

XMM-Newton : un observatoire européen pour l'astronomie X

P. Ferrando

Service d'Astrophysique, DSM/DAPNIA, bâtiment 709, Orme des Merisiers, CEA/Saclay,
91191 Gif-sur-Yvette cedex, France

Résumé : Placé en orbite le 10 décembre 1999, le satellite européen XMM-Newton est le plus imposant des télescopes d'astronomie X jamais construits, par la taille de ses miroirs et la complémentarité des détecteurs qui leur sont associés. Cet observatoire au service de la communauté permet de faire simultanément : i) des études de spectro-imagerie sur tout le champ de vue (30 arcmin) et toute la gamme d'énergie (0.1-12 keV) avec $\Delta E/E \sim 3-6\%$ et une résolution spatiale $\Delta\theta$ de ~ 5 arcsec FWHM, et ii) de la spectroscopie dispersive à très haute résolution entre 0.3 et 2.5 keV sur les objets à faible extension angulaire. Un télescope optique-UV observant simultanément avec les télescopes X vient compléter l'observatoire. Je rappelle d'abord ici les caractéristiques principales de ce télescope, en particulier de ses instruments d'imagerie. Je donne ensuite un aperçu des opérations en vol et des premiers résultats.

1. Contexte et motivations astrophysiques

L'astronomie X est une science jeune née avec l'avènement de l'ère spatiale, l'atmosphère terrestre étant complètement opaque à ces longueurs d'onde. Depuis la première fusée sonde en 1962 et le premier satellite lancé en 1970, les astrophysiciens ont conçu des instruments de plus en plus performants pour observer le ciel dans le domaine qui nous intéresse ici, de ~ 0.1 à ~ 10 keV. C'est une gamme d'énergie dans laquelle on peut encore focaliser les rayons par des miroirs utilisés en incidence rasante; au delà, dans les X durs et les gamma, il faut recourir à d'autres techniques instrumentales, non concentratrices de lumière, pour arriver à faire de l'imagerie du ciel (masque codé, télescope à double Compton).

Le satellite XMM-Newton est le dernier en date et le plus grand de ces instruments. Imaginé à la fin des années 70, il a été engagé comme programme de « pierre angulaire » par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) en 1984. Dans ce type de mission, l'ESA est responsable de la plateforme du satellite, du lancement et des opérations, tandis que les instruments sont à la charge de laboratoires sélectionnés sur appel d'offre. Pour XMM-Newton cette sélection a eu lieu en 1989, pour un lancement en 1999.

Dans la gamme d'énergie couverte par XMM-Newton, 0.1-12 keV, les trois processus principaux d'émission pour le continu sont le rayonnement de freinage dans les plasmas entre 1 et 100 millions de degrés, le rayonnement synchrotron des électrons relativistes, et enfin le rayonnement de corps noir à la surface d'objets très chauds comme les étoiles à neutrons. A ce continu s'ajoutent de nombreuses raies d'émission, diagnostics très puissants sur les conditions physiques et la composition chimique du milieu émetteur. Le type d'objet observable en astronomie X va ainsi des couronnes stellaires aux amas de galaxies, en passant par les vestiges de supernovae, et par les systèmes contenant un objet très massif qui accrète la matière environnante (étoiles binaires X, galaxies à noyau actif). A la richesse des diagnostics des spectres s'ajoutent les informations que l'on peut tirer des études de morphologie des objets et de la variation temporelle des flux (voir e.g. [1] pour une introduction globale à l'astronomie X). Certains objets comme le gaz intra-amas dans les amas de galaxies n'émettent qu'en X et ne sont donc directement observables qu'à travers ce rayonnement; pour de nombreux autres, les observations en X sont une composante essentielle des études multi-longueurs d'onde, de plus en plus courantes en astronomie, qui permettent d'élucider leur nature et les mécanismes physiques en jeu (voir e.g. [2]).

2. Le satellite XMM-Newton

Afin d'obtenir la surface de détection souhaitée, XMM-Newton est constitué de trois télescopes X coalignés (figure 1). Les modules miroir sont portés par une plateforme, tandis que les détecteurs sont portés par une seconde plateforme reliée à la première par un long tube en fibre de carbone. Chaque plan focal est équipé d'une mosaïque de CCDs permettant de faire de la spectro-imagerie avec une résolution en énergie moyenne (~ 60 eV FWHM à 1 keV). L'ensemble constitue l'instrument EPIC (European Photon Imaging Camera)

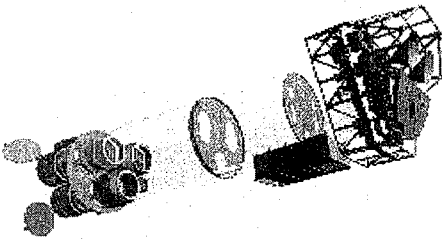


Figure 1 : Structure d'XMM-Newton

[3, 4]. Sur deux des télescopes sont montés des réseaux en réflexion, interceptant la moitié du flux total (l'autre moitié va sur EPIC) et permettant des mesures très fines de spectroscopie dispersive entre 0.3 et 2.5 keV (instrument RGS, constitué lui aussi de CCDs [5]). Un télescope optique-UV complète l'ensemble pour les études corrélées X-UV [6]. Enfin, un moniteur de radiation assure la mesure permanente du flux de particules autour du satellite; en cas de flux trop élevé, les roues à filtres d'EPIC sont fermées pour protéger les CCDs. Le satellite pèse environ 4 tonnes, pour 10 m de long et 4 m de diamètre hors panneaux solaires. Tous les instruments peuvent observer le ciel à la fois.

2.1 Les télescopes

Développés et construits sous responsabilité de l'ESA, ils ont été conçus pour avoir une grande surface de réflexion jusqu'à plus de 7 keV, nécessaire pour la mesure des raies du fer particulièrement importantes en astrophysique, tout en gardant une bonne qualité optique et un poids acceptable. La solution adoptée est celle de miroirs à incidence rasante de type Wolter I (paraboloïde-hyperboloïde).

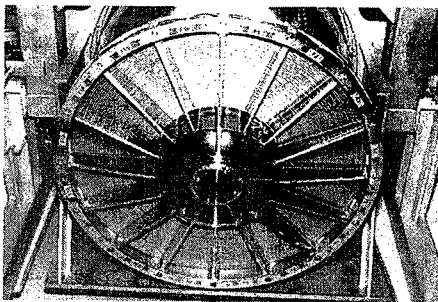


Figure 2 : un module miroir, vu du côté araignée.

La contrainte haute énergie a conduit à un design multi-télescope, tandis qu'un montage compact de 58 coquilles pour chaque miroir donne la surface voulue (Fig. 2). Les coquilles, en nickel recouvert d'or, ont été fabriquées par technique de réplication sur des mandrins en nickel Kanigen. Elles sont tenues par une araignée d'un seul côté des coquilles. La distance focale est de 7.5 m. Chaque module pèse ~ 400 kg, a un diamètre de 70 cm et une longueur de 60 cm. Il est complété à l'avant par un baffle pour réduire les photons X et optique parasites, et à l'arrière par un déflecteur magnétique d'électrons pour minimiser l'irradiation des détecteurs du plan focal.

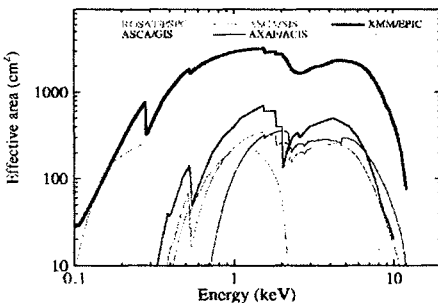


Figure 3 : Surface efficace totale d'XMM/EPIC comparée à celles d'autres missions.

Les caractéristiques des modules, mesurées en UV au centre spatial de Liège et en rayons X dans la facilité de Panter à Munich [7], sont restées les mêmes après le lancement [8]. La surface par télescope est de ~ 1500 cm² jusqu'à 2.4 keV, ~ 800 et 300 cm² à 7 et 10 keV. La Fig. 3 compare la surface efficace, tenant compte de l'efficacité quantique des détecteurs d'imagerie, à celles d'autres instruments ayant volé et à celle de la mission américaine en cours, Chandra (ex-AXAF). XMM-Newton est inégalé, avec 5 fois plus de surface que Chandra à 1 keV, et plus de 50 fois à 10 keV. La réponse aux sources ponctuelles est quant à elle de ~ 5 arcsec FWHM dans l'axe, quasiment indépendante de l'énergie. Elle varie peu avec l'inclinaison jusqu'à ~ 10 arcmin hors axe. Elle reste néanmoins nettement inférieure à celle de Chandra (0.5 arcsec), point fort de cette mission.

2.2 L'instrument de spectro-imagerie EPIC

Sous responsabilité de l'Université de Leicester, il a été réalisé par un consortium de dix laboratoires, anglais, italiens, allemands et français (Service d'Astrophysique du CEA à Saclay, Institut d'Astrophysique Spatiale à Orsay, et Centre d'Etude Spatiale du Rayonnement à Toulouse). Deux des trois caméras sont constituées de CCDs de type MOS, l'autre de type PN. Les détecteurs sont refroidis à des températures de ~ - 100 °C par un système passif de radiateurs exposés au noir sidéral (Fig. 1). Dans chacune des caméras sont mesurés la position, l'énergie et le temps d'arrivée de chaque photon X détecté. Les flux des sources auxquelles s'intéresse XMM-Newton peuvent être très faibles, quelques photons par heure... Les temps typiques d'observations en X vont ainsi de 10 à 100 kilosecondes par source visée.

Les caméras MOS [4] contiennent 7 CCDs de 600 × 600 pixels de 40 μm de côté, 1 × 1 arcsec² sur le ciel, permettant de bien échantillonner la tache focale, et positionnés de façon à couvrir l'ensemble du plan focal ($\phi = 62$ mm, Fig. 4). Fabriqués à partir d'un substrat de haute résistivité pour garantir une bonne

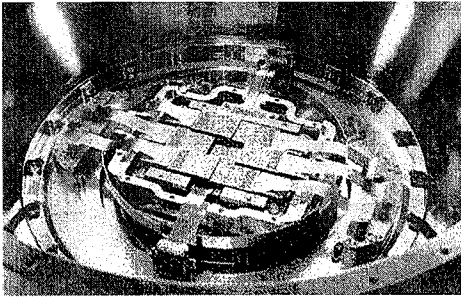


Fig. 4 : le plan focal EPIC/MOS avec ses 7 CCDs

épaisseur de déplétion et donc une bonne efficacité à haute énergie, ils sont éclairés en face avant. L'efficacité à basse énergie est obtenue par une structure d'électrodes « ouvertes » et amincies. En plus de la zone image, ces CCDs possèdent une zone mémoire dans laquelle l'image du ciel est très rapidement transférée (~ 10 ms), avant d'être lue et codée via un registre de sortie à 2 nodes. Le temps de lecture d'une image est de ~ 2.4 s dans le mode principal utilisé (image totalement codée, sur un node).

Avec 16 kbits/sec de télémesure pour chaque caméra, le satellite ne permet pas de transmettre au sol les dizaines de milliers d'images CCD accumulées pour chaque observation. De plus, vu le flux de rayons X, ces images contiennent essentiellement du bruit de lecture et les traces

laissées par les protons cosmiques de haute énergie. Aussi ces images sont-elles analysées à bord pour y rechercher et y caractériser les impacts dus aux photons X tout en éliminant ceux des particules. C'est le rôle dévolu à l'électronique temps réel conçue au CEA/SAP, et pour lequel un ASIC a été développé. Ne sont transmises ainsi au sol que les informations relatives aux événements de type rayon X [9, 10].

La caméra PN est d'une technologie moins classique avec 12 CCDs sur un seul substrat de silicium [11, 12]. Par rapport aux MOS, la caméra PN est plus efficace à haute énergie et plus résistante aux radiations. Par contre elle possède des pixels plus larges, 4×4 arcsec² sur le ciel, et nécessite des corrections de signal (CTI) plus importantes. Sur chacune des caméras est montée une roue à filtres à 6 positions, dont une fermée pour la protection des CCDs contre les radiations. Les autres portent des filtres de différentes épaisseurs pour bloquer la partie optique-UV des sources célestes, qui contaminent les observations en X. Enfin, chaque caméra possède une source de calibration interne (⁵⁵Fe).

L'ensemble des caméras EPIC a été étalonné au sol sur les faisceaux synchrotron SACO et DCI du LURE, une première pour les instruments d'astronomie X toujours étalonnés sur des tubes X auparavant. Il a fallu pour cela équiper des lignes spéciales et concevoir un système qui permettait d'éclairer de façon homogène et connue l'ensemble du large plan focal par le fin faisceau synchrotron [13, 14, 15]. On a pu ainsi mesurer parfaitement la réponse spectrale des détecteurs à des photons monoénergétiques entre 0.15 et 15 keV [15] ; on a pu aussi mesurer l'efficacité quantique des détecteurs, à quelques % à haute énergie, et à 10-20 % seulement en dessous du keV où les fluctuations temporelles et spatiales du faisceau SACO ont rendu l'analyse particulièrement difficile [16].

3. Opérations

Lancé par le premier vol commercial d'Ariane 5, XMM-Newton a été placé sur une orbite très elliptique (7000-114,000 km) inclinée à 40 degrés, de périodicité 48 h. Il est en contact avec la terre de façon quasi-permanente via deux antennes, à Kourou (Guyane) et à Perth (Australie). Le centre de commande du satellite est à Darmstadt (Allemagne), le centre de traitement des données brutes et de programmation des observations est à Vilspa (Espagne). Du côté haut cette orbite permet des observations ininterrompues de plus de 18 heures [17]. Du côté bas elle traverse les ceintures de radiations terrestres, dangereuses pour les instruments et génératrices d'un bruit de fond très important ; les caméras d'EPIC sont alors fermées.

Les trois premiers mois ont été consacrés à la vérification fonctionnelle du satellite et des instruments, et à l'optimisation des paramètres instrumentaux et des procédures d'observation. Les quatre mois suivants ont été occupés par la phase dite de « PV-Cal », i.e. étalonnage et vérification des performances sur des sources célestes connues. Si l'on du affiner certaines données peu ou mal mesurées au sol, aucune déviation importante n'a été détectée par rapport aux valeurs pré-lancement. Par ailleurs, un effort particulier est fait pour suivre la dégradation des CCDs sous le flux des rayons cosmiques. Grâce aux mesures de protection prises dans les ceintures de radiation et pendant les éruptions solaires, la dégradation de CTI reste très faible sur les MOS et non mesurable sur les PN [18].

Depuis début juillet 2000, XMM-Newton est dans son premier cycle de fonctionnement de routine, pour une durée d'environ 18 mois. Les observations effectuées sont celles de « temps garanti » et de « temps ouvert ». Le premier correspond au retour scientifique accordé aux laboratoires ayant construit cet instrument qui appartient dorénavant à l'ESA ; il ne se répètera dans les cycles suivants. Le second est composé de propositions faites par l'ensemble de la communauté en réponse à un appel d'offres à observation lancé par l'ESA, et sélectionnées par un comité d'attribution de temps de télescope. Ce cycle sera suivi de cycles récurrents, avec des observations en temps ouvert seulement, sur toute la durée de vie de l'observatoire que l'on espère être de dix ans. Enfin, toutes les données sont rendues publiques sur le web un an après distribution à leur propriétaire initial.

4. Premiers résultats

Les premiers résultats scientifiques, basés sur les observations faites dans la phase de « PV-Cal », sont publiés dans un numéro spécial d'Astronomy and Astrophysics [17]. Ses 56 articles traitant de problèmes astrophysiques très variés démontrent qu'XMM-Newton tient effectivement les objectifs fixés. Je n'ai la place ici que de mentionner trois exemples importants tirés des études faites au CEA/Sap.



Figure 5 : le pointé de l'étude du fond diffus. Les images des 3 caméras sont additionnées.

Tout d'abord XMM-Newton a permis de progresser énormément sur la question du fond diffus X, rayonnement dur observé jusqu'à quelques dizaines de keV et qui semble baigner l'ensemble du ciel pour les instruments à résolution spatiale médiocre. Les capacités d'XMM-Newton au delà de 5 keV ont été cruciales ici en permettant de montrer qu'au moins 60 % du flux est dû à l'addition de multiples sources ponctuelles [19]. L'étude de leur spectre a permis de déterminer que les sources découvertes sont probablement des galaxies à noyau actif dont le trou noir central nous est caché en dessous du keV par un tore de matière. Dans les sources galactiques, XMM-Newton a permis de faire des cartes détaillées de la supernova de Tycho, montrant que les couches externes de la supernova ont été mélangées lors de l'explosion, et identifiant les points où se produit probablement de l'accélération de rayons cosmiques [20]. Dans le domaine de l'histoire de la formation des amas de galaxie, un des grands problèmes cosmologiques, on a pu dresser une carte en température précise de l'amas de Coma, véritable traceur de son état dynamique, et démontrant ainsi que si son cœur apparaît relaxé ses bords accrètent encore de la matière, en particulier le long d'un filament cosmique [21, 22].

Ces très courts exemples démontrent la puissance de l'instrument spectro-imageur d'XMM-Newton. Les résultats tirés du spectromètre à haute résolution, non imageur, sont aussi impressionnants dans les diagnostics plasmas qu'il peut donner. Avec ces instruments les astrophysiciens ont de quoi résoudre ou faire progresser de nombreuses questions d'astrophysique. Mais XMM-Newton reste encore limité dans ses capacités à voir des objets très lointains comme les premiers amas créés. Aussi, d'autres missions sont-elles en préparation, XEUS à l'ESA [23] ou Constellation X à la NASA. Elles allieront des miroirs 10 à 100 fois plus grands que ceux d'XMM-Newton à des détecteurs focaux de nouvelle génération, à la fois imageurs et à très haute résolution spectrale, tels les matrices de bolomètres X développées de façon active aujourd'hui.

Références

1. P.A. Charles, et F.D. Seward, *Exploring the X-ray Universe*, Cambridge University Press, 1995.
2. I.F. Mirabel, L.F. Rodriguez, *Nature* **392**, 673 (1998)
3. G. Villa, A.F. Abbey, M. Arnaud, *et al.*, *Proc. SPIE* **2808**, 402 (1996)
4. M.J.L. Turner, A.F. Abbey, M. Arnaud, *et al.*, *Astron. Astrophys.* **365**, L27 (2001)
5. J.W. den Herder, A.C. Brinkman, S.M. Kahn, *et al.*, *Astron. Astrophys.* **365**, L7 (2001)
6. K.O. Mason, A. Breeveld, R. Much, *et al.*, *Astron. Astrophys.* **365**, L36 (2001)
7. P. Gondoin, B.R. Aschenbach, M.W. Beijersbergen, *et al.*, *Proc. SPIE* **3444**, 290 (1998)
8. P. Gondoin, B.R. Aschenbach, C. Erd, *et al.*, *Proc. SPIE* **4140**, 1 (2000)
9. P. Ferrando, M. Arnaud, A. Bouère, *et al.*, *Astron. Nachr.* **320**, 379 (1999)
10. C. Pigot, J.L. Sauvageot, P. Ferrando, E. Belsole, *Proc. SPIE* **4140**, 500 (2000)
11. L. Strüder, P. Holl, G. Lutz, Kemmer J. : *NIM A* **253**, 386
12. L. Strüder, U. Briel, K. Dennerl, *et al.*, *Astron. Astrophys.* **365**, L18 (2001)
13. M. Trifoglio, F. Gianotti, J.B. Stephen, *et al.*, *Proc. SPIE* **3445**, 558 (1998)
14. P. Dhez, E. Jourdain, O. Hainaut, *et al.*, *Proc. SPIE* **3114**, 134 (1997)
15. C. Pigot, E. Belsole, P. Bennie, *et al.*, *Proc. SPIE* **3765**, 558 (1999)
16. P. Marty, C. Pigot, E. Belsole, *et al.*, *Proc. SPIE* **4138**, 57 (2000)
17. F. Jansen, D. Lumb, B. Altieri, *et al.*, *Astron. Astrophys.* **365**, L1 (2001)
18. D. Lumb, P. Gondoin, M.J.L. Turner, *et al.*, *Proc. SPIE* **4140**, 22 (2000)
19. G. Hasinger, B. Altieri, M. Arnaud, *et al.*, *Astron. Astrophys.* **365**, L45 (2001)
20. A. Decourchelle, J.L. Sauvageot, M. Audard, *et al.*, *Astron. Astrophys.* **365**, L218 (2001)
21. M. Arnaud, N. Aghanim, R. Gastaud, *et al.*, *Astron. Astrophys.* **365**, L67 (2001)
22. D. Neumann, M. Arnaud, R. Gastaud, *et al.*, *Astron. Astrophys.* **365**, L74 (2001)
23. M. Bavdaz, A. A.J. Peacock, A.N. Parmar, *et al.*, *Proc. SPIE* **4012**, 306 (2000)