

d'Hyménoptères sont interfécondes, fertilité qui disparaît en présence de la bactérie. Cette dernière joue donc un rôle primordial dans l'isolement reproductif de certaines espèces et pourrait avoir été au fil de l'évolution, un facteur supplémentaire des mécanismes de spéciation.

La stabilité des associations avec *Wolbachia*

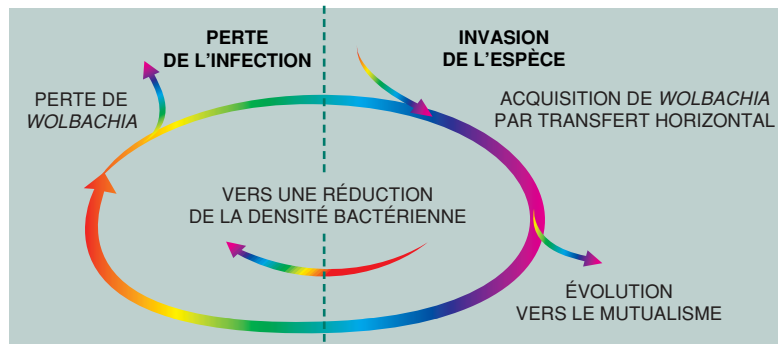
Ainsi, *Wolbachia* peut coloniser de nouveaux hôtes par transfert horizontal, puis se répandre dans les populations grâce à sa capacité de manipuler la reproduction. Ces deux phénomènes expliquent le succès évolutif de la bactérie, mais soulèvent une nouvelle question : pourquoi *Wolbachia* n'infecte-t-elle pas plus d'espèces ? Deux hypothèses sont proposées. Selon la première, toutes les espèces ne sont pas « infectables ». Pour s'installer dans une nouvelle espèce, *Wolbachia* doit museler le système immunitaire de l'hôte, et certaines espèces sont peut-être résistantes à la bactérie.

Selon la seconde hypothèse, simultanément aux acquisitions par transfert, certaines espèces pourraient perdre leur parasite, privant la bactérie d'une espèce hôte. Les associations à *Wolbachia* ne seraient pas stables dans le temps. On a montré qu'une fois une association installée, l'évolution des deux partenaires s'accompagnerait d'une réduction de l'effet de la bactérie sur la reproduction de l'hôte ne permettant plus à la bactérie de se maintenir, et entraînant la disparition de l'infection. Quelques données semblent étayer cette seconde hypothèse. Chez les parasitoïdes de la drosophile, nous avons observé que l'intensité de l'incompatibilité cytoplasmique rencontrée dans une espèce est liée à la prévalence de l'infection dans cette espèce. Ainsi, chez *Lepidopilina heterotoma*, la quasi-totalité des individus est infectée et l'incompatibilité cytoplasmique est complète. Au contraire, chez *Pachycrepoides dubius*, la bactérie n'a pas d'effet détectable, et les populations sont peu infectées (35 pour cent des individus en moyenne) : cette espèce serait en train de se débarrasser de l'infection.

Quel scénario peut-on ébaucher quant à l'évolution des associations avec *Wolbachia* ? Une espèce initialement non infectée acquiert *Wolbachia* par transfert horizontal. Seules les bactéries capables d'avoir des effets sur la reproduction se maintiennent dans les populations. Les deux partenaires coévoluent jusqu'à ce que l'infection disparaisse. Ainsi, on s'interroge : la capacité de *Wolbachia* à modifier la reproduction de ses hôtes ne se maintient-elle pas grâce aux transferts horizontaux qui lui permettent de coloniser de nouveaux hôtes, seules les bactéries ayant un effet notable sur la reproduction étant retenues ?

En dehors de cette dynamique d'acquisition et de perte de l'infection, *Wolbachia* peut suivre une autre voie évolutive : elle peut devenir mutualiste. En effet, ce n'est que dans ces conditions, où le symbiote apporte un avantage à son hôte, que l'association pourrait être stabilisée à l'échelle de l'espèce. C'est ce qui s'est produit chez un autre parasitoïde de drosophile, *Asobara tabida*. Chez cette espèce, nous avons montré que la présence de *Wolbachia* est nécessaire à la production d'œufs.

Les nématodes entretiennent aussi des relations mutualistes avec *Wolbachia*, qui infecte la majorité des filaires. Aujourd'hui, les *Wolbachia* des nématodes sont distinctes des *Wolbachia* qui infectent les arthropodes, et l'on n'observe plus de transferts horizontaux de la bactérie, mais uniquement des transferts par la descendance.



5. STABILITÉ DES ASSOCIATIONS avec *Wolbachia*. À l'échelle de l'évolution, certaines associations seraient instables. La bactérie est d'abord acquise par transfert horizontal par une nouvelle espèce. Quand son effet sur la reproduction est intense, elle se répand dans la population infectée. Les partenaires coévoluent et, parfois, l'effet pourrait diminuer, voire disparaître et entraîner la perte de la bactérie. Pour que l'association soit stabilisée, une association mutualiste doit s'installer entre la bactérie et l'hôte.

Wolbachia est un exemple étonnant d'association entre un micro-organisme et un hôte. Toutefois, cette bactérie n'est pas simplement un cas d'école et on étudie comment l'utiliser à des fins agronomiques ou médicales. Pourrait-elle devenir un agent de lutte contre les nématodes, ce qui nous permettrait de lutter contre de nombreuses pathologies humaines difficiles à traiter ? Des antibiotiques qui élimineraient *Wolbachia* détruiraient les filaires (puisque la bactérie est devenue indispensable à leur reproduction). On envisage aussi d'utiliser l'incompatibilité cytoplasmique pour contrôler des populations de ravageurs ou des vecteurs d'agents pathogènes, ou pour répandre des gènes : si l'on parvenait à introduire des gènes dans *Wolbachia* et à relâcher des insectes infectés par cette bactérie, cette dernière envahirait les populations visées et répandrait le gène d'intérêt. Cette technique a été envisagée pour répandre des gènes de résistance à l'agent du paludisme chez les moustiques. Toutefois, ces utilisations imposeraient que l'on sache manipuler avec précision le matériel génétique de *Wolbachia* et que l'on maîtrise les transferts artificiels vers de nouvelles espèces ainsi que les phénomènes d'invasion.

La découverte des bactéries *Wolbachia*, l'un des symbiotes les plus répandus dans le monde animal, a révélé une nouvelle voie de la symbiose : la manipulation de la reproduction. Aujourd'hui, on connaît d'autres organismes qui utilisent cette même voie pour se répandre dans les populations hôtes. Plus de six projets de séquençage complet de *Wolbachia* sont en cours, qui devraient révéler les mécanismes d'action de cette bactérie féministe.

Fabrice VAVRE est chargé de recherche au CNRS dans le Laboratoire Biométrie et biologie évolutive, dirigé par Christian GAUTIER, à l'Université Claude Bernard – Lyon I.

Frank DEDEINE et al., *Removing symbiotic Wolbachia specifically inhibits oogenesis in a parasitic wasp*, in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 98, pp. 6247-6252, 2001.

Seth BORDENSTEIN et al., *Wolbachia-induced incompatibility precedes other hybrid incompatibilities in Nasonia*, in *Nature*, vol. 409, pp. 707-710, 8 février 2001.

Claudio BANDI et al., *Wolbachia in filarial nematodes : evolutionary aspects and implications for the pathogenesis and treatment of filarial diseases*, in *Veterinary parasitology*, vol. 98, pp. 215-238, 2001.

Le grand inventaire cosmique

GÜNTHER HASINGER • ROBERTO GILLI

Le jour approche où les astronomes connaîtront avec certitude tous les objets susceptibles d'émettre de la lumière dans l'Univers.

Avons-nous vu tout ce qu'il y a à voir dans l'Univers? La réponse à cette question est non, bien sûr, car l'Univers observable et ses 10 000 milliards de milliards de milliards d'années-lumière cubes sont très loin d'avoir été explorés. Nous sommes aussi incapables de cataloguer l'ensemble des corps célestes existants que les entomologistes le sont de connaître chacun des scarabées qui peuplent la Terre. Toutefois, au même titre qu'un biologiste peut prétendre connaître les principales espèces de mammifères terrestres, par exemple, les astronomes sont sur le point de terminer l'inventaire des différentes classes d'objets susceptibles d'émettre ce qu'ils qualifient de lumière – c'est-à-dire, des ondes électromagnétiques du domaine radio au rayonnement gamma, en passant par les micro-ondes, les infrarouges ou les ultraviolets.

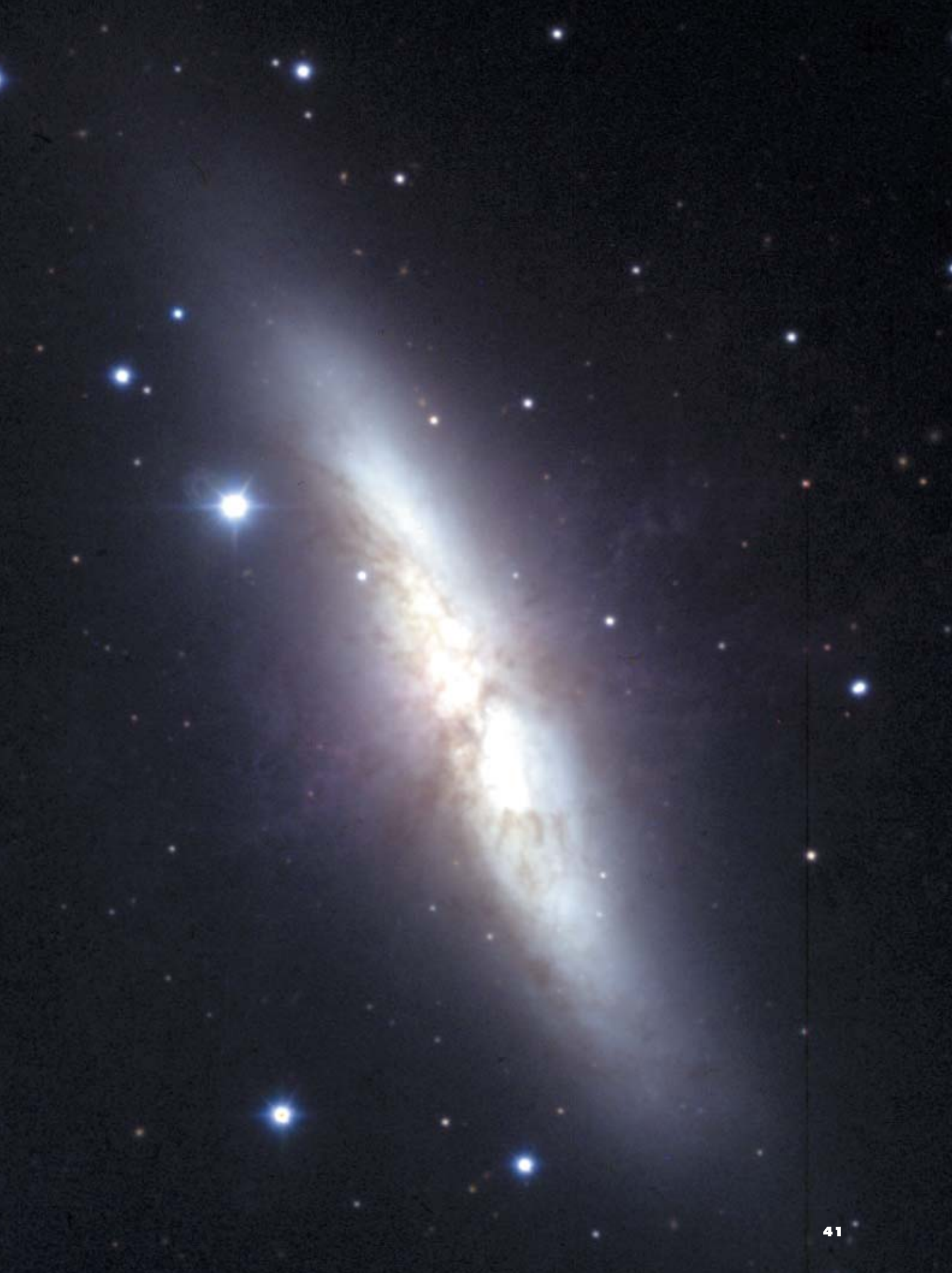
Le principe de cet inventaire consiste à étudier ce que les observateurs considèrent habituellement comme une nuisance : le fond diffus cosmique. Quand les astronomes parlent de fond diffus, ils font allusion à ce que les chercheurs des autres disciplines nomment bruit de fond, c'est-à-dire tout ce qui ne constitue pas l'objet de leur étude. Un télescope qui collecte la lumière provenant d'une étoile donnée ne peut éviter de capturer des photons issus d'autres objets proches ou lointains. Cette lumière superflue ne fait que réduire la précision de la mesure souhaitée. Ceux d'entre nous qui cherchent à établir l'inventaire des différentes classes d'objets célestes étudient précisément ce que leurs collègues négligent. Tout d'abord, nous enregistrons toute la lumière issue d'une région donnée du ciel. Ensuite, nous soustrayons les contributions dues aux objets connus, tels les étoiles, les galaxies et les nuages de gaz. S'il reste une lueur dif-

fuse d'origine non identifiée, nous en déduisons que notre recensement n'est pas encore complet.

Le fond diffus

Le terme de fond diffus évoque en général le fond diffus cosmologique. Ce rayonnement radio et micro-onde omniprésent n'est pas constitué de sources ponctuelles non identifiées, mais semble avoir une origine vraiment diffuse, en l'occurrence un plasma chaud très homogène qui baignait l'Univers 400 000 ans après le Big Bang. Cependant, d'autres fonds s'ajoutent à ce rayonnement fossile pour contribuer à «cette obscure clarté qui tombe des étoiles», notamment les fonds diffus X, infrarouge et visible (parfois qualifié d'optique). Le recensement des sources et l'estimation précise de leur contribution aux diverses composantes du fond diffus sont l'une des tâches les plus ardues de l'astronomie. Comme nous l'avons vu, dans son principe, cette estimation est simple puisqu'elle ne consiste qu'à soustraire de la totalité du signal reçu l'ensemble des sources identifiées entre la Terre et l'Univers profond : le bruit engendré par le détecteur lui-même, le rayonnement issu de notre propre Système solaire, l'émission de notre galaxie, et ainsi de suite. Il faut, de plus, évaluer le signal d'arrière-plan en tenant compte du fait qu'il a pu, lors de son trajet jusqu'à nous, être atténué et partiellement absorbé par la matière intergalactique. Dans la pratique,

1. CERTAINES GALAXIES, telle M82, abritent un trou noir supermassif et produisent des étoiles à un rythme effréné, dix fois supérieur à celui de la Voie lactée. Elles émettent probablement l'essentiel du rayonnement électromagnétique qui emplit l'Univers et qui constitue le fond diffus cosmique.





Roger Ressmeyer/Corbis

2. LA VOIE LACTÉE apparaît comme une simple traînée laiteuse à l'œil nu, mais se décompose en 100 milliards d'étoiles lorsqu'on l'observe à l'aide d'un télescope (*dans le cartouche, la constellation de l'Autel*). Il en va de même du fond diffus, cette faible lueur qui emplit le ciel entre les étoiles et qui est produite par l'ensemble des objets lointains de l'Univers que l'on peut, aujourd'hui, recenser.



WFI/European Southern Observatory

cette méthode se révèle difficile, car la soustraction est une opération qui amplifie les erreurs. Par chance, dans certains domaines du spectre, le fond diffus constitue le signal le plus brillant. En revanche, dans d'autres domaines, notre travail revient à extraire un simple murmure d'une cacophonie cosmique. En général, nos conclusions sont limitées par la précision avec laquelle nous connaissons l'émission d'avant-plan. En dépit de ces obstacles, nous sommes parvenus à caractériser le spectre du fond diffus avec une assez grande précision et sur un domaine spectral assez large (voir la figure 4).

Le grand recensement

La composante du fond diffus dans le domaine des rayons X fut découverte en 1962. Son spectre présente un maximum autour de 30 kiloélectronvolts et s'étend de façon continue vers les énergies plus élevées. En deçà de un kiloélectronvolt, on trouve un grand nombre de raies d'émission provenant de noyaux atomiques, superposées à ce spectre continu, et qui semblent être l'empreinte d'un gaz chauffé à plusieurs millions de kelvins à l'intérieur ou autour de notre galaxie. Dans les années 1970, les premiers satellites sensibles aux rayons X, tels *Uhuru*, *Ariel V* et *HEAO 1*, ont montré que l'émission X de plus forte énergie était répartie de façon uniforme sur

l'ensemble de la voûte céleste. On en déduisit que son origine est extragalactique. En effet, si la matière responsable de ce rayonnement était répartie comme celle de notre galaxie, l'éclat du fond diffus serait plus important dans le plan de la Voie lactée (ou dans le plan de l'écliptique si le rayonnement était émis par le Système solaire). Les satellites sensibles aux rayons gamma, tels *SAS-3*, *COS-B* et *Compton-GRO*, ont confirmé que les rayonnements plus énergétiques encore suivent également cette répartition uniforme.

Le fond cosmologique micro-onde et le fond diffus de rayons X dominent l'éclat du ciel dans leur domaine respectif du spectre électromagnétique. Ce n'est pas le cas pour le reste du fond diffus. Ainsi, sa composante infrarouge n'a été identifiée qu'en 1996 par Jean-Loup Puget et ses collègues de l'Institut d'astrophysique spatiale, à Orsay, et n'a été mesurée de façon précise qu'il y a deux ans. En lumière visible et dans le domaine ultraviolet, les premières mesures du fond cosmique ont été réalisées par Rebecca Bernstein et ses collègues de l'Institut de technologie de Californie. Avant ces mesures directes, les astronomes se contentaient d'évaluer le fond optique en extrapolant la distribution des galaxies les moins brillantes décelables sur certaines images prises par le télescope spatial *Hubble*. Quant à la composante du fond diffus

dans l'ultraviolet lointain, elle est absorbée par l'hydrogène... qui constitue l'essentiel du milieu interstellaire. En conséquence, dans ce domaine, les astronomes ne disposent que d'estimations fondées sur l'extrapolation des mesures obtenues dans les domaines adjacents du spectre, les ultraviolets moyens et les rayons X de basse énergie.

Quelles sont les sources des différentes composantes du fond diffus? En fait, chaque composante est constituée d'émissions venues de différentes classes d'objets astronomiques. La lumière des étoiles, dont l'énergie est issue de la fusion thermonucléaire, ne contribue qu'aux domaines infrarouge proche, optique et ultraviolet. Cependant, les quasars et autres noyaux actifs de galaxies alimentent tout le spectre électromagnétique, des ondes radios aux rayons gamma. Quant aux nuages de poussière interstellaire, ils absorbent la lumière visible, et les rayonnements ultraviolets et X, mais restituent cette énergie sous forme de rayonnement infrarouge. Pour compliquer encore un peu notre problème, le fond diffus, en chaque point du ciel, est la somme des émissions issues d'objets qui sont situés tout au long de la ligne de visée, c'est-à-dire à des époques différentes de l'histoire de l'Univers. Ainsi nombre de ces objets ont disparu de l'Univers contemporain, tandis que les astres que l'on observe aujourd'hui n'existaient

pas lorsqu'une grande partie du fond a été émise. Pour répondre à notre question, on attaque le problème de deux façons différentes. La première consiste à réaliser des observations avec la résolution spatiale et la sensibilité la plus élevée possible, afin de distinguer le maximum de sources dans le fond diffus. Ensuite, nous utilisons une seconde technique, nommée synthèse de population : nous calculons l'émission attendue pour différentes combinaisons possibles d'objets, et nous comparons ces prédictions aux mesures du fond, en faisant varier les combinaisons jusqu'à obtenir le meilleur ajustement.

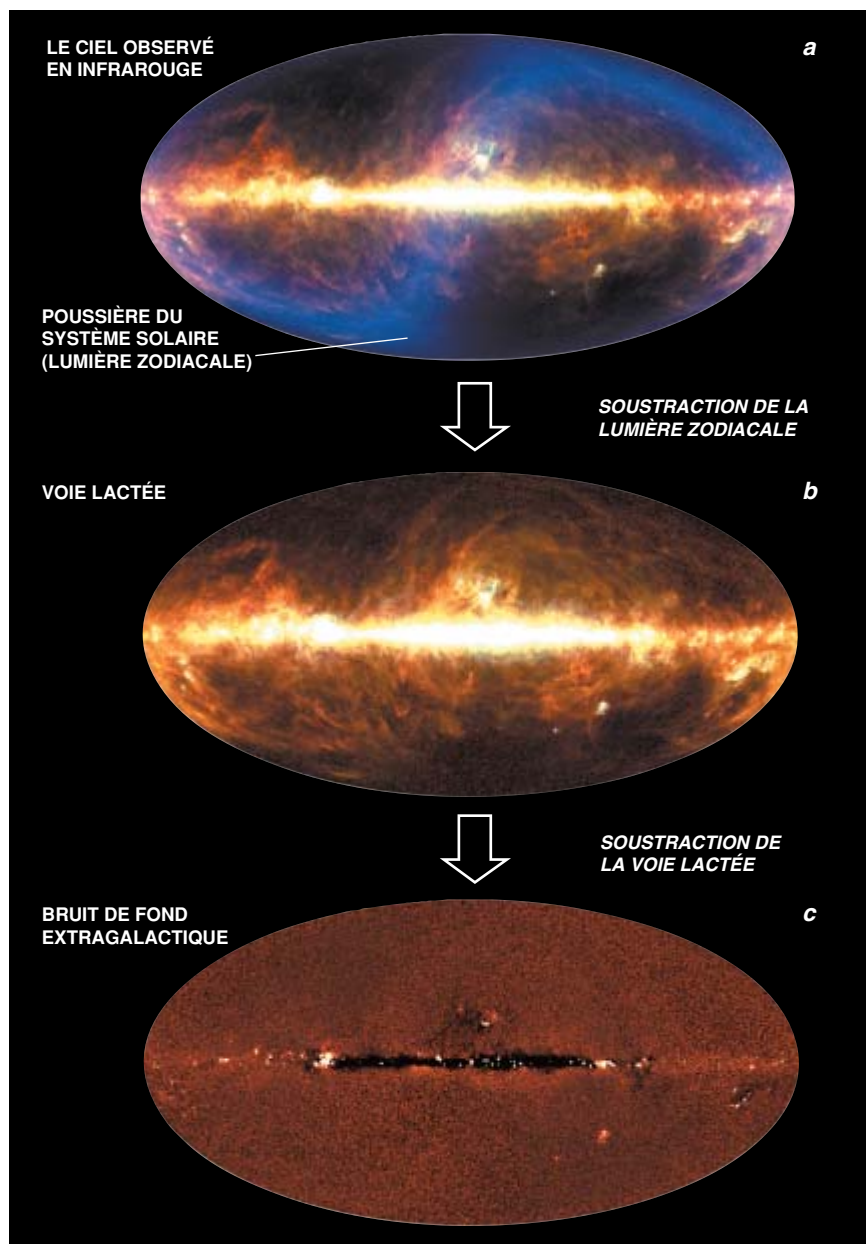
Trous noirs galactiques

La composante X du fond diffus, la première à avoir été identifiée, a fait l'objet de nombreuses études. Pendant 30 ans, on s'est demandé si elle était produite par un ensemble de sources ponctuelles que l'on ne parvenait pas à distinguer ou par une forme de gaz diffus et très chaud baignant l'environnement extragalactique. Dans les années 1990, on est arrivé à un consensus à l'aide d'un raisonnement indirect. Si le milieu intergalactique est rempli d'un gaz chaud assez dense pour rendre compte du fond diffus dans le domaine des rayons X, ce gaz doit se manifester dans d'autres domaines, notamment en masquant partiellement le fond cosmologique micro-onde. Ainsi, la lumière fossile de l'Univers primordial ne devrait pas nous apparaître sous la forme du spectre de corps noir parfait prévu par la théorie du Big Bang. Or, les observations du fond diffus, en particulier celles qui ont été obtenues par le satellite COBE, ont fait apparaître un spectre identique à celui du corps noir. On en déduit que seule une petite fraction du fond dans le domaine des rayons X provient d'un gaz intergalactique chaud : pour l'essentiel, cette composante du fond cosmique doit être constituée de sources discrètes non identifiées. Lesquelles ? Les premiers relevés systématiques ont été réalisés au début des années 1980 par Ricardo Giacconi et ses collègues de l'Université de Pennsylvanie, découvreurs du fond diffus dans ce domaine, à l'aide du satellite *Einstein*. À l'époque, ils sont parvenus à décomposer environ cinq pour cent du fond diffus en sources ponctuelles, parmi lesquelles on trouvait de nombreux quasars. Par la suite, les astronomes ont continué le travail à l'aide du satellite ROSAT. À partir de 1990,

et pendant dix ans, la mise en œuvre des relevés du fond diffus dans le domaine des rayons X a occupé des centaines d'astronomes à travers le monde.

Le satellite ROSAT a effectué des relevés très profonds d'une portion du ciel connue des astronomes sous le nom de «trou de Lockman». Proche de la constellation de la Grande Ourse, il s'agit d'une percée, entre les astres de la Voie lactée, qui nous permet d'observer l'Univers lointain. Les images du trou de Lockman, presque exemptes d'absorption de premier-plan, figurent parmi les observations en rayons X les

plus lointaines jamais réalisées. Elles ont permis de résoudre 80 pour cent du fond diffus à des énergies inférieures à deux kiloélectronvolts (un domaine que les astronomes qualifient de rayons X mous). Ensuite, pour identifier ces sources, il nous fallait comparer ces relevés avec des images prises en lumière visible dans la même région du ciel. La difficulté résidait dans le fait que les contreparties visibles des sources de rayons X sont souvent d'un éclat très faible : or, ces maigres flux lumineux doivent servir à réaliser des spectres optiques afin d'identifier les



3. LE FOND DIFFUS se révèle lorsque l'on soustrait à une image du ciel (**a**, l'ensemble du ciel observé dans l'infrarouge) la contribution des sources connues situées à l'avant-plan. Une fois ôté le rayonnement diffusé par les poussières du Système solaire autour de 60 micromètres de longueur d'onde, aussi nommé lumière zodiacale (en bleu), seule subsiste l'image des nuages moléculaires et de la poussière de la Voie lactée (**b**). Le fond diffus (**c**) apparaît lorsque l'on retire cette dernière contribution.

Michael Hauser/Space Telescope Science Institute and Nasa

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.

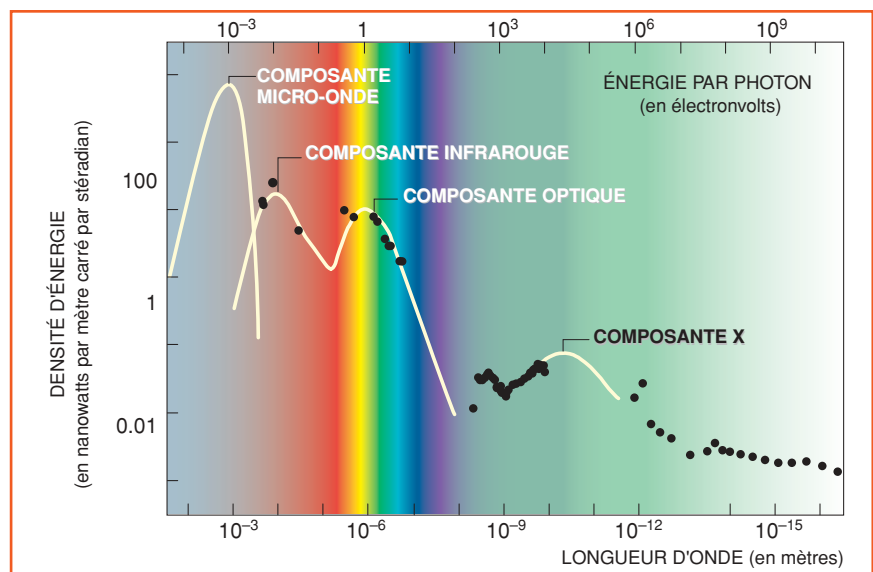
Ce résultat étant acquis, un paradoxe est apparu lorsque les astronomes s'en sont servi pour mettre en œuvre leur seconde stratégie, la synthèse de population. Ils ont combiné les spectres des différents types de noyaux actifs en tenant compte de leur proportion observée dans l'Univers local. Ils espéraient 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.

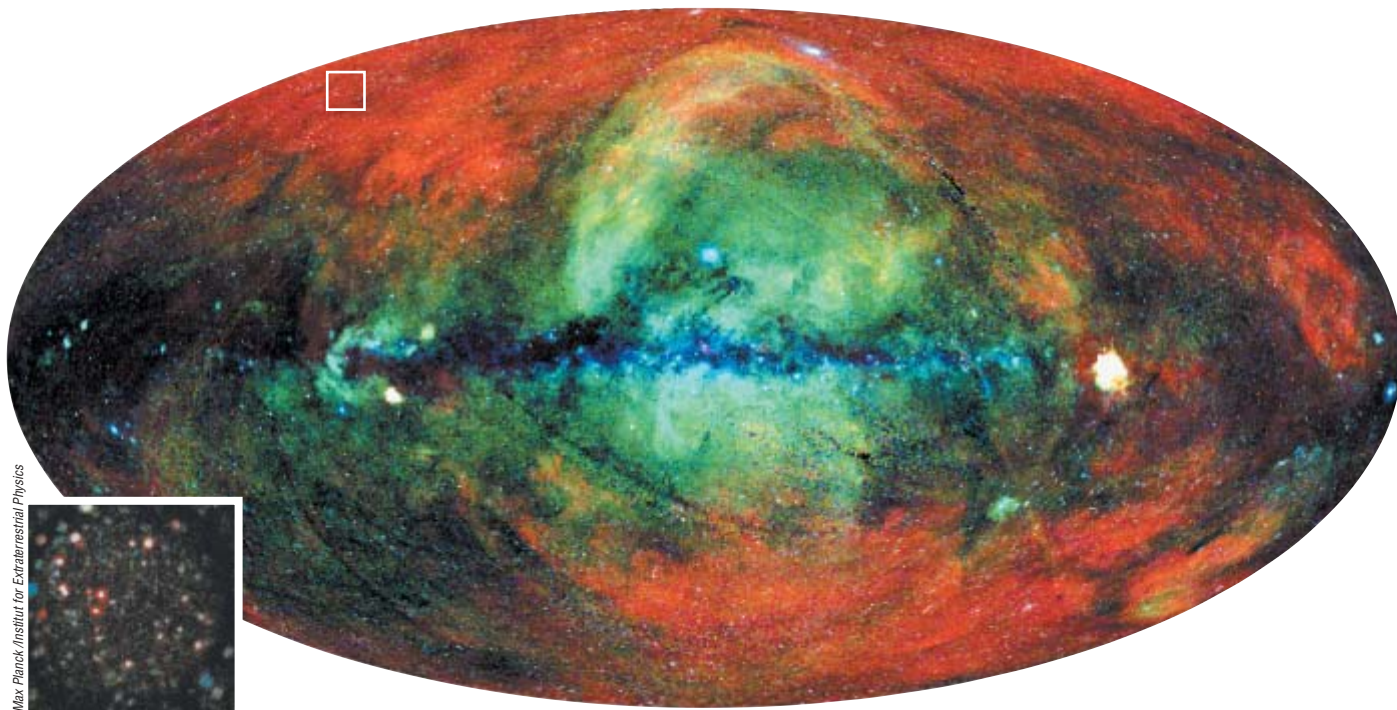
Les théoriciens ont alors utilisé la synthèse de population pour déterminer la combinaison de noyaux actifs de galaxies qui explique le spectre du fond diffus, en tenant compte de la façon dont ces objets évoluent au cours du temps. Ainsi, Andrea Comastri et ses collègues de l'Institut Max Planck de 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

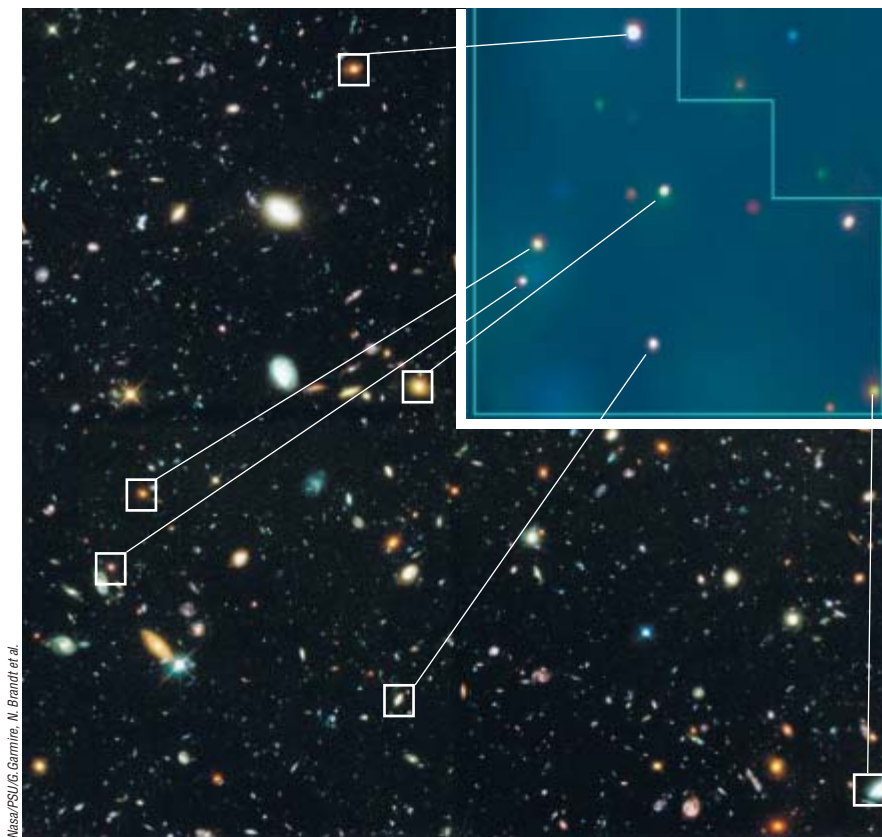
À ce jour, les sources identifiées correspondent à un mélange de noyaux actifs de types 1 et 2, en excellent accord avec les prévisions du modèle. Il est intéressant de noter qu'environ dix pour cent des sources découvertes par *Chandra* sont des galaxies très peu lumineuses, vraisemblablement des galaxies 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



NASA/PSU/G. Garmire, M. Brandt et al.

6. DES GALAXIES DISTANTES dont on sait maintenant qu'elles sont pleines de poussière interstellaire apparaissent sur cette image connue sous le nom de **champ profond de Hubble**. Sur l'image de la même région réalisée par le satellite **Chandra** sensible aux rayons X (dans le cartouche) apparaissent des sources très brillantes – probablement des trous noirs supermassifs – auxquelles on peut associer des galaxies apparaissant sur l'image reprise dans le domaine visible.

d'entre nous (G. Hasinger) a utilisé le télescope spatial sensible aux rayons X, *XMM-Newton*, et le satellite sensible à l'infrarouge *ISO*, pour estimer que les noyaux actifs contribuent à environ 15 pour cent du fond infrarouge.

Elise Archibald et ses collègues du Centre d'astronomie de Hilo, à Hawaï, ont expliqué ces découvertes par une séquence naturelle de formation galactique. Selon leur scénario, chaque galaxie se forme autour d'un petit trou noir d'environ 1 à 1 000 masses solaires qui lui sert de graine. À ce moment, le flux de la galaxie est essentiellement dû à la lumière stellaire. Par la suite, le trou noir croît rapidement en avalant de la matière. Après environ 500 millions d'années, le trou atteint un milliard de masses solaires et devient si brillant qu'il masque l'éclat des étoiles : un quasar est né. Après une période d'intense activité, ce quasar ayant aspiré le combustible disponible s'endort jusqu'à ce que, à la faveur d'une rencontre rapprochée, une autre galaxie lui fournisse du gaz qui tombera à nouveau vers le centre, où que les deux

trous noirs galactiques fusionnent. Simultanément, ces événements déclenchent d'intenses flambées de natalité stellaire qui enrichissent l'ensemble en poussière et se signalent par une émission infrarouge intense.

Certaines pièces manquent encore à ce puzzle. Aurions-nous, par exemple, oublié, dans notre recensement, des galaxies trop diluées et trop étendues pour que nos instruments les détectent ? Par ailleurs, nous ne savons pas expliquer le fond diffus gamma. Nous ne connaissons principalement qu'un type de source susceptible de le produire : les blazars. Ce sont des noyaux actifs de galaxies, plus gros et plus turbulents encore que ceux qui contribuent au fond diffus X. Toutefois, les synthèses de population que l'on réalise à partir de ce que nous savons des blazars ne rendent pas compte de tout le flux gamma du fond diffus. De nouveaux relevés, plus complets, seront nécessaires. Des instruments dans les domaines infrarouge, radio et X, devraient bientôt voir le jour, qui nous aideront dans cette tâche.

La clarté nocturne

Il n'y a pas si longtemps, les astronomes se demandaient pourquoi le ciel nocturne est noir. En effet, dans un univers infini empli d'étoiles, toute direction prise au hasard devrait, à un moment ou un autre, rencontrer une étoile. Certes, plus cette étoile est lointaine et plus son éclat nous paraît faible. Toutefois, cet effet est exactement compensé par le fait que, si les étoiles sont réparties de façon assez uniforme dans l'Univers, le nombre d'étoiles vues croît comme le carré de la distance à laquelle on regarde. De ce fait, le ciel devrait être aussi lumineux que la surface du Soleil. En 1848, ce mystère, connu sous le nom de paradoxe d'Olber, fut résolu par... Edgar Allan Poe ! Dans un poème en prose intitulé *Eurêka*, il suggéra que la noirceur de la nuit prouve que l'Univers n'a pas toujours existé et que les étoiles n'ont pas eu le temps de l'emplir de leur lumière. Cette hypothèse a résisté à l'épreuve du temps et elle est considérée, désormais, comme une des grandes observations cosmologiques sur lesquelles repose la théorie du Big Bang. Toutefois, nous savons aujourd'hui que le ciel nocturne est imprégné d'un faible fond diffus constitué de toutes les longueurs d'onde. Grâce, en partie, à la théorie du Big Bang et au modèle standard de la cosmologie, nous avons fait beaucoup de progrès dans l'explication de ce fond diffus... mais il est amusant de penser que, tandis que les penseurs du XIX^e siècle ont expliqué pourquoi la nuit n'est pas d'une clarté aveuglante, nous devons, quant à nous, comprendre pourquoi elle n'est pas totalement noire.

Günther HASINGER est astronome à l'Institut Max Planck de Garching, en Allemagne. Roberto GILLI est astrophysicien à l'Observatoire de Florence, en Italie.

G. HASINGER, R. BURG, R. GIACCONI, M. SCHMIDT, J. TRÜMPER et G. ZAMORANI, *The ROSAT Deep Survey I : X-ray Sources in the Lockman Field*, in *Astronomy and Astrophysics*, vol. 329, n° 2, pp. 482-494, janvier 1998.

R. GILLI, M. SALVATI et G. HASINGER, *Testing Current Synthesis Models of the X-ray Background*, in *Astronomy and Astrophysics*, vol. 366, n° 2, pp. 407-417, février 2001.

G. LAGACHE et B. GUIDERDONI, *La face cachée des galaxies*, in *Pour la Science*, n° 296, pp. 52-59, juin 2002.
