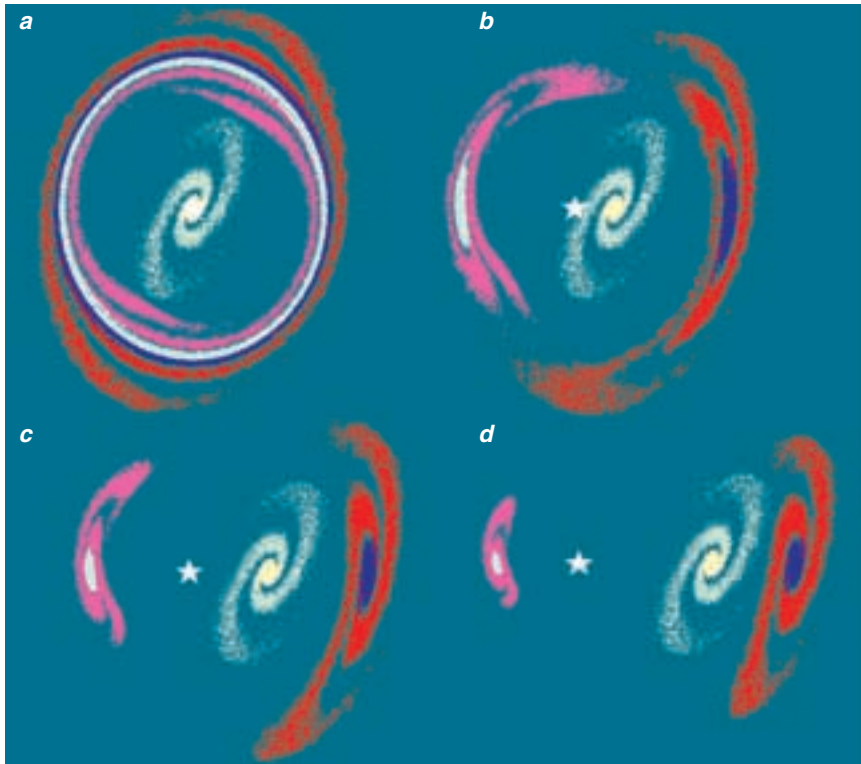




F. Combes

4. SELON L'ALIGNEMENT DE LA SOURCE ET DE LA LENTILLE, l'aspect des mirages diffère. Dans cette simulation, la lentille, ponctuelle, est représentée par l'étoile blanche. La source est une galaxie qui, en l'absence de lentille, serait observée non déformée à l'emplacement de la galaxie verte. En haut à gauche (a), la source est alignée avec la lentille : la galaxie source est déformée en anneaux d'Einstein. À mesure que la source s'éloigne de la lentille, la galaxie source est moins déformée (b, c, d).

apparente d'une étoile à six mois d'intervalle, c'est-à-dire quand la Terre s'est déplacée d'un demi-tour sur son orbite). Plus loin, on utilise des étoiles variables périodiques nommées Céphéides dont la luminosité absolue est connue : en 1912, l'astronome américaine Henrietta Leavitt a montré que la luminosité absolue d'une Céphéide est uniquement fonction de sa période. Ainsi, en mesurant la période et la luminosité d'une Céphéide, on en déduit sa distance : elle est proportionnelle au quotient de sa luminosité absolue par sa luminosité apparente.

Cette méthode, dite des «chandelles standards», s'applique également aux distances intergalactiques : les astronomes utilisent alors les galaxies les plus brillantes des amas, dont la luminosité absolue est connue comme standard. Pour les distances les plus lointaines, on utilise la loi de l'expansion de l'Univers et l'on déduit la distance d'un objet en fonction de sa vitesse apparente par rapport à nous (mesurée par son décalage vers le rouge).

Pour cela, il faut que la vitesse d'expansion soit suffisamment grande devant les vitesses particulières des

galaxies entre elles. Ces vitesses, qui s'ajoutent au mouvement général de l'expansion, sont dues à l'attraction gravitationnelle des amas de galaxies les plus proches, l'Univers n'étant pas homogène à cette échelle. Dans notre voisinage, par exemple, les galaxies ont toutes un mouvement important vers un amas de galaxies nommé le Grand Attracteur.

Comment détermine-t-on la constante de Hubble? C'est le quotient de la vitesse d'éloignement des galaxies par leur distance. Pour la calculer, il faut donc connaître le mieux possible la distance d'une galaxie et sa vitesse d'éloignement due à l'expansion. Cette constante est déterminée aux distances intermédiaires, où la méthode des «chandelles standards» est applicable, à condition de soustraire les vitesses propres.

Toutefois, les astronomes ne s'accordent ni sur la distance des galaxies dans cette région intermédiaire, ni sur leur vitesses particulières : la constante de Hubble reste incertaine, avec une valeur comprise entre 40 et 100 kilomètres par seconde et par mégaparsec (un parsec est égal à 3,28 années-lumière). Les désaccords por-

tent surtout sur les diverses manières de corriger les vitesses particulières. Une nouvelle méthode pour évaluer les distances très lointaines est la bienvenue, car, à ces distances, les vitesses propres sont négligeables par rapport à la vitesse d'expansion : avec la seule distance, on détermine la constante de Hubble.

Cette méthode recherchée est celle des lentilles gravitationnelles, parce que la lumière des différentes images parcourt des trajets de longueurs différentes (sauf les cas de l'anneau d'Einstein, où par symétrie, tous les parcours ont la même longueur). Supposons que l'on observe une image double d'un quasar et nommons d_1 et d_2 les longueurs des deux trajets de la lumière. Par l'analyse de la position relative des images du quasar et de la lentille, et par une modélisation de la lentille, on détermine le quotient entre les longueurs des trajets suivis par les deux images, soit d_1/d_2 . Dans le cas d'une lentille ponctuelle, ce quotient des trajets dépend uniquement de la distance angulaire entre la lentille et les deux images de la source. Pour connaître les longueurs elles-mêmes, et non seulement leur quotient, une information supplémentaire est nécessaire.

Si l'on mesure la différence de temps entre le moment où un sursaut de luminosité apparaît sur une image et celui où ce même sursaut apparaît sur l'autre image, on en déduit la différence de longueur entre les chemins optiques : c'est le produit de la différence de temps par la vitesse de la lumière. Connaissant le quotient (d_1/d_2) et la différence entre les longueurs ($d_1 - d_2$), on déduit ces longueurs d_1 et d_2 , qui sont égales à la distance absolue du quasar à quelques pour cent près.

Du premier mirage gravitationnel découvert, QSO 0957+561, les astronomes auraient pu théoriquement déduire une distance précise, mais, la comparaison des courbes de lumière (la variation d'éclat en fonction du temps) des deux images est délicate. Ainsi, selon les déterminations, la différence de temps d'arrivée est comprise entre 404 jours et 537 jours.

De surcroît, l'estimation du quotient des trajets dépend de la modélisation de la lentille, l'objet défecteur de la lumière. Or, pour ce quasar, la séparation entre les deux images est grande (six secondes d'angle). La masse nécessaire à une telle déviation est celle d'un petit amas de galaxies, que l'on observe

d'ailleurs devant le quasar. La répartition de la masse dans un amas de galaxies étant plus difficile à estimer que dans une seule galaxie, le quotient des trajets est moins précisément connu. La constante de Hubble déduite est ainsi comprise entre 33 et 117 kilomètres par seconde et par mégaparsec, ce qui est trop approximatif pour préciser la valeur déterminée par les méthodes classiques d'estimation de la distance absolue des objets lointains.

Ne pourrait-on trouver une source dont l'image serait déviée par une seule galaxie, de sorte que la modélisation soit plus facile? L'idéal serait que la galaxie soit la plus massive possible, pour que la séparation angulaire des multiples images de la source soit voisine de une seconde d'angle. Dans ce cas, on pourrait séparer les images dans le domaine visible et, comme le retard est plus court (plus la séparation angulaire est faible, moins la lumière est déviée et plus le retard est court) que dans le cas précédent, on associerait facilement les caractéristiques communes dans le spectre de chaque image. Dans le visible, aucune lentille possédant ces caractéristiques n'a encore été observée, mais peut-on en trouver à d'autres longueurs d'onde?

Les mirages radio

Contrairement au domaine visible, la résolution angulaire dans le domaine radio n'est pas dégradée par la turbulence atmosphérique. De plus, l'obscurcissement dû à la lentille elle-même est plus faible que dans le visible : lorsque les images sont très rapprochées, les rayons lumineux déviés traversent la lentille près du centre, où l'absorption par le gaz et la poussière de la lentille est importante. Une ou plusieurs images du quasar peuvent alors être complètement absorbées dans le visible et n'être aperçues qu'en radio.

La source radio PKS 1830-211 est un cas exemplaire. C'est un quasar découvert aux longueurs d'onde centimétriques par deux astronomes indiens, Ravi Subramanian et Ramesh Rao, de l'Université de Pune, avec les antennes interférométriques du VLA (*Very Large Array*, ou «très grand réseau»), au Nouveau Mexique. La résolution atteinte par cet instrument est bien meilleure que la seconde d'angle. La carte de l'émission radio centimétrique révèle deux images gravitationnelles du quasar, avec un



5. DEUX IMAGES DE LA SOURCE et un embryon d'anneau d'Einstein sont visibles sur ce mirage gravitationnel du quasar PKS 1830-211. Cette image radio a été obtenue aux antennes interférométriques du VLA, au Nouveau Mexique.

embryon d'anneau d'Einstein (voir la figure 5). Aucune contrepartie dans le visible n'a été trouvée, ni pour le quasar ni pour la lentille, et la recherche de raies à une longueur d'onde de 21 centimètres, qui révèlent l'hydrogène de la lentille, est longtemps restée infructueuse, en raison d'interférences de télécommunications terrestres. Cette raie vient juste d'être détectée au VLA par Chris Carilli, de l'Observatoire de Socorro, mais elle est difficilement exploitable.

Pour étudier cette lentille, nous avons recherché les molécules qui pourraient se trouver dans la lentille et absorber la lumière du quasar à des longueurs d'onde caractéristiques. Nous avons balayé le domaine de longueurs d'onde à deux et trois millimètres avec le télescope submillimétrique de 15 mètres de diamètre du SEST (*Swedish-European Submillimeter Telescope*, soit «télescope suédo-européen submillimétrique»), à La Silla, au Chili. Grâce à cette exploration, nous avons découvert une dizaine de raies d'absorption moléculaires. Comment mesurer le décalage vers le rouge de ces raies?

La position des raies est connue en laboratoire mais elles sont nombreuses. L'identification des molécules absorbantes n'a été possible qu'après l'observation d'un certain nombre de raies. Les raies détectées sont celles de nombreuses molécules organiques : le monoxyde de carbone (CO), le cyanure d'hydrogène (HCN), le sulfure de carbone (CS), etc. Pour chaque molécule, plusieurs raies sont aujourd'hui détectées. Le décalage vers le rouge de la lentille, mesuré grâce à l'identification des raies, est de 0,88582.

Dans nos premières observations, les deux images étaient superposées. À l'aide de l'interféromètre de l'IRAM, près de Grenoble, nous sommes parvenus à séparer les deux images, distantes d'une seconde d'angle. Nous avons ainsi montré que seule la lumière d'une des images du quasar était absorbée par les molécules identifiées.

À l'aide de cette absorption sélective, nous pouvons mesurer l'intensité lumineuse de chaque image, sans même séparer spatialement le système double. Nommons A et B les deux images. Sans absorption, les émissions continues des deux images s'ajoutent : on observe A + B. En revanche, lorsque l'on observe à la longueur d'onde d'une raie d'absorption (par exemple CO), seule l'image B est absorbée ; il ne reste plus que l'émission continue de A. En mesurant simultanément l'intensité lumineuse à la longueur d'onde d'une raie et à une autre longueur d'onde, on en déduit donc l'intensité de A et celle de B. En répétant cette mesure à des moments successifs, on peut alors estimer la différence des chemins optiques entre les deux images. La différence des temps d'arrivée des photons devrait être de trois à sept semaines. Ces observations sont actuellement effectuées de façon hebdomadaire avec les télescopes de l'IRAM et du SEST.

Une autre source radio, B0218+357, ressemble beaucoup à PKS 1830-211 : c'est un quasar qui nous apparaît double, avec un superbe anneau d'Einstein (voir la figure 6). La disposition des deux images A et B est caractéristique de la géométrie attendue des lentilles gravitationnelles. Le centre de l'anneau indique la direction du centre de la lentille. La plus faible des images, B, est à l'intérieur de l'anneau. Les sources radio comportent en général une source compacte, dont le spectre est plat (l'intensité ne varie pas avec la fréquence), et des jets radio avec des condensations brillantes de spectre en pente (l'intensité de la lumière reçue diminue avec la fréquence). Ici les images A et B ont des spectres plats, alors que l'anneau a un spectre en pente. Ainsi, l'anneau est probablement l'image d'une condensation brillante dans un jet du quasar, alignée exactement avec la lentille et l'observateur.

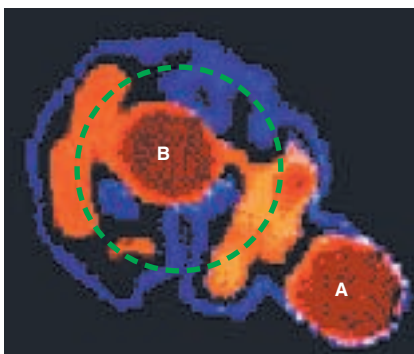
Dans le domaine visible, on voit uniquement l'image B, l'autre image étant sans doute très obscurcie par de la poussière. En effet, la lentille est une

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.
