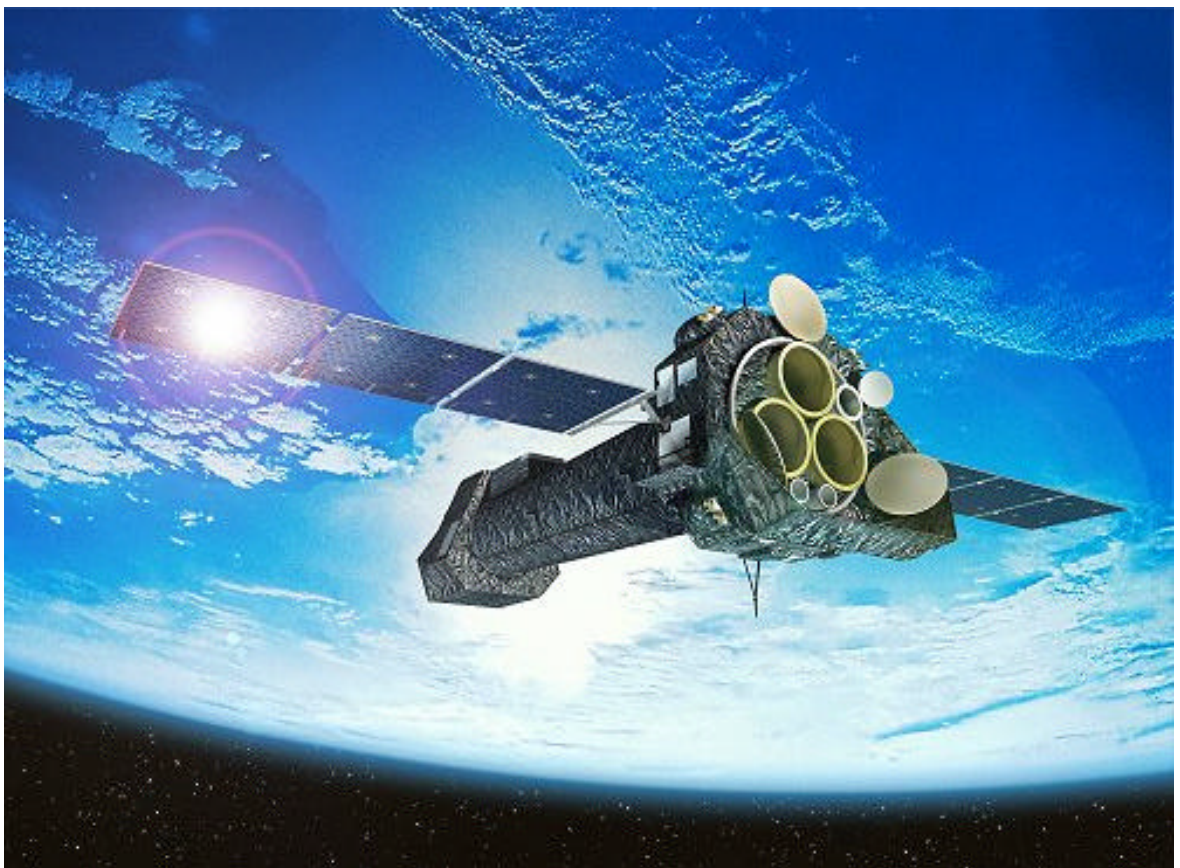




## **XMM-Newton : un nouvel observatoire spatial pour explorer les émissions X de l'Univers**

**19 Octobre 2000**



*Contacts presse*

Corinne Borel : ☎ 01 40 56 18 35 - Pascal Newton : ☎ 01 40 56 20 96



## INTERVENANTS

**Philippe Ferrando** - Service d'Astrophysique CEA/Saclay

*Présentation générale de XMM-Newton  
Le mystère du fond diffus*

**Doris Neumann** - Service d'Astrophysique CEA/Saclay

*Dynamique des amas de galaxies*

**Jean Ballet** - Service d'Astrophysique CEA/Saclay

*Observation de restes de la supernova Tycho*

## **S o m m a i r e**

### **XMM-Newton (X-Ray Multi-mirror Mission) : présentation générale**

- **XMM-Newton observe les rayons X**
- **XMM-Newton : un peu de technique...**
- **Les instruments d'XMM-Newton**
- **Le CEA et XMM-Newton**
- **Les équipes**

### **XMM-Newton : des premiers résultats**

- **Le mystère du fond diffus**
- **Dynamique des amas de galaxies**
- **Observation de restes de la supernova Tycho**

## **XMM-Newton (X-Ray Multi-mirror Mission) : Présentation générale**

L'observatoire XMM-Newton est un télescope spatial de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) lancé le 10 décembre 1999 par le 4<sup>ème</sup> tir de la fusée Ariane 5, son premier vol commercial. Il est destiné à observer, dans le ciel, les émissions de rayonnement X.



XMM-Newton pèse 3,8 tonnes environ et mesure 10 m de longueur et 16 m d'envergure pour 4 m de diamètre. **C'est le plus gros satellite d'observation de rayons X jamais mis en orbite et le plus gros satellite construit en Europe.**

En France, trois laboratoires coordonnés par le CNES, dont le DAPNIA (département d'astrophysique, de physique des particules, de physique nucléaire et de l'instrumentation associée) du CEA/Saclay ont travaillé à la réalisation des instruments du satellite et à leur étalonnage. Une quarantaine de sociétés d'une quinzaine de pays ont travaillé, sous maîtrise d'œuvre de la firme allemande Dornier, à sa construction.

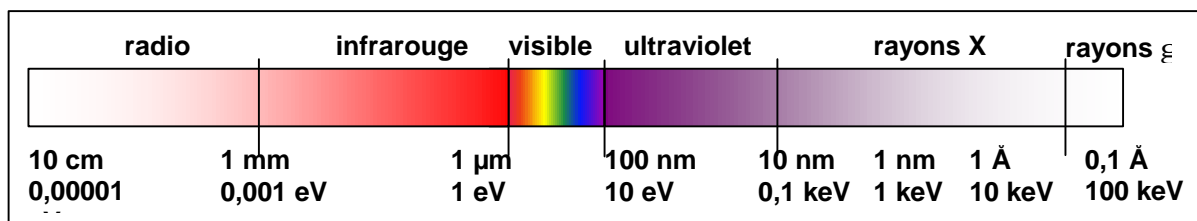
**Le coût total du projet est de 690 millions d'euros.**

La durée de vie prévue de XMM-Newton est de 10 ans.

## XMM-Newton observe les rayons X

L'astronomie des rayons X (photons énergétiques dont la gamme d'énergie est comprise entre  $\sim 0,1$  et  $15 \text{ keV}^1$  et la longueur d'onde entre  $0,8$  et  $120 \text{ Angström}^2$ ) est une science récente. L'atmosphère terrestre est opaque aux rayons X et leur observation ne peut donc se faire qu'à partir de fusées ou de satellites.

Les rayons X sont constitués de photons comme la lumière visible, les infrarouges, les ultraviolets ou les ondes radios mais leur énergie est plus grande. Pour des énergies encore plus grandes, on trouve les rayons  $\gamma$  :



Ces rayons X proviennent de phénomènes mettant en jeu de grandes quantités d'énergie (où les températures sont de l'ordre de  $1\,000\,000$  à  $100\,000\,000$  de degrés) comme les effondrements gravitationnels, les accrétions de matière par des objets massifs, des ondes de chocs... **Les rayons X proviennent des zones très chaudes de l'univers où la température atteint des millions de degrés** : les étoiles, les gaz interstellaires chauds, les trous noirs, les galaxies actives et les amas de galaxies.

XMM-Newton observe un domaine étendu de la gamme spectrale X compris entre  $300 \text{ eV}$  et  $10 \text{ keV}$ .

### L'astronomie des rayons X

XMM-Newton est un satellite doté d'une **exceptionnelle sensibilité en spectroscopie** ( finesse des analyses), associée à une **bonne résolution angulaire** ( finesse des images) et un **large champ d'observation**. XMM-Newton est capable de réaliser des images simultanées en différentes longueurs d'onde (X et visible ou ultraviolet).

<sup>1</sup>  $1 \text{ keV} = 1000 \text{ electronVolt}$  - unité de mesure d'énergie

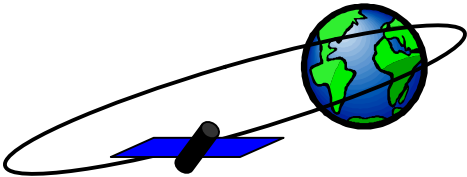
<sup>2</sup>  $1 \text{ Angström} (1 \text{ Å}) = 10^{-10} \text{ m}$  (  $0,1$  millionième de millimètre)

Les observations d'XMM-Newton devraient permettre de faire progresser des thèmes aussi variés que :

- La physique des trous noirs
- La production et la circulation des éléments lourds dans l'univers et les mécanismes de chauffage associés. C'est à dire comprendre comment se forment les éléments qui nous constituent, qui constituent les planètes.  
*(abondance de ces éléments dans les étoiles, dans le milieu interstellaire chaud, dans les halos de galaxies, dans les amas de galaxies, dans les restes des supernovae...).*
- La quantité et la distribution de matière noire dans l'univers  
*(estimation du potentiel gravitationnel dans les galaxies et amas de galaxies et densité du gaz dans les halos des galaxies et le milieu intra-amas)*
- La formation et l'évolution des grandes structures  
*(évolution des amas de galaxies, évolution de la fonction de masse des amas, étude de la fusion des amas, évolution de la population des noyaux actifs..)*
- La nature du fond diffus X  
*(émission continue de rayonnement X observé sur l'ensemble de l'espace interstellaire)*

## XMM-Newton : un peu de technique...

### Où se trouve XMM-Newton ?



Lancé le 10 décembre 1999, XMM-Newton a atteint son orbite finale le 16 décembre 1999. Il tourne sur une orbite elliptique excentrique très allongée (7 000 km de périégée et 114 000 km d'apogée) en décrivant une révolution toutes les 48 heures. XMM-Newton est suivi par les stations au sol de Kourou et Perth avec lesquelles il est en contact quasi continu. Il est donc possible, en principe, d'adapter les paramètres de chaque observation en temps réel. Ceci est crucial pour l'observation de sources variables. Le satellite est commandé depuis le centre opérationnel de Darmstadt (ESOC), qui gère aussi les problèmes de sécurité du satellite et des instruments. Le centre des opérations scientifiques est lui situé à Vilspa (Espagne). Après les premières phases de vérification des performances des instruments, et leur étalonnage sur sources célestes, ce centre a maintenant à sa charge la planification des observations et le suivi de leur bon déroulement.

### Pourquoi un satellite aussi gros ?

Pour faire une image ou l'analyse spectrale d'un faisceau de rayons X il faut le focaliser. Mais les rayons X sont très pénétrants et traversent les matériaux dans les configurations habituelles des télescopes. Les rayons X ne peuvent être réfléchis que pour des incidences rasantes, et d'autant plus rasantes que leur énergie est grande.

Dans XMM-Newton la focalisation est ainsi assurée par des coques de symétrie de révolution combinant une section parabolique et une section hyperbolique, sur lesquelles se réfléchissent les rayons X. Ces coques ont une distance focale de 7,5 m, choisie pour garantir une bonne efficacité à haute énergie. Une surface collectrice très importante est obtenue en multipliant le nombre de ces coques.

**XMM-Newton possède 3 télescopes.** Chacun d'entre eux est ainsi constitué de 58 coques concentriques coalignées en fines coques de nickel (0,5 à 1 mm d'épaisseur) recouvert d'or. Chaque télescope, d'une longueur de 60 cm et d'un diamètre de 70 cm, possède son propre plan focal et sa propre chaîne d'acquisition. En raison de la grande surface collectrice ainsi obtenue, les télescopes d'XMM-Newton sont des **instruments très sensibles**.



## **XMM-NEWTON et la concurrence**

Depuis les années 40, l'émission de rayons X par le soleil est connue. En 1962, les Américains R. Giacconi et B. Rossi ont découvert la première source de rayons X extra solaire dans la constellation du scorpion. Ensuite divers détecteurs montés sur différents engins spatiaux ont identifié une quarantaine de sources de rayons X. En 1970, le premier satellite véritablement dédié à l'identification de sources de rayons X en répertorie 339. Le satellite américain Einstein, équipé de miroirs à incidence rasante (comme XMM-Newton) répertorie plus de 10 000 sources.

Suivent ensuite l'européen Exosat, le germano-anglo-américain Rosat qui détecta 100 000 sources X, l'américano-japonais Asca, l'italo-néerlandais BeppoSax, et le satellite américain Chandra lancé en juillet dernier.

Asca est le premier satellite ayant permis de faire véritablement de la spectroscopie résolue spatialement.

**Chandra, lancé en juillet 1999 possède une meilleure résolution spatiale que XMM-Newton mais une plus faible sensibilité. Ce sont deux instruments complémentaires.**

## **Et après XMM-Newton ?**

XMM-Newton a une durée de vie de 10 ans et 10 à 15 ans de travail sont nécessaires pour développer un nouveau satellite scientifique.

L'ESA a un projet de successeur à XMM-Newton, **XEUS**, visant à accroître la surface des miroirs par près d'un facteur 100 par rapport à XMM-Newton. Comme ceci nécessite d'augmenter la distance focale au delà des capacités des coiffes des fusées, XEUS sera constitué de deux satellites positionnés à 50 m l'un de l'autre, l'un portant le miroir, l'autre les instruments focaux. Une partie de XEUS sera assemblée sur la station spatiale internationale.



## Les instruments d'XMM-Newton

XMM-Newton va permettre d'une part de **réaliser des images du ciel en rayons X**, en visible et en ultraviolet afin de détecter de nouvelles sources de rayons X et d'autre part **d'analyser**, grâce à des spectromètres, **émise la lumière en rayons X** par ces sources pour en extraire des informations sur leur composition.

Avec ses 3 télescopes X en parallèle composés chacun de 58 miroirs concentriques, XMM-Newton dispose d'une **surface collectrice inégalée dans le domaine X**. Au foyer de ces télescopes se trouvent des détecteurs capables de récolter l'information tant spatiale que spectrale contenue dans l'image du ciel en rayons X ainsi formée.

Deux des télescopes sont également équipés de systèmes dispersifs (réseaux par réflexion) permettant une analyse détaillée de la distribution d'énergie des sources X les plus brillantes.

XMM-Newton comprend aussi un télescope optique (le moniteur optique OM) qui permettra pour la première fois de réaliser des observations simultanées dans les domaines X et visible ou ultraviolet.

### Le spectro-imageur EPIC (European Photon Imaging Camera)

Les trois télescopes constituent la caméra EPIC (European Photon Imaging Camera) réalisée par un consortium de 10 laboratoires européens (italiens, français, allemands et britanniques) sous la direction de M. Turner (université de Leicester) avec une importante participation française (Service d'astrophysique au CEA/Saclay, l'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay et le Centre d'étude spatiale des rayonnements de Toulouse).

- Deux des télescopes sont munis de réseaux. Au foyer de chacun de ces télescopes sont placées 7 caméras CCD identiques (600 X 600 pixels de 40  $\mu\text{m}$  (1,1" sur le ciel) ) qui reçoivent 40 % des photons collectés par le télescope. Ces caméras sont de technologie MOS (Metal-Oxyde-Semiconductor)
- La caméra du troisième télescope, qui ne possède pas de réseau, reçoit l'intégralité du flux de photons collecté. A son foyer sont placés 12 CCD (200 X 64 pixels de 150  $\mu\text{m}$  (4,1" sur le ciel) ). Ces caméras sont à jonction p-n.

En combinant les deux technologies MOS et jonction p-n, on optimise les performances et la fiabilité de l'ensemble.

Ces caméras CCD ont été développées spécifiquement pour une utilisation en rayons X et en environnement spatial (tenue aux rayons cosmiques).

La résolution spectrale des caméras est de 135 eV à 6,4 keV et de 55 eV à 1 keV. Une telle résolution est atteinte en refroidissant les CCD à des températures de  $-100^{\circ}\text{C}$ .

## Le spectromètre à haute résolution (RGS)

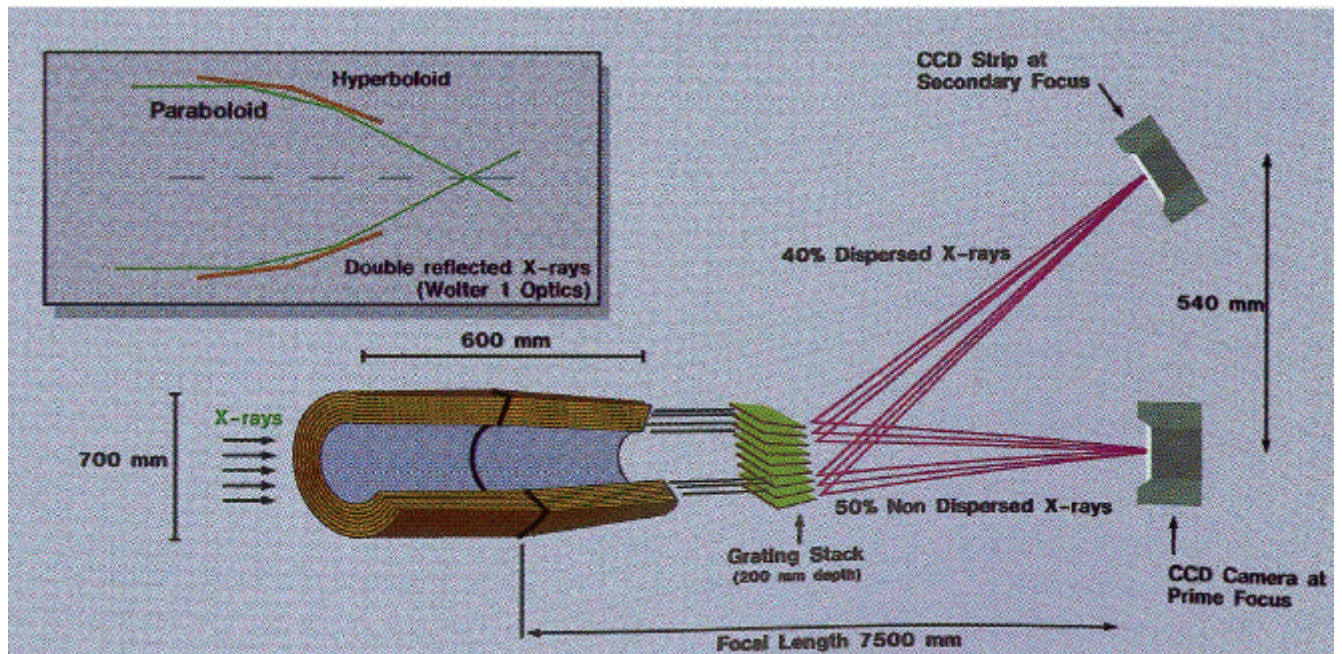
Deux des trois télescopes sont équipés d'un spectromètre réalisé par un consortium néerlandais, anglais, américain et suisse.

Cet instrument permet de faire une analyse du spectre X détecté par le télescope et d'identifier ainsi les éléments présents, ainsi que leur forme chimique. De nombreuses raies importantes se trouvent dans la bande d'énergie du RGS et notamment des raies du Fer, Nickel, Azote, Oxygène, Néon, magnésium...

40% des photons collectés sont interceptés par un ensemble de 202 réseaux placés à la sortie du télescope. Ces réseaux dispersent le faisceau avec un angle qui dépend de la longueur d'onde. Une caméra constituée de 9 CCD (1024 X 384 pixels de 27 micromètres) détecte alors le faisceau diffracté.

Le spectromètre est sensible dans la bande d'énergie 0,35 à 2,5 keV (5 à 38 Å).

Son pouvoir de résolution (noté  $E/\Delta E$ ) est de 290 à 10 Å, de 520 à 20 Å, et de 800 à 35 Å.





## Le moniteur optique (OM)

Le moniteur optique est réalisé par un consortium anglais, belge et américain. Il comporte un télescope de 30 cm de diamètre avec une ouverture de 12,7.

La sensibilité du télescope est semblable à celle d'un télescope de 4 m de diamètre au sol.

L'OM est primordial pour l'étude des corrélations entre les propriétés X et optiques des sources détectées par EPIC, leur classification et leur identification. Il améliore également le suivi de la direction de pointage, très utile pour l'analyse des données X. Le télescope permet des observations simultanées multi-longueur d'onde des sources X variables en évitant les contraintes des observations coordonnées sol-espace comme le mauvais temps ou les plannings d'utilisation. Chaque observation fournit des données optiques sur toutes les sources X détectées situées dans le champ couvert par l'OM.

## La gestion des données

Un **centre d'opération scientifique**, le SOC (Science Operation Center), sous la responsabilité de l'ESA, est l'interlocuteur des observateurs. Il est responsable de la base de données d'XMM-Newton, du suivi et de l'actualisation des données d'étalonnage, de la réalisation de l'ensemble logiciel permettant l'analyse des données et de leur distribution aux observateurs.

Grâce à sa très grande sensibilité, XMM-Newton détectera des dizaines de sources secondaires de rayonnements X en plus de sa cible d'observation dans son champ de vue. Avec plusieurs observations quotidiennes XMM-Newton détectera ainsi plusieurs dizaines de milliers de sources dès la première année, dont la plupart seront des sources non encore répertoriées. XMM-Newton a le potentiel de générer une très importante base de données de sources formant un échantillon représentatif du ciel. XMM-Newton devrait détecter, par an, typiquement 1000 étoiles, 1000 amas de galaxies et 15 000 galaxies actives, de flux supérieur à  $10^{-14}$  erg.s<sup>-1</sup>.cm<sup>-2</sup> (dans la bande 0,5-10 keV).

Afin de faciliter l'utilisation de cette grande quantité, l'ESA a décidé de confier à un **centre de surveillance scientifique**, le SSC (Survey Science Center), le rôle d'analyser systématiquement ces données. Le SSC est placé sous la responsabilité de l'Université de Leicester (Grande-Bretagne), dans le cadre d'une collaboration entre la Grande-Bretagne, la France et l'Allemagne, avec une forte participation française (Observatoire de Strasbourg, Service d'astrophysique du CEA, CESR). Ce consortium unique assure l'homogénéité des résultats.



Le SSC est chargé de :

- traiter systématiquement toutes les données des trois instruments d'XMM-Newton de manière homogène durant toute la durée de la mission. Ceci permettra de vérifier le bon fonctionnement des logiciels d'analyse et de mettre en évidence d'éventuelles modifications des performances des instruments.
- rechercher et caractériser toutes les sources du champ et si possible les identifier dans des bases de données existantes.
- effectuer des observations de suivi optique (avec des télescopes au sol) pour chercher à identifier les sources pour lesquelles aucune contrepartie n'a été trouvée.
- mettre toutes ces informations à la disposition de la communauté scientifique par l'intermédiaire de la base de données gérée par le centre d'opération scientifique (SOC), tout en respectant les droits de propriété d'un an des observateurs.

La fonctionnalité du SSC a existé dans des projets précédents, tels que Einstein ou Rosat, mais s'est développée a posteriori et a été assurée par de nombreux participants. XMM-Newton est le premier projet X pour lequel un consortium unique assure l'homogénéité des résultats et est programmé longtemps avant le lancement.

## Le CEA et XMM-Newton

Le CEA a participé à la **réalisation d'EPIC**, le principal instrument d'XMM-Newton et est **impliqué fortement dans le centre de surveillance scientifique (SSC)**.

Concernant EPIC, le CEA a pris à sa charge :

- la conception, la réalisation, les tests et la livraison des contrôleurs dits EMCR (Epic Mos CCD Controller and Recognition unit) qui gèrent les modes de fonctionnement des caméras Mos CCD et en pilote l'électronique de commande. Il gère ainsi les différents modes de lecture des 7 CCD qui composent le plan focal et reconnaît, analyse et étiquette en « temps réel » les événements X à partir des charges collectées individuellement sur chacun des 2 520 000 pixels constitutifs de ce plan focal. Les choix des composants associés aux techniques de réduction de poids et de puissance, ainsi que les choix d'architecture et de redondance électronique permettent une espérance de vie de 90% pour 10 ans passés sur une orbite; fortement radioactive
- la réalisation des convertisseurs de puissance dits EMVC (EPIC MOS Voltage Converter). Ils ont la tâche moins noble scientifiquement mais essentielle de générer et distribuer 10 sources d'alimentation au travers de la chaîne d'acquisition avec tous les impératifs de sûreté de fonctionnement et de protection imposés par les constituants de la chaîne et du satellite. L'EMVC ne doit pas générer ou véhiculer de bruit vis-à-vis des charges collectées sur le plan focal qui sont de l'ordre de quelques électrons. Avec un rendement global supérieur à 70% et une espérance de vie de 10 ans, l'EMVC est l'objet d'une prestation industrielle d'une très grande maîtrise ;
- le développement d'ASIC (techniques de réduction de poids et puissance) pour application spatiale ;
- le développement des bancs de tests ;
- la conduite et l'analyse des mesures d'étalonnage (station synchrotron IAS/LURE) ;
- outre l'aspect expertise et maintenance d'EPIC, le CEA est également chargé d'assurer une partie de l'analyse des données en vol.

Concernant le SSC, le CEA intervient à plusieurs niveaux :

- il est chargé de l'intégration et des tests de la moitié (à parité avec Leicester) de l'analyse systématique des données, plus précisément des chaînes de traitement pour les instruments EPIC et RGS, ainsi que de la détection de sources et d'un certain nombre de tâches de visualisation des produits ;
- il est chargé de l'intégration et des tests des sous-systèmes de corrélation des résultats avec les catalogues existants et du système de vérification visuelle des résultats ;
- il est chargé de réaliser les logiciels spécifiques pour l'instrument EPIC/MOS ;
- il participe aux observations de suivi optique des sources détectées en X ;
- il participera pendant toute la vie du satellite à la vérification systématique des résultats et assurera la maintenance des logiciels qu'il a fournis.

# Les équipes

INSTITUT	INSTRUMENT	PAYS
Service d'astrophysique au CEA/Saclay	EPIC	France
Centre d'étude spatiale des rayonnements		
Institut d'astrophysique spatial		
Mullard space science laboratory	OM et RGS	Grande -Bretagne
University of Leicester	EPIC	
School of physics, Birmingham	EPIC	
Centre spatial de Liège	OM	Belgique
Space research organisation of the Netherlands	RGS	Pays-Bas
Paul Scherrer Institute	RGS	Suisse
Istituto di fisica cosmica, Milan	EPIC	Italie
Istituto di tecnologia e studio delle radiazioni extraterrestri, Bologne		
Istituto di astronomia, Palerme		
Max-Planck Institut für extraterrestrische physik, Garching	EPIC	Allemagne
Institut für astronomie und astrophysik, Tübingen		
Los Alamos and Sandia national laboratory	OM	USA
Columbia University	RGS	
University of California, Lawrence Livermore laboratory	OM	

Structure industrielle et participants pour les trois instruments :



## **XMM-Newton : des premiers résultats...**

Lancé le 10 décembre 1999, XMM-NEWTON a atteint son orbite la semaine suivante. La semaine du 17 au 21 janvier 2000, les instruments du satellite ont subi une série de tests fonctionnels. Entre le 19 et le 21 janvier les trois caméras d'EPIC réalisaient plusieurs vues de différentes régions extra-galactiques de l'univers. Le moniteur optique (OM) observait simultanément la même région du ciel. Le spectromètre (RGS) réalisa son premier spectre le 25 janvier.

Dès ces premières observations, on a pu confirmer que le satellite est extrêmement stable, que les télescopes focalisent correctement et que les instruments (les caméras EPIC, le moniteur optique OM et les spectromètres) fonctionnent exactement comme attendu. L'infrastructure du centre d'opération scientifique (SOC), le processing et l'archivage des données également.

L'inspection initiale des premières images a montré immédiatement des vues uniques de sources X de plusieurs objets célestes.

La phase de calibration et de vérification des performances des instruments a commencé le 3 mars, pour s'achever fin juin et laisser depuis la place aux observations routinières.

Les résultats présentés ici relatent de travaux effectués par les astrophysiciens du CEA/Saclay, en collaboration avec d'autres équipes internationales. Il s'agit de :

- l'étude de la nature du fonds diffus d'émission de rayons X, observable dans le ciel ;
- la dynamique des amas de galaxies, notamment l'étude d'un filament et l'observation d'une chute de galaxie ;
- l'observation de restes de la supernova Tycho.

## Le mystère du fond diffus

Dès les premières observations du ciel en rayons X, réalisées au moyen d'instruments embarqués dans des fusées, les astrophysiciens mettent en évidence la présence d'un fond diffus de rayons X. Son origine est un mystère. Provient-il d'une multitude de sources ponctuelles non résolues ? Si oui, quelle est leur nature ? Sinon, est-il émis par un gaz très chaud présent entre les galaxies ?

Pour répondre à ces questions, les astrophysiciens **cherchent à détecter des sources ponctuelles de rayons X**, à additionner leur spectre d'émission et tenter de reconstituer ainsi le fond diffus. Pour reconstituer ce fond, ils vont s'intéresser à l'ensemble de la gamme des rayons X depuis les faibles énergies (0,5 keV) jusqu'aux plus fortes (10 keV).

Le milieu gazeux de notre galaxie absorbe les rayons X dont l'énergie est inférieure à 1 keV. Or, les rayons X de faible énergie sont les plus faciles à détecter. Les observations se porteront donc sur une région du ciel où ce milieu gazeux est moins dense : le « **pointé de Lockman** » qui, en absorbant peu les rayons X de faible énergie, autorise une analyse en rayons X sur une large gamme d'énergie.

Les observations de XMM-Newton complètent celles de ses prédécesseurs (les satellites ROSAT, ASCA, BeppoSAX) et apportent de nouvelles réponses. Dans la gamme de faible énergie (0,5 à 2keV), le satellite ROSAT a montré que 70 à 80 % du fond diffus est dû à des sources ponctuelles. Dans les gammes de plus haute énergie, moyenne (2 à 5 keV) et haute (5 à 10 keV), qui sont plus difficiles à détecter, les satellites ASCA et BeppoSAX ont montré que 30% du fond diffus est dû à des sources ponctuelles de rayons X. L'origine de 70% du fond diffus en rayons X de plus haute énergie reste donc à élucider.

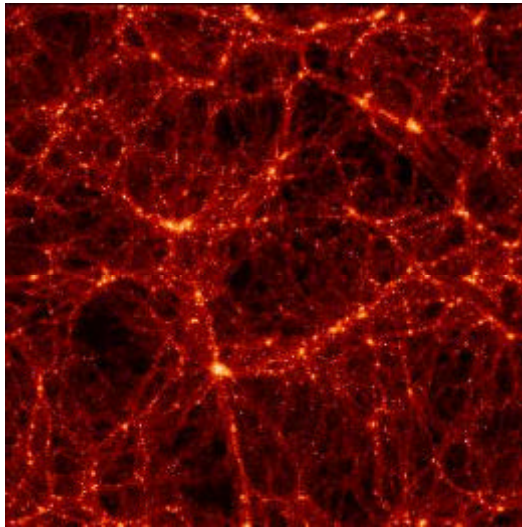
XMM-Newton possède une très grande surface efficace à haute énergie et une bonne résolution spectrale. Doté d'un grand champ de vue et d'une bonne résolution angulaire, XMM-Newton facilite le comptage et l'identification des sources ponctuelles de rayons X. Dans la bande de forte énergie allant de 5 à 10 keV, l'excellente sensibilité de XMM-Newton détectera beaucoup plus de sources ponctuelles que BeppoSAX. Il est en effet capable de détecter des sources d'intensité 20 fois plus faibles que BeppoSAX.

**XMM-Newton a montré que 60% du fond diffus de haute énergie (5 à 10 keV) provient de sources ponctuelles.** L'analyse spectrale de ces sources indique qu'il s'agit très probablement de noyaux actifs de galaxies enfouis. Certaines galaxies possèdent en effet un cœur brillant. L'interprétation actuelle est que ce cœur abrite un trou noir hyper massif (dont la masse correspond à plusieurs centaines de millions de fois la masse du soleil) émettant des rayons X à très haute énergie. On suppose que ces sources identifiées pour les hautes énergies sont du même type que celles identifiées pour les basses énergies : des noyaux actifs de galaxies mais vus sous une perspective différente (de profil) conduisant à l'absorption des rayons X de basse énergie.



## Dynamique des amas de galaxies

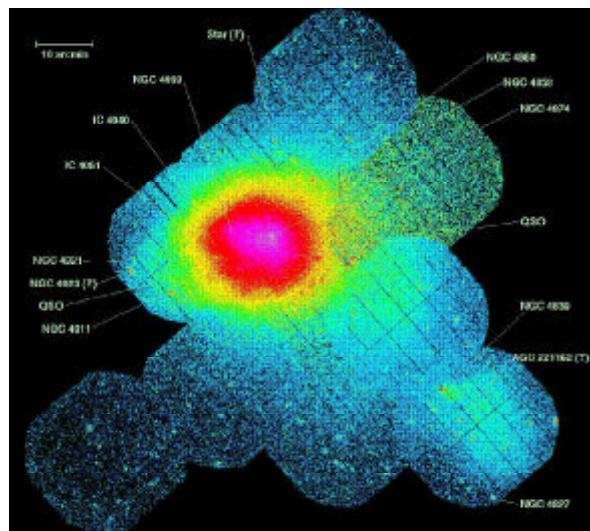
Les amas de galaxies sont **les plus grandes structures de l'Univers**. Ils sont constitués de centaines de galaxies liées ensemble par leur propre attraction gravitationnelle. **Les galaxies ne constituent que 5 % de la masse totale de l'amas. La matière noire, d'origine inconnue constitue 70 à 80% de l'amas. Le reste de la matière est un gaz chaud**, formant un plasma, dont la température atteint 10 à 100 millions de degrés. Ce plasma est un fort émetteur de rayons X. L'analyse spectrale de ces rayons X renseigne sur la température de l'amas et sur sa dynamique.



**Figure 1** : simulation de la structure « filamentaire » de l'Univers

Les amas de galaxies se forment aux croisements des filaments qui composent le « web » cosmique. Dans l'Univers, la matière est répartie le long d'immenses filaments entre lesquels se trouvent de vastes « bulles », vides de matière. Au cours du temps, la matière s'écoule le long des filaments et converge vers les intersections pour former des groupes, puis des amas de galaxies (voir figure 1). Dans notre Univers, **ces amas sont les objets les plus jeunes ayant atteint un équilibre gravitationnel**. Cette jeunesse, qui porte de nombreuses informations sur leur formation et la formation des grandes structures de l'Univers, en fait **des objets d'observation privilégiés**. Leur étude nous renseigne sur la distribution des grumeaux de matière à l'origine des galaxies et nous donne des indications précieuses sur l'évolution de l'Univers.

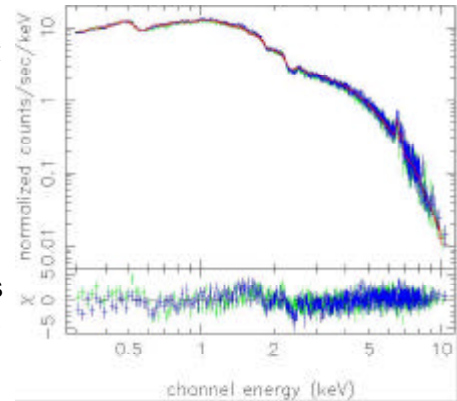
XMM-Newton a observé l'amas Coma, grand amas situé dans notre « voisinage », à...10 millions d'années lumière. Son diamètre atteint 2 millions d'années lumière. Sa masse représente 2 000 000 milliards de fois la masse de notre soleil ou 20 000 fois la masse de la Voie Lactée. Coma est un grand amas qui couvre plus d'un degré d'angle du ciel. XMM-Newton qui possède un champ de vue de 30 minutes d'angle, a réalisé une image « mosaïque » de Coma (voir figure 2). Les données obtenues par XMM-Newton **permettent de déterminer, avec une grande précision, les mouvements de matière (gaz, galaxies, groupes de galaxies) qui animent cet amas en raison des forces gravitationnelles**.



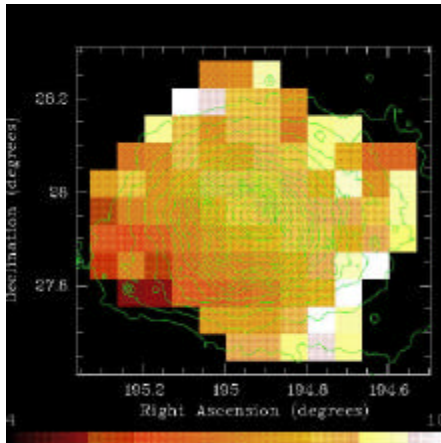
**Figure 2** : image mosaïque en rayons X de l'amas Coma vu par Epic

## Etude d'un filament

Les rayons X émis par un amas de galaxies renseignent sur sa température. En même temps que l'image en rayons X, la caméra Epic enregistre le spectre des photons X (**voir figure 3**). En utilisant des modèles mathématiques, il est possible, à partir du spectre moyen d'au moins 3 000 photons, de construire la carte températures du centre de Coma (**voir figure 4**). Sur cette carte, les zones chaudes apparaissent en couleurs claires et les zones froides en couleurs foncées, tandis que les courbes vertes traduisent l'intensité des rayons X enregistrés



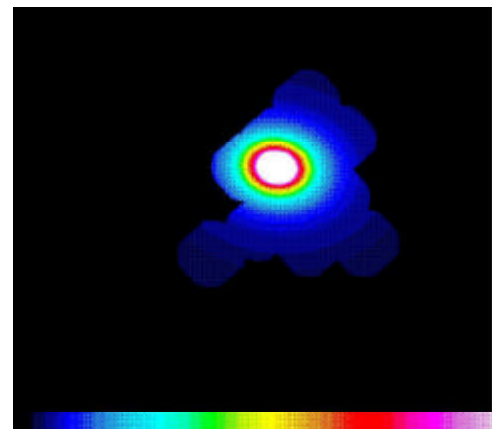
**Figure 3** : spectre X enregistré parEpic

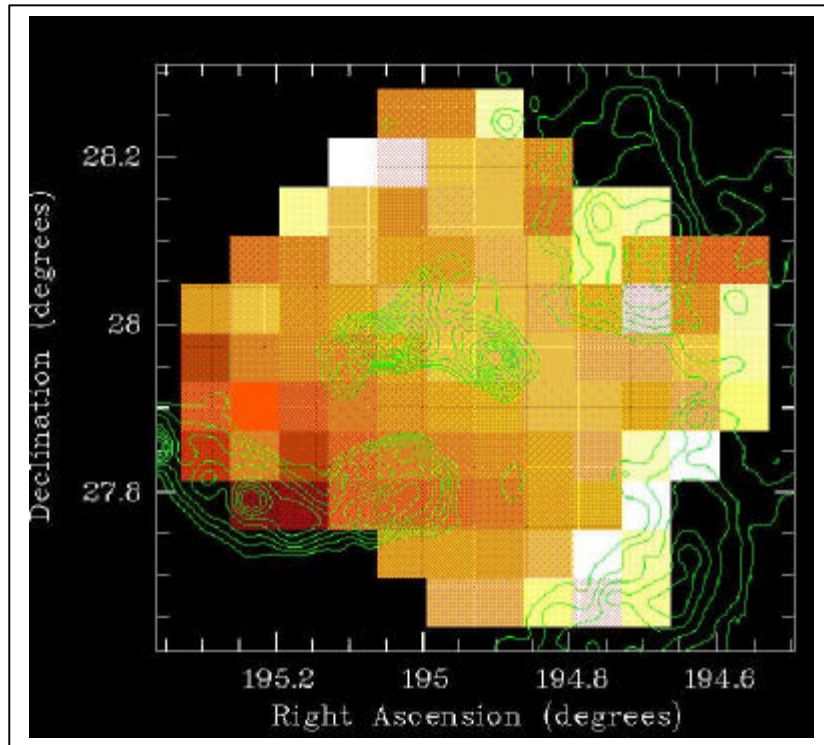


**Figure 4** : carte de températures de l'amas Coma superposée à l'intensité de son spectre X émis tel qu'enregistré parEpic

Cette image révèle de fortes variations de températures au sein de l'amas Coma. Cela signifie que Coma est perturbé, hors équilibre, et qu'il est le siège de vastes mouvements de matière. Pour mieux comprendre ces phénomènes gravitationnels, à partir d'autres amas connus « au repos », sans perturbations visibles, on a reconstruit mathématiquement le profil théorique moyen de Coma tel qu'il serait si il était au repos (**voir figure 5**). En soustrayant la carte Coma d'émission X obtenue à partir des observations d'XMM-Newton (**lignes vertes de la figure 4**) de la carte théorique de Coma (**figure 5**), on obtient une carte (**voir figure 6**) des régions de Coma où la matière est en mouvement (**lignes vertes de la figure 6**).

**Figure 5** : carte modélisée de l'émission X d l'amas Coma supposé « au repos », c'est à dire sans mouvements de matière





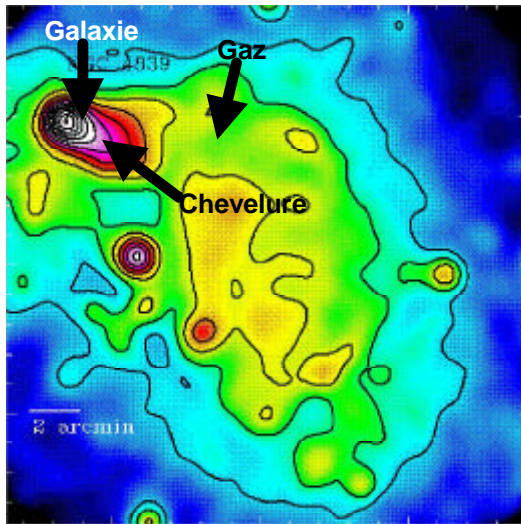
**Figure 6** : carte modélisée de température d  
l'amas Coma superposée à l'intensité de son  
spectre X calculé pour la matière en mouvement

Cette nouvelle carte révèle plusieurs zones intenses d'émission de rayons X. Au centre se trouve le cœur de Coma. En bas à droite, une seconde zone d'émission intense de rayons X est à haute température. C'est une grande structure filamentaire attirée par Coma. C'est la première fois que ce filament pouvait être détecté avec une telle précision dans le domaine des rayons X. Ce filament, non visible sur la figure 6, est orienté à son autre extrémité en direction d'un autre amas de galaxies. Cela confirme l'hypothèse selon laquelle les amas se forment au croisement des filaments. La forte température du filament, révélée par la zone claire en bas à droite de la figure 6, s'explique par l'échauffement de la matière du filament qui se comprime en tombant sur l'amas.

En bas à gauche de la figure 6, on remarque une troisième zone intense d'émission de rayons X qui est froide. Il s'agit d'une petite structure de galaxies plus froides que le gaz de l'amas. Comme le filament, ce petit groupe de galaxies est attiré par l'amas, mais sa taille étant plus petite, il tombe moins vite sur le gaz de l'amas et s'échauffe donc moins.

## Chute d'une galaxie

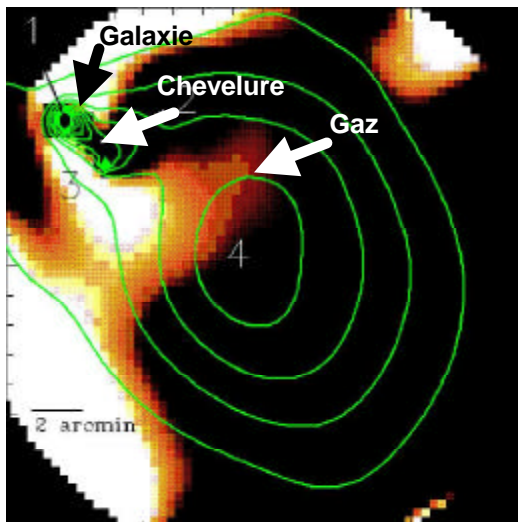
On a étudié en détail le voisinage de la galaxie NGC4839, liée à un groupe de galaxies, situé à la frontière entre Coma et le filament. L'observation de cette galaxie dans la bande d'énergie 0,5 à 2 keV (voir figure 7) montre que la galaxie est plus proche de l'amas que le gaz chaud du groupe. Cette galaxie, comme une comète s'approchant du soleil, possède



une chevelure : elle perd une partie de sa matière lors de sa chute vers l'amas. La carte des températures de cette région du ciel (voir figure 8) montre que la chevelure de NGC4839 est plus froide que les gaz de l'amas. Cette constatation est en très bon accord avec la simulation de l'attraction d'une galaxie sur un amas de galaxies où la « queue » froide de la galaxie tombant sur l'amas apparaît nettement.

**Figure 7** : carte en rayons X de la galaxie NGC4839 vue par Epic

**La galaxie est plus proche du centre de Coma à cause du gaz chaud de l'amas.** La situation est similaire à la chute d'une goutte d'eau et d'une plume tombant sur Terre. La plume, qui a pourtant la même masse que la goutte d'eau, tombe moins vite car l'atmosphère la ralentit. En étudiant ce décalage entre le gaz chaud et la galaxie, la détermination plus précise de la distribution du gaz au sein de l'amas sera possible.



**Figure 8** : carte en températures de la galaxie NGC4839 vue par Epic

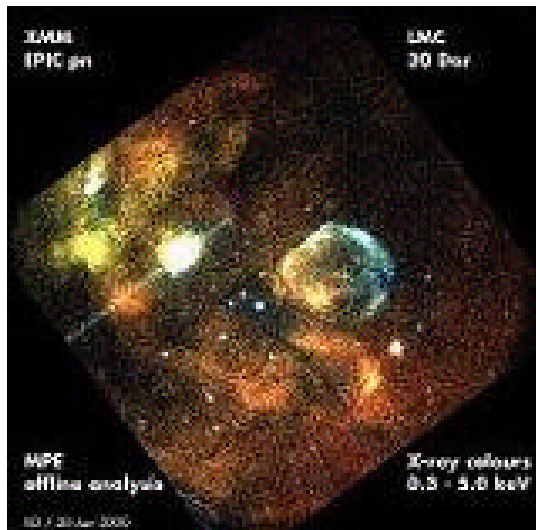
Ces premières données obtenues par XMM montrent une grande cohérence spectrale et spatiale. Cette qualité des observations permettra de déterminer précisément l'état dynamique d'autres amas de galaxies. Cette observation de l'état dynamique nous éclairera sur la formation des grandes structures de l'univers.

## Observation de restes de la supernova Tycho

### Les supernovae

Les supernovae correspondent à l'un des **événements les plus violents de l'Univers**. Deux scénarios peuvent se produire :

- une étoile massive ayant entièrement brûlé son combustible nucléaire implose en une fraction de seconde puis explose en éjectant ses couches externes. Le cœur se transforme soit en une étoile à neutrons soit en un trou noir.
- par apport progressif de matière, une naine blanche (dernier stade d'évolution d'étoiles peu massives) dépasse la limite de stabilité gravitationnelle et sa contraction déclenche la fusion nucléaire explosive de l'ensemble. Il ne reste rien.



*Image X (XMM-Newton) d'une région du Grand Nuage de Magellan : observation de restes de supernovae*

Dans les deux cas, une émission de lumière (principalement optique) extrêmement puissante se produit alors et pendant les semaines qui suivent, l'étoile émet une puissance comparable à celle d'une galaxie comprenant plusieurs milliards d'étoiles. Puis cette luminosité s'atténue et l'œil ne distingue plus rien.

Lors de cette explosion plusieurs masses solaires de matière sont éjectées à grande vitesse (10 000 km/s) dans le milieu interstellaire, créant une onde de choc. Cette onde de choc chauffe le gaz interstellaire à plus de 10 millions de degrés, ce dernier émet alors du rayonnement dans le domaine des rayons X. Ce rayonnement augmente à mesure que l'onde de choc englobe plus de matière, et on obtient une centaine d'années après l'explosion un reste de supernova dont la taille atteint quelques années-lumière.

La matière éjectée se dilue progressivement dans l'espace interstellaire mais reste identifiable des centaines d'années après l'explosion, sous forme de filaments et de gaz se déplaçant à très grande vitesse.

Dans les galaxies de type spirale comme la nôtre, une **supernova apparaît approximativement tous les trente ans**.

Les supernovae jouent un rôle très important dans la mesure où **elles enrichissent le milieu interstellaire en éléments chimiques** (carbone, oxygène, jusqu'au fer et au-delà) produits par les réactions nucléaires du cœur des étoiles, et l'explosion elle-même, à partir de l'hydrogène initial.

L'éjection à grande vitesse dans le milieu interstellaire assure le brassage de ces éléments plus lourds que l'hydrogène et la galaxie toute entière s'enrichit de ces apports.

## **Pourquoi observer les restes de supernovae ?**

Plusieurs points restent encore à éclaircir pour comprendre avec précision leurs mécanismes d'explosion :

- les mécanismes de formation (en particulier explosive) des différents éléments chimiques générés.
- les mécanismes d'instabilité de l'onde de choc lors de la traversée des couches externes de l'étoile, affectant la répartition des éléments.

Pour ces deux objectifs il faut pouvoir mesurer directement la présence de ces éléments dans la matière éjectée, à l'intérieur du reste de supernova.

Ces éléments étant chauffés eux aussi à des millions de degrés, les rayons X sont des outils de choix pour appréhender les différents phénomènes mis en jeu.

Les observatoires spatiaux précédant XMM-Newton et Chandra ont permis d'obtenir d'assez bonnes images de restes de supernovae et des spectres d'une résolution moyenne (permettant d'identifier les éléments), mais pas les deux ensemble.

**Avec XMM-Newton et Chandra, la conjugaison du spectre et de l'image avec les caméras CCD permet d'observer le spectre de petites régions d'un reste de supernova, et de former des images à une énergie particulière** (par exemple celle des raies émises par les éléments qui nous intéressent).

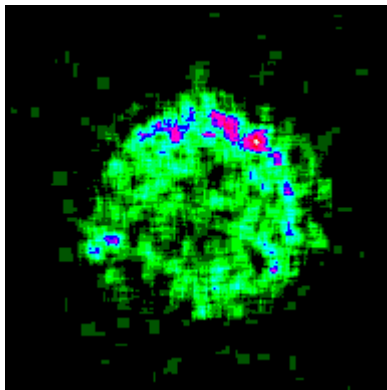
## XMM observe le reste de la supernova Tycho

En 1572, l'astronome danois Tycho Brahe observa, sans lunette, un astre nouveau, extrêmement brillant. Il montra qu'il s'agissait d'une étoile lointaine. Cet astre fut ultérieurement identifié comme une supernova, que l'on baptisa supernova Tycho. Cette supernova est vraisemblablement le fruit du deuxième mécanisme (issue d'une naine blanche).

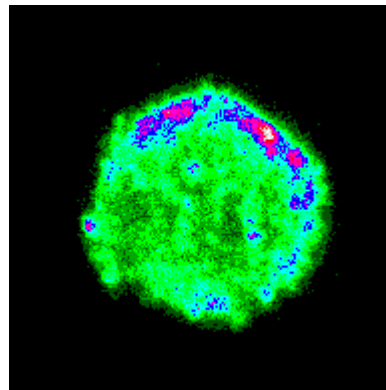
Les observations faites par XMM-Newton montrent que, **lors de l'explosion de la supernova, la matière a été éjectée de manière régulière**. En effet la forme globale est assez circulaire et peu structurée.

La spectroscopie des rayons X observés révèle différents pics d'émission X, dont la position spectrale caractérise le type d'élément chimique présent et l'intensité la concentration de cet élément, ainsi que la température du gaz environnant.

Une cartographie spatiale des rayons X caractéristiques des différents éléments chimiques silicium (Si) et fer (Fe) a permis de mettre en évidence **une grande analogie de répartition entre ces deux éléments** (figures 1 et 2) : il n'y a pas eu de fragmentation importante lors de l'explosion. Toutefois des petites différences locales sont observables.

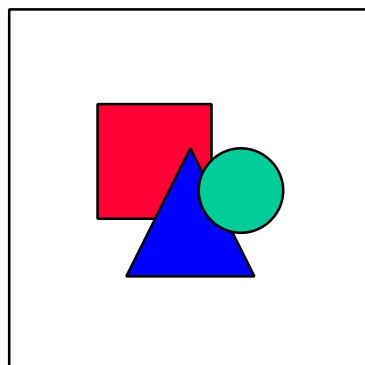


**Figure 1** : Cartographie d'émission X du Fe (Tycho)



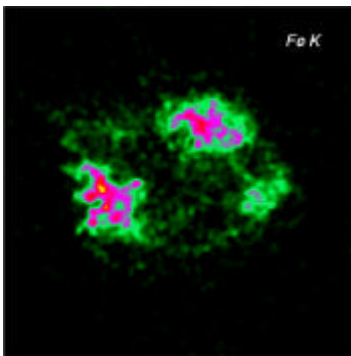
**Figure 2** : Cartographie d'émission X du Si (Tycho)

Par ailleurs, les chercheurs ont observé que, dans les zones où l'émission X des éléments chimiques est assez faible, il subsiste **une forte émission continue** (figure 3). Cette émission est vraisemblablement reliée à l'accélération de particules ultra relativistes derrière l'onde de choc, qui émettent du rayonnement synchrotron X, dans le champ magnétique local. **Ces particules sont la source des rayons cosmiques observés dans notre milieu interplanétaire.**

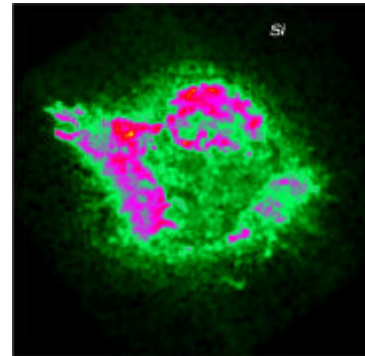


**Figure 3** : Fonds continu d'émission X (Tycho)

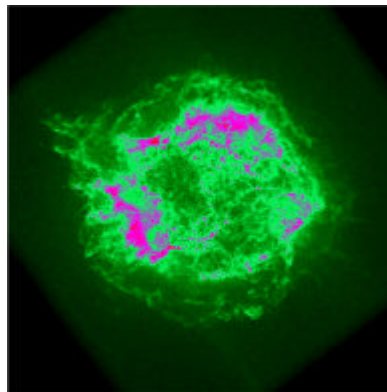
La télescope américain Chandra a, de son côté, observé un reste de supernova âgé de 320 ans environ (Cassiopeia A). Ce reste, dont on n'a pas observé la supernova, est de l'autre type (issu d'une étoile massive). Les premiers résultats ont montré que, contrairement à Tycho, **la matière a été éjectée de manière très fragmentée lors de l'explosion** et **les cartographies des raies X du fer et du silicium sont très différentes** (figures 4 et 5). L'explosion s'est produite de manière extrêmement asymétrique, et le silicium et le fer se sont retrouvés dans des zones très éloignées.



**Figure 4** :Cartographie d'émission X duFe (Cassiopeia A)



**Figure 5** :Cartographie d'émission X du Si (Cassiopeia A)



**Figure 6** :Fonds continu d'émission X (Cassiopeia A)





## **Publications :**

- Hasinger, G. et al., *Astronomy and Astrophysics*, à paraître - (numéro spécial XMM): résultats du CEA sur l'observation du pointé de Lockmann (Mystère du fonds diffus)
- Neumann, D. M. et al., *Astronomy and Astrophysics*, à paraître - (numéro spécial XMM): résultats du CEA sur l'amas Coma (amas de galaxies)
- Decourchelle, A. et al., *Astronomy and Astrophysics*, à paraître - (numéro spécial XMM): résultats du CEA sur la supernova Tycho
- Rasmussen, A. et al., *Astronomy and Astrophysics*, à paraître (numéro spécial XMM): résultats obtenus sur le détecteur RGS d'XMM-Newton
- Hwang, U. et al., *Astrophysical Journal* 537,L119 (2000): Cassiopeia A / Chandra
- Hughes, J.P. et al., *Astrophysical Journal* 528,L109 (2000): Cassiopeia A / Chandra