiciens Fishman et Murphy avec le satellite CGRO, sont émis par des sources situées à la limite de ce que peuvent détecter les satellites opérant dans le domaine des très hautes énergies.

Faisant suite au satellite Granat-Sigma et travaillant un certain temps en même temps que lui du fait de l'allongement de la durée de vie du télescope franco-soviétique, le gigantesque satellite Compton Gamma Ray Observatory a été nommé ainsi en l'honneur d'Arthur Holly Compton, couronné du prix Nobel de physique pour ses recherches dans le domaine des hautes énergies et de l'instrumentation spécifique qui fut embarquée sur des satellites. D'un poids de 17 t, CGRO a été mis en orbite en avril 1991 par la navette spatiale Atlantis et a incontestablement contribué à faire progresser l'astrophysique gamma, mais pas autant qu'on aurait pu le supposer en voyant la disproportion de masse par rapport à la combinaison Granat-Sigma. De plus, Sigma, lancé pourtant avant CGRO, lui était supérieur au point de vue de la résolution angulaire et en matière de spectroscopie fine.

Le programme CGRO avait en effet un handicap : entre la décision de construire le satellite et la date de son lancement, les techniques

instrumentales avaient progressé mais cela n'a pas du tout été tenu compte au cours du développement du satellite américain.

CGRO comportait quatre instruments principaux, à savoir BATSE (Burst and Transient Source Experiment), OSSE (Oriented Scintillation Spectrometer Experiment), COMPTEL (Imaging Compton Telescope) et EGRET (Energetic Gamma Ray Experiment). Les deux derniers ont été construits avec comme maître d'œuvre la firme allemande MBB. Le satellite américain apporta néanmoins considérablement aux études astrophysiques sur les hautes énergies sur plusieurs points. Il en est ainsi pour l'étude du continuum de fond diffus galactique en émission gamma venant de l'intérieur de la galaxie sur la bande 0,75-30 MeV et qui a été étudié grâce à l'instrument COMPTEL de GRO. Cette émission provient du phénomène de « *Bremstrahlung* », caractéristique des interactions entre les électrons du rayonnement cosmique et le gaz interstellaire, qui se manifeste par la création d'un spectre de radiation particulier dont il est possible de mesurer l'énergie. Au sein du « bruit » de ce rayonnement de fond, il est possible, avec un instrument de grande sensibilité, de faire ressortir des sources individuelles. Ainsi, des sources connues en rayonnement X se sont révélées être aussi émettrices en rayonnement gamma. CGRO l'a clairement démontré pour les objets Cyg X1, Cyg X3, Gal 025-14, Vela PSR, Eta Car, SS4333, Cir-1 et Cas A.

CGRO a aussi contribué à détecter les mystérieux sursauts gamma qui posent encore aujourd'hui tant de problèmes d'interprétation aux physiciens et aux théoriciens. Le satellite a détecté plus de 2 000 de ces sursauts et montré qu'une part importante de ceux-ci proviennent de sources extragalactiques. Certains de ces sursauts produiraient autant d'énergie gamma que le Soleil en produit sur une période de mille ans. Pour que l'énergie de ces sursauts nous apparaisse si intense, malgré leur distance (certains sursauts ont été localisés par Sigma et CGRO à une distance de 12 milliards d'années-lumière) et une certaine déperdition en cours de route due à la traversée de nuages interstellaires ou à l'attraction d'étoiles, il faut que le niveau initial de ceux-ci soit extra-

ordinairement plus élevé que ce que nous connaissons par ailleurs.

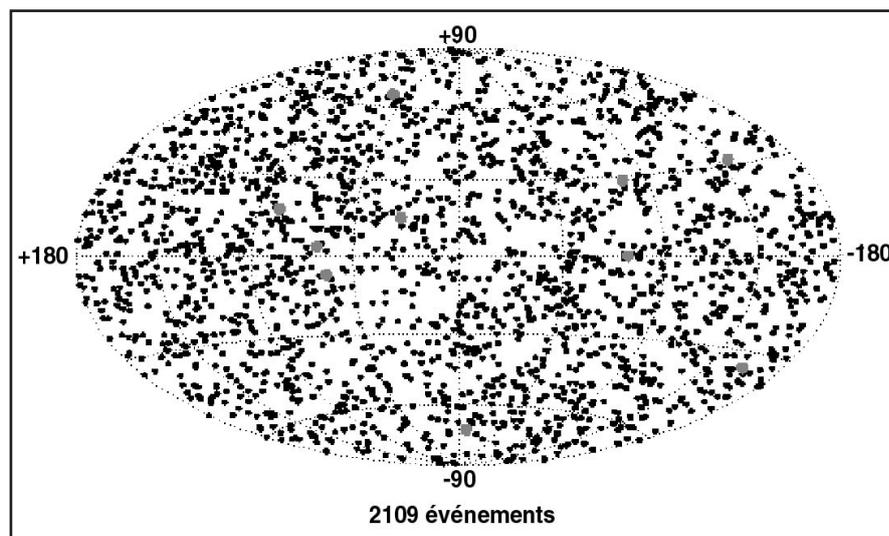
Plusieurs théories ont été proposées comme source des sursauts gamma, comme la collision entre deux étoiles à neutrons ou l'effondrement d'une étoile géante massive en trou noir. Ces théories semblent avoir été confirmées avec les observations effectuées par le satellite italo-néerlandais Beppo-Sax qui détecta en 1997 un sursaut d'une violence extrême en X et en gamma. Son origine vient de ce que l'astrophysicien polonais Paczynski appelle une « hypernova » ou une coalescence entre un trou noir et une étoile effondrée. CGRO et Beppo-Sax ont permis de mesurer l'émission comme cent fois supérieure à l'énergie que dégage l'explosion d'une supernova. CGRO a également étudié les émissions de l'aluminium 26 sur 1 809 keV dû à un processus de nucléosynthèse et qui est principalement éjecté par les supernovae, les étoiles de Wolf-Rayet, les novae X, les étoiles AGB. Pour ce type d'émission, et concernant seulement les supernovae, un modèle théorique a été proposé il y a dix ans par l'astrophysicien américain Clayton et ce modèle a été récemment conforté par l'analyse, au moyen du satellite XMM, de sursauts gamma produits par des supernovae en décembre 2001. CGRO a aussi trouvé des traces de cobalt 57 dans la région où explosa la supernova 1987-A dans le

Grand Nuage de Magellan. Il apparaît de plus en plus évident que les éléments lourds dans l'univers ont été formés dans des processus faisant appel aux explosions d'une première génération de supernovae.

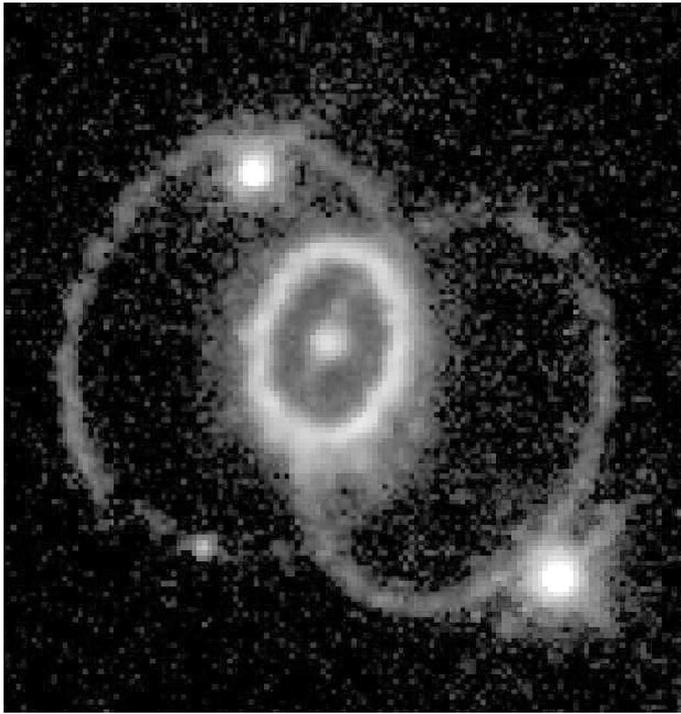
D'autre part, CGRO a découvert de nouveaux objets émettant en gamma comme certains quasars (qui sont habituellement connus pour leur forte émission en visible et en X) et identifié une nouvelle classe de noyaux galactiques actifs. La combinaison des instruments BATSE, COMPTEL et EGRET a permis de découvrir en rayonnement gamma les pulsars PSR B 1509-58, PSR B1706-44 et PSR B 1055-52. Il existe actuellement plus de 800 pulsars répertoriés dans notre galaxie selon la base de données de l'université de Princeton, mais seule une dizaine de ceux-ci ont été catalogués comme des émetteurs gamma.

La voie royale pour INTEGRAL

En raison de ses capacités hors du commun, une voie royale s'offre au satellite européen pour des investigations qui seront pour longtemps inégalées. INTEGRAL est certes un satellite scientifique européen mais il est avant tout un exemple de comment on peut fédérer des travaux



On voit représentée ci-dessus la distribution dans le ciel de plus de 2 000 sursauts gamma enregistrés par le CGRO (coordonnées galactiques).



La supernova 1987-A située dans le Grand Nuage de Magellan.

effectués en parallèles, puisqu'il regroupe les concepts GRASP (ESA) et NAE (Etats-Unis) en un seul satellite international sous maîtrise d'œuvre européenne. Conscient des avancées faites par les Européens en matière d'astronomie gamma, l'astrophysicien Matteson (université de Californie San Diego) a joué un rôle considérable pour l'internationalisation du projet INTEGRAL, qui consiste pour l'essentiel en un spectro-imageur qui opérera sur la plage 15 keV-10 MeV du spectre électromagnétique. INTEGRAL est probablement le télescope pour lequel ont été effectuées le plus grand nombre de simulations. Par rapport à l'instrument COMPTEL de GRO qui opérait sur la plage 3-10 MeV de rayonnement galactique avec 3,5° de résolution angulaire, INTEGRAL aura une résolution dix fois supérieure. De plus, il tire les leçons des programmes gamma antérieurs : ainsi, pour ce qui concerne l'émission gamma venue des supernovae et des novae, le spectromètre du satellite a été en partie conçu en tenant compte des observations faites par des astrophysiciens comme Chan, Lingens, Woosley, Leising et Share qui ont participé au programme CGRO.

Au cours de la brève histoire de l'évolution de l'astrophysique gamma, un certain nombre d'étapes ont été franchies : le satellite américain HEAO-3 a constitué un

progrès marquant dans le domaine de la détection des hautes énergies, Sigma a été un progrès considérable dans la résolution angulaire tandis que CGRO l'a été dans le domaine de la sensibilité. INTEGRAL combine des progrès considérables dans les trois domaines mais avec un avantage plus marquant en matière de sensibilité. Toutes ces qualités vont nous permettre d'effectuer des avancées dans nombre de domaines que l'on peut étudier avec les rayonnements gamma : désintégration radioactive (aluminium 26, fer, cobalt), excitation des noyaux des atomes, réactions d'annihilation matière-antimatière, rayonnement cyclotron (rayonnement électromagnétique émis par les électrons voyageant sur des trajectoires circulaires ou hélicoïdales dans un champ magnétique) et plasmas galactiques portés à haute température.

Les objectifs scientifiques d'INTEGRAL concernent à la fois l'astrophysique galactique et l'astrophysique extragalactique.

Pour ce qui concerne l'astrophysique galactique :

- centre galactique (émission du continuum, émission de lignes gamma) ;
- objets compacts : binaires x où un transfert de matière émet parfois un rayonnement gamma, naines blanches, étoiles à neutrons, candidats trous noirs, sources non

identifiées ou complexes et sur lesquelles on ne peut établir, pour l'instant, aucun modèle certain ;

- processus explosifs et hydrostatiques de nucléosynthèse : supernovae de type 2 issues de géantes bleues, autres types de supernovae de type 2 selon un processus d'explosion d'étoile massive, supernovae de type 1a (explosions de naines blanches), novae x, aluminium 26, fer 60 ;

- processus interstellaires : lignes d'annihilation positron sur 511 keV, lignes de rayonnement cosmique avec des interactions de matière interstellaire, continuum de rayonnement cosmique avec des interactions de matière interstellaire ;

- rayonnements transitoires éphémères à haut niveau d'énergie : bouffées de rayonnement gamma très dur, sources éphémères dans le plan galactique.

Pour ce qui concerne l'astrophysique extragalactique :

- noyaux de galaxies actives et blazars ;

- noyaux de galaxies actives et rayonnement de fond cosmique à haute énergie ;

- production habituelle de rayonnement gamma par les galaxies ;

- amas de galaxies.

Au service de ces objectifs impressionnants, les concepteurs d'INTEGRAL ont mis au point deux instruments principaux (imageur et spectromètre) et deux instruments complémentaires qu'il est possible de braquer instantanément sur les sources gamma détectées en les étudiant aussi sur d'autres longueurs d'onde. Ces deux instruments sont le X-Ray Monitor, dénommé également JEM-X, et l'Optical Transient Camera (OTC). L'imageur IBIS fournira des images extrêmement piquées des rayons gamma. Il est réalisé par un consortium industriel dont le maître d'œuvre est la firme italienne Alenia Spazio. IBIS utilise la technique du masque codé qui est ici optimisée pour l'imagerie de sources gamma difficiles à mettre en évidence sur la plage énergétique allant de 50 keV à 10 MeV. Le spectromètre SPI est quant à lui optimisé pour des mesures détaillées des lignes d'émission des rayons gamma et la cartographie des sources diffuses d'une échelle angulaire inférieure à 1,4°. Nul doute qu'INTEGRAL n'en finira pas de nous étonner.