

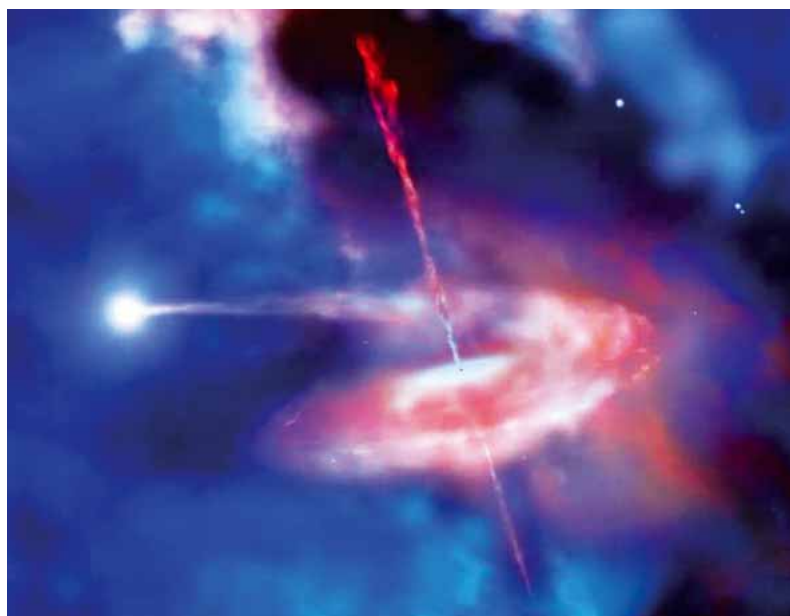
# Dans l'Univers extrême et violent

Il est une part encore secrète de l'Univers, celle où se manifestent les trous noirs et les sites d'accélération de particules du rayonnement cosmique. La connaissance de ces phénomènes, parmi les plus énergétiques de l'Univers, suppose d'explorer un domaine particulier du rayonnement cosmique : celui des rayons X durs et des rayons gamma (entre 1 keV et 1 MeV).

**D**ans le spectre des **rayons X durs** et **gamma**, l'exploration du ciel ne fait que commencer ! Une certitude pourtant : dans cette gamme d'énergie, l'atmosphère oppose une véritable barrière à la progression des **photons**. L'idée sera donc de lancer un télescope spatial pour observer au-delà de cette frontière et qu'il soit doté d'un spectro-imageur. Cet instrument devra détecter les photons gamma, en mesurer la direction d'origine et l'énergie, en déterminer la date d'arrivée (avec une précision d'un millionième de seconde) et si possible encore la **polarisation**. Souvent faibles, parfois lointaines et furtives, les sources recherchées exigent pour leur étude le recensement du plus grand nombre de photons possible. Aussi, les quelques grains de lumière que ces sources émettent, noyés au milieu d'un intense bruit de fond, exigent-ils des instruments d'une très grande sensibilité et de la plus haute efficacité de détection possible pour être observés. Bien que la combinaison de détecteurs performants et innovants avec des technologies spatiales ait permis des avancées spectaculaires, il n'en demeure pas moins que la détection – un par un – des photons gamma dans l'espace figure comme l'un des grands défis lancés aux astrophysiciens.

## Révolution dans l'astronomie des hautes énergies

Voilà déjà une vingtaine d'années que les astrophysiciens observant dans la gamme des rayons X durs et gamma, ont troqué leurs scintillateurs pour des détecteurs plus sensibles et plus complexes à base de semi-conducteurs en silicium et en **germanium**, puis surtout en tellurure de cadmium (CdTe), excellent matériau pour la détection des photons gamma. Pour l'astronomie des hautes énergies, ce fut une révolution. En effet, grâce à leur **pixellisation**, ces instruments, véritables appareils photo numériques à rayons gamma embarqués sur des satellites, apportent une finesse d'image, une précision de datation, une sensibilité et une mesure de l'énergie de chaque photon encore jamais atteintes auparavant. Le CEA a joué un rôle majeur dans la conception de cette nouvelle génération de spectro-imageurs semi-conducteurs et dans l'optimisation de leurs performances. Le degré de précision acquis résulte de la détermination des chercheurs à protéger leurs détecteurs, de plus en plus miniaturisés et pixellisés, contre le bruit tant physique (dû aux rayons cosmiques) qu'électronique. La première grande caméra à bénéficier des performances technologiques apportées par l'usage de détecteurs à base de tellurure de cadmium (CdTe) fut ISGRI (pour *Integral Soft Gamma-Ray Imager*) dont la surface de détection atteint un quart de mètre carré. Installée à bord du satellite INTEGRAL (pour



Vue d'artiste d'un trou noir accrétant la matière de son étoile compagnon dans un système binaire.

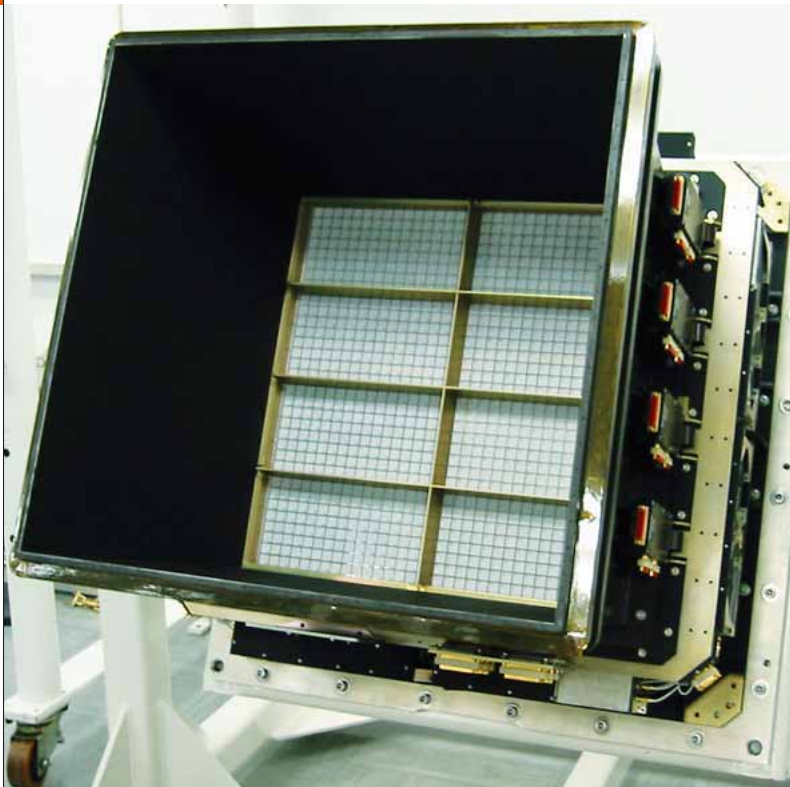
*International Gamma Ray Astrophysics Laboratory*), il s'agit d'une mission de l'**Agence spatiale européenne (ESA)** lancée en 2002. Le CdTe figure parmi les matériaux les plus efficaces pour la détection des photons gamma. Cette réussite du CEA a impulsé le développement de nouveaux petits « bijoux technologiques » toujours plus performants. Ainsi, les efforts conjoints de R&D conduits par le CEA et le **Cnes** depuis ISGRI (pour *Integral Soft Gamma-Ray Imager*), garantissent aujourd'hui les performances scientifiques du futur télescope spatial ECLAIRS, dédié à la détection des sursauts gamma ou d'un télescope haute énergie de nouvelle génération du type de SIMBOL-X.

## De nouveaux instruments pleins d'esprit

Pour filer la métaphore, le portrait des détecteurs de la nouvelle génération dédiés à l'astronomie X dur et gamma spatiale peut se dessiner en quatre traits :

- L'esprit leur vient d'un système de détection composé d'un senseur en CdTe et de son électronique associée placés au sein d'un module de détection miniature complexe, « spatialisable » et optimisé scientifiquement (une caméra gamma se compose d'une mosaïque de ces modules). Les progrès en détection gamma spatiale reposent donc sur des efforts simultanés consentis sur les senseurs (CdTe à électrode Schottky<sup>(1)</sup> fortement segmentée), leur

(1) L'électrode Schottky est réalisée avec un contact métal semi-conducteur formant une diode polarisée en inverse.



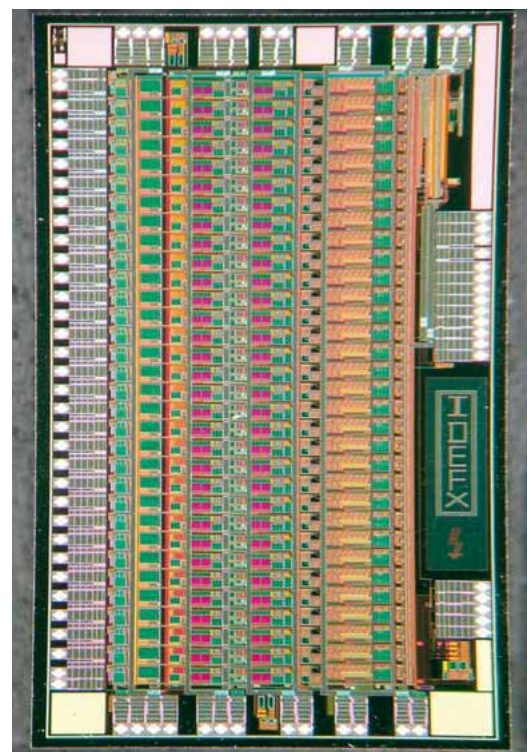
Grâce à sa caméra constituée d'une matrice de semi-conducteurs en tellure de cadmium (CdTe), de 128 x 128 pixels, le télescope IBIS (pour *Imager on Board the Integral Satellite*), observe la voûte céleste avec une résolution angulaire d'une dizaine de minutes d'arc. La caméra ISGRI a été réalisée par le CEA avec le soutien du Cnes (photo réalisée, en 2001, à LABEN/Milan, lors de l'intégration de l'instrument).

électronique de lecture de type ASIC/CMOS (pour *Application Specific Integrated Circuit/Complementary Metal Oxide Semiconductor*) et leur assemblage en composants « hybrides ». Pour pimenter l'affaire, les différents objets doivent être compatibles avec l'environnement spatial (thermique, radiation, fiabilité...) et résistants au lancement par une fusée. Ces dernières années ont vu, à la fois, les progrès notables de l'imagerie par miniaturisation des **pixels** (500  $\mu\text{m}$  de côté) et les performances spectrales. Cette double avancée a favorisé l'extension de la gamme spectrale vers les basses énergies ainsi qu'une meilleure précision dans la mesure de l'énergie de chaque photon. L'extension à basse énergie s'avère déterminante pour l'astronomie gamma. En effet, c'est en étudiant simultanément les photons de basse énergie (quelques **keV**) et les photons de haute énergie que certains astres révèlent enfin leur vraie nature : **trous noirs** ou pas et dans quel état...

- Leur cœur bat grâce au CdTe, un matériau dont les qualités de **spectromètre** sont désormais reconnues pour les températures proches de la température ambiante (entre  $-40^\circ\text{C}$  et  $+20^\circ\text{C}$ ). Il s'agit d'un cristal lourd (le numéro atomique moyen « Z » vaut 50) et dense ( $\approx 6$ ) lui permettant de stopper efficacement les photons gamma jusqu'à quelques centaines de keV alors que ces derniers traversent généralement la matière sans interagir. Ainsi, lorsqu'un photon gamma interagit avec un **électron** du cristal, ce dernier se trouvant arraché, emporte avec lui la quasi-totalité de l'énergie cédée par le photon. Quant à l'électron, il termine sa course dans le cristal en produisant des **paires « électron-trou »** en nombre proportionnel à la

quantité d'énergie déposée par le photon incident. Un champ électrique appliqué au cristal accélère les paires en question. La mise en mouvement de ces nouveaux porteurs libres induit un courant transitoire, précieux signal qu'il va falloir « capturer » et traiter. Notons que ces porteurs ne migrent pas à la même vitesse selon qu'il s'agisse de trous ou d'électrons. L'écart est d'ailleurs si grand (un facteur 10 environ) que les porteurs les plus lents sont assujettis au phénomène de piégeage, provoquant « une perte de charge ». Ce phénomène, particulièrement accentué dans le CdTe, suppose un traitement spécifique de son signal. Enfin, la cristallogénèse du CdTe demeurant très complexe, la réalisation de ce semi-conducteur reste difficile et limite la taille des cristaux à quelques centimètres carrés de surface pour quelques millimètres d'épaisseur. Aujourd'hui, les progrès de l'industrie pour la fabrication des cristaux, la réalisation des contacts métal/semi-conducteurs et la stabilité des senseurs ont permis de bouleverser les limites en s'approchant des performances ultimes de ce matériau. En particulier, les cristaux monolithiques les plus récents, équipés d'électrodes segmentées, présentent des **courants de fuite** (source limitant le bruit électronique) 1 000 fois plus faibles qu'il y a 10 ans. Il s'avère désormais possible d'accélérer les porteurs pour limiter le piégeage et traiter ainsi le signal plus aisément. Le traitement du signal est réalisé par les microcircuits IDEF-X (pour *Imaging Detector Front-End*).

- La micro-électronique jouerait le rôle de système nerveux central avec des circuits adaptés aux signaux spécifiques des détecteurs CdTe et aux contraintes de leur intégration physique dans un composant hybride modulaire. Aujourd'hui, la production des circuits IDEF-X s'effectue grâce à une technologie CMOS



Microcircuit IDEF-X V2 pour ECLAIRS. Les 32 structures parallèles, visibles sur l'image, sont des chaînes de spectrométrie indépendantes séparées de seulement 170  $\mu\text{m}$ . Ce circuit à bas bruit et basse consommation est résistant aux radiations de l'environnement spatial.

standard et abordable. Dessinés avec un soin particulier, ils supportent l'environnement **radiatif** selon deux modalités : soit en termes de dose cumulée dont l'effet modifie les propriétés des transistors et altère les performances des circuits, soit au plan d'événements singuliers du **rayonnement cosmique** dont l'effet peut aller jusqu'à la destruction des circuits. Bien que leur surface n'excède pas une vingtaine de millimètres carrés seulement, les puces électroniques IDeF-X permettent d'intégrer 16 ou 32 chaînes de détections indépendantes, selon les versions. Leur mission consiste à collecter les charges délivrées par le détecteur, à réaliser l'amplification et la mise en forme du signal, à mémoriser les données. Ces puces présentent l'avantage de ne produire qu'un niveau de bruit très faible : à peine celui d'une trentaine d'électrons RMS (*Root Mean Square*) lorsque la puce est isolée. Une fois le circuit connecté à un détecteur, le bruit de l'ensemble demeure inférieur à une soixantaine d'électrons rms, soit cinq fois moins qu'avec le circuit équipant la caméra ISGRI. Ces circuits, associés de façon classique à de bons cristaux de CdTe, permettent de détecter des photons de 1,5 keV à 250 keV. Leur seuil bas, à la limite inférieure de la gamme de détection, est environ deux fois et demie plus faible que sur les meilleurs circuits équivalents existant par ailleurs dans le monde. Cette performance offre un atout maître aux futures missions ECLAIRs et SIMBOL-X.

• Les composants hybrides 3D et le *packaging* en formerait l'enveloppe charnelle. Préparer un imageur, avec ses détecteurs CdTe et ses circuits IDeF-X associés, passe par leur assemblage dans un composant hybride. Le plus dense de ces composants se nomme *Caliste 256*. Il est équipé d'un cristal de CdTe d'un centimètre carré, pixelisé au pas de 580  $\mu\text{m}$ , chaque pixel étant connecté à une chaîne IDeF-X. Huit circuits IDeF-X fonctionnent simultanément pour extraire les 256 signaux d'un seul *Caliste*. Spécifiée pour l'observation d'un large champ de vue, la grande surface de l'imageur s'agence avec une mosaïque de composants *Caliste*, chacun aboutable sur ses quatre côtés pour ne laisser subsister aucune zone morte

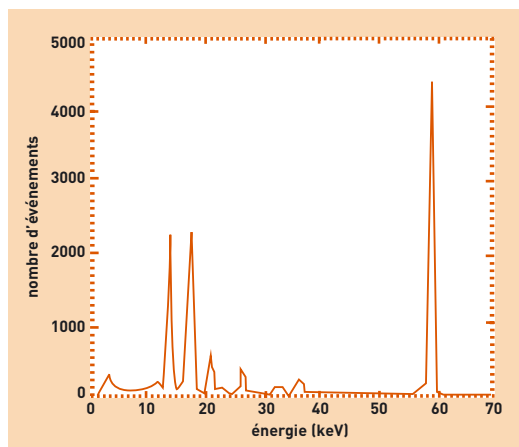
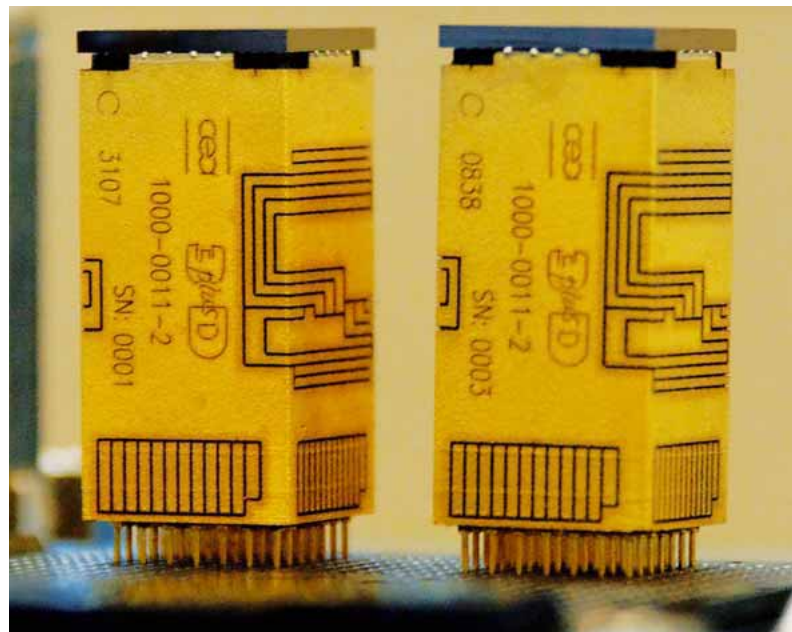


Figure 1. Exemple d'un spectre enregistré avec *Caliste 64*. La figure représente la distribution en énergie des photons émis par une source d'américium 241. Ce spectre est constitué de la somme des réponses de 64 pixels indépendants étalonnée en énergie. La résolution spectrale vaut environ 900 eV fwhm à 60 keV. Le seuil de détection vaut environ 1,5 keV [A. Meuris/CEA].



Modules *Caliste 256*. Chacun des ces deux prototypes est un spectro-imageur miniature de 1 cm de côté et environ 2 cm de haut. Un cristal de CdTe est placé au sommet d'un composant électronique (doré) dans lequel huit circuits IDeF-X sont empilés verticalement.

(figure 1). Ceci implique que les huit circuits IDeF-X puissent être entièrement disposés sous la petite surface de CdTe. Pour y arriver, la solution consiste à empiler les circuits et à les présenter perpendiculairement à la surface du cristal. Cette prouesse technologique a été exécutée par la société française 3D Plus. Pour une utilisation dans l'espace, ces modules unitaires de détection présentent une garantie de fiabilité qui réduit considérablement les risques de panne dans un imageur spectrométrique. Il faut dire que ce composant a été conçu de manière à résister aux stress mécaniques, thermiques et radiatifs inhérents à la mise en orbite.

Aujourd'hui, les chercheurs ne connaissent qu'un mot capable de qualifier ce détecteur de nouvelle génération : impressionnant ! Ses performances en apportent la preuve :

- la résolution spectrale, inférieure à 900 eV FWHM (*Full Width at Half Maximum*) à 60 keV devient six fois plus précise que pour ISGRI ;
  - le seuil bas descend à 1,5 keV contre 15 keV pour ISGRI ;
  - les pixels sont 100 fois plus petits.
- Lorsqu'il sera placé au foyer d'un télescope de type SIMBOL-X, ce modèle de spectro-imageur CdTe pour les rayons gamma apportera, de façon certaine, une quantité extraordinaire de résultats scientifiques.

➤ **Olivier Limousin**

Service d'astrophysique (ISAp)  
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)  
Direction des sciences de la matière (DSM)  
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles  
(CEA-Université de Paris 7-CNRS)  
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

➤ **Eric Delagnes**

Service d'électronique des détecteurs et d'informatique (Sedi)  
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)  
Direction des sciences de la matière (DSM)  
CEA Centre de Saclay