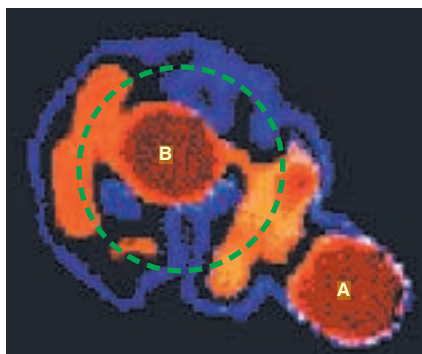


galaxie vue par la tranche, située entre le quasar et notre Galaxie. Sur la ligne de visée correspondant aux rayons lumineux donnant l'image A se trouvent des nuages interstellaires très denses, détectés grâce à leurs raies d'absorption dans le domaine radio. La raie de l'hydrogène atomique a été observée par C. Carilli et ses collègues en 1993, et nous avons détecté plus d'une douzaine de raies d'absorption moléculaires avec le télescope de 30 mètres de l'IRAM, au Pico Veleta, en Espagne.

La distance angulaire entre les deux images A et B est de 0,3 seconde d'angle : c'est la plus faible détectée à ce jour. La déviation des rayons lumineux n'est due qu'au bulbe de la galaxie-lentille, et la modélisation géométrique du phénomène est particulièrement simple. En utilisant, dans le domaine radio, la variation de polarisation successive (la direction d'oscillation de l'onde lumineuse) des deux images, Edward Corbett et ses collègues, de l'Université d'Hertfordshire, ont déterminé la différence des temps d'arrivée des photons : les photons de l'image A mettent 12 ± 3 jours de plus à nous parvenir que ceux de l'image B, de sorte que la constante de Hubble serait égale à quelque 30 kilomètres par seconde et par mégaparsec. Cette valeur dépend toutefois du modèle géométrique de lentille. La confirmation à d'autres longueurs d'onde est impatientement attendue.

Raies moléculaires et gaz lointain

La détection de raies d'absorption dans le spectre des quasars n'est pas nouvelle : la raie d'absorption de l'hydrogène atomique Lyman-alpha, dans l'ultraviolet, est si fréquemment observée que l'on nomme la série de raies détectées la «forêt» Lyman-alpha. Il suffit de si peu d'hydrogène sur la ligne de visée entre un quasar et l'observateur, pour produire une raie détectable, que la masse d'hydrogène interposé n'est pas suffisante pour créer une lentille. En étudiant ces raies, on s'est aperçu que les galaxies sont entourées de filaments d'hydrogène, sur des distances égales à plus de dix fois leur diamètre. Les galaxies sont comme les nœuds d'une toile de filaments emplissant tout l'Univers. Ce gaz intergalactique, beaucoup plus abondant par le passé, a servi à former les étoiles des galaxies durant leur évolution.



6. LE QUASAR RADIO B0218+357. Grâce à la résolution de 50 milliseconde d'angle, on distingue les deux images du quasar A et B (séparées de 0,3 seconde d'angle) ainsi qu'un embryon d'anneau d'Einstein.

Si les raies d'absorption de l'hydrogène atomique permettent l'exploration du gaz diffus, les raies moléculaires, observables dans le cas de mirages gravitationnels, sont l'outil privilégié pour explorer l'Univers dans ses lignes de visée les plus opaques. La densité de ce gaz augmente au voisinage des galaxies ; l'hydrogène absorbe tant les rayonnements ultraviolets et visibles qu'il bloque la lumière à ces longueurs d'onde. Aussi, on complète les observations en étudiant des raies qui ne sont pas totalement absorbées, telle la raie de l'hydrogène atomique à 21 centimètres, ou, pour du gaz plus dense encore, les raies moléculaires. Dans ce cas, la quantité de lumière absorbée est proportionnelle à la quantité de gaz sur la ligne de visée.

Les raies d'absorption moléculaires dues au gaz situé devant les quasars se révèlent également très utiles pour l'étude des nuages moléculaires froids à grand décalage vers le rouge. La technique des raies d'absorption est très sensible : à des décalages vers le rouge élevé, on peut détecter des quantités de gaz de quelques masses solaires (un seul nuage). Cette grande sensibilité a permis l'étude chimique des nuages, par la détection de dizaines de raies moléculaires correspondant à plusieurs molécules organiques et de leurs isotopes (des molécules dont les atomes diffèrent par leur nombre de neutrons).

Dans le milieu interstellaire, les proportions de molécules aussi fondamentales que l'oxygène moléculaire ou l'eau ne sont toujours pas déterminées. Le gaz très éloigné absorbe le rayonnement à des longueurs d'onde très décalées vers le rouge, de sorte que la longueur d'onde des raies d'absorption de ces molécules est supérieure à

ce qu'elle est dans notre Galaxie. Ainsi, on s'affranchit de l'absorption atmosphérique et nous avons montré qu'en direction de B0218+357, la proportion d'oxygène moléculaire par rapport au monoxyde de carbone était inférieure aux prédictions des modèles chimiques.

Quelle est la température du gaz détecté à ces distances ? Au minimum, elle est égale à 2,76 kelvins, la température du fond diffus cosmologique, vestige de l'époque reculée de la recombinaison, lorsque les électrons et les protons qui, jusqu'alors, étaient libres, se sont regroupés en atomes. Dans un gaz diffus, les molécules ne peuvent pas être excitées par collision avec des molécules d'hydrogène : leur température est celle du fond diffus cosmologique avec lequel elles sont en équilibre radiatif. On estime ainsi la température du fond diffus cosmologique et sa variation en fonction du décalage vers le rouge. Les déterminations que nous avons faites à un décalage vers le rouge de 0,9, corroborent les prédictions de la théorie du Big Bang : la température du fond diffus était supérieure par le passé, conformément à la théorie.

L'observation des raies d'absorption moléculaires dans les lentilles gravitationnelles est une technique pleine de promesses pour sonder le gaz froid à grand décalage vers le rouge. Les futurs instruments millimétriques bénéficieront de plus grandes surfaces collectrices, et un nombre bien supérieur de sources deviendront accessibles, car le nombre de sources croît très rapidement lorsque le flux décroît. Les lentilles gravitationnelles deviendront des outils fondamentaux de l'astrophysique du XXI^e siècle.

Françoise COMBES est astronome à l'Observatoire de Paris. Tommy WIKLIND est astronome à l'Observatoire spatial d'Onsala, en Suède.

T. WIKLIND et F. COMBES, *The Redshift of the Gravitational Lens of PKS1830-211 Determined from Molecular Absorption lines*, in *Nature*, vol.379, pp.139-141, 11 janvier 1996.

F. COMBES et T. WIKLIND, *Direct Search for Molecular Oxygen towards the Gravitational Lens B0218+357*, in *Astronomy & Astrophysics*, vol.303, p.L61, 1995.

B. FORT et Y. MELLIER, *Arcs in Clusters of Galaxies*, in *Astronomy and Astrophysics Review*, vol. 5, p 239, 1994.

E. TURNER, *Les lentilles gravitationnelles*, in *Pour la Science*, septembre 1988.

La richesse des provinces de l'Empire aztèque

MICHAEL SMITH

La population aztèque produisait des étoffes qu'elle échangeait contre des marchandises importées d'autres régions et de l'extérieur de l'empire.

En 1519, lorsque Hernán Cortés et son armée entrent dans Tenochtitlán (l'actuel Mexico), l'empereur Moctezuma règne au sommet d'une pyramide sociale et politique, dont l'organisation transparaît dans la

comptabilité impériale : quatre fois par an, les rois des cités-États versent un tribut à l'empereur qui, en échange, leur délègue localement ses pouvoirs. Les nobles des provinces, à leur tour, dépendent du roi de leur cité-État et,

tout en bas de la hiérarchie, le peuple produit toutes sortes de biens et verse un tribut qui fait vivre toute la noblesse. Les impôts qui pèsent sur les gens du commun sont donc lourds. Comment ces derniers vivent-ils ?

