

propriétés physiques de ces objets ainsi que leur décalage vers le rouge. Ce travail a été rendu possible par le télescope géant *Keck*, à Hawaï. Environ 80 pour cent des sources identifiées par ROSAT se sont révélées être des noyaux actifs de galaxies. On a longtemps pensé que ces noyaux étaient des quasars et des galaxies (dites de Seyfert) de type 1 : des sources dont les larges raies d'émission suggèrent que nous observons directement leurs régions les plus centrales, où de pantagruéliques trous noirs font bombance. En aspirant la matière environnante, ils convertissent de façon très efficace son énergie gravitationnelle en rayonnement, provoquant ainsi d'intenses flambées de rayons X.

Vautrés dans la poussière

Dans l'Univers local, nous connaissons d'autres types de noyaux actifs, nommés galaxies de Seyfert de type 2 ou quasars de type 2, qui se manifestent par des spectres dont les raies d'émission sont étroites, voire inexistantes. Aujourd'hui, dans le cadre du «modèle unifié des noyaux de galaxies» proposé au milieu des années 1980, on sait expliquer l'existence d'un second type de noyaux actifs. Ce modèle postule que les noyaux actifs de galaxies possèdent non seulement un trou noir central, mais aussi un tore de gaz et de poussière. En fonction de son orientation par rapport à l'observateur, ce tore peut, dans certains cas, cacher le trou noir. Le modèle a été amélioré, mais ces prévisions de base ont été conservées.

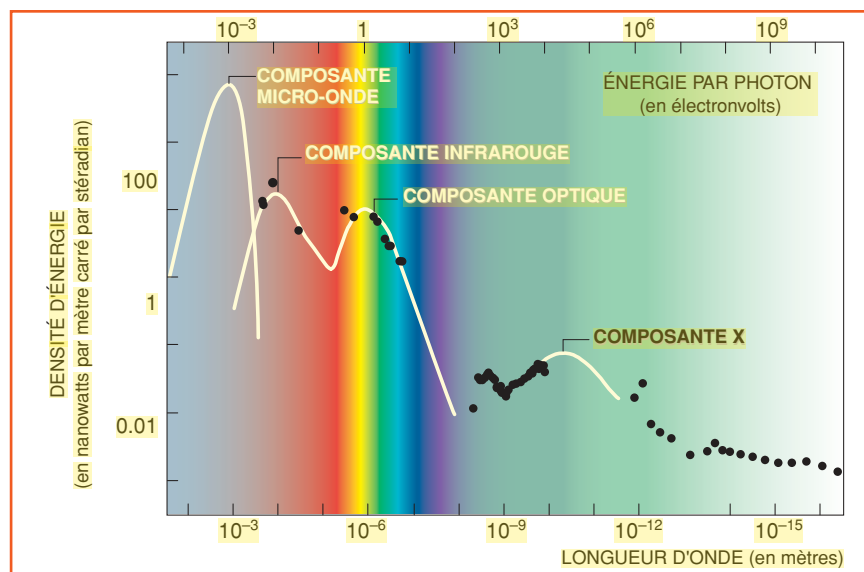
Ce résultat étant acquis, un paradoxe est apparu lorsque les astronomes s'en sont servi pour mettre en œuvre leur seconde stratégie, la synthèse de population. Ils ont combiné les spectres des différents types de noyaux actifs en tenant compte de leur proportion observée dans l'Univers local. Ils espéraient que le spectre résultant correspondrait bien à celui du fond diffus dans le domaine des rayons X. Ce ne fut pas le cas. Les spectres des noyaux actifs de galaxies de l'Univers local sont plats, alors que, comme nous l'avons dit, le fond diffus présente un pic à 30 kiloélectronvolts. En 1989, Giancarlo Setti, de l'Université de Bologne en Italie, et Lo Woltjer, de l'Observatoire de Haute-Provence, en France, ont proposé une solution à ce problème. Selon eux, nos modélisations par synthèse de population étaient fondées sur l'attribution de mauvaises proportions aux différents

types de noyaux actifs de galaxies. G. Setti et L. Woltjer affirmèrent que, contrairement à ce qui avait été supposé, la majorité des sources du fond diffus X est constituée de noyaux actifs de galaxies de type 2 (et non de type 1), obscurcis par la poussière, mais dont les trous noirs centraux, supermassifs, émettent des rayons X très énergétiques pouvant traverser leurs tores de gaz et de poussière (tandis que la partie moins énergétique de leur spectre est absorbée). Ce type de population produirait un spectre différent de celui que l'on calculait et qui, peut-être, correspondrait mieux aux observations.

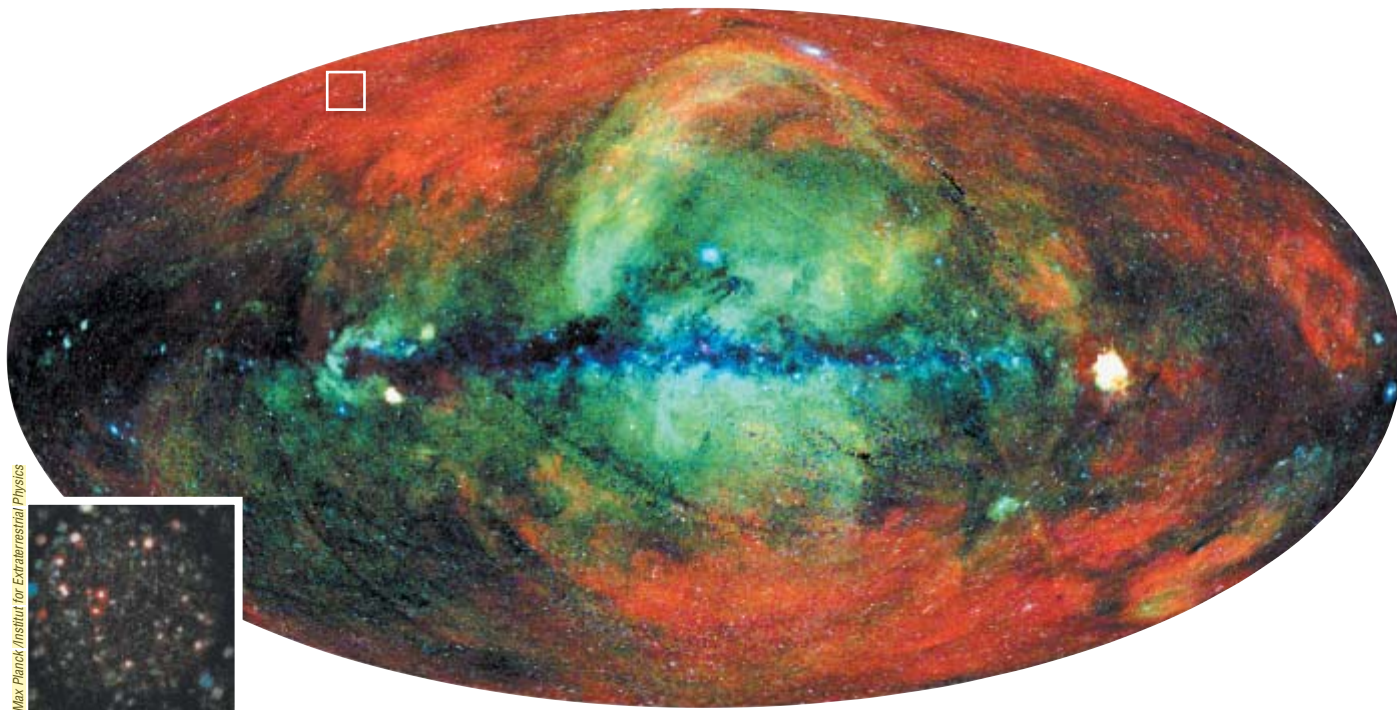
Les théoriciens ont alors utilisé la synthèse de population pour déterminer la combinaison de noyaux actifs de galaxies qui explique le spectre du fond diffus, en tenant compte de la façon dont ces objets évoluent au cours du temps. Ainsi, Andrea Comastri et ses collègues de l'Institut Max Planck de Garching, en Allemagne, ont montré que les modèles de synthèse de population expliquent le spectre du fond diffus en rayons X jusqu'à environ 300 kiloélectronvolts si la majorité (80 à 90 pour cent) de l'énergie produite dans le trou noir est voilée par un nuage épais. En retour, pour expliquer l'intensité de l'émission reçue, on doit considérer que le nombre de trous noirs supermassifs est beaucoup plus grand que prévu. On

pense qu'ils se sont formés dans presque toutes les galaxies. Ces monstres seraient peut-être passés inaperçus sans l'étude du fond cosmique dans le domaine des rayons X.

Signalons qu'un paradoxe semblable a été résolu de façon analogue dans les domaines visible et infrarouge. Le fond diffus visible est la somme des émissions des étoiles, décalées vers le rouge par effet Doppler en raison de l'expansion de l'Univers. Le fond infrarouge a un spectre identique à celui de la poussière chauffée par le rayonnement stellaire à des températures comprises entre 10 et 100 kelvins (et, lui aussi, décalé vers le rouge). L'énergie correspondant à l'émission de poussière doit, au bout du compte, prendre sa source dans les étoiles (et les noyaux actifs de galaxies). Cependant le fond diffus infrarouge est plus brillant que le fond diffus visible... comme si la Lune, qui réfléchit la lumière du Soleil, était plus brillante que le Soleil ! Comme précédemment la solution consiste à supposer qu'une fraction notable des sources de rayonnement dans l'Univers est occultée par du gaz et de la poussière : les étoiles formées dans l'Univers jeune sont beaucoup plus nombreuses que prévu, mais elles sont masquées par la poussière, la composante visible du fond diffus ne représentant, pour ainsi dire, que la partie émergée de l'iceberg stellaire.



4. LE FOND DIFFUS est produit par l'ensemble des objets célestes qui ont peuplé l'Univers. Ce spectre, établi par les astronomes à l'aide de leurs observations (les points noirs), présente quatre maxima qui correspondent aux différents rayonnements produits. La lumière fossile du plasma primordial décalée vers le rouge par l'expansion universelle domine la composante dans le domaine des micro-ondes : c'est le fond diffus cosmologique. Le fond infrarouge est produit par les poussières qui emplissent les galaxies et qui sont chauffées surtout par la formation d'étoiles. La partie optique du fond diffus correspond à l'émission des étoiles libres de toute poussière ; enfin, celle du domaine X est engendrée par des trous noirs supermassifs tapés au cœur de nombreuses galaxies.



Max Planck Institut für Extraterrestrische Physik

5. LA COMPOSANTE X DU FOND DIFFUS est facile à identifier : c'est la brume qui recouvre les régions du ciel loin du plan de la Voie lactée (la bande horizontale). Le satellite ROSAT a enregistré en détail le Trou

de Lockman, une trouée qui nous permet d'observer l'Univers lointain (dans le cartouche). Les couleurs représentent des rayons X d'énergie élevée (en bleu), moyenne (en vert) et basse (en rouge).

Les astronomes ont fait une «radio-graphie» de l'Univers lointain en observant les rayons X durs pour lesquels le milieu interstellaire est parfaitement transparent. L'observatoire spatial *Chandra* et le satellite *XMM-Newton* ont exploré le ciel à des énergies supérieures à celles de ROSAT, jusqu'à dix kiloelectronvolts. Les équipes dirigées par R. Giacconi et Gordon Garmino, de l'Université de Pennsylvanie, ont réalisé les relevés les plus précis, grâce au satellite *Chandra*. Ces relevés ont résolu au moins 80 pour cent du fond diffus dans le domaine des rayons X durs. En les comparant aux relevés optiques, les astronomes ont commencé à identifier les images de ces sources dans le domaine visible.

Notre sympathique voisin ULIRG

À ce jour, les sources identifiées correspondent à un mélange de noyaux actifs de types 1 et 2, en excellent accord avec les prévisions du modèle. Il est intéressant de noter qu'environ dix pour cent des sources découvertes par *Chandra* sont des galaxies très peu lumineuses, vraisemblablement des galaxies normales qui ne contiennent pas de noyau actif. Leur émission est due à un gaz intensément chauffé par la formation de grandes quantités d'étoiles.

Aujourd'hui, les astronomes élaborent une troisième méthode pour ana-

lyser le fond diffus. Ils cherchent, dans l'Univers local et contemporain, des objets – des fossiles vivants, en quelque sorte – qui se comportent comme les galaxies de type 2 que l'on observe dans l'Univers lointain et qui, peuplant le cosmos dans un passé reculé, sont responsables de l'essentiel du fond diffus. L'un de ces fossiles est la galaxie NGC 6240, étrange habitant du voisinage de la Voie lactée et membre de la classe exotique des ULIRG (acronyme de l'anglais *Ultra-luminous infrared galaxy*). Ces galaxies émettent la majeure partie de leur rayonnement dans le proche infrarouge, ce qui trahit le fait qu'elles sont saturées de poussière. Comme la poussière est constituée d'éléments lourds qui sont synthétisés dans les étoiles et redistribués dans l'espace intersidéral lorsque ces étoiles meurent, la présence de quantités prodigieuses de poussière résulte nécessairement d'épisodes d'intense formation stellaire. Alors que la Voie lactée ne produit que quelques nouvelles étoiles par an, NGC 6240 en produit des centaines. NGC 6240 est également dotée d'un des trous noirs les plus voraces de l'Univers local. L'étude de NGC 6240 a révélé que son spectre moyen présente le même profil que celui de la composante infrarouge du fond diffus. Ainsi, cette galaxie contient tous les ingrédients dont nous avons besoin pour expliquer ce fond diffus. En particulier, on comprend mieux pourquoi les galaxies de type 2 (obscurcies par la poussière)

sont prépondérantes dans l'Univers jeune : les galaxies entourant ces noyaux actifs étaient le siège d'épisodes de sursaut de formation stellaire, produisant de grandes quantités de poussières qui nous masquent leur trou noir. Ainsi, la formation stellaire et la présence de trous noirs voraces étaient beaucoup plus fréquentes par le passé qu'aujourd'hui. Pourquoi les épisodes de sursaut de formation stellaire et les noyaux actifs de galaxies vont-ils de pair ? La réponse n'est pas certaine, mais presque toutes les ULIRG – y compris NGC 6240 – présentent des signes indéniables de collision récente avec une autre galaxie. Ces collisions multiples favoriseraient la fusion de trous noirs formant des monstres supermassifs et déclencheraient, par ailleurs, des flambées de natalité stellaire.

Toutefois, ces deux phénomènes ne contribuent pas de façon équivalente au fond diffus. Les trous noirs supermassifs, aspirant la matière qu'ils chauffent à des températures de millions de kelvins, dominent le fond dans le domaine des rayons X, tandis que les flambées de formation d'étoiles contribuent surtout à la composante infrarouge. Ceci a été démontré à l'aide de la méthode de synthèse de population par Omar Almaini et ses collègues de l'Observatoire d'Édimbourg, en Écosse, qui ont estimé que 30 pour cent au plus du fond infrarouge était dû aux noyaux actifs de galaxies. L'un