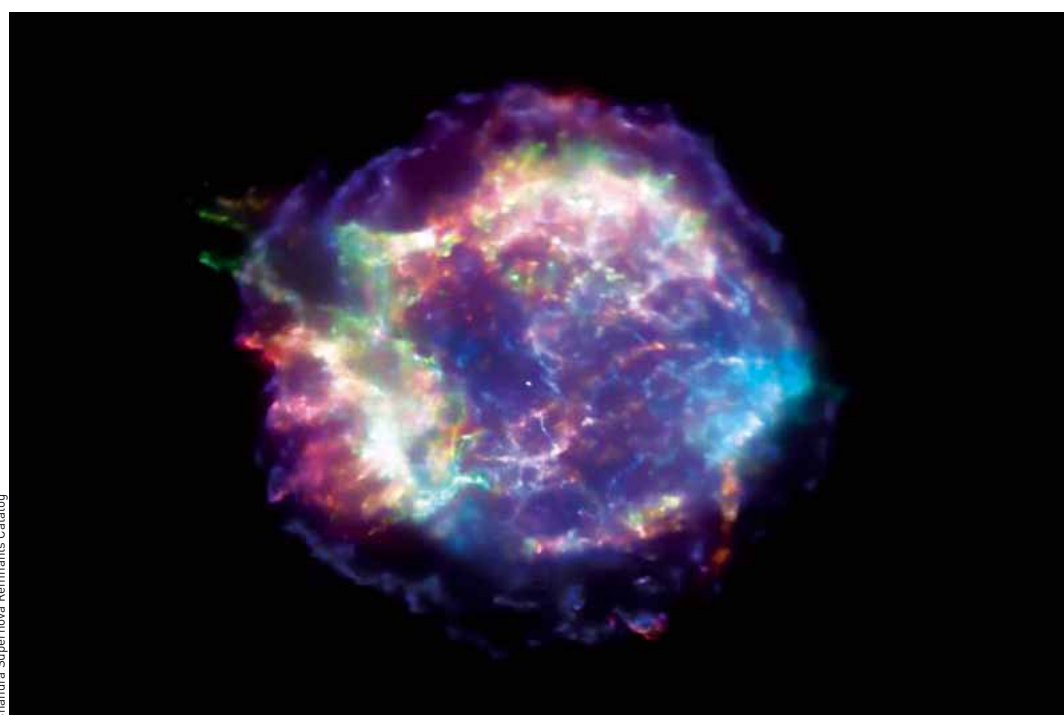


L'univers des rayons X

S'il doit exister un observatoire pour nous éclairer sur l'astronomie des rayons X dans l'Univers, sans nul doute s'agit-il d'IXO. L'intérêt des chercheurs pour ce rayonnement s'explique parce que la plupart des sources astrophysiques émettent, peu ou prou, en rayons X et que ces derniers sont une véritable mine de renseignements scientifiques sur ces sources, constituant ainsi un merveilleux outil d'observation.

L'atout d'IXO (pour *International X-ray Observatory*; voir encadré) réside dans sa capacité d'observer sur une très longue durée dans un environnement extrêmement stable. Pour mener à bien sa mission, il emportera un

spectro-imageur à base de matrices de micro-calorimètres, possédant la meilleure résolution spectrale jamais atteinte par un spectromètre dispersif en énergie, de 2 eV pour des photons X de 6 keV.



Chandra Supernova Remnants Catalog

Reste de la supernova (étoile qui explose en fin de vie) Cassiopée A. L'image en rayons X, obtenue par le satellite Chandra, montre en fausses couleurs l'expansion d'une bulle de gaz à plusieurs millions de degrés à l'intérieur d'une enveloppe d'électrons extrêmement énergétiques.

Dans les lumières d'IXO

IXO est le projet phare de l'astronomie des rayons X en ce début de siècle. Ce projet est né de la fusion de deux grands projets. L'un américain, Constellation-X, qui devait être une batterie de quatre sondes observant simultanément la même région du ciel et l'autre européen, XEUS (pour *X-ray Evolving Universe Spectroscopy*). Celui-ci était constitué de deux sondes, l'une « miroir » et l'autre « détecteur », volant en tandem à la précision de quelques millimètres dans les trois dimensions. Essentiellement pour des raisons de coût, les deux projets sont en cours de fusion depuis août 2008. Le nouveau projet envisagé consiste en un satellite déployable. C'est-à-dire qu'il partira dans la coiffe de la fusée, replié, et qu'une fois dans l'espace, un mécanisme permettra de l'étendre jusqu'à une dizaine

de mètres de distance focale (un peu à la manière d'une longue-vue de marine). Par ailleurs, le miroir de ce télescope sera d'un type tout à fait révolutionnaire. Jusqu'à maintenant, presque tous les observatoires spatiaux en rayons X ont utilisé la technique des coquilles métalliques à symétrie cylindrique enchâssées l'une dans l'autre pour ces miroirs à incidence rasante. La technique proposée pour le très grand miroir d'IXO sera basée sur les développements des technologies du silicium. L'élément de base de ce miroir est constitué de silicium cannelé et cintré. Chaque élément est collé à son voisin pour former une structure ressemblant à une galette de microcanaux. L'avantage énorme de cette technologie réside tant dans sa légèreté que dans la rigidité de l'ensemble, ce qui rend le miroir

très attrayant pour partir en fusée. Cet observatoire sera placé au **point de Lagrange L2** du système **Soleil-Terre**, ce qui permettra des observations de très longue durée (quasiment sans éclipse) dans un environnement extrêmement stable.



Vue d'artiste d'IXO.

J.-L. Sauvageot/CEA

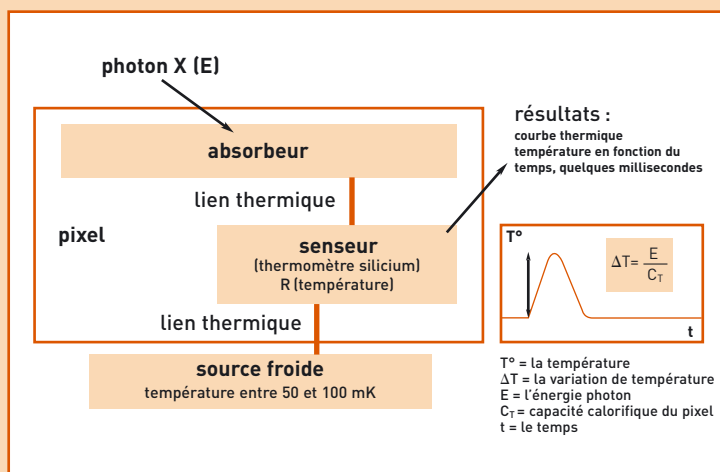
Principe du microcalorimètre X

Réaliser la mesure calorimétrique d'un seul **photon X** suppose de prendre en compte deux notions majeures :

1- La propriété de la grande majorité des matériaux d'avoir une capacité calorifique spécifique dont la valeur diminue avec la température. Cela permet d'obtenir une élévation de température non négligeable avec la seule énergie d'un photon X dissipée dans un **pixel** détecteur, sous réserve qu'il soit de petite dimension (d'où le terme de microcalorimètre) et, surtout, maintenu à basse température (de l'ordre de 0,05 K).

2- L'existence de senseurs (thermomètres) suffisamment sensibles à ces très basses températures, pour mesurer une élévation de température (quelques microkelvins).

Les thermomètres le plus souvent utilisés délivrent un signal électrique sous forme d'une tension (senseur semi-conducteur, silicium ou **germanium**) ou d'un courant (senseur à transition supraconductrice) proportionnel à la température. La mesure de la courbe temporelle (pulse induit par le dépôt d'énergie du photon X) permet de déterminer l'énergie déposée avec une excellente **résolution** spectrale.



Structure d'un pixel microcalorimètre.

Une impédance thermique entre l'absorbeur et le senseur favorise une thermalisation complète de l'énergie dans l'absorbeur avant que la chaleur correspondante ne soit transmise au senseur. Ensuite, la chaleur évacuée lentement vers la source froide mettra le pixel à un niveau qui le rendra sensible au rayon X incident. Entre temps, sera réalisée la mesure fine de la courbe de température, associée par le thermomètre.

Le rayonnement X comme traceur

La quasi-totalité des sources astrophysiques émettent des **rayons X** et certaines n'émettent d'ailleurs que des rayons X. À ces énergies (l'usage veut que l'on s'exprime en énergie pour traiter du rayonnement X), les **photons** se font pénétrants et donc capables de ramener des informations précieuses, notamment sur les processus enfouis au sein des nuages de matière. Le **rayonnement X** fait donc office de traceur, à la fois pour la matière à très haute température (quelques millions de degrés), et pour les **électrons** à haute énergie en interaction avec un **champ magnétique** ou des photons de basse énergie. La matière peut être portée à ces hautes températures par les potentiels de gravitation intenses au sein des **amas de galaxies**, auprès des objets compacts massifs ou encore à l'occasion d'explosions stellaires. En collectant et détectant le rayonnement X, les chercheurs ouvrent une nouvelle fenêtre donnant sur l'Univers « violent ». Parmi les

atouts des rayons X, celui d'être réfléchis sous incidence rasante permet l'utilisation de télescopes à miroir. L'interaction des rayons X avec le milieu détecteur, relativement ponctuelle, débouche sur une imagerie à haute **résolution angulaire**. Il n'en va pas ainsi dans le domaine gamma à plus haute énergie où les optiques par réflexion deviennent inopérantes, faisant que les collimateurs n'autorisent qu'une imagerie à basse résolution angulaire. Quant au dépôt d'énergie d'un photon, essentiellement obtenu par effet photoélectrique, il tient dans un pixel situé à l'intérieur d'un détecteur matriciel de taille raisonnable. Pour toutes ces raisons, la **spectrométrie dispersive en énergie** à haute efficacité **quantique** devient aujourd'hui envisageable pour chaque photon absorbé. Il s'agit d'une avancée notable comparée aux résultats de la spectrométrie dispersive en longueur d'onde. Obtenue, à plus grande longueur d'onde, au moyen de dispositifs optiques comme les réseaux, il s'agissait d'une technique très « dépensière » en photons.

Pour les astrophysiciens, l'observation des **raies** de fluorescence X et du **continuum** (émis thermiquement ou par les électrons en interaction avec le **champ magnétique** ou les photons) ouvre une mine d'informations inédites sur la composition, la densité, la température et la dynamique de la matière à très haute température, mais aussi sur le champ magnétique local. Encore faut-il, à ces astrophysiciens, pouvoir disposer d'une plate-forme spatiale équipée d'un instrument spectro-imageur performant, les rayons X étant arrêtés par l'atmosphère !

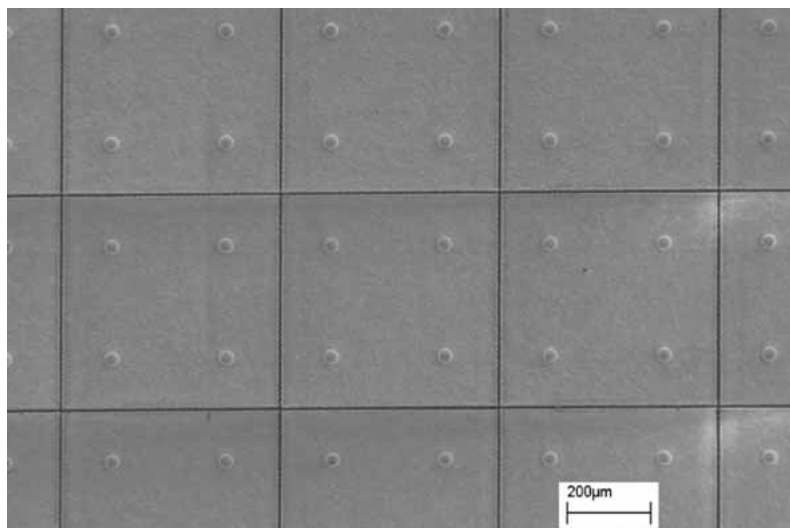
Un savoir-faire virtuose

Lancés en 1999, deux télescopes dédiés à l'astrophysique X sont actuellement satellisés en orbite terrestre. Il s'agit de XMM-Newton (pour *X-Ray Multi Mirror*) et de Chandra⁽¹⁾. L'un et l'autre sont équipés de spectro-imageurs à base de CCD (pour *Charge-Coupled Device*), c'est-à-dire de dispositifs à transfert de charge en silicium. Dans leurs détecteurs semi-conducteurs, l'énergie déposée par un photon X se mesure en inventoriant les **paires électrons-trou** créées. La difficulté réside dans le fait que l'énergie de ce photon X est aussi dissipée en chaleur, qui entre en compétition avec la production des paires d'électrons-trou. Dès lors, la quantité d'énergie mesurée fluctue d'un photon X absorbé à l'autre et cela, à énergie incidente équivalente. La résolution spectrale obtenue ne peut alors être meilleure qu'une valeur plancher (120 eV @ 6 keV). Les chercheurs rencontrent là une limite intrinsèque au milieu détecteur (ici, le silicium) et à ce mode de détermination de l'énergie (comptage des paires d'électrons-trou) à laquelle ils ne pourront jamais remédier. Pour que ces fluctuations ne fassent pas obstacle à la réalisation des mesures, la totalité de l'énergie doit se retrouver préalablement sous forme de chaleur et ainsi permettre la mesure de la température associée (c'est de la calorimétrie). Une coopération a été organisée, au sein du CEA, entre le Laboratoire d'électronique et de technologies de l'information (Leti) et l'Institut de

(1) Du nom de l'astrophysicien américain d'origine indienne disparu, en 1995, Subrahmanyan Chandrasekhar.

recherche fondamentale sur les lois de l'Univers (Irfu). Pour ces équipes, il s'agit de développer des matrices de microcalorimètre (voir encadré) en vue d'améliorer la résolution spectrale d'un ou deux ordres de grandeur et ainsi dépasser les détecteurs semi-conducteurs. L'expérience acquise dans le domaine **infrarouge** et **submillimétrique** grâce aux matrices de **microbolomètres** (dans ce domaine de longueur d'onde, il s'agit de la mesure d'un flux) s'est avérée d'autant plus efficace que de nombreuses technologies silicium, déjà utilisées par l'instrument PACS (pour *Photo detector Array Camera and Spectrometer*) se trouvent directement transposables sur les matrices de microcalorimètres. Cette R&D vise à construire des matrices de grande taille (32 x 32 pixels), selon une conception du **pixel** capable d'intégrer les spécifications contraignantes de l'astronomie X (voir encadré *Les lumières d'IXO*). La réalisation des pixels microcalorimétriques ($500 \times 500 \mu\text{m}^2$) par micro-usinage dans une plaque de silicium sur isolant (SOI) appelle un savoir-faire virtuose. Les résultats montrent des senseurs extrêmement fins (moins de $1,5 \mu\text{m}$ d'épaisseur) reliés à la source froide au moyen de poutres de silicium dont la section ne dépasse pas les quelques microns carrés. Autant de performances compatibles avec l'exigence de solidité puisque les senseurs supportent leur assemblage par hybridation, au moyen de billes d'indium, avec des absorbeurs constitués de minces feuilles de tantale. Par ailleurs, il a fallu toute l'expertise du Leti pour réussir l'intégration du thermomètre dans la plaque suspendue. En effet, cet instrument comportant une résistance variable en fonction de la température (de l'ordre du mégohm à 50 mK), le contrôle d'un haut niveau de dopage (à une fraction de pour-cent près) s'imposait, avant de l'homogénéiser par un traitement à haute température. Cette technique de fabrication a permis la réalisation de thermomètres enfin capables d'atteindre les performances requises.

Restait encore à traiter la question des matrices de grande taille. Jusqu'à présent, celles de petite dimension se fabriquaient par assemblage manuel des absorbeurs avec les senseurs, opération réalisée



Matrice d'absorbeur en tantale.

sous microscope. Or, cette technique ne convient pas aux matrices de grande taille. D'où l'idée d'une matrice prototype de 64 pixels hybridés, extrapolable à de plus grandes tailles, que le Leti a réalisée grâce à une technologie de report (absorbeur sur senseur) non plus manuelle mais collective.

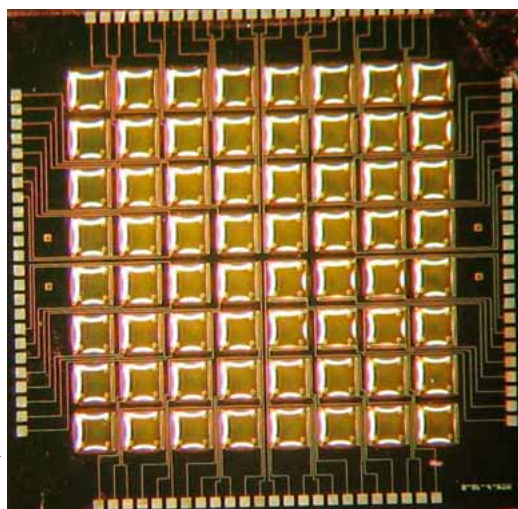
Néanmoins, un obstacle de taille empêche encore la réalisation d'un plan focal à partir d'une mosaïque constituée avec ce type de matrices, à savoir l'inexistence d'une électronique de proximité fonctionnant à basse température. Indispensable à la lecture et au **multiplexage**, cette électronique doit être cryogénique pour trouver sa place dans le cryostat au plus près du détecteur, position qui présente une multitude d'avantages : simplicité, fiabilité, immunité au bruit, augmentation de la bande passante, réduction de la puissance parasite sur les cryoréfrigérateurs de vol (aux performances obligatoirement limitées). Dans cette optique, les chercheurs explorent aujourd'hui des voies originales comme les Transistors à haute mobilité électronique (HEMTs) en GaAlAs/GaAs (arséniure de galium et arséniure de galium-aluminium) ou les ASICs (pour *Application-Specific Integrated circuit*) en silicium-**germanium**. Ces avancées bénéficieront incontestablement à l'amélioration des performances des futurs observatoires dédiés à l'astronomie X, leur surface effective ou leur résolution spectrale notamment. Les chercheurs en sont persuadés : de nouvelles découvertes astrophysiques, aujourd'hui encore imprévisibles, en résulteront.

> **Patrick Agnese**

Département d'optronique
Laboratoire d'électronique
et de technologies de l'information (Leti)
Direction de la recherche technologique (DRT)
CEA Centre de Grenoble

> **Claude Pigot**

Service d'astrophysique (SAP)
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)



Matrice senseur