

XMM :

sonder les mystères de l'Univers en X

PHILIPPE JAMET

XMM, le satellite d'astronomie X qui a été lancé avec succès le 10 décembre dernier par une fusée Ariane 5, représente pour l'Esa bien plus qu'un successeur à son satellite Exosat. Ce dernier n'a pourtant pas chômé puisqu'il a effectué plus de deux mille observations de sources X entre mai 1983 et avril 1986. On attend en effet de XMM, véritable bijou technologique, des progrès scientifiques majeurs.



Le satellite européen XMM.

L'astrophysique des « hautes énergies » – rayonnements X, cosmique et gamma – a particulièrement bénéficié des progrès de la technologie spatiale depuis le début des années 70 même si, dans le domaine gamma, cet apport est plutôt dû aux circonstances qu'à une politique déterminée. On sait, en effet, que les premières découvertes réalisées dans ce domaine ont été effectuées par des satellites militaires américains, de type Vela, chargés de détecter d'éventuelles explosions nucléaires soviétiques. C'est l'impossibilité de faire concorder un certain nombre de phénomènes observés par ces satellites avec des émissions artificielles terrestres qui a ouvert une brèche dans laquelle se sont vite engouffrés les astrophysiciens.

Dans le domaine de l'astrono-

mie X, l'attitude des scientifiques fut plus volontariste. Et on peut les comprendre car leurs observations stellaires, galactiques ou extragalactiques de l'Univers en lumière visible ne laissaient aucun doute sur la réalité : notre Univers, si parfaitement organisé au niveau macroscopique, était aussi le siège de phénomènes violents, éruptifs et cataclysmiques, d'explosions d'étoiles en supernovæ, de naissances dans la douleur de proto-étoiles, de collisions galactiques dont on sait aujourd'hui qu'elles sont courantes et à l'origine des grandes galaxies qui, comme la nôtre, comptent au minimum 100 milliards d'étoiles. Il paraissait donc évident, pour la plupart des spécialistes, que ces événements énergétiques violents devaient, en plus des rayonnements

visibles et radio, émettre des rayons X et ultraviolets, et cela en raison des conditions extrêmes dans lesquelles ils se produisent. Ces rayons venant de l'espace, de longueur d'onde courte mais à fréquence et énergie élevées, ne peuvent pas traverser l'atmosphère terrestre car ils sont arrêtés et absorbés par les molécules d'air en haute altitude.

Dès la fin des années 50, presque tous les astrophysiciens étaient convaincus de la validité des thèses de William Fowler sur la nucléosynthèse et de celles de Chandrasekhar sur l'évolution des étoiles en fonction de leur masse. C'est dans ce contexte que les astrophysiciens ont commencé à frapper à la porte des décideurs. On voit alors fleurir quelques projets de ballons en haute altitude équipés de « compteurs proportionnels » (une

variante de compteurs Geiger avec un système d'amplificateur) mais c'est surtout aux Etats-Unis que débutent les recherches avec des objectifs limités : la recherche de rayons X solaires voire lunaires ! On utilise d'abord d'anciennes V2 allemandes et des fusées « Aerobee » porteuses dans leur coiffe de détecteurs de rayons X (cas de l'équipe d'Herbert Friedman du Naval Research Laboratory), mais nombre de ces essais soit échouent soit ne permettent pas d'obtenir assez de données à cause du faible temps d'utilisation des instruments.

Toutefois, certains de ces lancements arrivent à mettre en évidence une forte émission X dans la couronne solaire, partie la plus externe de l'atmosphère de notre étoile. Un résultat inattendu renforce encore les partisans d'une astronomie X : on enregistre une source émettrice très forte baptisée Sco-X1, première source stellaire découverte de ce type et dont l'émission X est *cent fois plus forte* que son émission correspondante en lumière visible ! Il faut dire que si les découvertes se multiplient, c'est aussi parce que de jeunes scientifiques américains plutôt motivés n'hésitent pas à éviter les méandres de la bureaucratie et qu'ils arrivent à décrocher certains crédits. L'impulsion est d'abord venue des Italo-Américains Bruno Rossi et Riccardo Giacconi qui ont organisé les recherches autour d'équipes venues du MIT, de la société American Science and Engineering et de la division Astrophysique des hautes énergies de l'observatoire de Harvard. Outre Giacconi et Rossi, notons aussi les scientifiques américains qui allaient accéder à la célébrité : Herbert Gursky et Francis Paolini (de la société ASE), Harvey Tananbaum, Leon Van Speybroeck, Stephen Murray (qui devait ultérieurement participer au programme Rosat).

Le plus intrigant est sans conteste le fait que notre Univers apparaît, quelle que soit la direction vers laquelle on porte son regard, comme saturé par un rayonnement X diffus. On trouvera aussi plus tard un fond infrarouge diffus. Ces deux découvertes nous ont amenés à nous poser des questions auxquelles nous n'avons pu, pour l'instant, apporter que des réponses partielles. A propos de ce rayonnement X diffus, on a émis au cours des années 60 différentes hypothèses pour expliquer ce phé-

nomène, comme par exemple avec l'idée d'un rayonnement fossile, trace des premières étapes de la formation de l'Univers, ou bien encore les « étoiles à neutrons » dont l'existence avait été démontrée par Chandrasekhar et Zwicky.

Au moment même où les astrophysiciens ont commencé à comprendre que la fameuse source Sco-X1 est une source binaire dans laquelle une étoile à neutrons absorbe la matière venue de l'étoile autour de laquelle elle tourne, Giacconi, toujours lui, obtient l'accord de la Nasa pour le projet SAS-1 (Small Astronomy Satellite). Ce petit satellite de 64 kg, rebaptisé « Uhuru », est lancé en décembre 1970 à partir d'une plate-forme italienne ancrée au large des côtes du Kenya. SAS-1 donnera la première cartographie du ciel en rayons X et identifiera plus de 300 sources X dans notre seule galaxie. Il va aussi nous révéler un certain nombre de comportements étranges des sources X observées. En effet, certaines d'entre elles sont continues, d'autres discontinues, d'autres pulsent de façon régulière avec un maximum et un minimum d'intensité. Il va sans dire que les théoriciens des étoiles à neutrons et des étoiles binaires peuvent s'en donner à cœur joie. Parmi les sources observées par Uhuru, notons la source Cygnus-X1, découverte en 1965, et qui est en fait un système binaire associant une étoile géante bleue (de 20 masses solaires) et ce que l'on pense être un *trou noir stellaire*. Au cours des années 70, d'autres satellites à rayons X, travaillant toujours avec les mêmes techniques de première génération, ont été lancés : SAS-3 et OAO 3 Copernicus (Etats-Unis), ANS (Pays-Bas), Ariel 5 (Grande-Bretagne), ces deux derniers étant mis en orbite par des lanceurs américains.

Giacconi, jamais à court d'idées, est conscient des limites des appareils embarqués de première génération et en particulier des compteurs proportionnels qui, entre-temps, ont été améliorés avec l'apparition des compteurs à fenêtre de béryllium. Ces détecteurs sont en fait des tubes remplis de gaz munis d'une fenêtre opaque aux rayonnements visibles et UV mais transparente aux rayons X. Selon Giacconi, qui fut le premier à imaginer des systèmes plus performants reposant sur d'autres

principes, les détecteurs de première génération avaient beaucoup d'inconvénients dont notamment la difficulté à déterminer la direction des sources X et pour laquelle il fallait utiliser des systèmes de masques assez complexes. Un autre problème apparut également : un important « bruit de fond » provenant des sources de rayons gamma (situés à côté de la bande X dans le spectre électromagnétique) et des rayons cosmiques. Ces derniers qui sont des flux de particules chargées de très haute énergie (principalement des noyaux d'hydrogène et d'hélium associés à une faible proportion de noyaux atomiques plus lourds), possèdent des énergies atteignant plusieurs centaines de millions d'électronvolts et parfois même plusieurs dizaines de milliards d'électronvolts. Il arrive très souvent qu'ils interfèrent avec les rayonnements X et les compteurs proportionnels embarqués sur les premiers satellites X n'arrivaient pas toujours à faire la différence.

Un blocage amène à une percée technologique

En restant sur la même technologie, la seule solution aurait été, toujours selon Giacconi, d'augmenter de manière considérable la surface des détecteurs. Cette solution fut choisie pour le satellite HEAO-1 (lancé le 12 août 1977 par une fusée Atlas-Centaur) mais comme le reconnaissait Giacconi : « *En raison de limitations d'ordre physique, ses détecteurs de rayons X, bien que cinquante fois plus étendus que ceux de SAS-1, n'étaient que sept fois plus sensibles. Pour accroître la sensibilité de HEAO-1 d'un facteur 1 000, il aurait fallu des détecteurs couvrant une surface de plusieurs centaines d'hectares.* » Nous allons voir comment un blocage dans le domaine technique est à l'origine d'une percée technologique basée sur des principes radicalement différents.

Il fallait cependant tenir compte de la spécificité des rayons X dont on sait, depuis les années 30, qu'ils ne peuvent être ni réfractés par une lentille de lunette ni réfléchis par un miroir normal. Par contre, on savait également que ces rayons pouvaient être réfléchis par un miroir lorsqu'ils

parvenaient avec une incidence tangente à la surface de celui-ci. Le professeur allemand Wolter avait essayé de construire des microscopes reposant sur ce principe mais sans succès. Toutefois, il allait être à l'origine de la technique astronomique dite à *incidence rasante* pour laquelle, là encore, l'équipe dirigée par Giacconi fut à la pointe. Le satellite X HEAO-2 (dénommé également Einstein) a été conçu sur ce principe avec un système de quatre télescopes imbriqués les uns dans les autres, composés d'un paraboloïde et d'un hyperboloïde, c'est-à-dire au total huit surfaces réfléchies. L'ensemble focalisait les photons X à incidence rasante dans le plan focal à 3,4 m derrière l'ouverture d'entrée. HEAO-2 possédait aussi un système d'alignement du télescope avec les instruments additifs montés sur une table tournante dans le plan focal ainsi qu'un système de senseur stellaire permettant de choisir les cibles. De plus, l'ensemble comportait une caméra à comptage de photons de rayons X, une caméra grand champ et un spectromètre à silicium refroidi pour des mesures d'énergie des photons. Lancé le 13 novembre 1978, HEAO-2 a fait passer Giacconi à la postérité et révolutionnera l'astronomie X en donnant – pour un temps – l'avantage aux Américains.

HEAO-2 a mené des investigations dans la plupart des domaines d'étude de l'astrophysique, avec une assiduité plus grande pour deux aspects importants de la physique stellaire : les émissions en rayons X des couronnes stellaires, dont on sait aujourd'hui que leurs énormes températures sont dues à des processus magnétohydrodynamiques ; la physique du transfert de matière dans des systèmes binaires ou compacts. Ces derniers sont souvent composés d'une étoile géante rouge et d'une naine blanche ou d'une étoile à neutrons. En général, la naine blanche ou l'étoile à neutrons, dont les atmosphères respectives sont composées de gaz dégénéré d'électrons et de neutrons, *aspirent*, tel un vampire, le gaz de leurs voisins par l'intermédiaire d'un *disque d'accrétion*. C'est l'échauffement de cette matière à plusieurs millions de degrés qui crée une violente émission X. Dans ce domaine, HEAO-2 nous a révélé un certain nombre de couples d'étoiles inconnues auparavant

Les Japonais et l'astrophysique spatiale X

Alors que le nouveau satellite X japonais Astro-E sera bientôt mis en orbite, il n'est pas inutile de rappeler que le Japon est présent depuis longtemps dans ce domaine d'investigation et qu'il dispose, lui aussi, de petits lanceurs spécialement conçus pour la mise en orbite de charges utiles scientifiques : M-3C-2, M-3C-4, M-3S-3, M-3SII-2 et surtout le récent M-5. En février 1979, l'agence spatiale japonaise ISAS lança le satellite X Hakucho, lequel sera suivi par Tenma (février 1982) et Ginga (février 1987). Ce dernier, qui fut l'occasion d'une coopération avec les Américains, a notamment été braqué sur la fameuse supernova 1987-A et a effectué une étude approfondie de certains pulsars. Il est également parvenu à détecter quelques sursauts gamma pour lesquels les astrophysiciens émirent l'hypothèse d'étoiles à neutrons fortement magnétisées pour expliquer leur origine. Lancé en 1991, le satellite solaire Yohkoh était aussi équipé d'un télescope pour l'étude des rayons X de basse énergie. Le dernier satellite X japonais en date fut Astro-D, lancé début 1993, et développé en coopération avec les Etats-Unis et la Grande-Bretagne.

en lumière visible. Ce satellite, grâce aux nouveautés technologiques pour déterminer la source de l'émission, allait ouvrir la voie à des études complémentaires sur ces étoiles, et cela sur d'autres longueurs d'onde.

Toujours en physique stellaire, HEAO-2 contribua, grâce à son extrême sensibilité, à infirmer la théorie dominante selon laquelle seules les étoiles dont la température se situait entre 5 500 et 10 000 K (ce qui correspond aux types spectraux G, F et A) pouvaient émettre des rayons X avec une intensité comparable ou supérieure à notre Soleil (qui est une étoile de catégorie spectrale G2). Surprise : on découvre des émissions X venant d'étoiles naines froides K et M ! Plus étonnant encore, certaines de ces étoiles de catégorie M émettent tellement fort dans le rayonnement X que celui-ci représente un dixième de leur émission en énergie visible alors qu'il ne représente qu'un millionième pour le Soleil. HEAO-2 a également observé en X la matière des nébuleuses post-supernovæ et a effectué une résolution en sources X individuelles stellaires d'une partie des rayonnements X émise par des sources galactiques. Cette résolution a été réalisée notamment pour un certain nombre d'étoiles de la fameuse galaxie M31 Andromède.

D'autres études ont été menées sur des amas de galaxies (dont l'espace intergalactique semble saturé par un gaz émetteur en X et porté à plusieurs millions de degrés), ainsi que sur les quasars et les galaxies actives. L'étude des amas de galaxies en X permet de

comparer la masse totale des amas et la masse totale de leurs composants. Il apparaît en général une différence notable que les astrophysiciens imputent à une grande quantité de *matière noire*. On sait, depuis les travaux de Zwicky effectués dans les années 30, que les mesures de vitesses relatives aux étoiles et aux nuages de gaz et de poussières de chacune des galaxies observées sont beaucoup trop élevées en regard de leur masse visible. Pour ce qui concerne les quasars, que l'on soupçonne d'être à l'origine du fond diffus de rayonnement X, HEAO-2 n'était pas assez sophistiqué pour trancher.

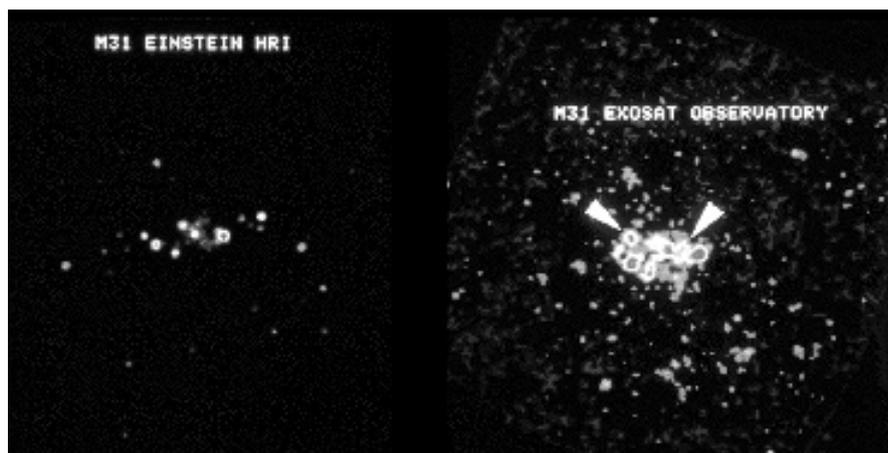
En 1980, le même satellite montra combien il était adapté à l'étude des corps *massifs* et *compacts*, issues finales de la vie des étoiles de grande taille, en détectant des émissions X en provenance de Geminga. Cette source, qui avait été auparavant étudiée en rayonnement gamma par le satellite SAS-2 de la Nasa et le satellite européen COS-B, a été détectée en X par HEAO-2 et en visible par le télescope spatial Hubble, seulement en 1996. Il s'agit d'une étoile à neutrons, la plus proche de notre système solaire dont elle est éloignée de 510 années-lumière, qui a comme caractéristique de ne pas émettre d'ondes radio contrairement à la plupart des pulsars. HEAO-2 cessa de fonctionner en avril 1981 après avoir permis de détecter plus de 10 000 sources stellaires et galactiques de rayonnement X. Les scientifiques américains se sont battus afin que soit lancé un successeur à HEAO-

2 et qui puisse être opérationnel pour les années 1986-1987. Devant le peu d'empressement des décideurs, les spécialistes d'outre-Atlantique se sont impliqués à fond dans des programmes d'astronomie X japonais et dans un programme d'astronomie X d'un niveau encore plus élevé que HEAO-2 : Rosat, satellite de conception allemande. Ce dernier a été développé en coopération avec les Etats-Unis et la Grande-Bretagne. Mais, entre-temps, l'Agence spatiale européenne (Esa) avait lancé son satellite X baptisé Exosat.

Exosat, premier satellite européen de rayons X

Pour ce qui concerne un certain domaine de l'astrophysique des hautes énergies, l'Europe s'était déjà illustrée dans le domaine gamma avec le satellite COS-B (août 1975-avril 1982). Celui-ci fut le premier à révéler le rayonnement gamma des quasars dont on sait aujourd'hui qu'ils sont les noyaux particulièrement actifs de galaxies lointaines recelant un trou noir en leur cœur. Dans le domaine X, l'Europe avait, à la fin des années 70, sans aucun doute un retard sur les Etats-Unis, tout auréolé des succès impressionnants d'HEAO-2. L'expérience des satellites ANS et Ariel 5 n'apporta pratiquement rien à la mise au point du premier satellite X dont l'Europe allait se doter. Lancé le 23 mai 1983, Exosat allait achever sa mission le 9 avril 1986 après avoir effectué plus de deux mille observations de sources X.

Exosat a permis aux Européens non seulement de combler une partie de leur retard en astronomie X sur les Etats-Unis mais aussi d'attirer des équipes scientifiques du monde entier, puisque certaines équipes américaines, privées de successeur immédiat à HEAO-2, ont pris une part active aux recherches de l'Esa. Ce fut notamment le cas en 1986, lorsqu'une équipe américano-européenne (L. Stella et N. White de l'Esa avec W. Priedhorsky de Los Alamos) a découvert, grâce aux données d'Exosat, la source binaire X 4U 1820-30. Ce couple bizarre, composé d'une naine blanche et d'une étoile à neutrons, possède une particularité étonnante : la naine blanche orbite



Exosat a permis aux Européens de combler une partie de leur retard en astronomie X sur les Etats-Unis. A gauche, M31 observé par HEAO-2 et, à droite, par Exosat.

autour de l'étoile à neutrons en *onze minutes*, avec un impressionnant transfert de matière à plusieurs millions de degrés. Fait intéressant et sur lequel nous reviendrons, ce couple, qui dégage une énergie dix mille fois supérieure à celle du Soleil, se situe dans l'amas globulaire NGC 6624. Selon une hypothèse émise à l'époque par le Dr Verbunt, un scientifique impliqué dans Exosat, ce couple d'étoiles aurait été au départ composé d'une étoile à neutrons et d'une géante rouge, cette dernière représentant l'un des stades ultimes d'une étoile de type solaire en phase de dilatation et d'expansion avant son effondrement en naine blanche. Le Dr Verbunt pensait que l'étoile à neutrons, elle-même issue d'un phénomène de collision typique des amas globulaires, avait dû graviter à l'intérieur même de la géante rouge en la dépouillant peu à peu de ses couches externes. Dans ce cas, l'effondrement de la géante rouge en naine blanche n'aurait pas suivi le schéma habituel.

Vers le milieu des années 80, les astrophysiciens avaient relevé une cinquantaine de sources X de ce type mais ce nombre augmenta avec la mise en service du satellite Rosat en 1990. Il faut aussi mentionner que l'on mit à contribution Exosat à élucider un mystère qui intriguait les astrophysiciens depuis les années 70 : certaines étoiles à rayons X émettent à intervalles plus ou moins réguliers des sortes de bouffées pouvant durer plusieurs secondes et dénommées *bursts*. D'autres phénomènes complexes ont été étu-

diés et l'astrophysicien néerlandais Van der Klis, membre de l'équipe Exosat, reçut en janvier 1987 le prix Bruno Rossi décerné par l'American Astronomical Society pour sa découverte étonnante, en 1985, d'oscillations quasi périodiques émises par des sources considérées comme des étoiles à neutrons. L'étoile GX5-1 fut l'un des nombreux objets observés où furent détectées des oscillations. Cette étoile, selon l'Esa, était des centaines de milliers de fois plus chargée en énergie que notre Soleil et, heureusement pour nous, éloignée de quelque 30 000 années-lumière. Ce que Exosat a révélé de particulièrement étonnant à propos de ce type d'étoiles, c'est qu'elles peuvent osciller jusqu'à plusieurs milliers de fois par minute avec des gammes de périodes variables. L'hypothèse émise à l'époque pour expliquer ces oscillations, était que le disque d'accrétion de matière au profit des étoiles à neutrons était *instable*, d'où sa modulation variable en X.

Equipé de deux télescopes imageurs, de huit compteurs proportionnels à gaz pour les énergies moyennes et d'un spectromètre à scintillation gazeuse, Exosat constituait d'un point de vue technologique un instrument de deuxième génération. Avec son arrêt prématuré, le 9 avril 1986, les astrophysiciens n'ont pas disposé, mis à part les programmes japonais, d'un grand télescope X pendant plusieurs années. Rosat, satellite X de conception allemande mais à forte participation américaine et britannique, combla ce vide le 31 mai 1990, après son lancement par

une fusée Delta-2. Ce satellite opérait non seulement dans le domaine des rayons X de basse énergie (0,1 à 2 KeV) mais également sur la bande de l'ultraviolet extrême. Equipé d'un télescope X à incidence rasante de fabrication allemande, et composé de quatre miroirs paraboliques, de détecteurs radio à micro-canaux et de deux compteurs proportionnels à gaz, Rosat possédait aussi une caméra britannique à large champ (WFC) ayant une sensibilité dans la bande X-UV (6 à 60 nm). Cette caméra était elle-même intégrée à un télescope doté de trois miroirs à incidence rasante fournis par le célèbre Rutherford Appleton Laboratory, responsable aussi des filtres X-UV. Le troisième instrument était un spectro-imageur X à haute résolution construit par l'équipe du Dr Stephen Murray du Harvard Smithsonian Astrophysical Observatory. Le projet avait pour maître d'œuvre la société allemande Dornier qui allait être intégrée dans Dasa. L'expérience considérable acquise par les équipes allemandes avec Rosat explique la prépondérance (partagée avec les Italiens) des équipes d'outre-Rhin dans l'actuel programme XMM (X-ray Multi-Mirror mission).

Placé sur une orbite circulaire à 580 km décrite en un peu plus de quatre-vingt-douze minutes, Rosat a fait progresser de manière considérable l'astrophysique des rayons X de basse énergie ainsi que nos connaissances des systèmes *binaires* dans lesquels des étoiles effondrées et compactes de type naines blanches, d'une taille comparable à celle de la Terre, dépouillent littéralement les couches externes de leurs « étoiles-compagnons » en réactivant des phénomènes de nucléosynthèse. Rosat a mis en évidence l'existence de deux objets de ce type, dénommés CAL 83 et CAL 87, dans le Grand Nuage de Magellan, une petite galaxie satellite de la nôtre. Il a aussi observé la fameuse nova V1972 qui explosa en 1992. Le satellite a effectué une véritable surveillance céleste en X et ultraviolet extrême à des fins de cartographie mais ses investigations ont aussi porté sur des sources particulières sélectionnées d'après les renseignements apportés par HEAO-2 et Exosat. Outre les étoiles compactes (naines blanches, étoiles à neutrons et les supposés trous noirs stellaires) et les systèmes binaires en

interaction, Rosat s'est intéressé aux couronnes stellaires, à leurs interactions avec les champs magnétiques et à l'émission X des nuages de gaz des galaxies spirales et elliptiques. La répartition de ce gaz confiné gravitationnellement ainsi que la connaissance de sa nature et de sa densité permettent aux scientifiques de *peser* les galaxies et de connaître, de façon indirecte, la quantité de matière noire qui s'y trouve. Rappelons pour mémoire que les effets de la matière noire avaient déjà été mis en évidence par HEAO-2 pour un certain nombre de galaxies. Un des grands objets d'étude de Rosat a également été le fameux fond diffus de rayonnement X. Le satellite cessa sa carrière, au milieu des années 90, après avoir observé au total 120 000 sources X cosmiques.

Parmi les programmes de satellites X à citer, notons le satellite SAX de l'Agence spatiale italienne qui a été construit sous la maîtrise d'œuvre d'Alenia Spazio. En 1997, ce satellite, dont les détecteurs empiétaient légèrement sur la bande gamma, a réussi à détecter et à localiser en astronomie visible une explosion d'une puissance inouïe jamais observée auparavant et provenant d'un objet situé à plus de 10 milliards d'années-lumière de notre Galaxie. Retenons, parmi les différentes hypothèses retenues pour expliquer cette explosion, celle de l'astrophysicien américain Kip Thorne qui envisage la fusion de deux étoiles à neutrons ou même d'une de celles-ci avec un trou noir stellaire.

XMM, pierre angulaire du programme scientifique de l'Esa

Alors que les scientifiques américains se débattaient pour que soit adopté le projet d'un successeur de troisième génération à HEAO-2, destiné à être opérationnel vers le milieu des années 90, le principe d'un grand satellite X plus performant qu'Exosat était déjà décidé en Europe. C'est pourtant le satellite américain – AXAF (Advanced X-Ray Astrophysics Facility) et baptisé Chandra en l'honneur de Chandrasekhar qui partagea, en 1983, le prix Nobel de Physique avec William Fowler – qui a été mis en orbite en premier, en

juillet 1999. Quant aux Européens, qui avaient fait d'un grand satellite X l'une des pierres angulaires de leur programme Horizon 2000, ils n'ont perdu qu'un minimum de temps après l'arrêt prématuré de leur satellite Exosat. Dès le 12 juin 1989, les décisions étaient prises par le Comité des programmes scientifiques de l'Esa quant aux technologies et aux instruments qui devaient être placés sur le satellite XMM. Etant donné leur expérience acquise dans le développement de Rosat, la maîtrise d'œuvre est revenue aux Allemands de Dornier Satelliten System GmbH (qui allait être intégré dans Dasa). Il en fut de même des Italiens de Media Lario, déjà engagés sur SAX. Trente-cinq compagnies européennes ont bénéficié des contrats XMM, un gros satellite sophistiqué et massif, placé sur une orbite de 7000 km (périgée)-114 000 km (apogée), inclinée à 40°. Ce type d'orbite permet des observations assez longues sur des objets en évolution et, entre autres, l'étude en continu des sources X émettant les fameux sursauts. XMM est un satellite de 10 m de long dont on attend beaucoup sur le plan scientifique et qui bénéficiera aussi des banques de données élaborées sur les sources X par Rosat et SAX.

La mise en œuvre des moyens apparaît à la hauteur des objectifs scientifiques puisque, selon ses concepteurs, XMM représente avec ses trois télescopes la plus grande surface collectrice jamais construite en astronomie X, à savoir 120 m². Ce chiffre peut apparaître presque incroyable mais, ici, la technologie a été poussée aux limites, laissant loin derrière tout ce qui avait été fait auparavant. Les trois télescopes fournisseurs d'images sont en effet le fruit d'une conception révolutionnaire puisque l'intérieur de chacun d'eux est tapissé de 58 miroirs concentriques à incidence rasante, ce qui permet de *minimiser* la perte des photons X qui arrivent vers ces miroirs selon une tangente. La partie purement optique du télescope a été confiée à la firme italienne Media Lario qui a coordonné les efforts de plusieurs centaines d'ingénieurs et de techniciens des sociétés APCO, BCV, Kayser Threde et Daimler Steyr Puch. Les Italiens ont réalisé des prodiges de précision sur le plan technique après que les Allemands de Carl Zeiss aient livré les moules

(dénommés mandrins) des miroirs en cinquante-huit dimensions différentes, tous ayant été polis selon la configuration paraboloidale-hyperboloidale de type Wolter requise. Ensuite, les spécialistes de Media Lario ont avec minutie déposé par-dessus un substrat de nickel par bain électrochimique puis une couche d'or. Il a fallu ensuite effectuer l'opération de démoulage (délicate puisque chaque miroir ne mesure qu'environ 1 mm d'épaisseur) et d'assemblage de ces miroirs sur des structures à cercles concentriques fabriquées par la société suisse APCO. C'est en Allemagne qu'a été réalisée l'opération d'intégration dans les télescopes (équipés de caméras pour le pointage). De plus, deux des télescopes sont équipés de spectromètres à réseau de diffraction pour l'analyse détaillée de l'énergie des rayons X (Reflection Gazing Spectrometer). Parmi les autres merveilles technologiques de XMM, desservies en images par les télescopes, un rôle très important est dévolu aux caméras EPIC (European Photon Imaging Camera). On sait que parmi les objectifs scientifiques d'XMM, figurent la détection et l'observation des étoiles à neutrons et des pulsars (étoiles à neutrons en rotation rapide émettant en X et parfois en radio). Comme le déclare Giovanni Bignami, astrophysicien à l'origine de la découverte de la fameuse source Geminga : « *Alors que nous avons répertorié 700 pulsars, il existe probablement des étoiles à neutrons qui, comme Geminga, n'émettent pas dans le domaine radio. Des millions d'entre elles pourraient faire partie des sources de rayonnement X déjà connues mais non identifiées à ce jour. C'est avec impatience que j'attends de pouvoir commencer à chercher de nouvelles Geminga avec EPIC, l'ensemble de caméras dans le rayonnement X qui équipent XMM.* »

Comme le veut aussi la plus élémentaire logique, XMM sera équipé d'un télescope (Optical Monitor) travaillant à la fois dans le visible, l'UV et l'infrarouge afin de pouvoir observer sur d'autres longueurs d'onde les événements détectés en X. Ainsi, lorsqu'une découverte sera confirmée en visible, il sera possible de déclencher la chaîne d'informations pour effectuer des observations avec le télescope spatial Hubble ou les grands observatoires terrestres.



Le satellite XMM, véritable bijou technologique, peut donner à l'Europe une position dominante en matière d'astronomie X.

Que peut-on attendre de XMM (et aussi de son concurrent américain AXAF...)? Beaucoup de choses car, selon l'Esa, ses capacités techniques font « *qu'en une heure d'observation il pourra faire une moisson de rayons X plus riche que toute mission précédente. Ses immenses capacités permettront aux astronomes d'analyser très rapidement de nombreuses sources de rayons X de forte intensité ainsi que d'en découvrir de plus faibles, en grand nombre également, ce qui était auparavant hors de leur portée* ». Au programme, bien sûr, on trouve les étoiles mortes en voie d'extinction, les nébuleuses post-supernovæ, les naines blanches, les étoiles à neutrons, tous les systèmes binaires et les objets compacts sur lesquels seront aussi effectuées des mesures d'intensités relatives et de signature d'éléments chimiques identifiables. Tous ces objets sont certes des objectifs qui avaient été traités lors de missions précédentes mais, avec XMM, la différence est de taille du fait de son haut niveau de résolution et de sensibilité. En outre, ce satellite fonctionnera au moins sept à huit ans, ce qui permettra de mieux connaître l'évolution temporelle des sources émettrices en X.

Dans d'autres domaines des possi-

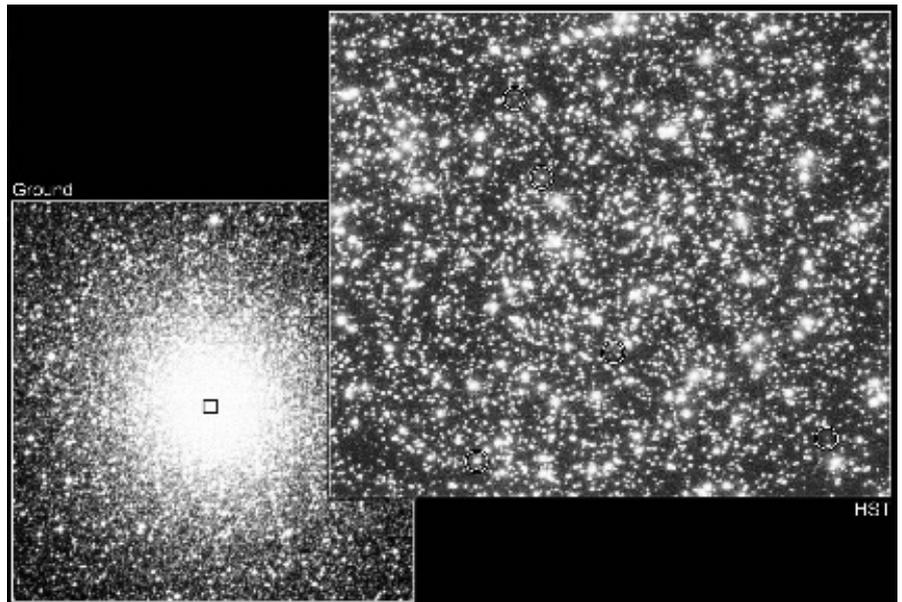
bilités immenses s'offrent au satellite européen, comme, par exemple, le repérage des sursauts gamma, associant télescopes X et système d'observation optique, étant donné que ce rayonnement gamma produit un bruit de fond parasite interférant avec les X. Les renseignements obtenus par XMM devraient servir au futur satellite européen Integral opérant sur les ondes gamma et dont les objectifs principaux seront, une fois de plus, les champs gravitationnels des effondrements stellaires et les trous noirs, mais encore davantage les sursauts gamma qui portent la marque des phénomènes énergétiques les plus violents de l'Univers.

Parmi les domaines d'investigation d'XMM, n'oublions pas non plus les amas globulaires émettant en X, les quasars, l'irritant problème de rayonnement de fond diffus X ainsi que certaines étoiles binaires dénommées « W. Ursæ Majoris » et caractérisées par des variations minimales de la période de l'étoile en orbite. Les astrophysiciens Maceroni et Van t'Veer pensent qu'il s'agit de variations de transferts de masse qui perturbent le moment angulaire de l'étoile. Parmi les types d'étoiles observées, mentionnons aussi les étoiles symbiotiques qui sont des

étoiles binaires, où l'une des deux composantes est une géante froide, marquées par des vents stellaires importants et des jets très variables qui sont parfaitement détectables en UV et en X.

Comme nous l'avons déjà signalé, l'une des grandes affaires dans laquelle est impliqué XMM concerne les amas globulaires. Ceux-ci sont des structures assez âgées, très denses en étoiles et qui sont très rapprochées les unes des autres, rassemblées dans des volumes comprenant jusqu'à 100 000 unités. Une des grandes surprises ayant soumis à épreuve la sagacité des astrophysiciens, c'est lorsqu'on a découvert des émissions X intenses provenant de ces amas que l'on rencontre à la fois vers le cœur de notre Galaxie et dans le halo galactique. Les sources X que l'on rencontre dans les amas se manifestent souvent par des émissions brèves et intenses, comme celles détectées dès 1975 par les Américains Clark et Markert dans les amas NGC 1851 et NGC 6624. C'est un sujet intrigant et XMM pourrait peut-être nous permettre de trancher entre deux des modèles proposés : émission venant soit d'étoiles à neutrons réactivées à la suite de phénomènes de capture et évoluant vers le stade de *pulsars millisecondes*, soit d'un *trou noir central* situé au cœur de l'amas, thèse qui a eu un certain moment les faveurs de l'astrophysicien français James Lequeux.

Ces phénomènes surprenants ont dépassé le stade de simple élaboration théorique lorsque, en 1991, les astrophysiciens Meylan, Paresse et Shara ont découvert, en travaillant avec le télescope Hubble, des « étoiles à la traîne » (dites encore Blue Stragglers) dans l'amas 47 Tucanæ, nées de la coalescence de deux étoiles avec réamorçage des réactions de nucléosynthèse. Etant donné la situation de densité extrême qui prévaut dans ces amas, on peut s'attendre à toutes les éventualités, et cela en raison de mécanismes de collision et de capture impliquant de vieilles étoiles à neutrons éteintes, soit une vieille étoile à neutrons et une géante rouge en phase de dilatation, ou bien encore des naines blanches, genre d'étoiles dont la présence est courante dans les amas. On ne peut donc rejeter les hypothèses les plus étonnantes, comme celle émise par les astrophysiciens Arons, Bahcall et Ostriker qui pensent, que l'effet de



Etoiles à la traîne (dans un cercle) au sein de l'amas globulaire 47 Tucanæ. Une des grandes découvertes, relatives aux amas globulaires, concerne l'existence de phénomènes de collision et de capture entre étoiles.

densité d'étoiles, au cœur des amas, est tel qu'il favorise la formation d'étoiles géantes ayant la masse critique suffisante pour évoluer vers le stade de trou noir stellaire. Certaines sources X observées par HEAO-2 dans les amas NGC 1851, NGC 6440 et NGC 6624, émettant par violentes bouffées discontinues, sont peut-être de petits trous noirs stellaires.

A un autre niveau, plus macroscopique, on trouve le problème des émissions X des amas de galaxies. Le problème de la distribution des masses et de la matière au sein de ces amas a bien été étudié par Rosat et le sera davantage par XMM. Parmi les amas galactiques visés, notons le célèbre amas de Coma qui contribua à la célébrité de Zwicky pour ses conclusions concernant la présence de matière noire, ainsi que les amas ABCG85 et ABC2199.

A plus basse échelle, le rayonnement X (et le rayonnement gamma) sont parfois les compléments indispensables pour confirmer ce qui est parfois détecté en optique, c'est-à-dire le disque d'accrétion des *trous noirs géants* situés au cœur des galaxies, lesquels absorbent gaz, poussières et étoiles des régions centrales. XMM braquera ses détecteurs vers un certain nombre de galaxies dont certaines ont été étudiées par Hubble. Parmi les candidats, notons la galaxie géante M87 (qui possède

un noyau galactique très actif avec un trou noir supermassif), NGC 4261 (située à 45 millions d'années-lumière), la grande galaxie voisine Andromède (qui abriterait un objet central de 70 millions de masses solaires), la galaxie du Sombrero, la galaxie de Seyfert NGC 4151, NGC 4258 qui abriterait un trou noir de 40 millions de masses solaires et la grande galaxie NGC 6240 (située à 300 millions d'années-lumière). A propos de cette dernière, les travaux des chercheurs américains Bland, Hawthorn, Tully et Wilson ont mis en évidence d'importantes concentrations de gaz ionisé et des émissions violentes de rayonnement X jamais observées auparavant.

Dans tous ces domaines, l'instrument européen devra compter avec la concurrence du satellite américain AXAF Chandra qui cible de petites sources fines, et dont la vision des détails très fins sera meilleure que XMM et celle du satellite japonais Astro-E qui devrait être lancé en mars 2000. Toutefois, selon les responsables de l'Esa, « ses télescopes conçus selon une méthode d'avant-garde donneront à XMM un appétit gargantuesque pour le rayonnement X et ceci explique qu'il surpassera globalement AXAF ». Un petit regret toutefois : la très modeste participation française à ce grand programme de satellite européen.

n