

Principes de l'astronomie X

On appelle rayons X des photons dont l'énergie est située entre 0,1 keV (kiloélectronvolt), ce qui correspond à une longueur d'onde de 10 nm (nanomètre), et 100 keV, soit une longueur d'onde de 0,01 nm. Le rayonnement X a pour origine l'interaction d'électrons de grande énergie avec le milieu environnant: plasma ou champ magnétique (un plasma, «quatrième état de la matière», étant un gaz très chaud composé d'électrons et d'ions). Lorsqu'un électron libre passe au voisinage d'un ion, il est décéléré, et l'énergie perdue est transférée au photon émis. La longueur d'onde du photon émis dépend de l'énergie de l'électron. Ainsi, un électron ayant une énergie de quelques kiloélectronvolts peut émettre un photon dans le domaine des rayons X.

Ce rayonnement, connu sous le nom allemand de *Bremsstrahlung* («rayonnement de freinage»), est continu, et de type libre-libre ou libre-lié suivant que, après l'interaction, l'électron est encore libre ou lié à l'ion. Il existe également un rayonnement X discontinu, ou spectre de raies, qui se produit lorsqu'un ion passe d'un état excité (où il se trouve du fait de la température élevée du plasma) à un état moins excité. C'est ainsi que l'on observe dans les éruptions solaires des raies du Fe^{XXV} (longueur d'onde autour de 20 nm), où l'ion est un atome de fer qui a perdu 24 électrons sur les 26 qu'il possède à l'état neutre. Ces électrons ont été arrachés par collision avec les électrons libres très énergétiques présents dans le plasma.

Mais le rayonnement X le plus intense et le plus répandu est le rayonnement continu dû à l'interaction entre les électrons et le champ magnétique. On l'appelle *rayonnement synchrotron* par analogie avec celui émis par les particules accélérées par le champ magnétique intense dans les grands accélérateurs de particules de type synchrotron.

Les instruments

Dans l'histoire de l'astronomie X, on distingue trois étapes successives, liées au développement des techniques: l'utilisation des fusées, puis des satellites et enfin des observatoires spatiaux. Ces différentes étapes ont été marquées par la découverte de sources X de plus en plus faibles, lointaines et nombreuses.

En astronomie X, le choix du site d'observation, en l'occurrence l'orbite du satellite, est primordial: il doit être situé en dehors des ceintures de radiations qui entourent la Terre et qui sont constituées de particules cosmiques chargées, piégées dans le champ magnétique terrestre. Ces particules représentent un danger pour les observatoires spatiaux, car, d'une part, elles peuvent détériorer les panneaux solaires, qui fournissent l'énergie aux instruments embarqués à bord du satellite, et, d'autre part, elles créent des signaux parasites dans les détecteurs.

Pour déterminer la direction du rayonnement de la source, on limite le champ du détecteur soit par collimation – procédé qui consiste à réduire par des caches la surface d'entrée du détecteur –, soit en formant une image de la source à l'aide d'un télescope. Dans le domaine X, on utilise des grilles métalliques qui permettent d'obtenir des champs de l'ordre d'une fraction de degré. Pour former l'image d'une source X, on ne peut pas utiliser un télescope conventionnel. En effet, en incidence normale (c'est-à-dire perpendiculairement à la surface du miroir du télescope), les rayons X traversent les miroirs sans être réfléchis. En revanche, sous des angles plus inclinés (d'où le nom d'incidence rasante donnée à ce type d'utilisation des télescopes), la lumière rencontre un réseau d'atomes plus serré, elle est alors mieux réfléchie; aussi utilise-t-on le plus souvent des angles d'incidence de l'ordre de 87° .

Le principe de la détection du rayonnement X est fondé sur le fait que les photons de grande énergie sont capables d'arracher les électrons des atomes; les électrons ainsi éjectés laissent ensuite une trace en arrachant à leur tour les électrons des atomes du détecteur. Dans le domaine X, les détecteurs à gaz sont couramment employés (compteurs Geiger ou compteurs proportionnels); on utilise également des compteurs où l'électron arraché par le photon X est absorbé par des impuretés présentes dans le cristal qui constitue le détecteur, et ce en émettant un rayonnement, d'où le nom de compteurs à scintillation (ou scintillateurs).

Les grandes missions d'observation

C'est en 1948 que Herbert Friedman et son équipe du NRL (Naval Research Laboratory) détectent pour la première fois, grâce à un vol de fusée, les rayons X solaires. Mais il faudra attendre 1962 pour que soit découverte, tout à fait par hasard, la première source X non solaire, Sco X-1 (une étoile brillante dans le domaine des rayons X), dans la constellation du Scorpion. L'époque des satellites d'observation dans le rayonnement X débute avec le lancement du satellite américain SAS-1 *Uhuru*, en 1970. À la même époque, plusieurs autres satellites sont lancés, comme ANS et SAS-3, ainsi que la station orbitale Skylab.

C'est en 1978 que commence la troisième étape de l'astronomie X, avec le lancement de l'observatoire spatial américain *Einstein*, auquel fit suite une nouvelle génération d'engins transportant à leur bord des télescopes spécifiques au rayonnement X: le satellite européen Exosat, lancé en 1983; les satellites japonais Tenma X et Ginga X, mis sur orbite en 1987; le module Kvant, amarré la même année à la station orbitale soviétique Mir; le satellite soviétique Granat (1989); le satellite allemand Rosat (1990) et le satellite japonais ASCA (1993). Le satellite américain CGRO (1991) est plus particulièrement dévolu à l'étude du rayonnement S mais il travaille également dans le domaine du rayonnement X.

L'observatoire spatial «Einstein»

Le satellite américain HEAO-2 fut lancé le 13 novembre 1978, transportant à son bord le premier télescope X. Peu après son lancement, il fut rebaptisé *Einstein Observatory*, pour célébrer le centenaire de la naissance du physicien. Le but de la mission était double: d'une part, observer des sources X faibles et, d'autre part, obtenir des images de sources étendues et complexes. Les résultats collectés par *Einstein* sont nombreux et variés. Ils ont permis, par exemple, de mettre au point et de tester un certain nombre de modèles concernant les mécanismes d'émission X, la formation et l'évolution des supernovae, la structure hétérogène des galaxies et des nuages galactiques. Grâce aux observations de longue durée, de nouveaux quasars de faible intensité ont été découverts dans des régions apparemment «vides» du ciel.

Exosat

Le satellite Exosat (European X-Ray Observatory Satellite) fut mis sur orbite en mai 1983. Il devait réaliser trois expériences, chacune élaborée par des équipes internationales. La première, ME (*medium energy*), était destinée, grâce à une résolution temporelle très élevée (de l'ordre de 10 Ys), à l'étude des pulsars et autres sources rapidement variables; la deuxième expérience avait pour but, au moyen de deux télescopes, de fournir des images de haute résolution spatiale (autour de 2 keV); la troisième expérience utilisait un scintillateur, travaillant entre 2 et 80 keV, destiné à l'étude des sources X brillantes. L'orbite très inclinée d'Exosat (350 km de périégée et environ 190 000 km d'apogée) lui a permis de faire des observations de longue durée, ininterrompues, coordonnées avec d'autres satellites et avec des instruments au sol. La réussite de la mission fut telle que sa durée fut prolongée au-delà des deux années prévues; c'est ainsi qu'elle ne s'est arrêtée qu'avec l'activité du satellite, en avril 1986.

Le module Kvant

Ce module, un des éléments de la station spatiale soviétique Mir, comprend plusieurs expériences regroupées sous le nom d'«Observatoire de Röntgen»: TTM, destinées à réaliser des cartes d'un certain nombre de régions complexes dans les domaines d'énergie 2-30 keV; deux scintillateurs travaillant respectivement dans les domaines 2-100 keV et 15-250 keV; enfin Pulsar X-1, un détecteur de sources X durs (d'énergie très importante) et S jusqu'à 1 300 keV. L'observatoire Röntgen a permis plus de 300 observations, dont pas moins d'une centaine pour explorer la supernova 1987 A dans le Grand Nuage de Magellan, et a également observé un certain nombre de sources X, telles que Cygnus X-1 et Hercule X-1.

Granat

Ce satellite soviétique sur lequel était embarqué le télescope européen Sigma (Système d'imagerie gamma à masque aléatoire) fut lancé en 1989. Ce télescope permet d'obtenir dans la gamme d'énergie de 30 keV à 1,3 MeV une résolution angulaire de l'ordre de la minute d'arc. Il a fourni la première image S du centre de notre Galaxie, mis en évidence plusieurs sources ponctuelles variables et découvert, avec la nova de la Mouche en 1991, une nouvelle classe d'objets qui seraient des trous noirs.

Rosat

Rosat (Röntgen Satellite, en l'honneur du physicien allemand qui découvrit les rayons X) est un satellite allemand, mais réalisé avec une forte participation anglaise et américaine. Lancé le 1^{er} juin 1990, il a permis de faire passer le nombre de sources X connues de 1 000 à 100 000 et contribué à la compréhension de la nature de la mystérieuse source Geminga, qui se révèle être le plus proche pulsar, à moins de 300 al de nous.

Chandra et XMM

Depuis, le lancement de ces premiers observatoires spatiaux, l'astronomie X n'a cessé de se développer et d'ouvrir de nouveaux champs de recherche à la cosmologie. Lancé de Kagoshima en 1993, l'observatoire japonais ASCA est toujours en opération en 2000.

En 1999-2000, pointés vers deux des galaxies les plus proches de notre Voie lactée, les détecteurs en rayonnement X de l'observatoire spatial américain Chandra (lancé en juillet 1999 par la navette Columbia) ont révélé un grand nombre de trous noirs jusque-là non détectés (ou quasars de type II). Ainsi, au centre de la galaxie d'Andromède, distante de 2,5 millions d'années de lumière, Chandra a décelé un trou noir d'une masse égale à environ 30 millions de fois celle du Soleil. Puis, dans la galaxie M 82, située à 11 millions d'années de lumière, le satellite a découvert de nombreux restes de supernovae et des étoiles binaires émettant en rayonnement X ; l'éclat de ces étoiles doubles est dû au fait qu'elles sont accompagnées d'un trou noir qui aspire leur matière en la chauffant à plusieurs millions de degrés.

Doué d'une résolution inférieure à celle de l'observatoire Chandra de la NASA (6 secondes d'arc contre 0,5 seconde d'arc), XMM, l'observatoire spatial européen du rayonnement X, lancé en décembre 1999, a une capacité collectrice près de cinquante fois supérieure à celle de son concurrent américain, ce qui lui permet de déceler des sources de faible intensité, et dans une large gamme d'énergie. Chandra et XMM ont été rejoints par d'autres observatoires spatiaux du rayonnement X : l'observatoire américano-japonais ASTRO-E, l'observatoire spatial italo-néerlandais Beppo-SAX. Le but ultime de toutes ces missions est de franchir un pas supplémentaire dans la connaissance de l'Univers – en ce qui concerne sa structure, sa taille, son âge, son évolution –, et donc de confirmer ou, au contraire, d'infirmer les théories cosmologiques existantes.

En effet, la plupart des techniques astronomiques classiques ne permettent réellement de donner que des

distances relatives. Analysé par le télescope spatial Chandra, le rayonnement X de l'étoile Cygnus X-3 a permis de mieux connaître les distances de cet objet cosmique. Cygnus X-3 est une source variable de rayonnement X (cette émission varie sur une période de 4,8 heures) ; les poussières interstellaires diffusent le rayonnement X selon des proportions différentes, créant ainsi une sorte de «halo» de rayonnement. En mesurant la différence entre le temps que mettent à nous parvenir le rayonnement provenant du centre du halo et celui provenant de sa périphérie, les astronomes ont pu calculer que l'étoile Cygnus X-3 était distante de 30 000 années-lumière. Appliquée à d'autres sources variables de rayonnement X dans d'autres galaxies (en particulier dans le Grand Nuage de Magellan), cette technique permettra peut-être enfin de mesurer plus exactement le taux d'expansion de l'Univers.