

Ils radiographient le cosmos depuis vingt ans

Yaël Nazé, Fonds national de la recherche scientifique, université de Liège, Belgique

Le rayonnement X occupe une place particulière, car il dévoile les événements les plus dramatiques et violents de notre cosmos. Depuis vingt ans, deux observatoires spatiaux captent cette lumière de haute énergie. L'analyse de leurs observations a profondément changé notre compréhension de nombreux phénomènes célestes.



ASTROPHYSICIENNE

Yaël Nazé travaille au département d'astrophysique, géophysique et océanographie de l'université de Liège. Elle est l'auteure de nombreux ouvrages de vulgarisation scientifique.

Longtemps le ciel, dans le domaine des rayons X, est resté inaccessible : cette partie énergétique du rayonnement électromagnétique est en effet arrêtée par l'atmosphère. Il a fallu attendre le début de la conquête spatiale pour commencer à « radiographier » les objets célestes. Dans les années 1960, en pleine fièvre Apollo, à l'aide d'un détecteur sur une fusée, des astronomes s'aperçoivent qu'un astre de notre Galaxie, baptisé Scorpius X-1, émet une quantité considérable de rayonnement X (constitué de photons de longueur d'onde comprise entre 10^{-12} et 10^{-8} mètre environ ; cela correspond à une énergie entre 100 électronvolts et 1 mégaelectronvolt, 1 MeV). Cette première détection d'une source hors du Système solaire marque, en

1962, l'acte de naissance de l'astronomie X. Le domaine se développe vite : le premier observatoire dédié, Uhuru, est mis en orbite en 1970. À la fin des années 1970 naît la volonté d'aller plus loin que l'exploration, d'entrer dans les détails des propriétés X des astres. Côté européen, la proposition XMM est choisie au milieu des années 1980 comme pierre angulaire du programme Horizon 2000. Côté américain, l'idée d'AXAF est officiellement mise en route un peu plus tard. Les observatoires, l'un rebaptisé XMM-Newton, l'autre Chandra, sont finalement lancés en 1999.

Ils se complètent plus qu'ils ne se concurrencent. XMM-Newton est le champion de la sensibilité : avec sa surface collectrice (à 1 kiloelectronvolt, 1 keV) de 3 000 cm², il peut détecter des sources très

faiblement lumineuses. Chandra, lui, se targue de sa résolution spatiale (0,5 seconde d'angle), qui lui permet de séparer des sources très proches. Deux propriétés techniquement difficiles à combiner : avoir deux observatoires permet donc une vue inédite sur le ciel X.

Les extensions des missions – qui ne devaient durer que quelques années – se sont succédé et comptent 20 ans de bons et loyaux services – un record ! Les découvertes de XMM-Newton et de Chandra sont au nombre de milliers. XMM-Newton est même la mission européenne la plus productive de tous les temps, avec plus de 6 000 articles scientifiques en un peu plus de 3 600 révolutions autour de la Terre. Bien sûr, l'électronique et la mécanique vieillissent, le carburant s'épuise mais, grâce au talent des ingénieurs spatiaux, ces vénérables anciens devraient pouvoir tenir quelques années encore, voire une décennie ! Petit florilège de cette « radiographie » du cosmos qui a bouleversé notre connaissance de l'Univers violent. ■

Contexte

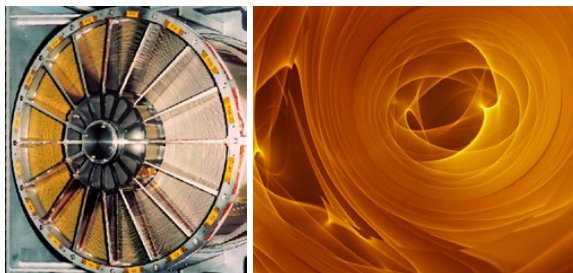
Double anniversaire pour l'observatoire européen XMM-Newton et l'américain Chandra, qui explorent le cosmos depuis deux décennies grâce aux rayons X. Des révélations sur un monde violent qui ouvrent la voie aux télescopes du XXI^e siècle.

Qu'est-ce qui émet du rayonnement X ?

Le rayonnement de corps noir La matière chauffée à plus d'un million de degrés émet du rayonnement X sur une large gamme (rayonnement continu). Le rayonnement X trace ainsi les zones chaudes du cosmos.

Le rayonnement synchrotron et de freinage Les particules chargées se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière émettent des photons X (essentiellement du rayonnement continu) lorsqu'elles rencontrent un champ magnétique ou électrique.

Le rayonnement de raies Des raies dans le domaine X sont émises lorsque les électrons sont éjectés des couches les plus internes des atomes et des ions. Cela peut se produire à température élevée dans un milieu peu dense, mais des raies X peuvent apparaître également lorsque la violente rencontre entre des atomes neutres et des noyaux d'hydrogène et d'hélium provoque la neutralisation des noyaux et la perte d'électrons par les atomes (phénomène d'**échange de charges**). ●●●



CHANDRA

Il tire son nom de l'astrophysicien Subrahmanyan Chandrasekhar, Prix Nobel de physique 1983.

POIDS 4800 kg

TAILLE 12,2 m

ORBITE très elliptique
(10 000 km - 140 161 km)

MIROIRS Wolter-I (quatre miroirs en forme de tonneaux imbriqués)

INSTRUMENTS FONCTIONNANT

UN À LA FOIS un spectro-imageur, une caméra haute résolution, deux spectromètres haute résolution

RÉSOLUTION ANGULAIRE

0,5 seconde d'angle

ÉNERGIE 0,1-10 keV

DURÉE DE VIE 1999 -> > 2020

◀ À gauche, l'un des trois télescopes de XMM, composé de 58 miroirs en forme de tonneau (les seuls à même de réfléchir les rayons X, en utilisant l'incidence rasante). À droite, le jeu de lumière sur l'un de ces miroirs.



XMM-NEWTON

Très sensible, l'observatoire européen peut détecter des sources très faiblement lumineuses.

POIDS 3764 kg

TAILLE 10 m

ORBITE très elliptique (périgée à 7 000 km, apogée à 114 000 km)

MIROIRS trois de type Wolter-I avec chacun 58 miroirs imbriqués

INSTRUMENTS FONCTIONNANT

EN PARALLÈLE trois spectro-imageurs, deux spectromètres haute résolution, un télescope UV-optique

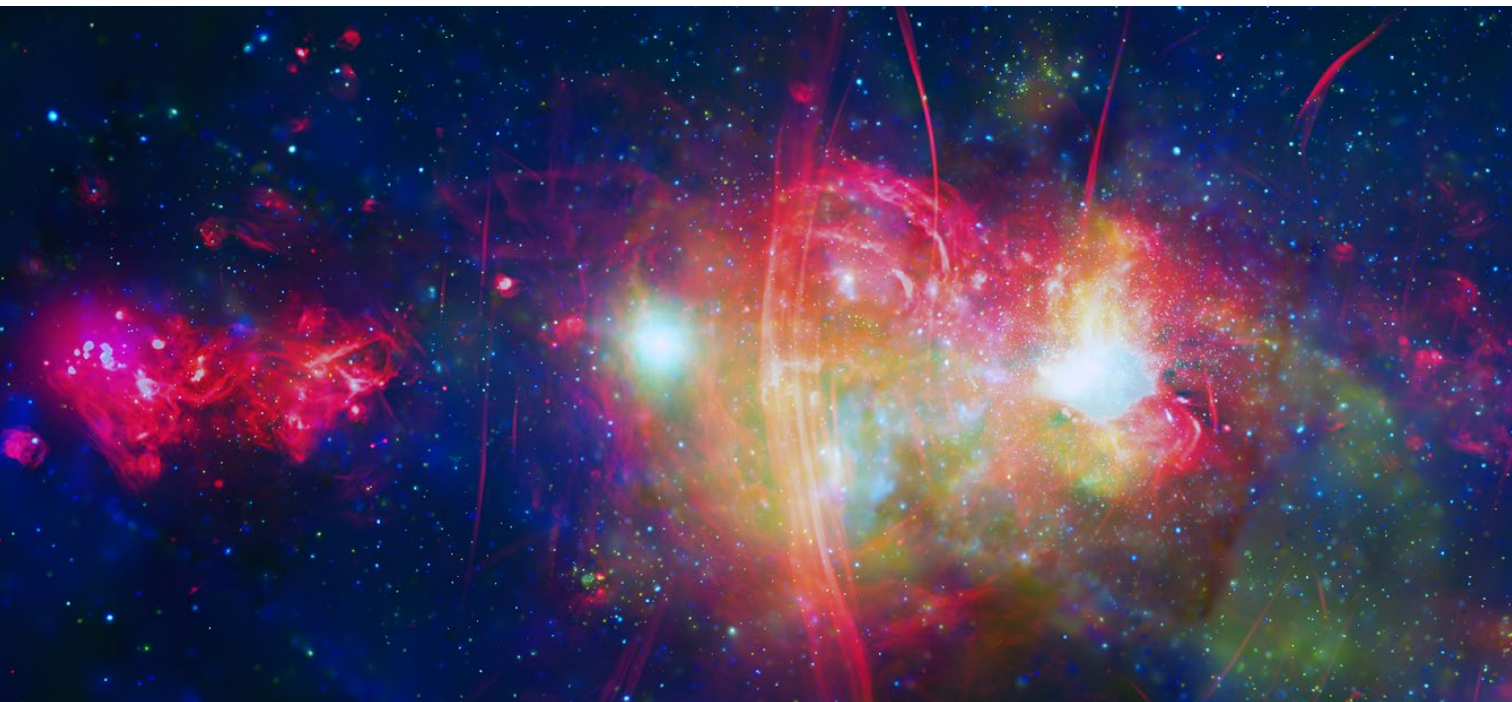
RÉSOLUTION ANGULAIRE

6 secondes d'angle

ÉNERGIE 0,15-15 keV

DURÉE DE VIE 1999 -> 2030 au maximum

▼ Notre centre galactique (Sgr A*) et ses environs, photographié en radio (rouge) avec MeerKAT et en X (vert et bleu) avec Chandra. On y trouve une série d'objets, dont le trou noir supermassif au cœur de la Voie lactée, des nuages de gaz chaud, des étoiles à neutrons et des naines blanches en train de dévorer la matière de leur compagnon stellaire.



Planètes sous X

L'émission X de nombreux objets du Système solaire a désormais été mesurée. La plus spectaculaire est sans conteste celle de Jupiter, avec de multiples composantes. Tout d'abord, on retrouve une émission sur l'ensemble du disque jovien : il s'agit de rayons X de faible énergie en provenance du Soleil, absorbés puis réémis par l'atmosphère planétaire. Ensuite, on voit de spectaculaires points chauds aux pôles, mêlant deux phénomènes : le rayonnement de freinage (lire p. 63), observé là où l'on détecte les impressionnantes aurores de la planète géante, et de l'échange de charges (lire p. 63), apparaissant à plus haute latitude et lié à des particules chargées très rapides, d'origine inconnue, s'écrasant à grande vitesse dans l'atmosphère.

Mais la plus grande surprise est la découverte que les aurores nord et sud se comportent de manière indépendante, avec des pulsations pour l'une et un comportement plus erratique pour l'autre.

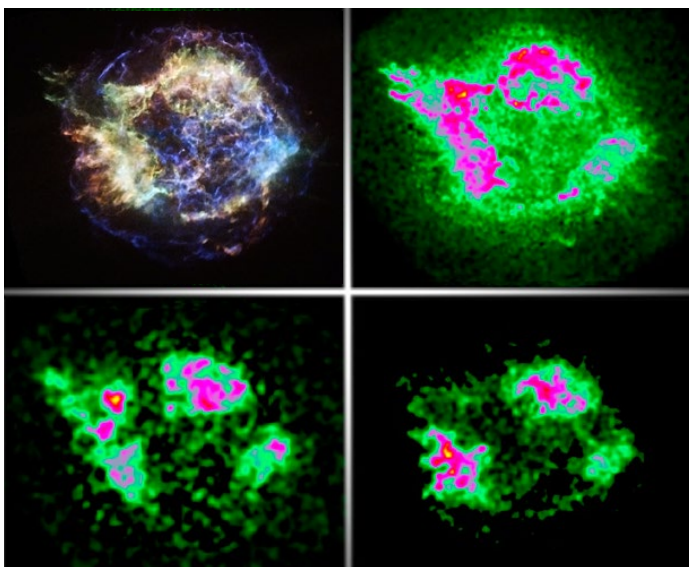


▲ Image composite des deux pôles de Jupiter, avec l'émission X des aurores boréales montrée en violet. Il existe une différence clairement marquée entre le Nord et le Sud.

Les aurores de Saturne, elles, n'émettent pas de rayons X... Il reste donc encore beaucoup à comprendre!

Pour ce qui est des exoplanètes – les planètes en orbite autour d'autres étoiles de la Galaxie –, alors qu'on s'attend à des interactions entre une planète de type « Jupiter chaude » (grosse planète très proche de son étoile) et son étoile, engendrant du rayonnement X en quantité, aucune détection liée à une exoplanète n'a été faite avec certitude. En

revanche, l'intensité de la lumière haute énergie d'une étoile nous renseigne sur l'habitabilité exoplanétaire : trop de rayons X et l'atmosphère peut s'éroder, voire disparaître, rendant la vie en surface plutôt difficile. Diverses étoiles ont ainsi été surveillées, et les perspectives ne sont guère encourageantes pour certaines planètes, notamment celles orbitant des étoiles de type naines rouges – comme Proxima du Centaure – dont les émissions X stellaires sont intenses.



▲ Résidu d'une explosion de supernova récente, Cas A est très brillante dans le domaine X, ce qui a permis d'étudier sa composition. À côté de l'image globale (en haut à gauche), les images X dévoilent l'émission associée au silicium (en haut à droite), au calcium (en bas à gauche) et au fer (en bas à droite).

Bruissement X après explosion d'étoiles

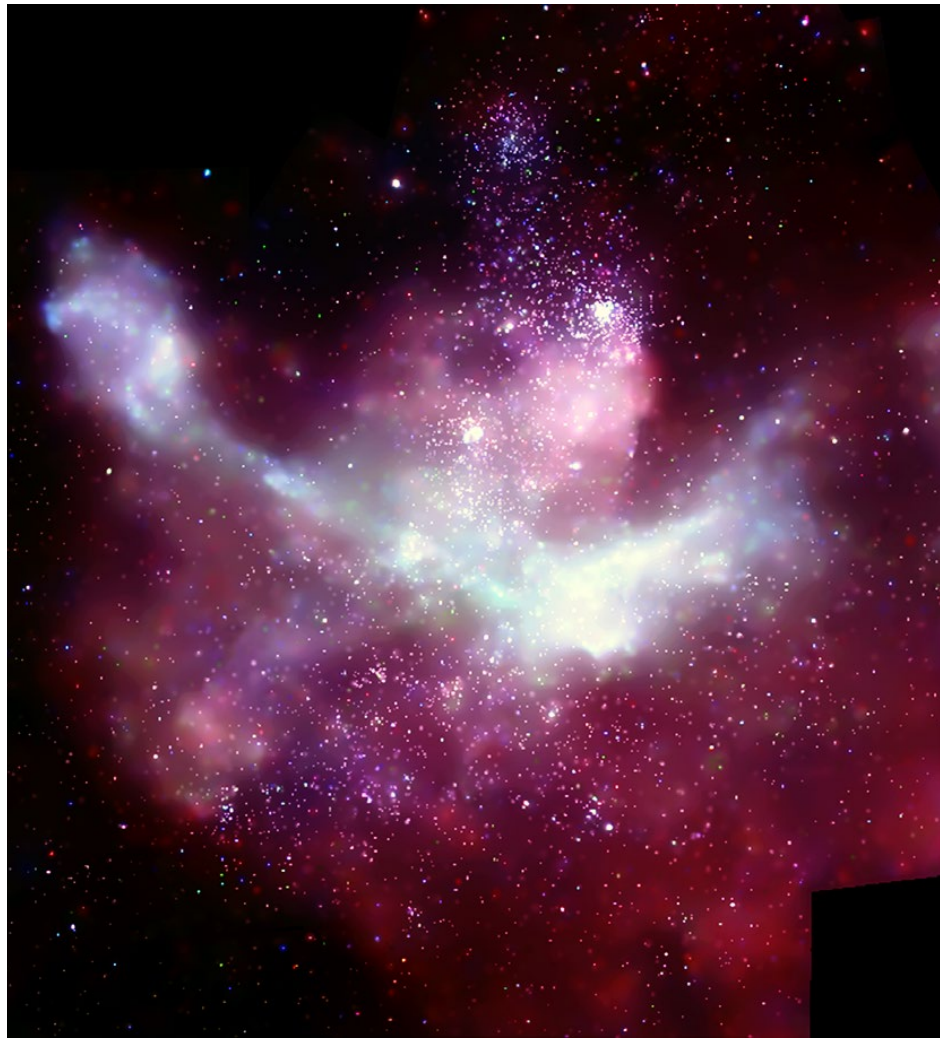
Les étoiles massives en fin de vie, ou les cadavres peu massifs grossissant trop, peuvent exploser en de formidables événements baptisés supernovae. Avec leurs capacités de spectro-imagerie, XMM-Newton et Chandra ont produit des cartes montrant la répartition des éléments chimiques dans les résidus de supernova. Par exemple, on est capable de suivre comment le silicium, le fer ou le calcium, produits durant les phases d'évolution stellaires se répartissent.

Un résultat a surpris : du fer, qu'on imaginait au centre – puisqu'il est produit au cœur de l'étoile –, est observé en périphérie de restes de supernova. Cela suggère que l'explosion a été turbulente et a mélangé les éléments composant l'étoile. De plus, en suivant l'évolution de ces objets, les astronomes ont découvert que l'énergie perdue lors de cette expansion correspond à l'énergie nécessaire à l'accélération des rayons cosmiques, ces particules chargées – parfois de très haute énergie – que l'on détecte sur Terre. Une preuve irréfutable de l'origine des rayons cosmiques.

Les rayons très énergétiques des étoiles

Les étoiles émettent peu de rayons X mais, même minoritaires, ils fournissent des informations cruciales. Ainsi, en va-t-il de l'activité stellaire – qui résulte des variations du champ magnétique –; celle-ci est plus marquée, donc plus facilement repérable, dans les hautes énergies. Pour le Soleil, on observe, également dans le domaine X, une activité modulée selon un cycle de onze ans environ. XMM-Newton et Chandra ont repéré d'autres cas: l'étoile 61 Cyg A et son cycle de 7,3 ans ou alpha Centauri B et son cycle d'environ huit ans. En vingt ans d'observations, les variations entre les cycles se révèlent. Un grand pas dans la compréhension de ces phénomènes encore énigmatiques...

En outre, toutes les grosses pouponnières d'étoiles connues dans notre Galaxie ont été observées, révélant les nombreuses éruptions des astres en formation. Non seulement on dispose enfin de statistiques fiables, permettant de mieux cerner l'activité stellaire dans cette phase cruciale de la naissance des étoiles mais, en plus, les spectres à haute résolution de quelques objets brillants (TW Hya, BP Tau...) ont permis d'établir les caractéristiques physiques des mécanismes en jeu. Le profil des raies X a notamment dévoilé les vitesses et les hautes densités mises en jeu dans le « choc d'accrétion », une collision forte entre le bébé-étoile et la matière qui vient s'accumuler dessus. Or pour expliquer de telles vitesses et de telles densités, comme si la matière devait passer dans un entonnoir étroit, les modèles doivent faire jouer un rôle important aux champs magnétiques. Enfin, les étoiles massives (plusieurs dizaines de fois la masse du Soleil) ont aussi eu leur lot de surprises version X. Ces étoiles



▲ Une pose de 1,2 million de secondes (soit presque deux semaines) de Chandra révèle l'émission X de plus de 14 000 étoiles dans la nébuleuse de la Carène.

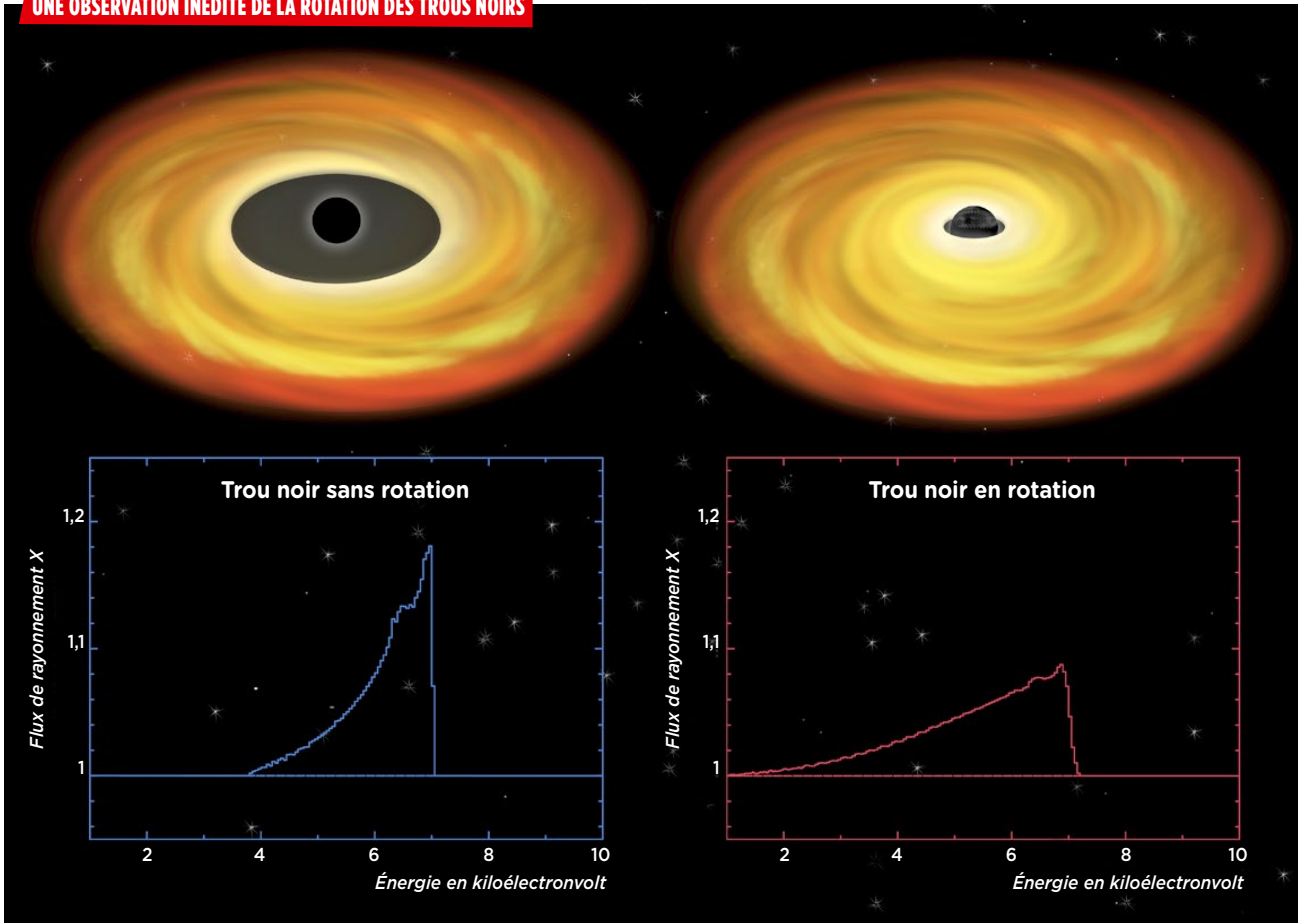
présentent une particularité: elles éjectent en continu de la matière, un vent stellaire bien plus rapide et dense que notre vent solaire. On croyait bien connaître ce vent mais les données X ont remis en question nos certitudes. Ainsi, l'analyse des profils de raies a montré que la quantité de matière perdue par ces vents était bien inférieure



◀ L'amas NGC 6231, avec les étoiles massives en jaune et les étoiles de faible masse encore en formation en vert, observé par XMM-Newton.

à ce que l'on pensait auparavant. De ce fait, les modèles d'évolution stellaire de ces grosses étoiles ont dû être réformés: pour aboutir à la cure d'amincissement observée entre la naissance et la fin de vie de ces étoiles (typiquement une à plusieurs dizaines de masses solaires), la perte ne peut pas être continue – puisque les taux de perte rapportés sont trop faibles – mais doit se faire lors d'éruptions sporadiques. En revanche, deux astres massifs pulsant en rayons X ont été découverts, un résultat inattendu et encore mal compris... Et dans les couples stellaires massifs, les collisions entre les vents émis par les deux étoiles du couple se sont révélées bien moins courantes qu'attendu et avec des propriétés surprenantes. ●●●

UNE OBSERVATION INÉDITE DE LA ROTATION DES TROUS NOIRS



▲ En haut, des trous noirs avec leur disque d'accrétion (vue d'artiste) : plus le trou noir tourne vite, plus le bord stable du disque s'approche du trou noir et orbite vite, conduisant à une raie du fer élargie, ce que l'on constate sur la raie théorique en bas à droite.

Extrême X

L'astronomie X étant une astronomie de l'extrême, elle fait la part belle aux objets compacts – naines blanches, mais surtout étoiles à neutrons et trous noirs. Avant l'envol des deux observatoires, la rotation des trous noirs relevait presque de la discussion philosophique. Cela a changé : les raies du fer associées aux disques d'accrétion autour de trous noirs sont observées déformées, comme prévu par la relativité générale. Cela donne en plus des informations sur le trou noir. Ces observations ont dévoilé la variété du cosmos, avec des trous noirs en rotation rapide tandis que d'autres ne tournent quasiment

pas ! Pour les étoiles à neutrons, outre un effet similaire de déformation des raies du fer, d'autres raies ont précisément indiqué l'intensité extrême du champ magnétique à leur surface.

Enfin, quand des astres comme ASASSN-14li devenaient subitement brillants, leur lumière X a éclairé la situation : il s'agissait d'un déchirement d'étoiles et de nuages avant leur chute inexorable dans le trou noir. Ces observations inédites, et aujourd'hui presque banales, sont maintenant appelées événements de rupture par effet de marée.

Mais ce qui a causé notre plus grande stupéfaction provient d'une direction inattendue : les sources X ultralumineuses (ULX). Avant

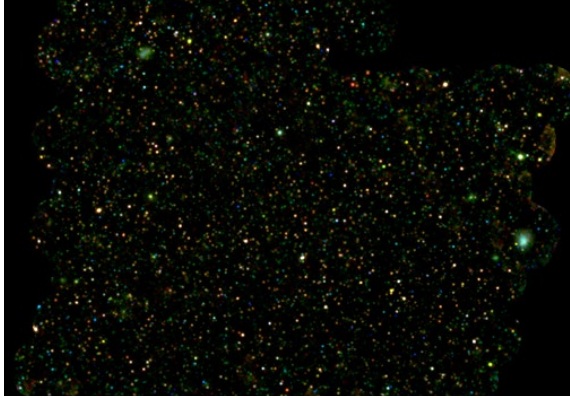
POUR EN SAVOIR PLUS

- <https://sci.esa.int/web/xmm-newton>
- <https://tinyurl.com/esa-xmm>
- Les pages de l'ESA sur XMM-Newton.
- <https://chandra.harvard.edu>
- Le site de Chandra.
- tinyurl.com/astronome-x
- Un jeu en ligne pour se glisser dans la peau d'un astronome X.
- <https://sci.esa.int/web/athena>
- Le site du successeur, l'observatoire Athena.

XMM-Newton et Chandra, leur intense émission dans le domaine X était considérée comme la meilleure preuve, sinon la seule, de l'existence de trous noirs de masse intermédiaire. Ces trous noirs sont le chaînon cosmique manquant entre les trous noirs stellaires qui sont répartis dans les galaxies et les trous noirs supermassifs, au centre de celles-ci. Si certains ULX restent de bons candidats, la découverte de pulsations de l'émission X de ces objets et/ou la mesure de mouvement orbital dans d'autres ULX a dévoilé leur faible masse : quelques masses solaires tout au plus. Point de trous noirs intermédiaire ici. Reste à comprendre comment de tels astres émettent autant de lumière...

Groupements à haute valeur énergétique

Alors que l'on connaissait quelques objets lointains en X, XMM-Newton s'est fait une spécialité de couvrir des zones du ciel peu ou pas explorées. La campagne de sondage XXL a déniché 26 000 noyaux actifs de galaxie (des cœurs de galaxies à grande distance qui émettent beaucoup de lumière dans toutes les longueurs d'onde) et presque 400 amas de galaxies dans une zone 250 fois plus grande que la surface de la pleine lune. En étudiant à haute résolution le gaz chaud des amas les plus brillants, on a même pu déterminer leur composition chimique et la relier à ses sources (différents types de supernovae). En parallèle, les images détaillées ont enfin permis de comprendre



▲ Cette image du relevé XMM-LSS, composée de 99 observations de XMM-Newton, dévoile le ciel profond, ses nombreuses galaxies actives et amas de galaxies.

pourquoi ce gaz situé entre les amas ne refroidit pas : grâce à leurs jets, les trous noirs supermassifs au cœur des galaxies y injectent de l'énergie, ce qui y crée des bulles en expansion. Dans certains cas, ces jets de

matière sont ultrarapides, plusieurs ayant été flashés à un sixième de la vitesse de la lumière.

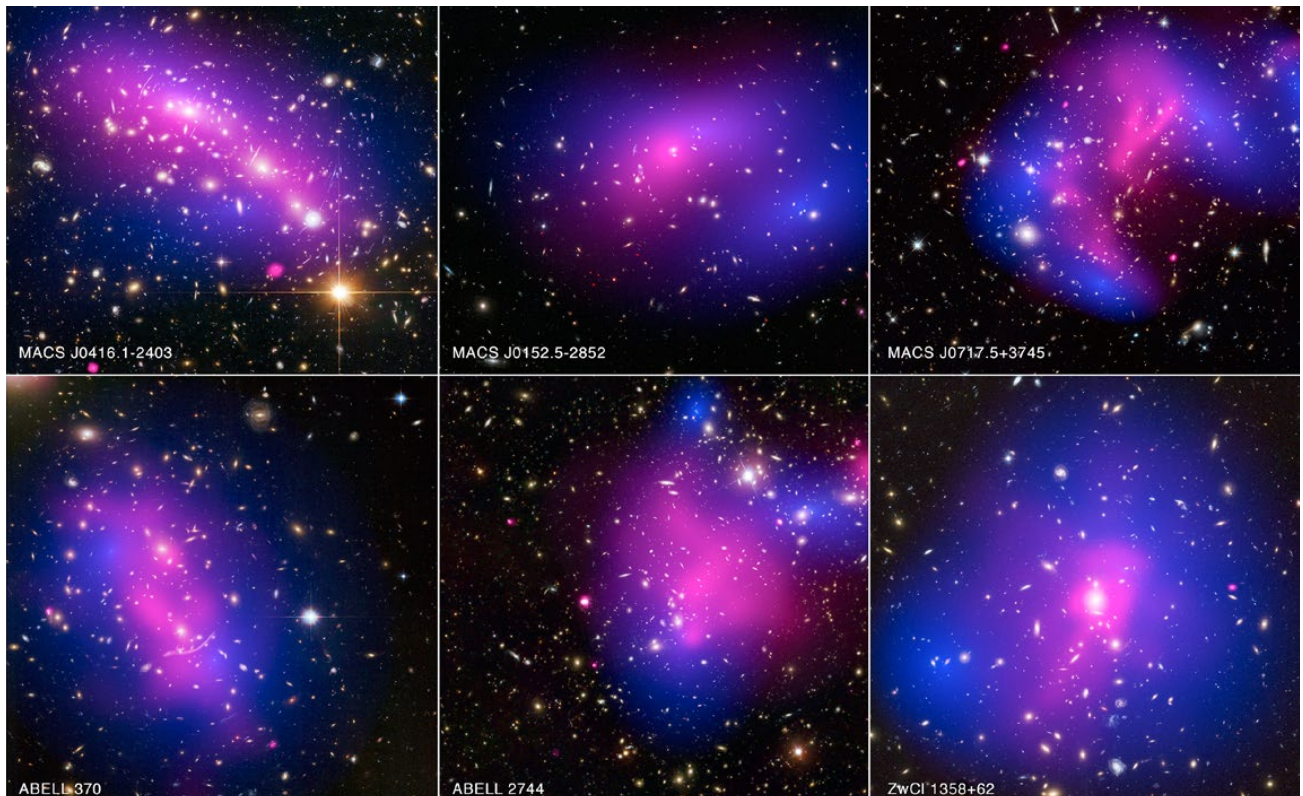
L'observation des galaxies et des amas en X a aussi apporté deux surprises. Dans les amas en collision, les données révèlent que le gaz chaud, forme principale de la matière ordinaire – la matière baryonique, celle dont nous sommes constitués –, n'est pas là où se trouve la majorité de la masse qui interagit gravitationnellement. Autrement dit, dans ces amas, il existe bien de la matière non visible : la matière noire. Ensuite, dans quelques amas, une raie inattendue a été enregistrée à 3,5 keV. Certains astronomes ont imaginé qu'elle résultait de la désintégration de matière noire exotique ! Mais plus prosaïquement, cette raie peut provenir du mécanisme d'échange de charges sur des atomes de soufre, un phénomène là aussi inattendu. ■

Les successeurs

Juillet 2019 – eROSITA (Allemagne et Russie) : relevé complet du ciel en X.

2022 – XRISM (Japon) : spectromètre haute résolution.

2031 – Athena (Europe) : spectromètre très haute résolution et spectro-imageur à grand champ de vue.



▲ Dans ces six collisions d'amas de galaxies, on peut voir les galaxies en blanc, le gaz chaud émettant des rayons X en rose et la répartition de masse déduite des effets de lentille gravitationnelle en bleu. Alors que le gaz chaud constitue la majorité de la matière « normale », il ne constitue pas la majorité de la masse totale (le bleu diffère du rose) : il y a « quelque chose » en plus (sans doute de la matière noire).