

Il y a seulement cinquante ans que les astronomes ont véritablement pris conscience de la richesse du spectre électromagnétique. Cependant, certaines "couleurs" ne se laissent pas aborder aussi facilement que les autres, et ceci est particulièrement vrai pour le domaine des hautes énergies.

par **Yaël Nazé¹** & **Grégor Rauw**
Groupe d'Astrophysique des Hautes
Énergies (Université de Liège)

l'Univers des hautes éne

Ces rayons γ nous permettent de véritablement prendre conscience de l'extraordinaire violence de l'Univers mais, hélas, ils ne se laissent pas facilement capturer. Malgré plusieurs décennies de travail, l'astronomie γ en est toujours à ses balbutiements et le ciel γ comporte encore bien des zones d'ombre. C'est pourquoi, en 1993, les Européens décidaient de construire un observatoire γ à part entière dans le cadre du programme "Horizon 2000" : INTEGRAL (INTErnational Gamma-Rays Astrophysics Laboratory) – *figure 2*, qui fut finalement lancé en octobre 2002 et donne aujourd'hui d'importants résultats.

Lumière γ

La nature de la lumière que nous observons à travers le spectre électromagnétique est généralement liée à la température des objets : il s'agit du fameux "rayonnement de corps noir". Ainsi, le gaz chauffé à plusieurs millions de degrés se montre dans les rayons X tandis que le rayonnement de fond cosmologique ultrafroid (-270 °C) est détectable dans les

domaines radio et infrarouge.

L'Univers γ , lui, est loin d'être habituel. En effet, l'émission γ a lieu à la suite de processus non thermiques (*fig. 1*), parfois très exotiques, comme par exemple l'annihilation de la matière avec l'antimatière. La désintégration de particules ou d'atomes radioactifs est également responsable d'émissions γ particulières. Ainsi, on observe régulièrement la désintégration du Titane-44 (*fig. 3*) ou celle de l'Aluminium-26 (*fig. 4*). Bien sûr, ces éléments radioactifs ont des durées de vie limitées (environ 85 ans pour le Titane-44 et un million d'années pour l'Aluminium-26). Il n'étaient pas initialement présents dans l'Univers, et ont été synthétisés lors d'explosions de supernovæ ou de réactions nucléaires se produisant au cœur des étoiles. Un autre processus est également capable de générer des photons γ : le mouvement des particules relativistes (c'est-à-dire voyageant à des vitesses proches de celles de la lumière) dans un champ magnétique (émission synchrotron) ou dans un champ électrique (bremsstrahlung).

¹ – Auteur des livres *Les couleurs de l'Univers*, éd. Belin (Bibliothèque Scientifique) et *L'Astronomie au féminin*, éd. Vuibert (cf. *l'Astronomie* de décembre 2005 et septembre 2006). Le premier ouvrage cité a reçu le Prix du livre de l'astronomie 2006 au 22^e festival de Haute Maurienne-Vanoise

Énergies dévoilé par INTEGRAL

Enfin, il peut se produire des échanges d'énergie entre des particules et des photons. Si les particules sont relativistes et rencontrent des photons de basse fréquence (infrarouge par exemple), alors les photons gagneront de l'énergie, jusqu'à devenir des photons γ , tandis que les particules en perdront : c'est l'effet Compton inverse. Au contraire, si des photons γ rencontrent des particules de basse énergie, l'échange aura lieu dans le sens inverse, et de l'émission γ disparaîtra : c'est l'effet Compton. Précisons que dans le domaine des hautes énergies, les astronomes ne parlent pas de longueur d'onde ni de fréquence. Ils préfèrent utiliser l'énergie des photons, et plus particulièrement une unité peu usuelle : l'électronvolt (eV), et ses multiples (1 000 eV = 1 keV, 1 000 keV = 1 MeV, 1 000 MeV = 1 GeV et 1 000 GeV = 1 TeV). Un eV correspond à l'énergie acquise par un électron accéléré par une tension électrique de un volt. Par exemple, la couleur jaune, de longueur d'onde 570 nm, correspond à une énergie de 2 eV. La limite entre le domaine X et le domaine γ se situe conventionnellement aux alentours de 100 keV.

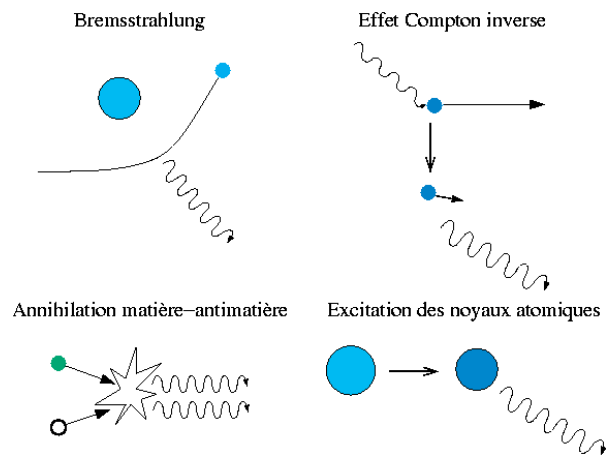


Fig. 1 – Processus émetteurs de rayons γ . © GAPHE



Fig. 2 – Vue d'artiste d'Integral en vol. © ESA

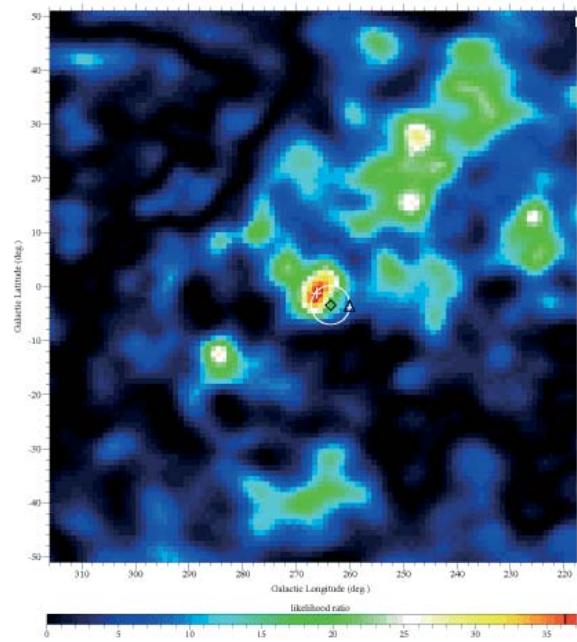
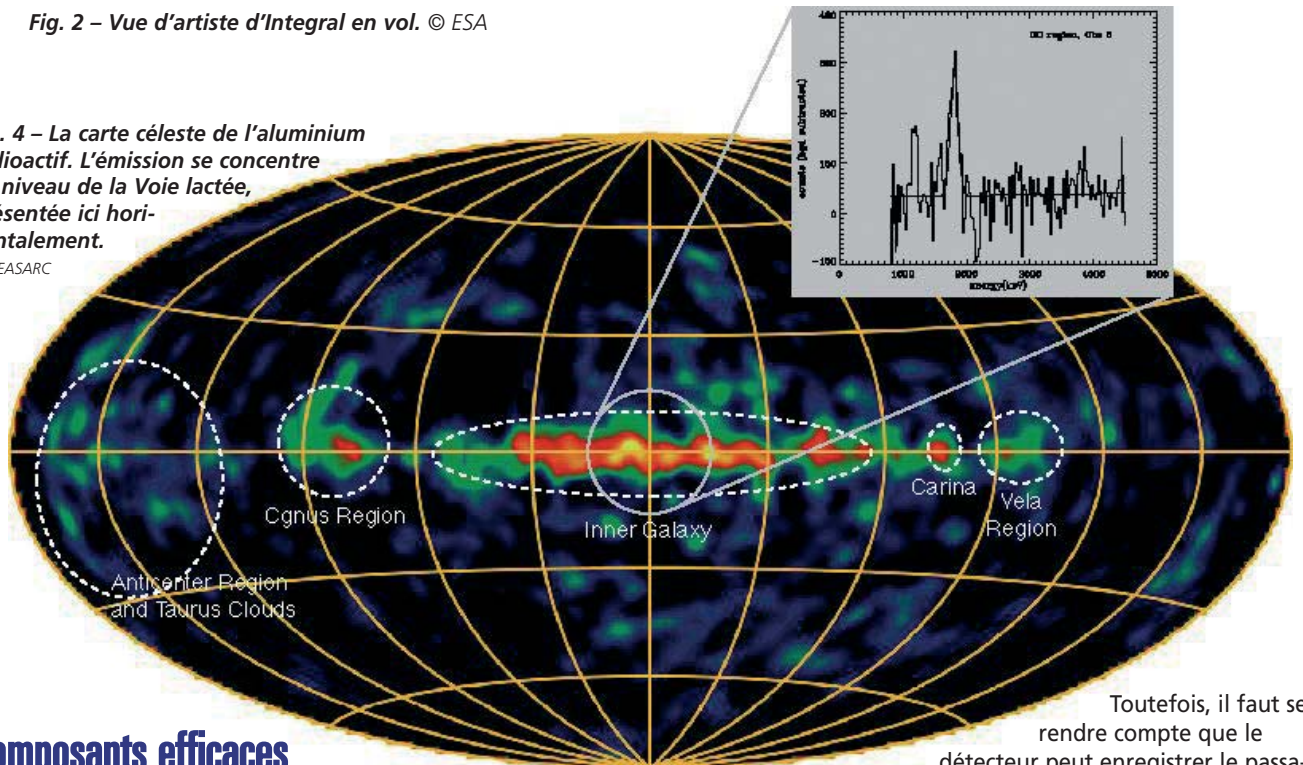


Fig. 3 – Image de la désintégration du Titane-44 dans la supernova Vela. © HEASARC

Fig. 4 – La carte céleste de l'aluminium radioactif. L'émission se concentre au niveau de la Voie lactée, présentée ici horizontalement.

© HEASARC



Composants efficaces

Le problème avec l'observation des rayons γ , c'est qu'on n'arrive toujours pas à focaliser ces rayons² ! Ils sont si énergétiques qu'ils traversent la matière comme si de rien n'était. Les "télescopes γ " sont donc très simples : un collimateur et un détecteur. Le collimateur est un simple tube qui définit le champ de vue : faire de l'astronomie γ , c'est donc un peu comme regarder le ciel nocturne à travers un tube de carton. Le détecteur, lui, repose aujourd'hui sur l'utilisation de semi-conducteurs.

Toutefois, il faut se rendre compte que le détecteur peut enregistrer le passage de particules énergétiques (notamment les rayons cosmiques) tout aussi bien que celui des photons γ ! Ainsi, la première³ détection de rayons γ célestes eut lieu en 1961 : à cette occasion, le satellite Explorer XI détecta 22 photons γ sur... des dizaines de milliers d'événements enregistrés ! Pour éviter le plus possible les particules énergétiques se trouvant dans les ceintures de Van Allen, les astronomes sont obligés de lancer leurs télescopes assez loin de la Terre. Integral, par exemple, orbite à une distance comprise entre 9 000 et

² – Quoique des chercheurs français du Centre d'étude spatiale des rayonnements (Toulouse) aient réalisé des lentilles γ expérimentales.

³ – Si l'on omet la détection de l'émission γ du Soleil, faite par une fusée en 1958.

153 000 kilomètres de la Terre, avec une période de trois jours. En plus, comme les particules énergétiques et les rayons γ au-delà d'une certaine énergie traversent tout, le tube collimateur est transparent... et le détecteur les enregistre donc sans distinction de leur direction ! Pour remédier à ce problème, il faut rendre le collimateur "actif". En fait, il ne s'agit pas d'un simple tube, mais bien d'un véritable "scintillateur" qui entoure le détecteur principal sur les côtés et en dessous : lorsque le collimateur enregistre le passage d'une particule chargée, il produit un signal et prévient ainsi le détecteur principal de ne pas tenir compte de l'événement.

Même avec ces précautions, l'astronomie γ n'est pas facile, et elle commence seulement à véritablement prendre son essor. À la suite de l'américain CGRO (*Compton Gamma Ray Observatory*, lancé le 5 avril 1991 et travaillant dans la gamme 30 keV à 30 GeV), l'europpéen Integral commence à nous dévoiler ce domaine. Cet observatoire emporte à son bord quatre instruments différents : SPI, IBIS, JEMX et OMC. SPI (Spectrometer Onboard Integral) est un spectromètre haute résolution qui réussit à détecter un signal cent fois plus faible que le bruit environnant ! Travaillant entre 20 keV et 8 MeV, on peut distinguer dans ses spectres des détails larges de 2,5 keV à une énergie d'un MeV, soit une résolution spectrale de 400. IBIS (Imager onBoard Integral) et ses deux détecteurs, Pcsit et Isgr, se destine plutôt à faire de l'imagerie.

Mais pour mieux comprendre la nature de ces sources de hautes énergies, Integral est doté de deux instruments supplémentaires : JEMX (Joint European X-ray Monitor), une paire de télescopes X, et l'OMC (Optical Monitor Camera), un imageur visible comportant une lentille de cinq centimètres et offrant un champ de vue de cinq degrés de diamètre. Ces deux instruments permettent de voir à quoi ressemblent ces sources de rayons γ dans d'autres zones du spectre électromagnétique, ce qui permet de mieux comprendre les processus physiques à l'origine de l'émission γ .

En vol, les ingénieurs se sont toutefois rendu compte de quelques problèmes : SPI n'est pas aussi sensible que prévu entre 100 keV et 1,5 MeV ; deux de ses 19 détecteurs en germanium ultrapur ne fonctionnent plus ; l'environnement du satellite comporte bien plus de polluants (rayons cosmiques, etc.) que prévu et, suite à une dégradation rapide de leurs performances, il a fallu garder en réserve un des deux instruments JEMX pour éviter leur perte totale.

Pour obtenir des images précises, IBIS, SPI et JEMX utilisent une technique très particulière : la technique des masques codés. Il s'agit de mettre au sommet du collimateur un masque percé de trous. En fonction de sa direction, chaque source céleste projette de manière différente l'ombre de ce masque (fig. 5).

Connaissant la superposition des ombres projetées, des techniques numériques permettent de retrouver la position de la source. Grâce aux masques codés, l'imageur d'Integral arrive à obtenir une résolution spatiale exceptionnelle, soit... douze minutes d'arc environ. Bien sûr, cette résolution est presque 7 000 fois moins bonne que celle du télescope spatial Hubble, qui travaille dans les domaines optique et ultraviolet, mais elle constitue néanmoins une grande avancée par rapport aux anciennes observations γ , précises à quelques degrés seulement. En effet, à cause de la résolution angulaire très limitée des télescopes γ précédents, la plupart des sources détectées avant Integral sont toujours de nature inconnue. Ainsi, sur les 271 sources ponctuelles détectées par l'instrument EGRET à bord de CGRO, 170 n'ont pas encore de contrepartie optique connue.

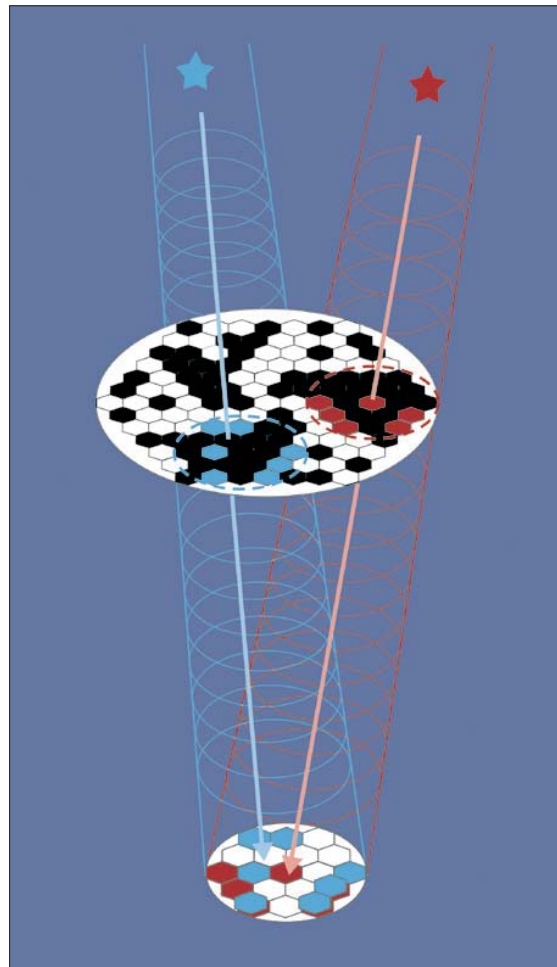


Fig. 5 – Principe des masques codés. © ESA

Le ciel γ

Pour générer des rayons γ , il faut des événements extrêmement violents. Il existe donc assez peu de sites célestes capables de produire de la lumière γ , mais ils sont exceptionnels.

Dans le Système solaire, les sources γ dans la gamme d'énergie d'Integral ne sont donc pas nombreuses. Avec la sensibilité des instruments actuels, seuls trois objets ont pu être détectés : la Terre, le Soleil et la Lune. L'atmosphère terrestre émet parfois des rayons γ lors des tempêtes de foudre, tandis que le Soleil n'est capable de générer des photons γ que lors de ses éruptions les plus intenses. Enfin, la surface de la Lune, constamment bombardée par des rayons cosmiques, devient légèrement radioactive et se met donc à émettre des photons γ . Bien plus lointaines, les étoiles "normales" ne sont pas détectables dans le domaine γ . Par contre, certaines étoiles extrêmes peuvent se révéler des sources γ intenses. Il s'agit par exemple des astres cannibales, dans lesquels un astre compact (trou noir ou étoile à neutrons) aspire la matière de son compagnon. Certains cadavres stellaires, les pulsars (des étoiles à neutrons magnétiques émettant de la lumière à la manière d'un phare) nous envoient également des bouffées de rayons γ . Enfin, les explosions stellaires, novae et supernovae, sont des événements énergétiques par excellence et émettent donc des quantités appréciables de rayons γ .

Depuis les confins de l'Univers, seules des sources célestes extrêmement puissantes sont capables d'émettre des rayons γ :



Fig. 6 – Les régions autour du centre galactique, vu par Integral. Une petite centaine de sources discrètes γ sont détectées. © ESA

les galaxies actives et les sursauts γ (ou GRBs, Gamma-Ray Bursts). Les galaxies actives comportent en leur cœur un trou noir supermassif qui avale des quantités incroyables de matière : l'émission γ provient des abords immédiats du trou noir, et elle nous donne donc des informations précieuses sur la physique dans des conditions extrêmes. Très différents, les sursauts γ sont, eux, très brillants mais aussi très éphémères : chaque jour, les astronomes détectent des bouffées de rayons γ qui s'éteignent aussi brusquement qu'elles avaient commencé. Ces événements peuvent apparaître dans n'importe quelle direction du ciel mais la position et l'instant précis du prochain sursaut sont tout à fait imprévisibles. Il y a seulement quelques années que nous savons que ces sursauts γ se produisent dans des galaxies lointaines, et non dans notre voisinage. Il y a encore moins de temps que leur véritable nature a pu être déchiffrée : les sursauts γ sont généralement associés à la formation d'un trou noir. Ainsi, les sursauts γ de plus longue durée sont produits lors de super-supernovae. Ils marquent le résultat de la mort d'étoiles extrêmement massives et la naissance subséquente d'un trou noir stellaire. Les sursauts γ les plus courts proviendraient, eux, d'étoiles doubles où se produirait la fusion de deux étoiles à neutrons ou l'absorption d'une étoile à neutrons par son compagnon trou noir.

Résultats de portée galactique...

De notre proche voisinage jusqu'aux limites de l'Univers connu, Integral multiplie les découvertes depuis son lancement. Focalisé sur le plan galactique (qu'il explorait deux fois par semaine en 2003), l'observatoire européen a logiquement apporté ses premiers résultats pour cette région. Ainsi, Integral a-t-il résolu un problème vieux de trente ans. En direction du centre galactique, on avait détecté une émission γ que l'on pensait composée à parts égales d'une émission diffuse et d'émissions discrètes (associées à des sources ponctuelles). L'importance relative de ces deux types d'émission posait un gros problème théorique : les processus à l'origine d'une telle quantité d'émission γ diffu-

se devraient se signaler à d'autres longueurs d'onde, ce qui n'était pas le cas... Les données d'Integral montrèrent rapidement que le brouillard diffus observé par les observatoires précédents pouvait se démêler en une centaine de sources γ distinctes (fig. 6) : la contribution de l'émission diffuse atteint tout au plus 10 %... une proportion bien plus compatible avec les estimations théoriques.

L'étude du centre galactique lui-même réserva quelques surprises : à la position de la source radio Sgr A*, là où se trouve un trou noir supermassif de quelques millions de masses solaires, on découvrit pour la première fois une émission de haute énergie persistante. Non seulement Integral découvrait l'émission haute énergie de notre ogre galactique, mais il permit aussi d'en faire l'histoire ! En effet, un nuage moléculaire voisin (baptisé Sgr B2), sorte de miroir naturel, nous renvoie l'écho de l'émission centrale (fig. 7). Et comme le

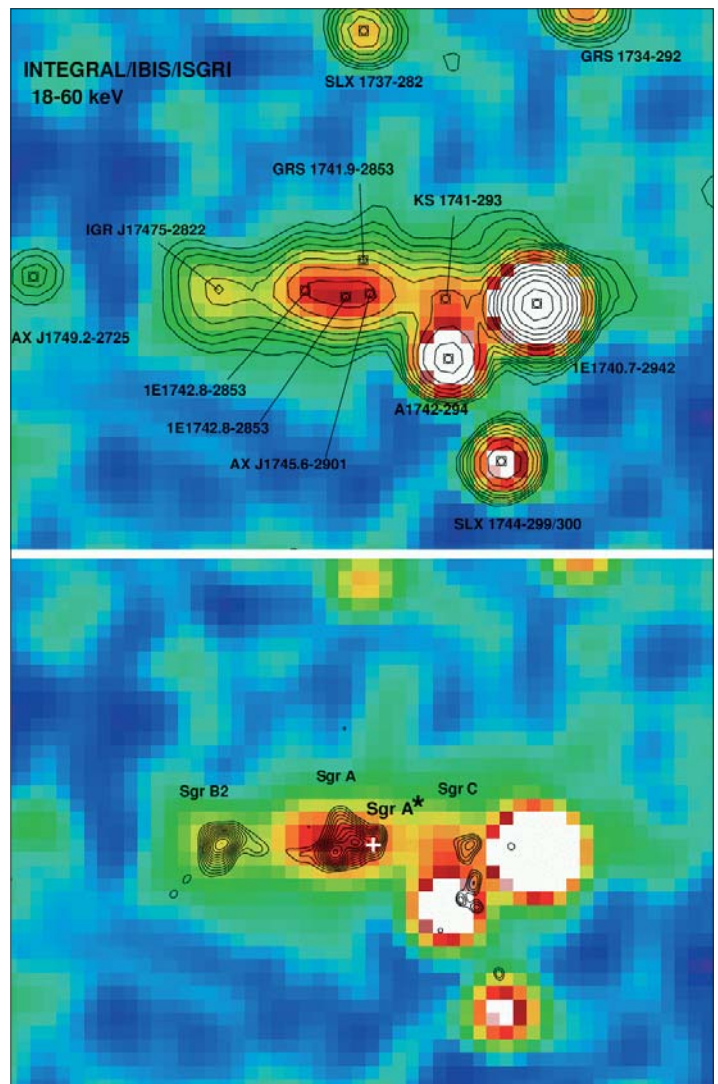


Fig. 7 – Sgr B2 est un nuage moléculaire qui nous renvoie l'écho de l'émission γ du centre galactique (dont une émission de haute énergie persistante a également été découverte par Integral). © ESA

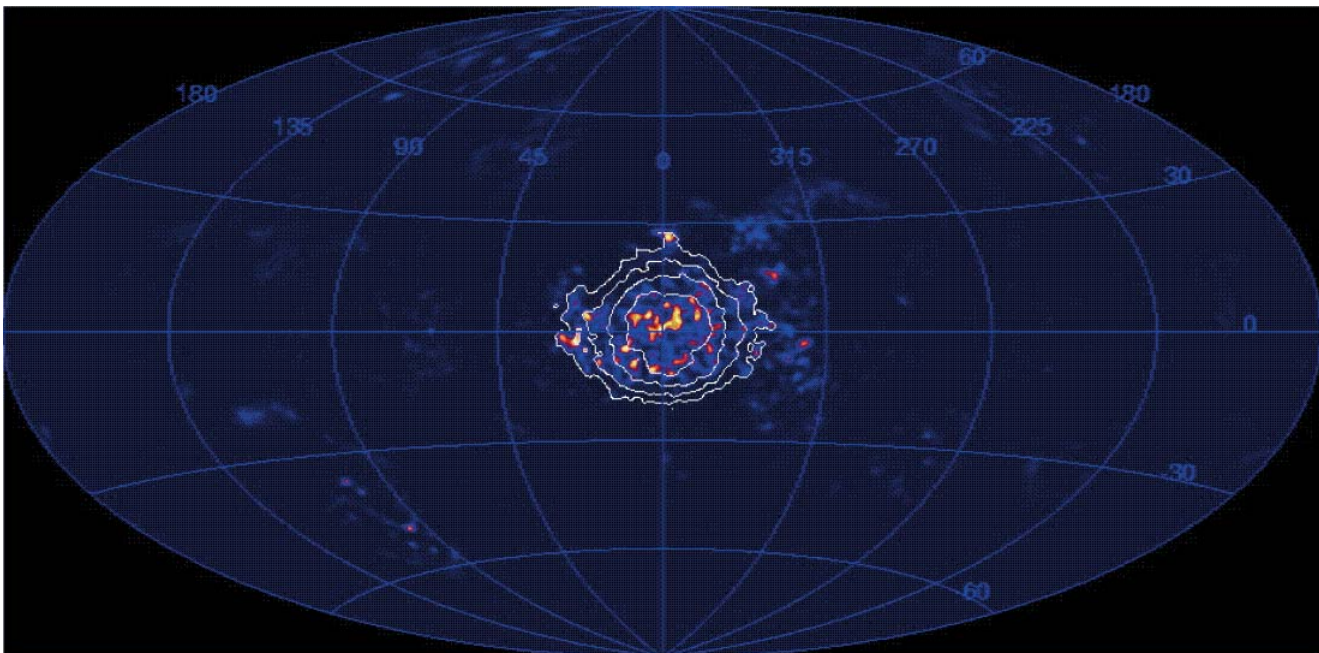


Fig. 8 – Carte montrant l'émission γ résultant de l'annihilation des électrons avec les positrons. © ESA

nuage se trouve à 350 années de lumière de Sgr A*, cet écho nous dévoile l'émission avec un retard d'au moins 350 ans : à cette époque, le centre galactique était environ un million de fois plus brillant qu'aujourd'hui.

Enfin, les observations d'Integral permettent de construire une carte précise de l'émission à 511 keV. Ce rayonnement particulier provient de l'annihilation des électrons avec leurs correspondants d'antimatière, les positrons. Cette raie à 511 keV est la plus brillante des émissions γ , la plus connue, mais aussi la plus mystérieuse : d'où vient l'antimatière puisque notre monde se compose, lui, de matière ? De la désintégration d'éléments ou de particules radioactifs créés par les explosions de supernovae, novae ou autres sursauts γ ? Ou bien d'interactions entre la matière interstellaire et les rayons cosmiques ? Nul ne le sait exactement, même si plusieurs de ces mécanismes apportent probablement leur contribution. Pour y voir plus clair, Integral a observé cette émission en détail, et ces observations montrent que l'émission à 511 keV est symétrique et a une largeur de plusieurs degrés autour du centre galactique (fig. 8). Il n'y a nulle trace d'une "fontaine d'antimatière" comme certains l'avaient proposé sur la base de données anciennes de moindre qualité.

Deux autres raies ont retenu l'attention d'Integral, celles dues à la désintégration de l'isotope 60 du fer (^{60}Fe) à 1 173 et

1 333 keV. Bien plus faible que celle due à ^{26}Al , cette raie avait jusqu'ici échappé à la vigilance des astronomes. Toutefois, la grande sensibilité d'Integral lui a permis de la détecter sans gros problème (fig. 9)... mais avec quelques résultats surprenants. En effet, si ^{26}Al est bien produit lors des explosions de supernovae, le rapport fer/aluminium devrait se situer autour de 0,4 – or, on observe seulement une valeur de 0,1 ! Cela indique qu'il doit exister une source d'aluminium supplémentaire, probablement les vents

stellaires denses des étoiles en fin de vie (Wolf-Rayet et étoiles sur la branche asymptotique des géantes) qui éjectent des grosses quantités de matière enrichie en produits de la nucléosynthèse dans le milieu interstellaire.

Cette émission due aux raies γ nous permet de mieux comprendre les processus de formation des éléments chimiques (la nucléosynthèse) qui ont lieu au cœur des étoiles. Étrangement, Integral a même apporté des résultats... pour le Soleil, l'étoile la plus proche de la Terre.

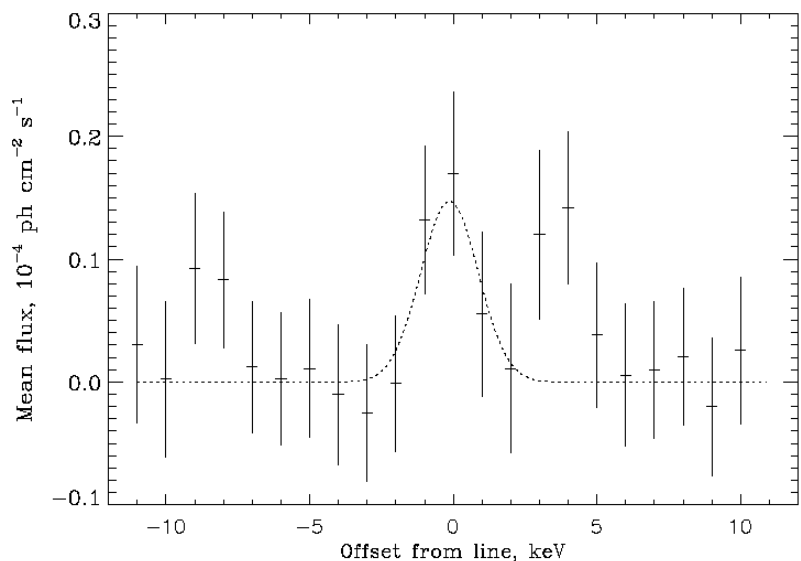


Fig. 9 – La première détection de l'émission du ^{60}Fe a été faite par Integral. (Note : deux raies dues aux instruments utilisés se voient ici de part et d'autre de la raie du fer, vers -8,5 et +4). © ESA

Un an après son lancement, le satellite européen observait des raies γ en provenance d'une éruption solaire particulièrement puissante – une première scientifique ! Ces données ont notamment montré que l'accélération des diverses particules solaires se faisait de manière différente suivant leur nature – Integral a donc véritablement révélé les mécanismes à l'œuvre lors des éruptions de notre astre du jour.

...et objets exotiques

Mais Integral ne s'intéresse pas seulement aux sources célestes "classiques". Ainsi, les observations en provenance de ce satellite ont permis de dévoiler une nouvelle classe d'objets célestes. Ils ressemblent à des binaires X, c'est-à-dire des systèmes où un astre compact (trou noir ou étoile à neutrons) avale petit à petit son compagnon stellaire, mais ce nouveau type de cannibale est particulièrement timide : du gaz très dense (le vent stellaire de l'étoile normale ou le disque d'accrétion de l'astre compact) forme un véritable cocon autour du couple et en absorbe presque tout le rayonnement (y compris les rayons X d'énergie plus faible), ce qui avait empêché toute détection jusqu'ici (fig. 10). Il faut noter que le premier objet de ce type a été découvert après seulement un mois d'observation, ce qui souligne la puissance d'un observatoire comme Integral.

L'observatoire européen a également découvert une émission de haute énergie en provenance des pulsars X anormaux (AXP), des pulsars jeunes, avec des champs magnétiques très intenses (10^{15} gauss, à comparer au demi-gauss du champ magnétique terrestre) – ce qui leur a valu le nom de *magnétar* – et responsables d'éruptions γ répétées. La découverte de leur émission de haute énergie aide les théoriciens à mieux comprendre ces objets mystérieux. Mais les observations d'Integral ne se limitent pas aux magnétars. Au cours de leur vie, la rotation des pulsars est censée ralentir ; cependant dans certains cas, on observe plutôt une accélération. Cela se produit si le pulsar absorbe la matière d'un infortuné compagnon. Integral a permis de découvrir le plus rapide d'entre eux, IGR J00291+5934, dont la période n'est que de 1,67 milliseconde ! Dans ce système minuscule (qui tiendrait tout entier à l'intérieur du

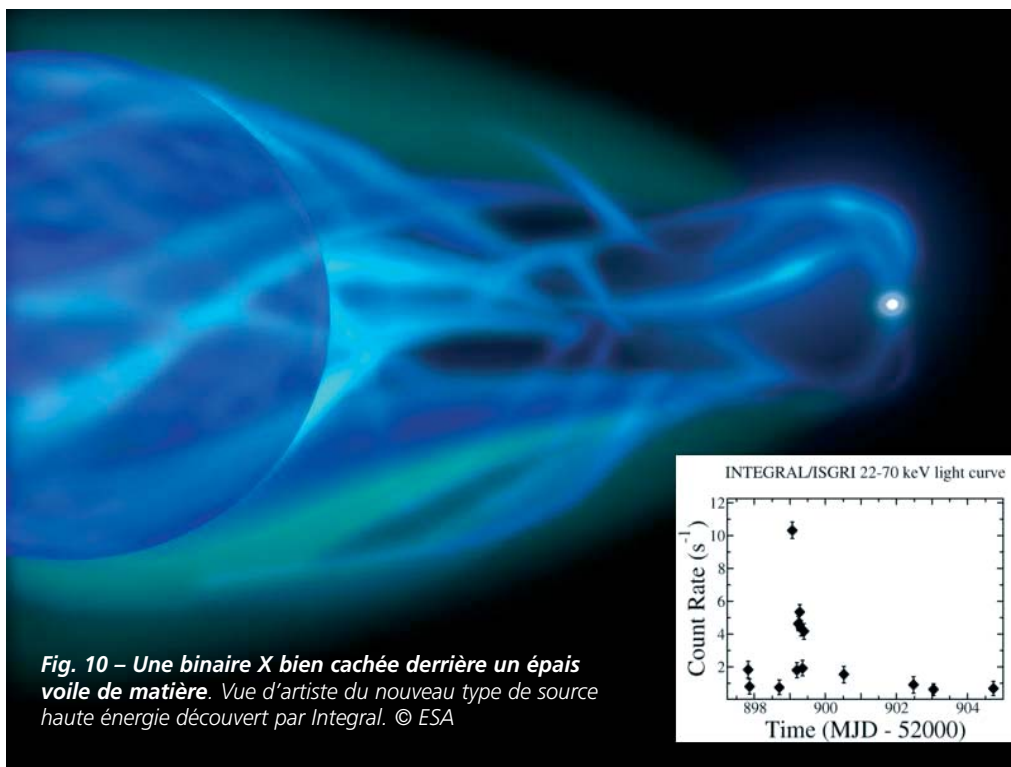


Fig. 10 – Une binaire X bien cachée derrière un épais voile de matière. Vue d'artiste du nouveau type de source haute énergie découvert par Integral. © ESA

Soleil), le pulsar a presque avalé tout son compagnon, qui ne "pèse" plus aujourd'hui que quarante fois la masse de Jupiter !

Bien plus loin et bien plus énergétique, les sursauts γ dominent le ciel aux hautes énergies. Ces explosions puissantes ne constituent qu'un objectif secondaire pour Integral – au contraire du satellite américain Swift (lancé en 2004). Toutefois, l'observatoire européen est capable d'en fournir une position précise (à une minute d'arc près) en quelques dizaines de secondes seulement. Cette rapidité lui a permis de découvrir en décembre 2003 le sursaut γ le plus proche ("seulement" 1 300 millions d'années de lumière) et le moins lumineux. Si les astronomes savaient déjà qu'il existait une classe de sursauts moins énergétiques, qui émettent la majorité de leur rayonnement dans le domaine des rayons X, la découverte d'un sursaut résolument γ mais peu lumineux ruine les espoirs d'utiliser un jour les sursauts γ comme des chandelles standards pour déterminer des distances cosmologiques. Comme indiqué plus haut, l'annihilation d'un électron avec un positron produit des photons γ énergétiques. Inversement, la rencontre d'un photon de très haute énergie avec un photon de plus basse énergie (par exemple un photon du rayonnement de fond cosmologique)

peut produire une paire électron-positron. Dans ce processus, le photon γ est détruit et cette interaction donne effectivement lieu à l'apparition d'un horizon au-delà duquel aucun photon γ ne peut être observé. La position de cet horizon dépend de l'énergie des photons γ considérés. Pour le domaine d'énergie couvert par Integral cet horizon n'a pratiquement aucun effet sur la possibilité de détecter des sources extragalactiques. Dans cet univers extragalactique lointain, les noyaux actifs de galaxies (AGN) tentent (en vain) de ravir la suprématie aux sursauts γ . Toutefois, là encore, les observations d'Integral sont cruciales pour notre compréhension physique du monde. En analysant l'émission γ des AGN, les astronomes ont ainsi pu montrer que le trou noir supermassif au centre de ces objets était bien entouré d'un tore de matière dense, ce qui a permis de convaincre les derniers opposants au "modèle unifié" des AGNs...

De notre voisinage aux confins de l'Univers, Integral tente, de son œil perçant, de révéler les mystères des hautes énergies. En trois ans d'observation, le satellite européen a déjà obtenu plusieurs résultats importants... tant et si bien que l'Agence spatiale européenne a jugé bon de prolonger sa mission jusqu'en 2010 !