

IMAGES DE L'UNIVERS EN RAYONS X

Anne Decourchelle, service d'astrophysique, CEA Saclay.

Les rayons X issus du cosmos sont difficiles à étudier car ils sont composés de photons très énergétiques qui sont absorbés par toute forme de matière, en particulier par l'atmosphère terrestre qui nous protège. Les sources de rayons X sont proches des noyaux galactiques. Leur étude permet de déterminer les paramètres qui régissent l'explosion des supernovae.

L'astronomie X est l'étude observationnelle du ciel en rayons X. Elle a une histoire beaucoup plus récente que l'astronomie optique ou la radioastronomie. Ses débuts ont été intimement liés au développement du domaine spatial dans les années 1960.

Dépasser l'atmosphère terrestre

L'atmosphère terrestre, en absorbant les radiations énergétiques du cosmos, nous protège de leurs effets nocifs. La figure 1 montre l'altitude jusqu'à laquelle pénètre le rayonnement

électromagnétique du cosmos en fonction de sa longueur d'onde. Selon le domaine électromagnétique et le besoin requis de précision des mesures, les observations astronomiques sont ainsi menées à partir de sites terrestres (souvent à haute altitude et avec de l'optique

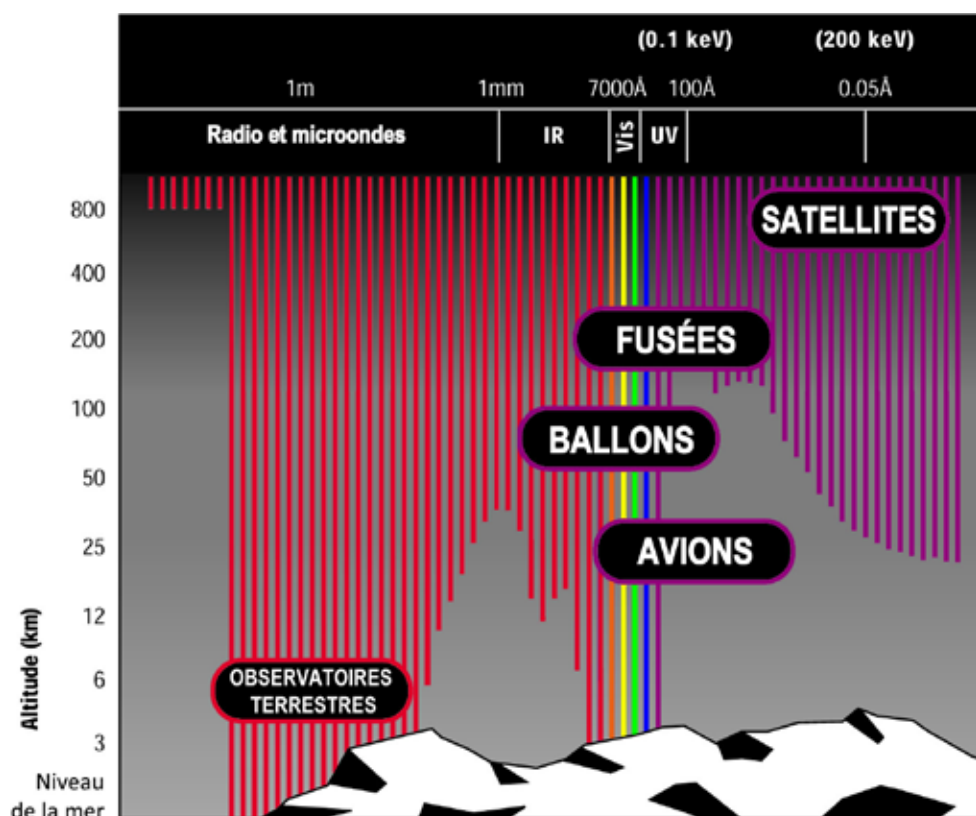


Fig.1. Altitude de pénétration de la lumière dans l'atmosphère terrestre en fonction de la longueur d'onde. Crédit : adapté de la NASA.

adaptative), atmosphériques (ballons, avions), ou au-delà (fusées, satellites). L'absorption est totale pour les photons UV, X et gamma. Les photons X cosmiques sont en effet absorbés par les atomes d'oxygène et d'azote de la haute atmosphère rendant l'accès à l'espace indispensable pour observer l'Univers en rayons X.

L'ouverture d'une nouvelle fenêtre sur l'Univers

Les premières observations en rayons X furent obtenues à partir d'instruments embarqués sur des vols en fusée par le Naval Research Laboratory (États-Unis) et aboutirent à la découverte en 1946 de l'émission en rayons X (et UV) du Soleil. De

nombreux autres vols suivirent dans les années 1950 pour étudier les propriétés du Soleil. Mais le Soleil est brillant en rayons X car il est proche de nous. En le plaçant à la distance de l'étoile la plus proche, il manquait aux instruments X de l'époque un facteur 100 000 en sensibilité pour être détectable ! Cela laissait peu d'espoir de détecter des sources X au-delà du Soleil.

Un défi instrumental qui a été relevé par une équipe américaine de l'AS&E (American Science and Engineering) menée par Riccardo Giacconi. Dans un contexte où les États-Unis s'étaient donnés pour ambition de marcher sur la Lune, l'objectif scientifique principal pour développer de nouveaux instruments X devint de détecter l'émission de la surface lunaire. Une émission X devait être produite par l'interaction des particules du vent solaire avec la surface lunaire et par la fluorescence X des matériaux de la surface lunaire induite par l'émission X du Soleil. Une partie très exploratoire du programme d'observation prévoyait également le balayage d'une portion du ciel pour rechercher d'éventuelles sources extrasolaires d'émission X. Après une défaillance instrumentale lors d'un premier vol en fusée en 1961, ce fut le succès lors du second vol (de 350 secondes) en juin 1962. L'émission de la Lune ne fut pas détectée, mais une source extrêmement puissante de rayons X extrasolaires fut découverte. Située dans la constellation du Scorpion, cette première source X extrasolaire (nommée Sco X-1) révéla que des processus extrêmement énergétiques étaient à l'œuvre dans l'Univers. Mais lesquels ? Une nouvelle fenêtre d'observation de l'Univers, celle de l'astronomie des rayons X, s'ouvrait et captivait la communauté avec ses nouveaux enjeux scientifiques. Quarante ans plus tard, le prix Nobel de physique 2002 a été attribué à Riccardo Giacconi pour cet accomplissement, qui a marqué le début de l'exploration en rayons X de l'Univers et de ses conditions extrêmes. Une révolution que nous vivons actuellement avec la découverte des premières sources d'ondes gravitationnelles.

Jusqu'en 1970, ce sont des instruments à bord de fusées et ballons qui explorèrent le ciel X et détectèrent plusieurs autres sources

cosmiques (comme le reste de supernova du Crabe). Mais il fallut attendre le premier satellite en rayons X, Uhuru, lancé le 12 décembre 1970, pour obtenir un balayage complet du ciel et découvrir plus de 300 sources d'émission X. Quelles étaient la nature de ces sources inconnues, leurs mécanismes d'émission et leurs sources d'énergie ?

Répondre à ces questions nécessitait de connaître la localisation précise des sources X observées, afin de rechercher leurs contreparties dans les autres longueurs d'onde, de réaliser des images en rayons X de ces sources, d'obtenir leurs spectres X et les courbes de lumière X des sources dont l'intensité varie dans le temps, et enfin de collecter un grand nombre de sources X pour identifier les différentes populations et leurs propriétés. Cela a été et reste les objectifs phares des instruments et télescopes X et se décline en matière de performance en sensibilité, résolution spatiale, spectrale et temporelle.

Comment imager les rayons X de l'Univers

Détection par incidence rasante

Le premier frein pour réaliser des images X du cosmos est que les photons X, contrairement aux photons visibles, ne se réfléchissent pas à incidence normale dans un miroir. Du fait de leur énergie très supérieure, ils pénètrent, diffusent et sont rapidement absorbés. C'est uniquement à incidence rasante qu'il est possible de les réfléchir sur une surface de type métallique extrêmement lisse. Une analogie serait le ricochet de galet à la surface de l'eau : lancé avec un très petit angle par rapport à la surface de l'eau, le galet peut rebondir plutôt que de couler. Le physicien allemand Hans Wolter proposa dans les années 1950 trois concepts

de télescope X (dits télescopes de Wolter). Utilisant deux réflexions à incidence rasante successives sur des surfaces réfléchissantes parabolique et hyperbolique (cf. figure 2), ils permettent de focaliser les rayons X et de former une image. Ce principe d'imagerie X a été développé dès les années 1970. Il a permis d'obtenir les premières images en rayons X à partir de l'observatoire américain Einstein, lancé en 1978, puis de ses successeurs, jusqu'aux observatoires actuels Chandra (US) et XMM-Newton (ESA) lancés en 1999, et eROSITA (allemand) en 2019. Afin de collecter plus de photons, plusieurs couches de miroirs concentriques sont emboîtées. C'est l'observatoire XMM-Newton qui dispose actuellement de la plus grande surface collectrice de photons X avec un système d'optique focalisante. Chacun de ses trois télescopes est constitué de 58 miroirs très fins en nickel et plaqués or. De longueur 60 cm (pour des rayons de 25 à 35 cm), les 58 miroirs sont emboîtés à une précision de quelques millimètres dans une configuration coaxiale (cf. figure 2). La longueur focale du télescope est de 7,5 m. Si la surface globale des miroirs des trois télescopes dépasse les 120 m², la surface géométrique effective de collecte des photons X est bien plus réduite (de l'ordre de 0,15 m²/télescope et dépend de l'énergie du photon).

L'enjeu actuel est la conception de la plus grande mission en rayons X, Athena (ESA), dont le lancement est prévu vers 2034. L'observatoire spatial Athena sera doté d'une nouvelle technologie optique (Silicon Pore Optics), reposant sur l'empilement de deux blocs (parabolique et hyperbolique) de plaquettes de silicium. La structure circulaire du télescope d'environ 2,5 m de diamètre sera constituée de près de 600 modules de miroirs assemblés sur une quinzaine de rangées circulaires, et savamment

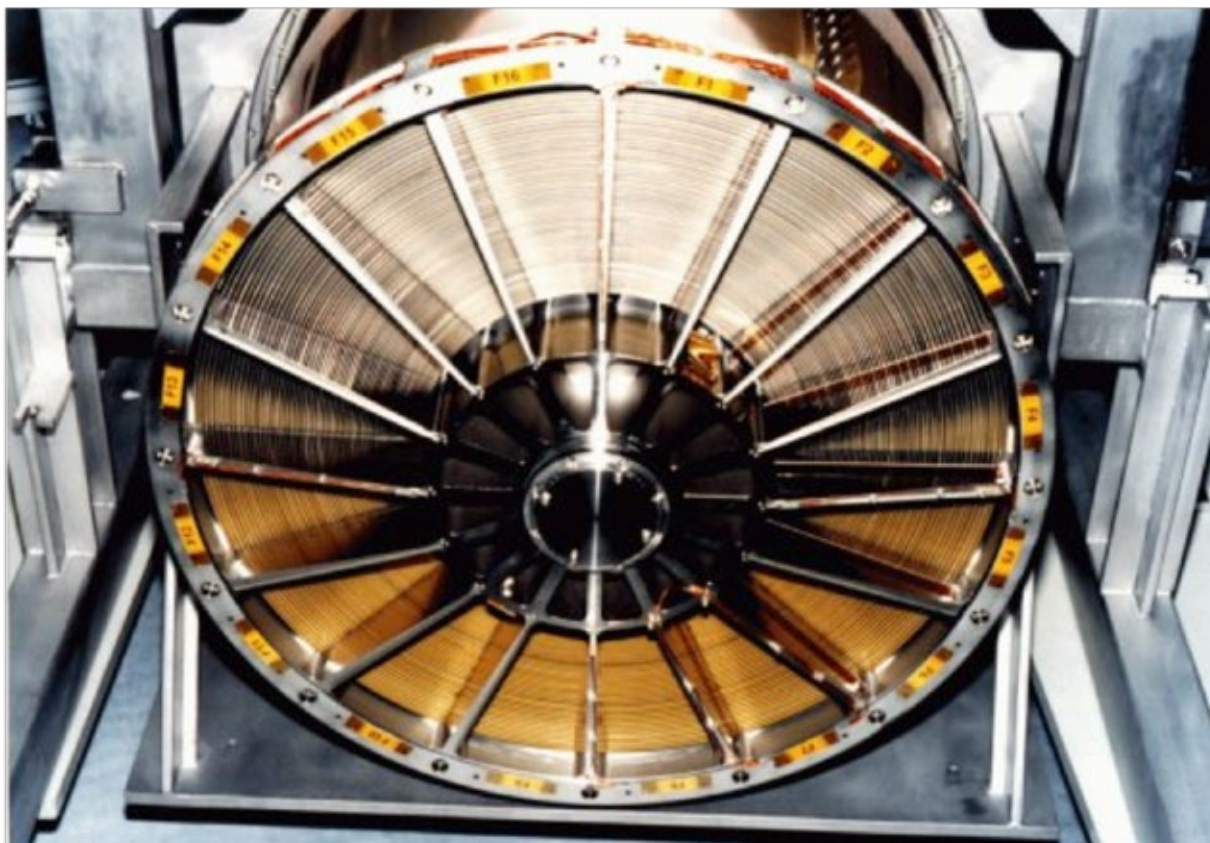
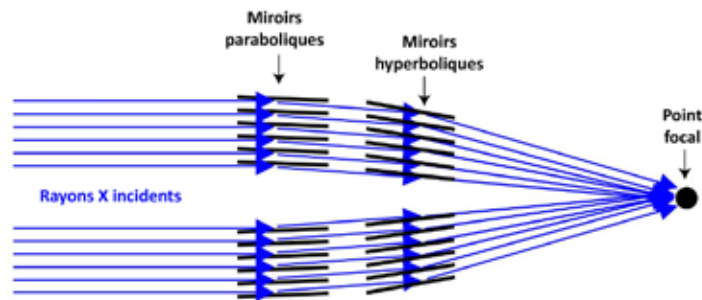


Fig.2. En haut, un schéma en coupe du principe d'un télescope X à incidence rasante de type Wolter I, constitué pour cette illustration de 6 ensembles de miroirs emboîtés (Crédit : adapté de la NASA).
En bas, photo d'un des trois télescopes de XMM-Newton montrant les 58 miroirs cylindriques emboîtés (Crédit : ESA).

optimisés pour atteindre les meilleures performances. Il s'agira de la plus grande optique en rayons X jamais réalisée.

Quelles sont les sources de rayons X ?

Les rayons X tracent les composantes énergétiques de l'Univers. Ils sont produits dans des conditions extrêmes : température très élevée (de l'ordre du million à la centaine de millions de degrés), très fort champ de gravité, intense champ magnétique, ou présence de particules relativistes de très haute énergie.

Alors que le premier satellite en rayons X Uhuru avait détecté

339 sources en rayons X, ce sont actuellement plus de 500 000 sources d'émission X qui ont été répertoriées par l'observatoire XMM-Newton.

Parmi ces sources, on observe une fraction importante, proche de la moitié, de noyaux actifs de galaxies, au cœur desquels se trouve un trou noir supermassif qui engloutit la matière qui l'environne. Dans les galaxies, les sources en rayons X dominantes sont les systèmes binaires d'étoiles dont l'une est un objet compact (trou noir, étoile à neutrons) qui avale la matière de son étoile compagnon. La première source X découverte Sco X-1 en est un exemple. Les observations en rayons

X permettent aussi d'observer des pouponnières d'étoiles en formation, des étoiles massives ou avec une activité magnétique soutenue, ainsi que la fin de vie des étoiles, sous la forme de restes de supernovae, de pulsars, de nébuleuses de vent de pulsar, de rémanents de sursauts en rayons gamma, ou de magnétars. C'est également en rayons X que l'on peut observer et caractériser les propriétés du milieu interstellaire chauffé à des millions de degrés dans les galaxies par notamment les étoiles massives et les supernovae, ainsi que celles du gaz chaud intergalactique dans les amas de galaxies. En revenant plus près de la

Terre et du Système solaire, on peut observer le faible rayonnement X des planètes, comme Mars, Jupiter, Saturne, et des comètes. Il est dû à la réflexion des rayons X solaires sur leur atmosphère ou surface, ainsi qu'à l'interaction avec les particules du vent solaire.

L'astronomie des rayons X s'intéresse ainsi à l'ensemble des structures de l'Univers et apporte un éclairage unique sur ses composantes chaudes et énergétiques. Pour illustrer la richesse des images en rayons X, regardons deux exemples, le reste de la supernova de Tycho et la région centrale de notre Galaxie. Ils mettent en exergue de façon complémentaire la variété et la richesse des informations récoltées.

Les restes de supernova

Les étoiles les plus massives (plus de 10 fois la masse du Soleil) finissent leur vie lors d'une spectaculaire explosion en supernova générée par leur effondrement gravitationnel. Tandis que le cœur de l'étoile se transforme en objet compact (étoile à neutrons, trou noir) sous l'effet de la gravité, l'enveloppe de l'étoile est expulsée lors de l'explosion. Le reste de supernova est alors constitué de l'objet compact et de la matière éjectée, les *ejecta*. Ils sont composés d'éléments lourds synthétisés en fin de vie de l'étoile et lors de l'explosion. Une naine blanche en système binaire explose, quant à elle, par combustion thermonucléaire en avalant plus qu'il n'en faut la masse de son étoile compagnon. Son explosion ne laisse comme résidu que la matière éjectée.

En 1572, «une nouvelle étoile» apparaît dans le ciel. Elle est découverte par l'astronome danois Tycho Brahé qui l'observe à l'œil nu pendant presque deux ans jusqu'à ce qu'elle disparaisse. Ce n'est que dans les années 1950, sur la base des observations de Tycho Brahé, que le phénomène a été attribué à une supernova et plus précisément à l'explosion thermonucléaire d'une naine blanche.

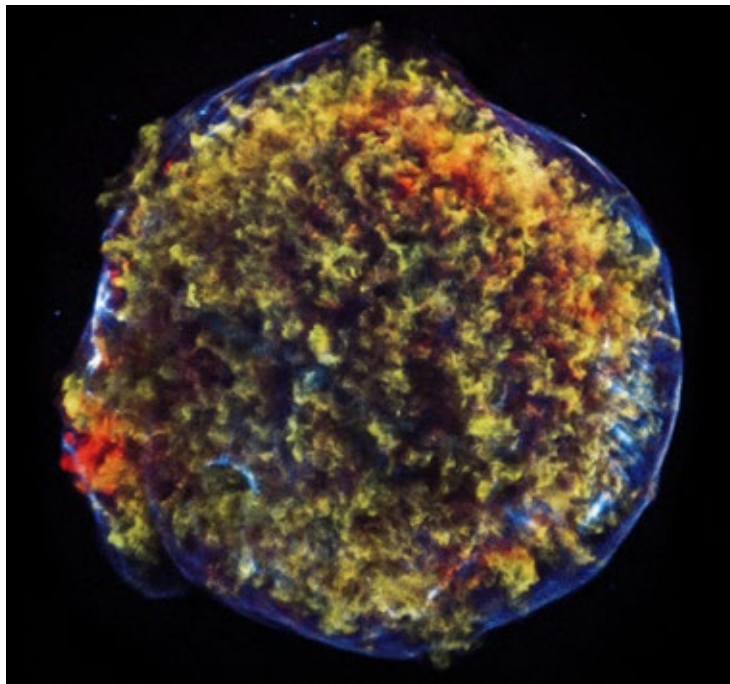


Fig.3. Image composite en rayons X du reste de la supernova de Tycho observé par le satellite Chandra. Les couleurs représentent différentes bandes d'énergie. En rouge (0,95-1,26 keV), l'émission est dominée par les raies d'émission du fer ; en vert (1,63-2,26 keV) par celles du silicium et en bleu par le continu à haute énergie (4,1-6,1 keV). La taille apparente du reste est de 8 minutes d'arc. Crédit : NASA/CXC/SAO.

La figure 3 montre l'image du reste de la supernova de Tycho (SN1572) observé en rayons X plus de 400 ans après son explosion. Il est localisé dans notre Galaxie à une distance de plusieurs milliers d'années-lumière. Le reste de supernova est créé par l'interaction de la matière éjectée à des vitesses de dizaines de milliers de km/s avec le milieu environnant. Les chocs générés chauffent la matière (ejecta et milieu environnant) à des dizaines de millions de degrés, qui émet alors en rayons X. Selon la nature de l'étoile et le mécanisme d'explosion, l'empreinte laissée sur le reste de supernova est différente.

Scruter la matière synthétisée par la supernova

Ce sont en premier lieu les ejecta (en jaune/rouge/vert) que l'on observe dans l'image en rayons X du reste de supernova de Tycho (figure 3). L'émission X révèle la morphologie grumeleuse et inhomogène de la matière éjectée. Sa structuration en nombreux petits globules de matière est le résultat d'instabilités à l'interface entre les ejecta et le milieu environnant. La figure 3 est une image composite en rayons X : une couleur différente est attribuée selon

la bande d'énergie¹. En rouge (0,95-1,26 keV), l'émission est dominée par les raies d'émission du fer ; en vert (1,63-2,26 keV) par celles du silicium et en bleu par le continu à haute énergie (4,1-6,1 keV). Les différentes couleurs des ejecta reflètent ainsi les variations de composition des globules d'éjecta imputables aux détails de l'explosion. Par exemple, le globule rouge visible à la périphérie du reste est dominé par le fer et se trouve entouré de globules de silicium (vert/jaune). Pour quantifier la composition de ces produits de nucléosynthèse éjectés, et connaître les conditions qui règnent dans le plasma, il est nécessaire de modéliser les spectres en rayons X par des modèles physiques. La morphologie, la composition, ainsi que les conditions physiques des ejecta, sont essentielles pour

¹ En rayons X, on détecte les photons un par un, avec leur position sur le ciel, leur énergie et leur temps d'arrivée. L'information sur l'énergie des photons est cruciale pour distinguer les différents processus d'émission en jeu, la nature et les propriétés du plasma observé (température, composition, densité...). Dans la gamme d'énergie 0,1-10 keV, on a ainsi accès à l'émission du plasma chauffé sous la forme d'un continu et de raies d'émission des éléments (très ionisés) tels que l'oxygène, le silicium, le soufre ou le fer, mais également à l'émission synchrotron des électrons accélérés au choc à des vitesses relativistes.

déterminer le type de supernova, les paramètres de l'explosion et ses mécanismes physiques.

Accélération de particules dans les restes de supernova

Les restes de supernova sont considérées comme l'une des principales sources à l'origine du rayonnement cosmique (électrons et noyaux relativistes) qui baigne notre Galaxie. L'image composite en rayons X du reste de la supernova de

Tycho (figure 3) révèle la présence d'un fin filament (en bleu), encerclant le reste de supernova. Ce filament provient de l'émission d'électrons accélérés à très haute énergie (TeV). Il trace le choc principal qui, se propageant à grande vitesse (quelques milliers de km/s), accélère des particules à des vitesses proches de la lumière. Si le rayonnement des électrons relativistes de haute énergie est observé dans le domaine des rayons X, c'est en rayons gamma de

très haute énergie que l'on observe le rayonnement des noyaux accélérés (hydrogène, hélium,..).

Vers le centre de notre Galaxie

La figure 4 présente une image composite en rayons X de la région centrale de notre Galaxie. Ces observations révèlent une grande richesse de sources astrophysiques et de processus énergétiques à l'œuvre dans la région centrale de notre

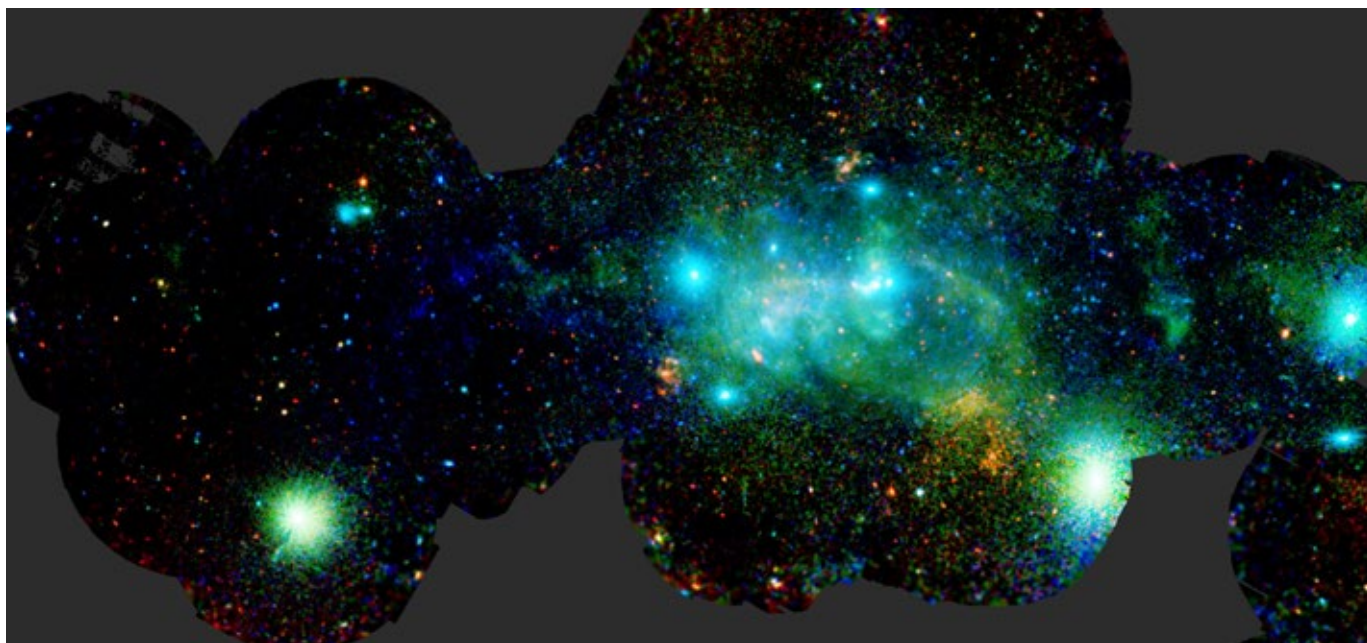


Fig.4. Image composite en rayons X de la région centrale de notre Galaxie obtenue à partir d'une mosaïque d'observations par le satellite XMM-Newton. En rouge sont représentés les photons d'énergie dans la bande 0,5-2 keV, en vert ceux de 2 à 4,5 keV et en bleu ceux de 4,5 à 12 keV. L'image s'étend sur 2,5 degrés. Crédit : ESA/XMM-Newton/G. Ponti et al. 2015. Crédit : NASA/JPL-Caltech.

Galaxie. Les sources ponctuelles (points rouges, verts et bleus) sont essentiellement des systèmes binaires où l'objet compact (naine blanche, étoile à neutrons ou trou noir) avale la matière de son étoile compagnon. Cette matière est chauffée en tombant sur l'objet compact et émet fortement en rayons X. On observe également des amas d'étoiles. Les structures diffuses structurées (bulles, coquilles) sont des restes de supernova, et des superbulles créées par l'action combinée de vents stellaires dans des amas de jeunes étoiles et de supernovae. L'ensemble de la région centrale est rempli d'un plasma à des millions de degrés, qui s'élève sous forme de lobes de part et d'autre du disque de notre Galaxie.

On observe dans la partie la plus centrale une intense activité sous l'effet des vents d'étoiles jeunes et massives et des supernovae. Enfin, tout au cœur de notre Galaxie, dans la région la plus brillante, se trouve Sgr A*, le trou noir supermassif de plusieurs millions de masses solaires. Il avale sporadiquement de la matière environnante qui, échauffée en tombant sur le trou noir, émet en rayons X. On suspecte que Sgr A* a été beaucoup plus actif par le passé.

Préparer le futur

Scruter l'Univers en rayons X ouvre une fenêtre unique sur l'Univers chaud et énergétique, complémentaire des autres longueurs d'onde et des ondes gravitationnelles.

C'est l'objectif de la grande mission spatiale Athena en préparation par l'Agence spatiale européenne pour un lancement dans les années 2030. Elle emportera deux instruments, dont le X-IFU, un spectro-imageur innovant sous responsabilité française et maîtrise d'œuvre du CNES qui fournira des images et des spectres avec une sensibilité et une résolution inégalées. En route pour de nouvelles découvertes !