

XMM : premiers résultats étonnants

Le grand satellite X de nouvelle génération, rebaptisé « XMM-Newton Observatory », a été lancé en décembre 1999. Les scientifiques de l'Esa l'ont doté de capacités exceptionnelles à collecter les photons X et à fournir des images sur ces longueurs d'onde, qui sont souvent la marque de phénomènes violents, cataclysmiques ou éruptifs. Les rayons X sont également émis, sur des longueurs caractéristiques, par la quasi totalité des étoiles, en particulier au niveau de leur couronne. Tout récemment, des astrophysiciens ont découvert que même de très petites étoiles, comme les naines brunes, pouvaient émettre des photons X de basse énergie par bouffées sous l'influence de forces gravitationnelles.

Certes, XMM n'est pas seul. Actuellement en orbite excentrée pour minimiser le temps de traversée des ceintures de Van Allen, le satellite américain Axaf-Chandra est vu comme complémentaire au satellite européen grâce à une finesse supérieure pour l'analyse des petites sources. En fait, malgré un accident en orbite qui a détruit plusieurs dispositifs à transfert de charge CCD de ses instruments, XMM surpasse globalement son concurrent américain car sa surface collectrice supérieure – 1 200 m² grâce à trois télescopes contenant chacun 58 miroirs concentriques à incidence rasante – fait de lui le plus grand télescope X de tous les temps.

Pour piloter ce grand projet, l'Esa a mis en place depuis longtemps un « Announcement of Opportunity », c'est-à-dire un appel à propositions d'observations, de façon à ce qu'il soit prêt pour l'été 1999 au cours

PHILIPPE JAMET

duquel les meilleurs projets d'utilisation de XMM (après sévère revue par les pairs) ont été sélectionnés. Le programme XMM, avant que soient entreprises les premières véritables recherches, a subi des tests en orbite et une phase de vérification des performances qui ont montré que celles-ci correspondaient à ce qui avait été spécifié en 1985 lors de l'atelier de Lyngby (Danemark). A l'époque, le défi paraissait difficile à relever mais les ingénieurs européens ont pourtant réussi. Le programme de XMM propose à la fois aux astrophysiciens européens un temps garanti pour leurs observations préalablement sélectionnées, mais aussi un temps ouvert négociable et dont peuvent profiter des astrophysiciens non membres des pays de l'Esa. Il existe aussi des « cibles d'opportunité » qui sont accordées par l'équipe scientifique pour des observations se déroulant sur une échelle de temps relativement courte en raison des sujets étudiés.

Un bilan déjà impressionnant

Le bilan scientifique de XMM, qui a été pourtant lancé après Chandra mis à poste en juillet 1999, apparaît d'ores et déjà impressionnant avec notamment la résolution d'un mystère intrigant comme celui du fond diffus de rayonnement X qui serait dû à 80 % à des trous noirs stellaires,

résultat d'étoiles de grande taille effondrées. Dans ce cas-là, le trou noir possède un disque d'accrétion où la matière tournoyante, chauffée par les forces gravitationnelles, émet des rayonnements très énergétiques – phénomène qui a été compris pour la première fois par les astrophysiciens Geoffrey Burbidge et Kevin Prendergast.

A une époque qui n'était pas si lointaine, on considérait les trous noirs stellaires comme des objets rares puisque l'on parlait de l'hypothèse selon laquelle leur formation s'est faite à partir de grosses étoiles ayant au minimum 8 à 10 masses solaires. Aujourd'hui, les hypothèses des astrophysiciens, suite à certaines observations, sont devenues moins restrictives et le champ des possibilités de formation d'un trou noir stellaire se situe probablement à partir d'une étoile en fin de vie de 5 à 6 masses solaires. De 2 à 5 masses solaires l'étoile évolue, après explosion en supernova, en étoile à neutrons ou en pulsar animé d'une prodigieuse vitesse de rotation sur lui-même. Rien que dans notre seule galaxie, il pourrait exister plusieurs centaines de millions de petits trous noirs et ceux-ci seraient aussi courants que les étoiles à neutrons, selon l'astrophysicien américain Kip Thorne qui a exposé ses thèses dans un ouvrage passionnant intitulé *Trous noirs et distorsions du temps* (Flammarion).

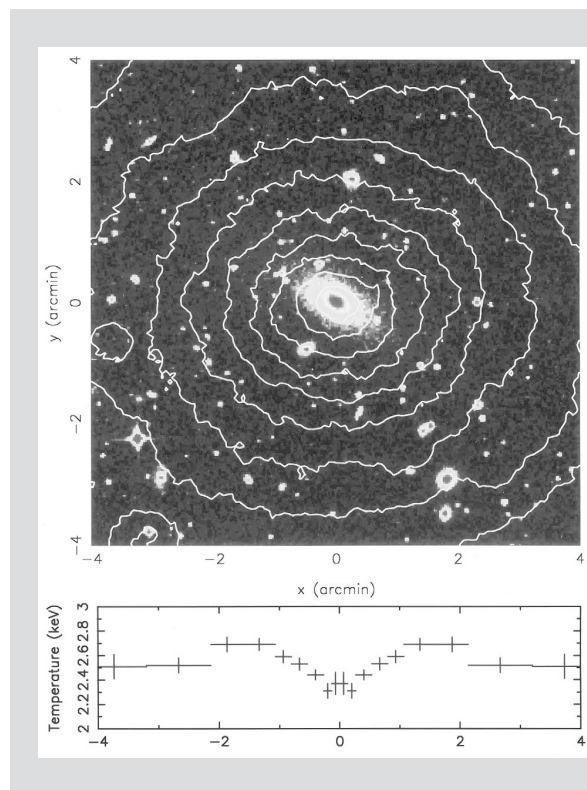
Ces petits trous noirs pourraient constituer des risques, lors des prochains millénaires, pour la navigation interstellaire qui devra disposer de cartes précises pour signaler et éviter les endroits dangereux. Dans ce domaine, il

existe aussi des idées très futuristes comme, par exemple, l'utilisation de la zone limite d'influence d'un trou noir pour accélérer la vitesse d'un vaisseau matière-antimatière par levier gravitationnel, ou bien encore comme source d'énergie au moyen de systèmes de câbles géants déroulés sur plusieurs millions de kilomètres. Tout cela peut sembler être, au premier abord, comme de la science-fiction mais pourrait être réalisable à très long terme en vertu du principe « physico-technique » énoncé par le scientifique germano-américain Winterberg, selon lequel toutes les voies de la nature finissent un jour par être explorées.

Les astrophysiciens traqueurs de trous noirs attendaient beaucoup de XMM et n'ont pas été déçus, mais le mystère que constituent ces véritables « léviathans de l'Univers » n'est pas encore levé pour autant. Si l'on explique mieux leur processus de formation, qu'ils soient stellaires ou galactiques géants situés au cœur d'une galaxie, il demeure que, du fait qu'ils absorbent tout ce qui se situe dans leur sphère de Schwarzschild et leur zone de captage, notre physique ne comprend toujours pas ce qui se passe au-delà de leur disque d'accrétion. Du fait que XMM fonctionnera pendant environ dix ans, on peut espérer une meilleure compréhension de la physique des trous noirs.

Outre la résolution du problème du fond diffus de rayonnement X, XMM a considérablement fait progresser notre compréhension dans des domaines comme les étoiles binaires X, les amas de galaxies, les restes de supernovae, la surveillance par le « trou de Lockman », tous ces objets étant étudiés sur une large bande allant de 10 à 0,01 nanomètres et sur le spectre énergétique allant de 0,1 à 100 KeV qui caractérise des températures allant de 1 à 2 millions de degrés. Fait étonnant, ces températures qui font émettre la matière en rayonnement X ne sont pas dues uniquement à des processus nucléaires dans le cas des binaires X, mais à des processus non thermiques qui peuvent être de nature gravitationnelle ou magnétohydrodynamique, comme c'est le cas dans les amas.

Il n'est pas étonnant que XMM nous ait fait progresser dans ce domaine de connaissances car les couples d'étoiles binaires en in-



Amas Abell S1101 cartographié par la caméra EPIC-MOS avec une surimpression en visible.

teraction sont depuis longtemps reconnus comme des objets à forte luminosité X. C'est notamment le cas des étoiles de type Algols, Cataclysmic Variables (CV), RS Canum Venaticorum Binaires (RSCVn) et Dwarf Novae (novae naines), qui sont des systèmes binaires clos où se produisent des transferts de matière d'une étoile à l'autre et des changements de période que l'astrophysicien Warner (1988) a été l'un des premiers à modéliser. Ces étoiles de types divers sont incluses en général dans la catégorie W Ursae Majoris. De la régularité des perturbations apparaissant dans leur courbe de lumière, on conclut pour celles-ci à l'existence d'enveloppes convectives rotatives en relation avec un important champ magnétique qui, avec un intense rayonnement X, caractérise ce type d'étoiles.

Bien souvent, pour ces étoiles, on suppose qu'il existe à leur côté d'un troisième corps invisible qui pourrait être un mini-trou noir. En effet, de nombreuses étoiles de ce type semblent être affectées par un double transfert de matière, des perturbations de leur champ magnétique, des variations de leurs propriétés physiques et dynamiques qui les font parfois appeler « erratiques » ou « non strictement périodiques ». Ces couples ont la plupart du

temps des orbites circulaires mais, dans un grand nombre de cas, leur orbite semble être affectée par un troisième corps invisible dont la présence est trahie aussi par un disque d'accrétion émettant en X. A partir des données de XMM, qui a ramené dans ses filets plusieurs milliers de couples stellaires X, il devient évident qu'il nous faut dépasser le classement traditionnel des binaires X – celles à forte masse désignant un couple où une étoile dégénérée de neutrons (étoile à neutrons) absorbe le gaz d'un compagnon de grande taille, et celles à faible masse se composant d'un couple d'étoiles de taille comparable où des transferts de matière, émettant en X à partir d'un disque d'accrétion, se produisent dans un sens ou dans les deux sens, en rallumant au passage le phénomène de nucléosynthèse. Toutes les analyses permises par les résultats ramenés par XMM n'ont pas encore été effectuées mais vont nous obliger à élargir le « bestiaire de notre zoo cosmique ».

Le troisième apport fondamental de XMM concerne les amas de galaxies dont on sait depuis longtemps qu'ils émettent fortement en X. Les amas sont les plus larges structures de l'Univers et consistent en des centaines de galaxies liées entre elles par leur mutuelle attraction

gravitationnelle. Les données de XMM à ce sujet sont de loin plus importantes que celles réunies par Rosat ou le satellite américain XTE (X-Ray Transient Explorer), ce dernier étant spécialisé dans la détection des gaz très chauds émettant en rayonnement X dans les amas de galaxies. Ces galaxies sont d'un grand intérêt pour les cosmologistes en tant qu'indicateurs de l'évolution de l'Univers dans des temps anciens, avec distribution de matière sous forme granuleuse comme base de départ dans la formation des structures que l'on peut aujourd'hui observer minutieusement en rayonnement X. Selon l'astrophysicien allemand Gunther Hasinger, principal chercheur sur XMM, les données rapportées par le satellite européen nous apportent la vision de cette granulation au cours de laquelle la matière cosmologique se structure pour donner naissance aux galaxies que nous connaissons.

Les images en visible d'amas de galaxies donnent bien une vue des galaxies elles-mêmes mais pas du gaz chaud qui relie ces galaxies entre elles. Par contraste, une image X fait parfaitement ressortir ce gaz chaud d'une température de plusieurs millions de degrés qui brille intensément en rayonnement X et fait apparaître avec une certaine finesse des constituants galactiques inobservables autrement. Pour ce faire, les instruments de XMM ont dû « éliminer » les effets des fameux « absorbeurs chauds » qui absorbent certains rayonnements et faussent les données sur les endroits d'où ils ont été émis. Ces absorbeurs chauds semblent être des gaz ionisants et des poussières violemment chauffées à proximité de trous noirs et de quasars, et le problème de leur présence s'est notamment posé pour l'étude de la galaxie Markarian 766 qui émet des jets à la vitesse de 16 000 km/s.

L'observation en X fait apparaître pour d'autres galaxies des jets de particules à hautes énergies dont le grand spécialiste est l'astrophysicien Anthony Readhead. En X, le gaz chaud entourant les galaxies apparaît comme une lumière brillante, diffuse et étendue. Le rayonnement X de ce gaz nous permet d'observer à l'intérieur un certain nombre d'inhomogénéités dues à des ondes de choc et des

phénomènes collisionnels assez violents. Ceux-ci sont causés par le mouvement des galaxies à l'intérieur de ces amas et avec des vitesses pouvant atteindre des centaines de kilomètres par seconde !

Alors qu'il est extrêmement rare de voir en visible des supernovae qui nous sont en grande partie masquées par des poussières dans d'autres galaxies, XMM a permis de prendre des images brillantes de plusieurs d'entre elles grâce à ses caméras EPIC et d'une brillance jamais constatée auparavant dans ces régions. Ces galaxies avaient pourtant été inspectées par le satellite X allemand Rosat mais, en rayonnement X basse énergie, leur émission était masquée par les gaz et les poussières de la Voie Lactée. On a aussi détecté de nombreuses sources X extragalactiques grâce aux lignes d'émission du fer et d'importants *redshifts* qui ont permis une évaluation de leur distance. On peut estimer que la grande capacité de XMM, aussi bien sur les hautes énergies que sur les basses, permettra des progrès considérables en astrophysique galactique.

Toujours pour ce qui concerne les supernovae, mais cette fois-ci dans notre galaxie, XMM a pu observer de nombreux restes de supernovae qui sont plus faciles à mettre en évidence en X que sur les autres plages du spectre électromagnétique. A la fin de leur vie, de nombreuses étoiles de grande taille terminent leur cycle dans de violentes explosions, dénommées supernovae, avant de devenir une étoile à neutrons ou un pulsar. L'histoire passée est là pour nous prouver qu'une telle explosion peut être visible en plein jour comme le content des chroniques chinoises et arabes.

Les explosions de supernovae sont les événements stellaires connus comme les plus énergétiques après les quasars qui sont des noyaux galactiques extrêmement brillants. Dans le spectre X des supernovae, on trouve des éléments comme l'oxygène, le néon, le magnésium, le fer. Après une explosion qui se caractérise par sa brillance, la plus grande partie de son énergie apparaît clairement avec le mouvement de matière qu'elle provoque. Les parties externes de l'étoile sont éjectées dans l'espace avec une vitesse initiale de l'ordre de 10 000 km/s. L'explosion s'étend comme une

bouffée d'ondes de choc et son contact permet l'émission d'abondants rayonnements X.

Un des plus puissants moyens d'investigation pour de tels objets est l'étude de leur morphologie grâce aux lignes d'émission caractéristiques individuelles. Le pouvoir collecteur de XMM a permis de telles analyses détaillées sur une large variété de restes de supernovae. On citera comme exemple la supernova E0102-70, dans le Petit Nuage de Magellan, issue d'une explosion qui a pu être observable il y a mille ans, et les restes de la supernova N132D issue d'une explosion qui a pu être observée il y a mille trois cents ans. Ces restes de supernovae se caractérisent par des anneaux de matière en expansion d'une température de plusieurs millions de degrés et émettent violemment en rayonnement X. Ces deux amas de débris de supernovae ont surtout été étudiés par les deux caméras EPIC-MOS de XMM, et l'analyse de ces résultats a été présentée dans la revue *Esa Bulletin*. Les instruments EPIC et RGS ont permis, pour la première fois en ce qui concerne les restes de supernovae, de mettre en évidence d'importantes différences en termes de températures et d'abondances relatives en éléments chimiques. Les astrophysiciens impliqués sur XMM travaillent sur plusieurs modèles en cours d'élaboration qui ne concordent pas parfaitement avec ce que l'on croyait savoir jusqu'à présent des différents types de supernovae.

Par rapport aux générations antérieures de télescopes X, XMM, comme Chandra, offre une combinaison d'instruments qui donnent une vue complètement nouvelle et une grande richesse de diagnostics physiques sur les conditions qui suivent de tels événements cataclysmiques.

Les caméras EPIC ont, par exemple, obtenu des clichés des restes de la supernova Tycho, située dans la constellation de Cassiopée, et qui fut observée par le célèbre astronome Tycho Brahé en 1572, visible alors en plein jour. Sa coquille de matière échauffée en expansion est connue depuis longtemps comme une source d'émission en radio et en X. Cette matière est faiblement détectable en lumière visible mais tout change en X où sa brillance aveugle les détecteurs les plus sensibles. C'est au

cours d'événements de ce genre que la majorité des éléments chimiques ont été créés par nucléosynthèse par une première génération d'étoiles puis éjectés dans l'espace. Ce sont ces matériaux de base qui ont servi à la formation des planètes et comme support à la vie elle-même (carbone, azote, oxygène).

Pour les astrophysiciens, l'examen des nouvelles données X permises par XMM aide à faire la lumière sur comment ces explosions se produisent et comment les éléments produits par ces explosions s'assemblent. Avec les caméras EPIC, qui offrent une unique combinaison de capacité de résolution spectrale et spatiale, il est possible d'extraire des informations de chaque élément chimique détecté tour à tour. Les images successives données par les caméras révèlent la lumière de différents éléments chimiques et nous donnent ainsi une bonne approximation de la réalité. Ces indications, qui mettent en évidence la localisation de leur maximum d'intensité, varient légèrement pour les différents éléments chimiques. A partir de ces indications, on peut obtenir des renseignements sur l'environnement « présupernova » ainsi que sur la géométrie de l'explosion originelle.

Un autre apport de XMM a été d'observer le ciel à travers le fameux « trou de Lockman », du nom de l'astrophysicien qui l'a découvert. Les premières observations effectuées en rayonnement X nous ont appris que le ciel tout entier rayonnait sur cette plage du spectre électromagnétique avec une émission faible et uniforme. Des études plus détaillées ont progressivement révélé que ce rayonnement de fond du ciel résultait de la superposition du flux émis par de nombreuses galaxies actives. Les observations effectuées par Rosat ont conduit à penser, à tort, que la présence de milliers d'objets de ce type, sur chaque carré représentant un degré du ciel, était à l'origine du fond de rayonnement X de basse énergie.

Toutefois, le spectre typique de telles galaxies, qui extrapolé caractérise plutôt de hautes énergies, ne correspond pas à ce rayonnement diffus. De nombreux astrophysiciens ont essayé d'élucider cette énigme en expliquant que de nombreuses galaxies contenaient un trou noir caché en leur centre. Ces trous noirs

massifs se seraient formés au début de l'Univers et auraient émis, par le biais de leur disque d'accrétion, des quantités énormes d'énergie sur toutes les longueurs d'onde. De larges disques de gaz tourbillonnant et de poussières entourant les trous noirs peuvent en effet masquer à notre vue les radiations sur la plupart des longueurs d'onde. Cependant, des rayons X très énergétiques doivent être capables de pénétrer ces couches absorbantes. C'est ainsi que les astrophysiciens ont fait appel à XMM pour écarter les premières théories sur ce fond de rayonnement diffus, et cela en étudiant encore davantage de faibles galaxies qui sont détectables par le télescope spatial européen grâce à sa capacité à repérer les rayons X à haute énergie à grande distance.

Les chances d'aboutir de XMM-Newton ont été renforcées par des observations effectuées à travers le trou de Lockman. Cette région du ciel a été sélectionnée du fait que, dans sa direction, la quantité de matériel absorbant le spectre électromagnétique est beaucoup plus faible que dans les autres directions de la Voie Lactée permettant ainsi de mieux observer l'Univers en profondeur, opportunité qui avait été aussi saisie par Rosat. Les instruments de XMM ont été braqués trente heures sans interruption et de nombreuses sources X ont été repérées. Parmi celles-ci, des sources X de basse énergie préalablement observées par Rosat et dont la couleur tend vers le rouge, tandis que les sources les plus énergétiques vont du vert au bleu sur des plages d'énergie allant de 5 à 10 KeV. La sensibilité de XMM sur cette plage d'énergie montre une amélioration considérable par rapport à celle des autres observatoires spatiaux en rayonnement X. On peut estimer, par exemple, que les résultats de XMM sont vingt fois meilleurs que ceux du satellite Beppo-SAX qui a mis en évidence l'existence des hypernovae prévues par l'astrophysicien polonais Paczynski.

Ce n'est qu'un début

Un des objectifs de XMM est de voir comment, d'après leur façon de fonctionner, il est possible de dé-

gager des modèles de l'évolution des galaxies à travers l'histoire de l'Univers. Il est également clair que XMM a déjà apporté une contribution significative à notre compréhension des trous noirs et à leur rôle dans l'émission passée sur les plages les plus énergétiques du spectre électromagnétique. De plus, XMM a révélé que les galaxies lointaines étaient plus massives que le laissaient penser les modèles cosmologiques grâce à des mesures de températures et de masses. Enfin, le programme a été l'occasion de démontrer l'utilité des investigations effectuées par l'instrument Optical Monitor qui peut opérer simultanément en visible et en UV sur les mêmes objets étudiés en X. Pour ce faire, l'Esa avait retenu la leçon passée du satellite européen Exosat qui était dépourvu d'un tel instrument et ne possédait qu'un seul viseur optique.

XMM, exceptionnelle combinaison d'instruments pour des études spectroscopiques, a démontré son pouvoir d'analyse des conditions physiques autour des étoiles dans notre environnement cosmique. Le phénomène d'explosions d'étoiles en supernovae qui a créé les éléments de construction chimiques des planètes et de la vie elle-même a été étudié comme jamais auparavant, aussi bien dans notre galaxie que celles voisines. Les détails fournis par l'observation en profondeur d'une nouvelle génération d'instruments ont été d'une aide considérable pour comprendre la complexe distribution des gaz chauds au niveau galactique. Le pouvoir de collecte des photons X de XMM, inégalé jusqu'à présent, a permis l'étude détaillée de nombreuses parties de l'Univers.

Il est évident que les renseignements apportés par ses travaux ne resteront pas sans conséquences sur les théories concernant la structure et l'évolution du cosmos. A l'heure où Roger-Maurice Bonnet, à notre grand regret, quitte la direction des programmes scientifiques de l'Esa, les Européens pensent à un programme de satellite X encore plus ambitieux dénommé Xeus, doté d'un miroir sans tube de 10 m de diamètre, aurait ses instruments additifs placés 50 m en arrière du miroir et pourrait être assemblé à partir de la station spatiale internationale.