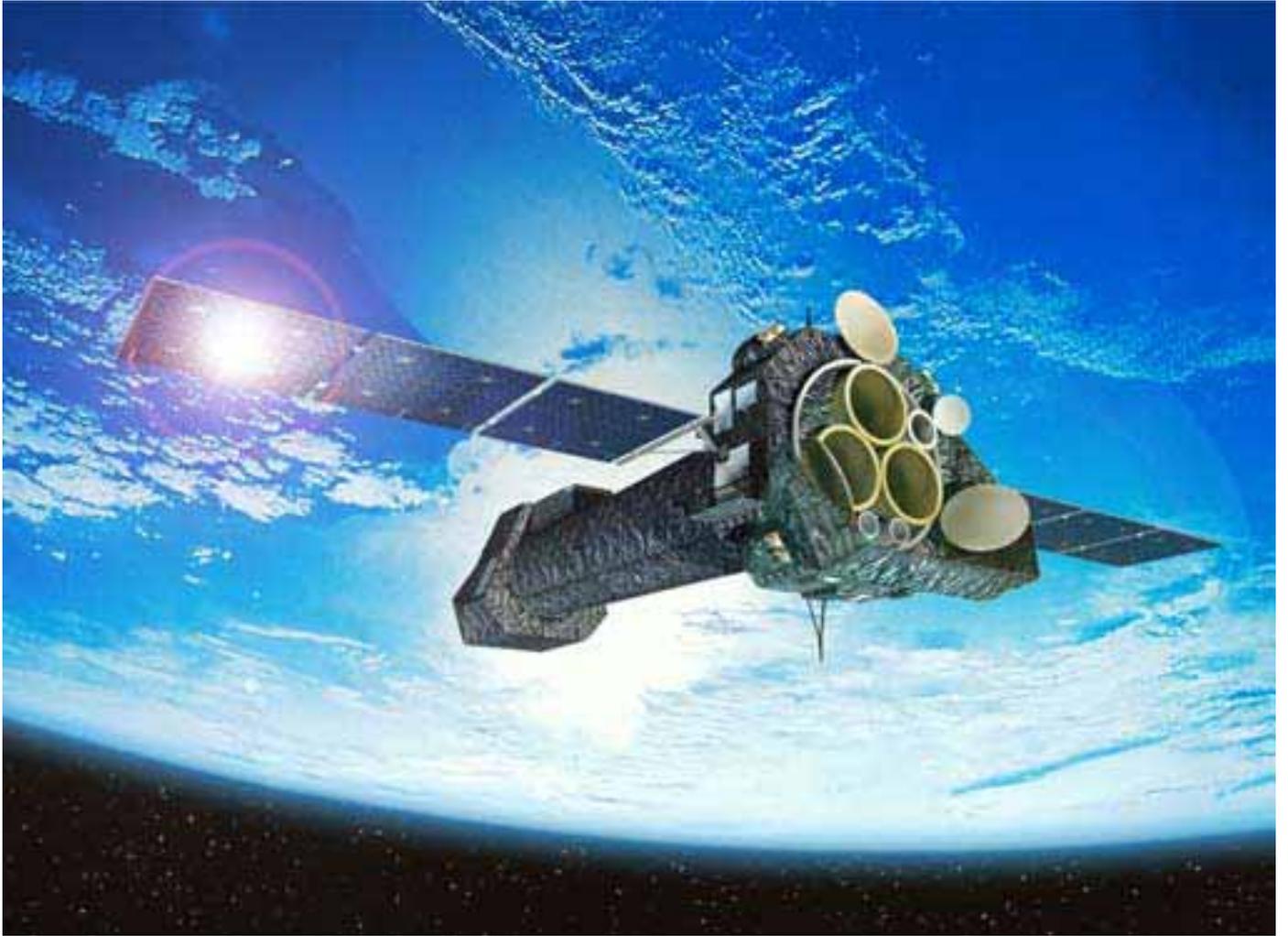


# Le ciel selon XMM-Newton



*Gregor Rauw & Yaël Nazé*

*Groupe d'Astrophysique des Hautes Energies (Université de Liège)*



# Le ciel selon XMM-Newton

*Gregor Rauw & Yaël Nazé*

*Groupe d'Astrophysique des Hautes Energies (Université de Liège)*

Il y a 110 ans, un obscur physicien allemand nommé Wilhelm Conrad Röntgen découvrait un nouveau type de lumière qu'il baptisa « rayons X ». Il ne fallut que quelques semaines pour trouver des applications médicales à ces mystérieux rayons. Par contre, l'étude du rayonnement X produit par les sources cosmiques n'a commencé que bien plus tard, dans les années 1960.

Dans l'Univers, les rayons X sont produits soit par des gaz très chauds (quelques millions de degrés, comme dans la couronne solaire), soit par des milieux où existent des particules se déplaçant à des vitesses proches de celles de la lumière (comme au voisinage du pulsar du Crabe), soit encore par un mécanisme d'échange de charge (comme pour l'interaction du vent solaire avec le gaz éjecté par les comètes). Jusque dans les années 70, l'étude des sources de rayons X cosmiques était limitée à quelques objets exotiques, mais la situation changea par la suite avec l'arrivée de nouvelles technologies. Aujourd'hui, ce sont de véritables observatoires qui sondent le ciel X. Parmi cette armada céleste, l'europpéen XMM-Newton (voir couverture 1) se distingue particulièrement. Lancé en décembre 1999, ce satellite accumule les résultats, tant et si bien que l'Agence Spatiale Européenne (ESA) vient de prolonger sa mission jusqu'en 2010.

Petit bilan de six années de succès.

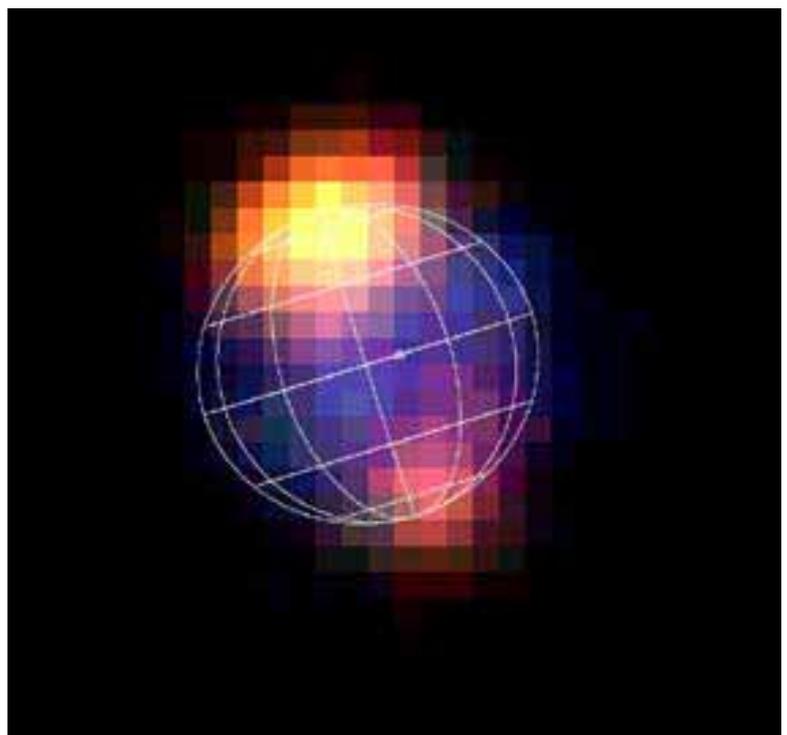
## *Nos voisins, version X*

La source de rayons X la plus brillante dans notre Système solaire est son seigneur, le Soleil, ou plus exactement la couronne solaire. Cette partie externe de l'atmosphère solaire est chauffée par des processus magnétiques jusqu'à plusieurs millions de

degrés, ce qui lui permet d'émettre du rayonnement de haute énergie. Toutefois, il faut préciser que le Soleil est un milliard de fois plus lumineux dans le domaine visible que dans celui des rayons X !

En plus de l'astre du jour, quatre planètes du système solaire (Vénus, Mars, Jupiter et Saturne) ont été observées avec XMM-Newton et son collègue américain Chandra. L'exemple le plus spectaculaire est celui de Jupiter. Les observations montrent une émission X intense concentrée près des pôles magnétiques de la planète géante, là où se produisent les aurores (Fig. 1). Cette émission est liée aux éjections de la lune volcanique Io. La matière éjectée, principalement de l'oxygène et du soufre, se charge petit à petit car les électrons de ses atomes sont véritablement arrachés par l'énorme champ électrique de la planète (plusieurs mil-

*Fig. 1 : L'émission X de Jupiter se concentre près des pôles de la planète. (© ESA)*



lions de Volts à comparer aux 220 Volts de notre courant alternatif!). Ces particules chargées sont ensuite acheminées vers les pôles magnétiques joviens. Elles heurtent l'atmosphère, capturent les électrons des molécules présentes et produisent alors des rayons X par le mécanisme d'échange de charges. En revanche, pour Vénus, Mars et Saturne, l'émission X provient essentiellement du mécanisme de fluorescence. Les atmosphères de ces planètes sont en effet exposées au rayonnement X du Soleil et, quand ces rayons X rencontrent des atomes de l'atmosphère, ils sont absorbés puis ré-émis avec une énergie bien spécifique, caractéristique de l'atome impliqué dans l'interaction.

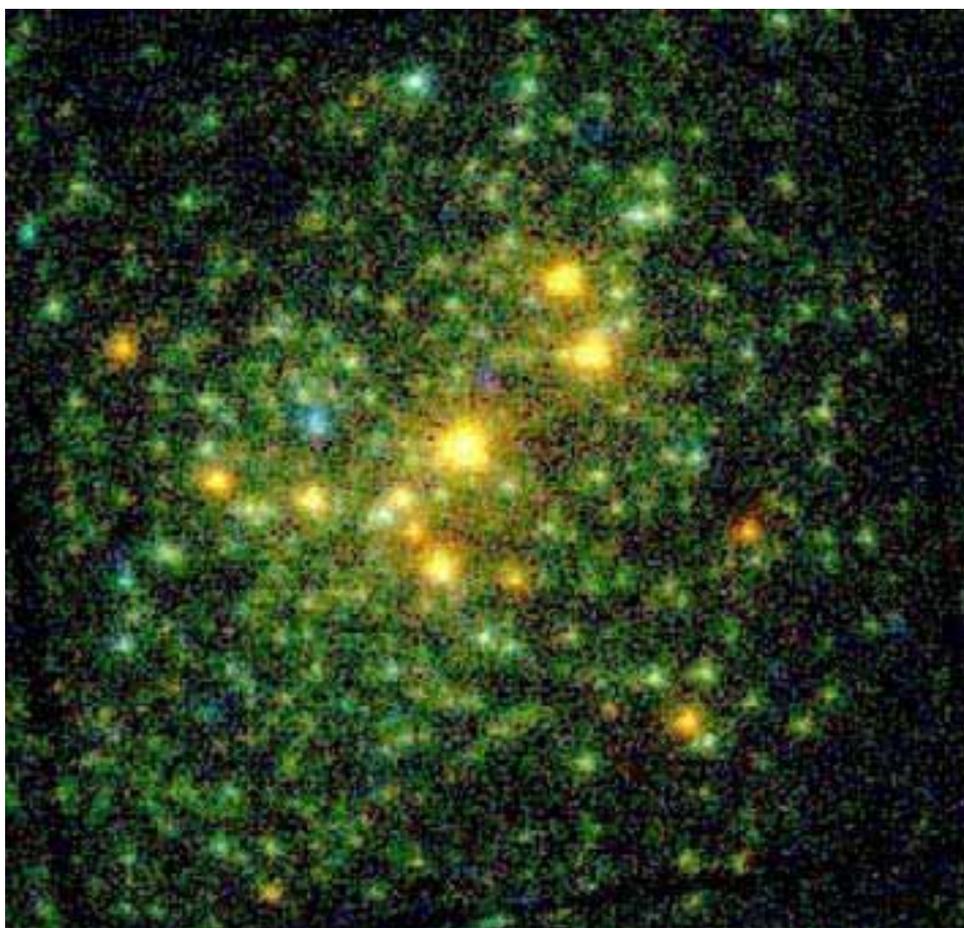
### ***L'émission X des étoiles***

L'émission X du Soleil est liée au champ magnétique solaire. La force de ce dernier varie avec le cycle bien connu de 11 ans qui module le nombre de taches solaires... et par voie de conséquence la quantité de rayons X émis. Alors que les modèles théoriques suggéraient qu'une situation similaire devait exister pour les étoiles semblables au Soleil, une véritable preuve faisait défaut... jusqu'à ce que XMM-Newton observe une étoile baptisée HD81809. Le suivi régulier de son émission X a en effet montré que celle-ci variait d'un facteur dix sur une échelle de temps d'environ huit ans qui

correspond pour cette étoile aux changements d'activité magnétique. Notre Soleil n'est donc bien qu'une étoile parmi d'autres !

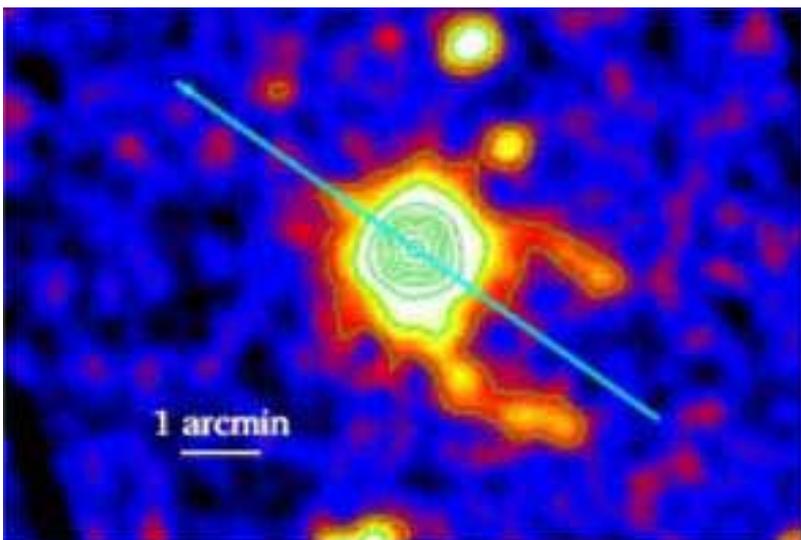
XMM-Newton a également observé des étoiles bien plus massives que le Soleil. Les données X d'amas contenant ce type d'étoiles ont ainsi révélé une multitude de sources secondaires (Fig. 2). Celles-ci sont associées à des étoiles semblables au Soleil mais encore prises dans les tourments de la formation stellaire : on peut dire que XMM a enregistré les premiers cris de ces bébés-étoiles.

Les objets exotiques révèlent eux aussi leurs profonds secrets sous l'œil inquisiteur d'XMM. Ainsi, l'observation de Geminga, ce pulsar étrange qui ne « pulse » pas dans le domaine radio, a dévoilé une structure étonnante (Fig. 3) : deux arcs de part et d'autre de l'étoile. Ces « arcs » X montrent la trace de l'onde de choc créée par le mouvement du pulsar qui se déplace à la vitesse vertigineuse de 120 km/s (soit plus de 400 000 km/h !) à travers l'espace interstellaire !



***Fig. 2 : Vue de l'amas NGC6231 avec le satellite XMM-Newton. Les sources les plus brillantes sont des étoiles massives de plusieurs dizaines de masses solaires, les sources plus faibles sont des étoiles naissantes ayant une ou deux fois la masse du Soleil.***

***(© GAPHE et ESA)***



**Fig. 3 : Le pulsar Geminga semble suivi de deux « traînées ». © ESA**

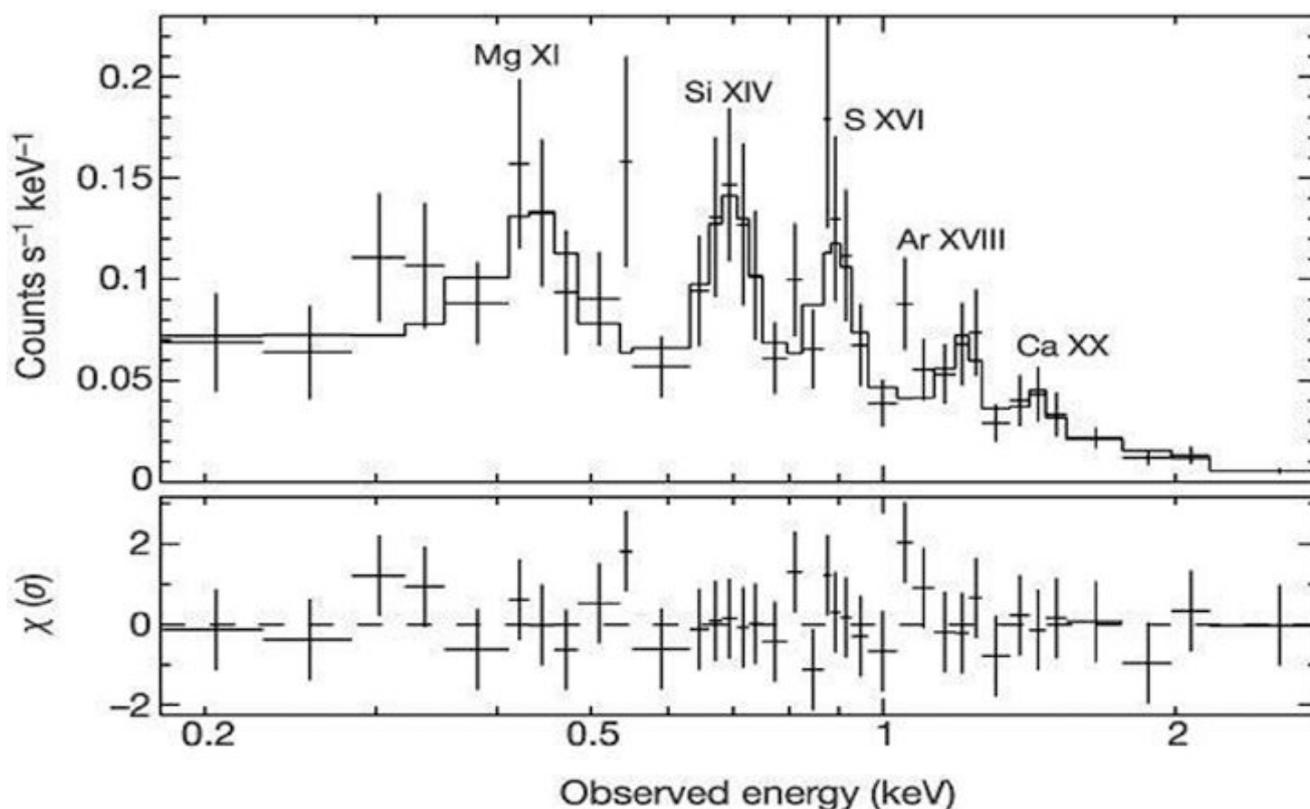
### *Aux confins de l'Univers, des explosions mystérieuses*

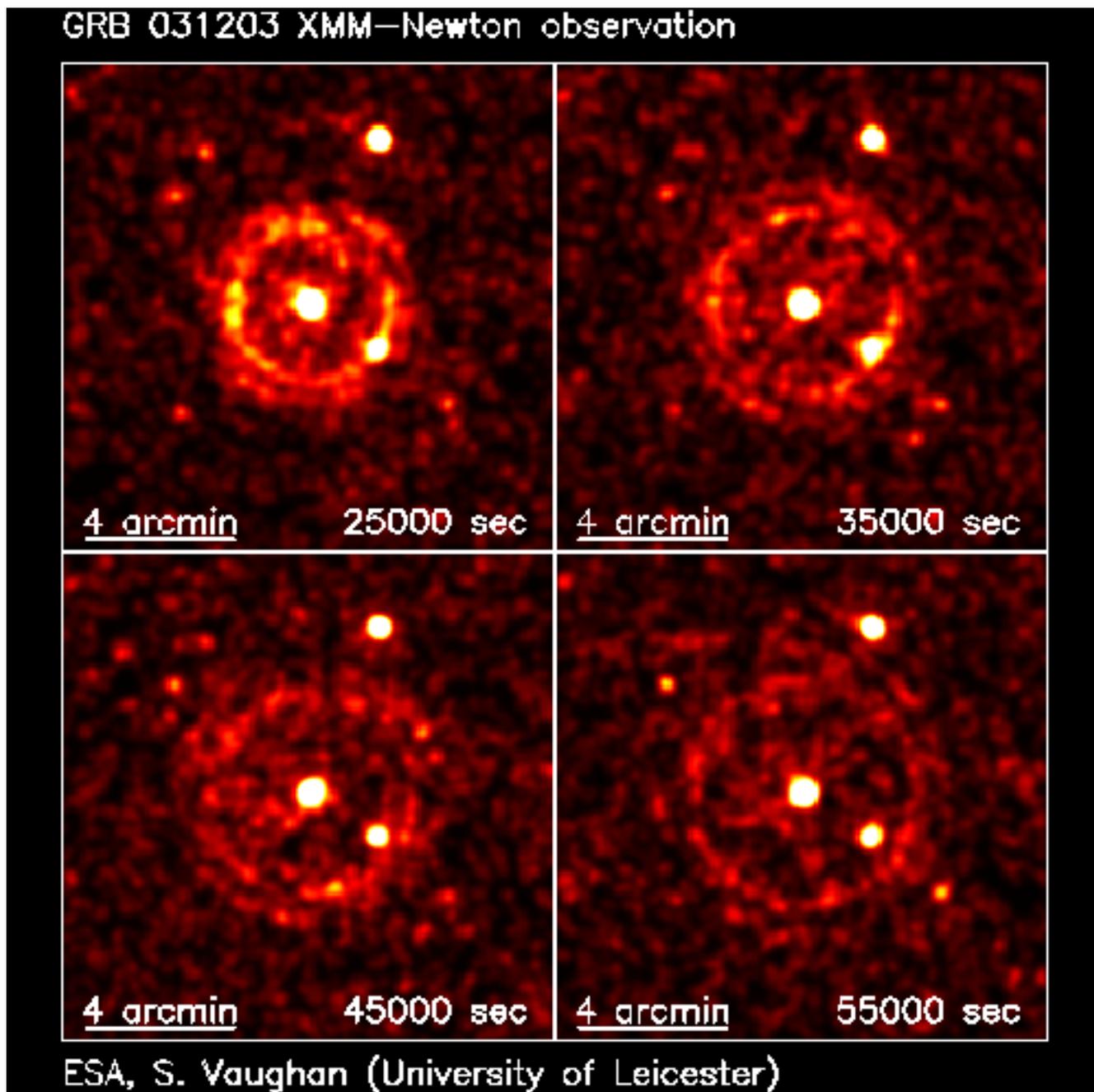
Depuis les années 1970, on observe chaque jour une augmentation brusque de l'émission  $\gamma$  (gamma). Ce « sursaut » se produit toujours en un endroit différent du ciel, et on sait depuis 1998 que les sources à l'origine de ce phénomène sont très lointaines. Toutefois, l'origine exacte du phénomène est toujours sujette à controverse. Les modèles les plus en vogue suggèrent que le sursaut gamma marque la naissance d'un trou noir, soit au cours d'une explosion d'une étoile très massive (une

« hyper- » ou « supra-nova »), soit au cours de la collision de deux étoiles à neutrons (c'est-à-dire deux résidus très compacts d'étoiles mortes). XMM-Newton a contribué à élucider la nature des mystérieux sursauts gamma en étudiant leur post-luminescence (l'émission X intense qui suit le sursaut gamma proprement dit).

Pendant quelques heures, cette post-luminescence dépasse plusieurs millions de fois l'émission X d'une galaxie toute entière et l'observation de la post-luminescence X du sursaut gamma GRB011211 par XMM-Newton a apporté la preuve que ce sursaut était bien associé à l'explosion d'une étoile très massive. En effet, l'analyse de l'émission X du sursaut a révélé la signature d'éléments chimiques tels que le magnésium, le silicium, le soufre, l'argon et le calcium typiquement fabriqués dans les explosions d'étoiles massives (Fig. 4).

**Fig. 4 : Spectre du sursaut gamma GRB011211 observé par XMM-Newton. Les différents éléments chimiques identifiés sont caractéristiques d'une explosion de supernova. (© ESA)**



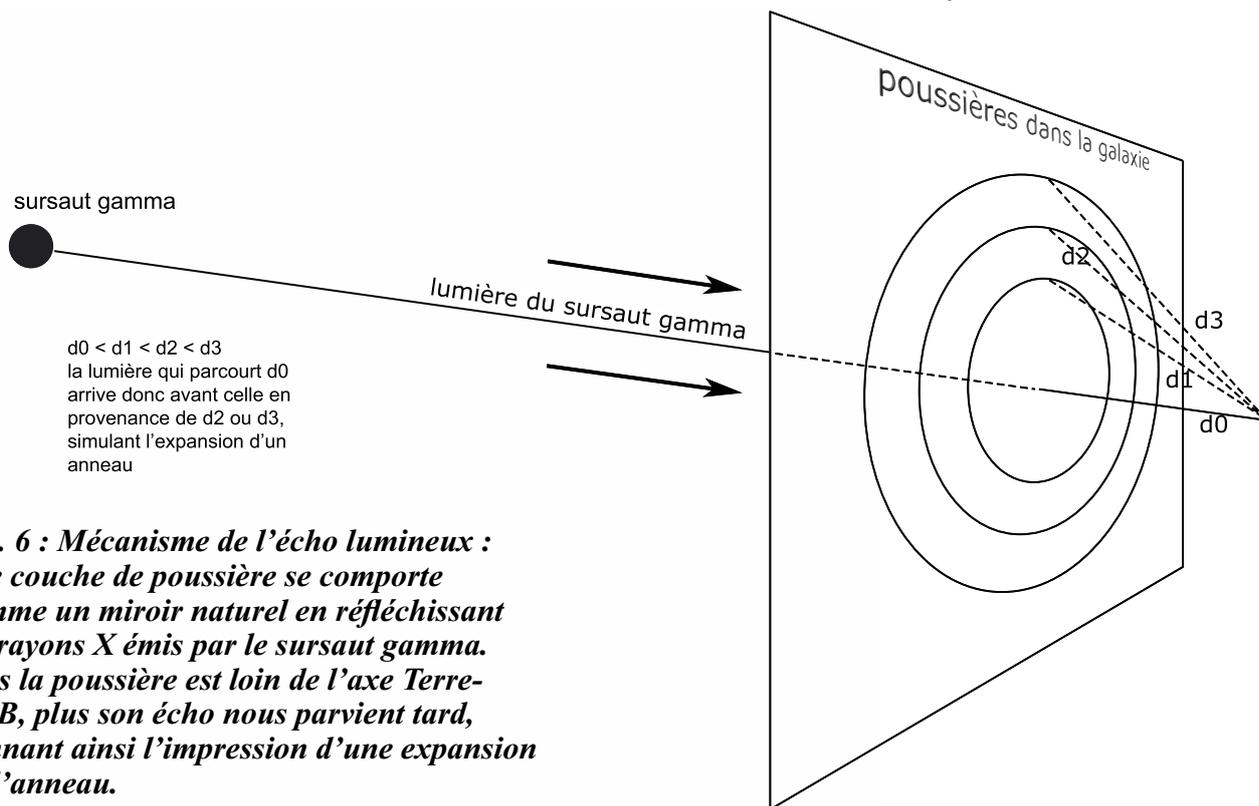


Les données obtenues avec XMM-Newton lors de l'explosion de GRB031203 en ont surpris plus d'un. Quelques heures après le déclenchement de l'explosion gamma, un anneau autour de la source était découvert par XMM (Fig. 5). Au fil du temps, cet anneau s'est mis à grandir. Son expansion n'est en fait qu'un mirage, la lumière étant réfléchiée par de la poussière de notre Galaxie située à 2 900 et à 4 500 années-lumière de la Terre (Fig. 6). Il s'agit en fait d'un écho lumineux, phénomène rarement observé dans le domaine visible et, pour la première fois, en rayons X !

*Fig. 5 : Un écho lumineux X observé lors de l'explosion de GRB031203 (© ESA)*

### ***Trous noirs, vous avez dit trous noirs ?***

Le résultat des sursauts gamma est généralement la création d'un trou noir. Cependant, une fois formé, celui-ci ne peut pas être observé directement car aucune lumière ou information de quelque forme que ce soit ne peut s'échapper de l'horizon temporel d'un trou noir. Le rayon de l'horizon est très petit, de l'ordre de 30 km pour un trou noir statique



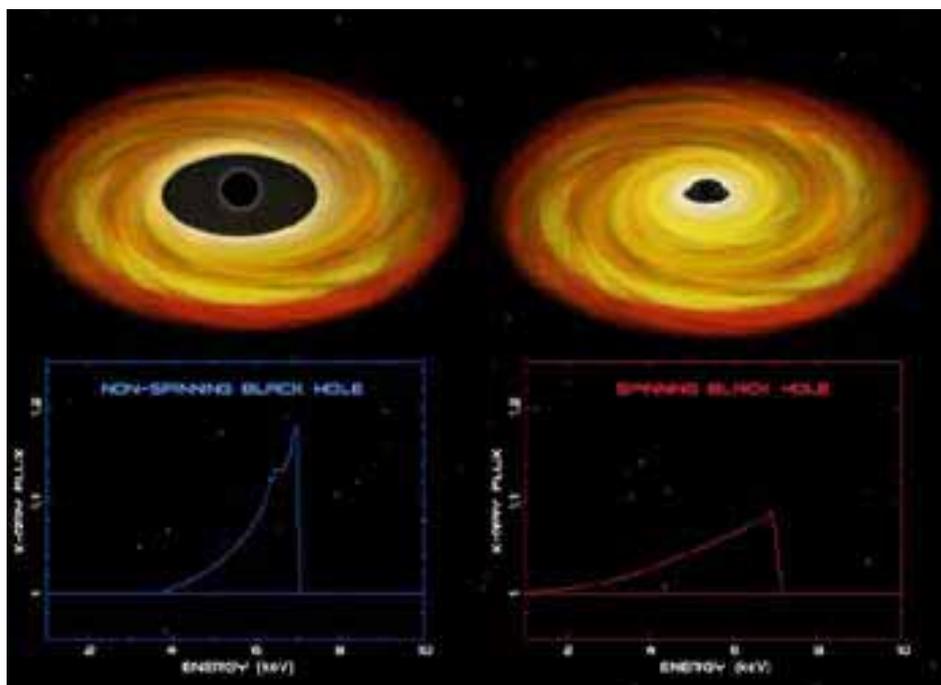
**Fig. 6 : Mécanisme de l'écho lumineux : une couche de poussière se comporte comme un miroir naturel en réfléchissant les rayons X émis par le sursaut gamma. Plus la poussière est loin de l'axe Terre-GRB, plus son écho nous parvient tard, donnant ainsi l'impression d'une expansion de l'anneau.**

de masse égale à 10 fois la masse du Soleil. Il est toutefois possible de détecter ces objets particuliers en observant leurs effets sur l'environnement immédiat. En raison de l'incroyable attraction gravifique, la matière au voisinage du trou noir se trouve littéralement aspirée vers celui-ci et, avant de disparaître à jamais au-delà de l'horizon temporel du trou noir, elle tourne autour du monstre en décrivant des trajectoires spiralées de plus en plus serrées. Elle en profite pour dissiper son énergie cinétique sous forme de chaleur, atteignant une température de plusieurs

**Fig. 7 : Illustration schématique de la déformation de l'émission X du fer au voisinage d'un trou noir statique (à droite) ou en rotation rapide (à gauche). La déformation est plus prononcée quand le trou noir tourne rapidement sur lui-même. La comparaison de modèles théoriques aux observations permet de mesurer la vitesse de rotation des trous noirs. (© NASA)**

millions de degrés : ce « disque d'accrétion », comme on l'appelle, rayonne donc des quantités phénoménales de rayons X.

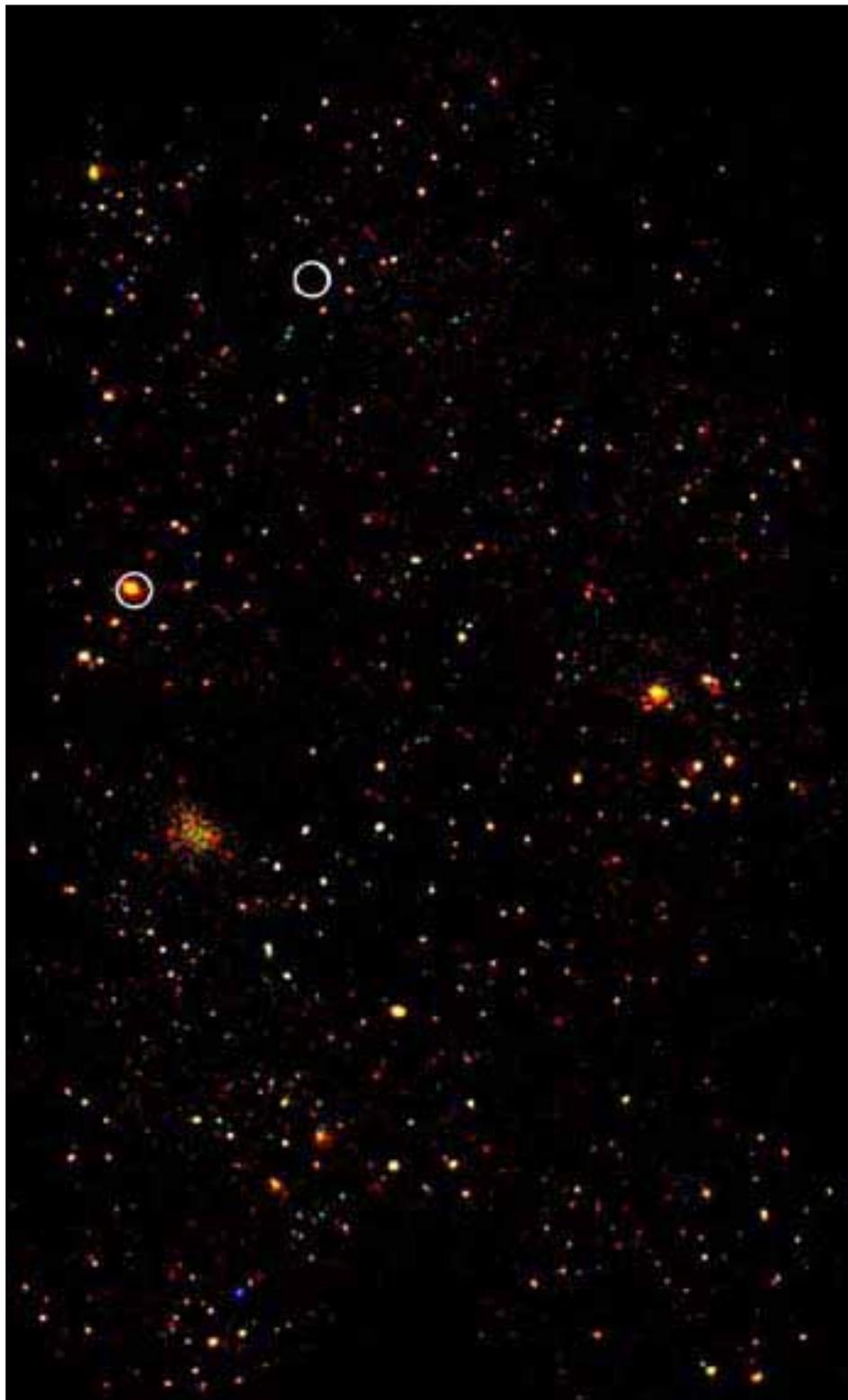
Le centre de notre Galaxie, situé à environ 26 000 années lumière dans la direction de la constellation du Sagittaire, abriterait un tel monstre, de masse approchant les quatre millions de masses solaires et situé à la position de la source radio Sgr A\*. Toutefois, contrairement à d'autres trous noirs supermassifs situés



au cœur de quasars lointains, Sgr A\* est une source de rayons X plutôt modeste, sa luminosité X étant plusieurs ordres de grandeur inférieure à celle des noyaux de quasars : ainsi, l'émission X de Sgr A\* équivaut à environ 10 fois la luminosité du Soleil dans tout le spectre électromagnétique, alors que pour les trous noirs situés au cœur de quasars lointains, la luminosité X peut atteindre plusieurs dizaines de milliards de fois la luminosité du Soleil. Cette constatation suggère que Sgr A\* se trouve actuellement dans une phase calme où le taux d'accrétion de matière est faible. Mais cela peut parfois changer brusquement. Ainsi, en septembre 2001, les astrophysiciens ont été témoins, par l'entremise d'XMM, d'un sursaut de rayonnement X en provenance de Sgr A\*. Au cours de cet événement, le flux de rayons X a augmenté d'un facteur 20 en moins de 1 000 secondes : ce phénomène spectaculaire marque une augmentation soudaine de la quantité de matière engloutie par notre ogre galactique.

Dans le même contexte, XMM-Newton a enregistré une gigantesque éruption de rayons X en provenance du cœur de la galaxie RX J1242-11 lorsqu'une étoile de masse égale à celle du Soleil a été déchirée par les forces de marée énormes générées par le trou noir supermassif central (d'environ cent millions de masses solaires). Il faut cependant noter qu'une partie seulement de la matière de cette étoile a ensuite été avalée par le trou noir.

Les observatoires X modernes permettent d'aller plus loin encore et de déterminer les caractéristiques de ces objets. En effet, la théorie de la Relativité générale



**Fig. 8 : La grande sensibilité d'XMM-Newton lui permet de découvrir des sources très faibles. Les deux cercles indiqués sur cette figure montrent les deux seules sources connues précédemment dans ce champ grâce aux observations de ROSAT – une des sources a aujourd'hui disparu, preuve que le ciel des hautes énergies est très variable. (© ESA-LSS)**

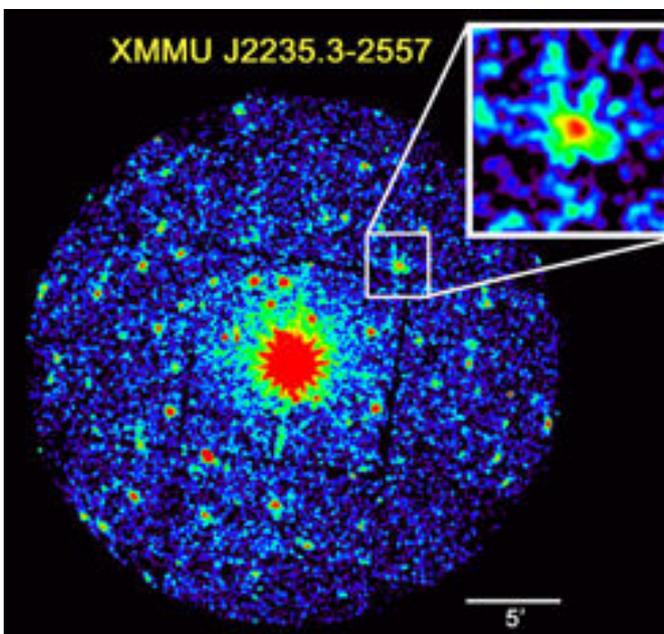
prédit que le temps s'écoule moins vite au voisinage d'un trou noir. En conséquence, l'énergie caractéristique de la lumière émise quand un électron passe d'un niveau atomique à un autre est modifiée dans des proportions qui dépendent de la vitesse de rotation du trou noir sur lui-même (Fig. 7). Les observations collectées par XMM-Newton, complétées par celles de Chandra, ont montré que tous les trous noirs ne sont pas identiques : certains tournent très rapidement sur eux-mêmes alors que d'autres sont quasi-statiques.

### *De plus en plus grand...*

L'observation des rayons X permet également d'étudier les structures les plus grandes de notre Univers : les amas de galaxies comportant des centaines, voire des milliers de galaxies liées par leur attraction gravitationnelle. Toutefois ces amas de galaxies ne se composent pas seulement de galaxies individuelles : un gigantesque halo de gaz très chaud (quelques millions de degrés) les entoure. Détectable seulement dans le domaine X, il compte autant de masse que l'ensemble de toutes les galaxies appartenant à ces amas.

Avec sa grande sensibilité, XMM-Newton, en observant très longtemps certaines zones du ciel, a pu découvrir des dizaines

**Fig. 9 : L'amas de galaxies le plus lointain connu actuellement a été découvert par XMM-Newton. © ESA**



de sources lointaines là où ses prédécesseurs ne voyaient qu'un brouillard peu révélateur (Fig. 8). Certaines de ces sources X lointaines se sont révélées être des quasars, d'autres des amas de galaxies encore inconnus. C'est ainsi que XMM a repéré l'amas de galaxies le plus lointain qui s'était déjà formé quand l'Univers n'avait qu'un tiers de son âge actuel (Fig. 9)! Ces observations sont capitales en cosmologie puisqu'elles renseignent les astronomes sur l'histoire de l'Univers et en particulier sur l'apparition des premières structures à grande échelle dans l'Univers jeune.

En six ans de travail, XMM-Newton a obtenu des résultats parfois attendus avec impatience, parfois au contraire très surprenants, mais qui toujours améliorent notre compréhension de l'Univers sur bien des points, des planètes proches aux lointains amas de galaxies. Tout cela prouve une fois encore – si besoin était – que l'Europe est à la pointe de la recherche astrophysique... et compte y rester !

*Cet article est publié conjointement avec la revue Ciel et Terre (numéro de février)*

