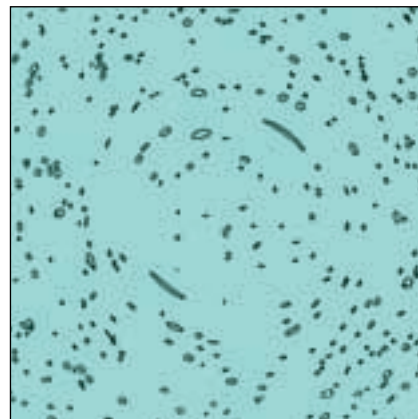
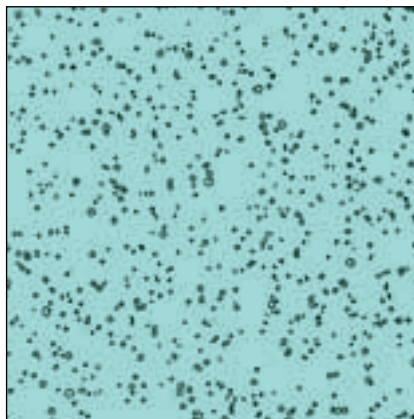


masse de la lentille. Lorsque la lentille est un amas de galaxies dont on peut mesurer la luminosité, on déduit la masse de la matière qui ne brille pas, autrement dit, la matière noire. Cette matière noire constituerait une grande partie de la masse de l'Univers, et sa détection est l'une des principales applications des lentilles gravitationnelles.

Les galaxies lointaines, très nombreuses, forment une image aléatoire que la présence d'une lentille déforme de façon caractéristique (voir la figure 3). Utilisant ce phénomène, Bernard Fort, de l'Observatoire de Paris, Yannick Mellier, de l'Institut d'astrophysique de Paris, et leurs collègues, ont détecté de multiples arcs lumineux dans plusieurs amas, dont Abell 370 et Abell 2218. Ces arcs correspondent à des galaxies situées derrière les amas. Ayant calculé la masse des différentes zones des amas, ils ont montré que la matière noire était cinq fois plus concentrée dans les régions centrales des amas que dans leur périphérie. Ce résultat est inattendu, car la matière lumineuse est répartie de manière uniforme dans les amas. Cette différence de concentration dénoterait une différence dans la genèse de la matière lumineuse et de la matière noire.

Pour mieux étudier la matière noire, deux approches complémentaires sont poursuivies. Une partie de la matière noire est constituée de matière ordinaire, telles les naines brunes. Ces petites étoiles ne brillent pas, mais les astronomes les décèlent indirectement par leurs effets de microlentille gravitationnelle : les naines brunes dévient la lumière des étoiles situées dans leur direction, derrière elles, de sorte que l'on peut voir, en cas d'alignement, un petit mirage gravitationnel. À ce jour, les expériences MACHOS et EROS, consacrées à ces études, ont détecté quelques naines brunes dans le Grand Nuage de Magellan, l'une des galaxies les plus proches de la nôtre.

L'autre approche, pour la détection de la matière noire qui n'est pas constituée de matière ordinaire, mais de particules exotiques, utilise la déformation à toutes les échelles : outre les arcs lumineux, relativement faciles à détecter et qui sont le fruit d'une déformation par la matière dense, il existe à très grande échelle dans l'Univers des multitudes de distorsions des images de galaxies, non plus par un seul amas, mais par toute la masse dispersée dans l'Univers. La détection des déformations à grande échelle indique la position des grandes



Xiang-Ping Wu

3. DÉFORMATION DE GALAXIES LOINTAINES, dû à une lentille gravitationnelle. À gauche, on a indiqué la multitude de galaxies que l'on verrait sans lentille. L'interposition d'un amas de galaxies jouant le rôle de lentille (au centre de l'image) déforme l'image des galaxies d'autant plus qu'elles sont près de la direction de la lentille (à droite).

structures de l'Univers, y compris la matière noire. Par comparaison avec les prévisions des modèles cosmologiques, on détermine la géométrie de l'Univers et les paramètres cosmologiques, comme la densité moyenne de l'Univers et sa courbure.

Malheureusement, la mesure de ces faibles déformations est malaisée, car les galaxies ont des orientations variées : il est difficile de distinguer les galaxies qui sont allongées en raison des déformations de mirage gravitationnel, d'une part, des galaxies vues par la tranche non déformées, d'autre part. Toutefois, les lentilles produisent des images symétriques qui facilitent la distinction : en l'absence de déformations, l'orientation des galaxies est aléatoire, tandis que, sur de grandes échelles, l'alignement des galaxies déformées est caractéristique.

Grâce aux perfectionnements des détecteurs et des méthodes d'analyse, les astronomes ont décelé des distorsions de quelques pour cent sur de grandes échelles. De nombreux programmes d'observation sont en cours sur les grands télescopes. En particulier, le groupe de Y. Mellier et B. Fort espère, grâce à une analyse statistique de vastes régions du ciel, y connaître la répartition de matière totale.

La géométrie de l'Univers

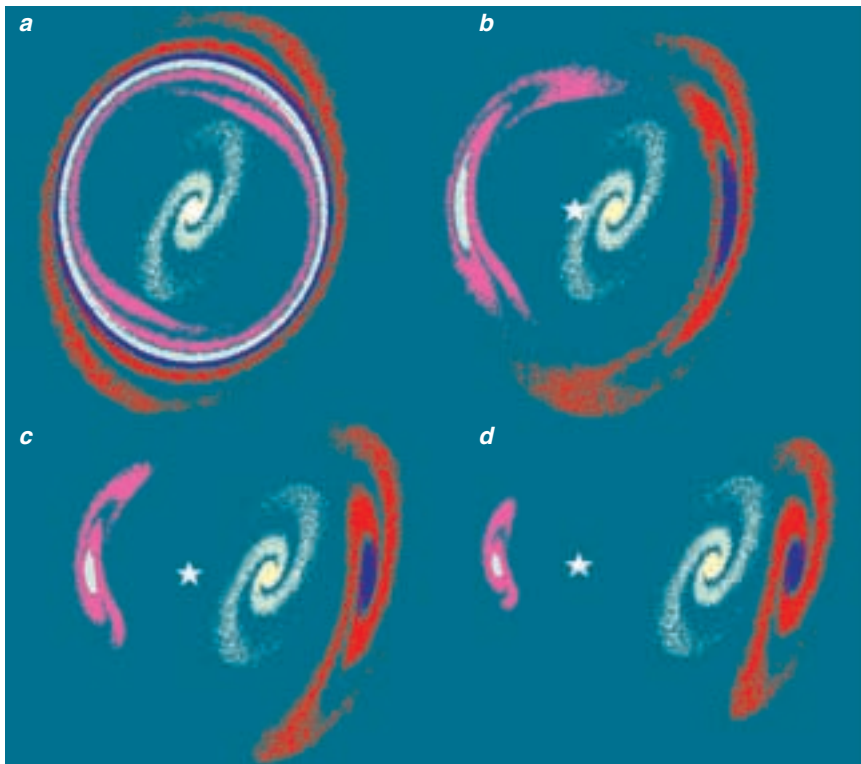
Outre la mesure de la répartition de la matière, les lentilles gravitationnelles aident aussi à connaître les paramètres fondamentaux de la cosmologie. Selon la théorie du Big Bang, l'Univers est en expansion continue depuis 15 milliards d'années. Comme les taches sur un ballon que l'on gonfle, les galaxies s'éloignent d'autant plus vite les unes

des autres (et de nous) qu'elles sont lointaines. Le quotient de leur vitesse par leur distance est nommé constante de Hubble, du nom de l'astronome américain Edwin Hubble (1889-1953) qui, dans les années 1920, a mis en évidence cette fuite des galaxies. La constante de Hubble, ainsi que le paramètre de décélération (qui indique les variations de la vitesse d'éloignement des galaxies en fonction du temps) sont des paramètres mesurables par l'étude des lentilles gravitationnelles.

Pour étudier une galaxie, on sépare les différentes longueurs d'onde qui composent la lumière qu'elle émet. En raison de l'effet Doppler, le spectre ainsi mesuré est d'autant plus décalé vers les grandes longueurs d'onde, «vers le rouge», que la galaxie étudiée s'éloigne rapidement (comme la sirène d'une ambulance qui s'éloigne est plus grave que lorsque la sirène s'approche). Comme les galaxies les plus éloignées sont celles qui s'éloignent le plus vite, le décalage vers le rouge d'un objet céleste révèle sa distance. La lumière se déplaçant à vitesse finie, c'est également une mesure de son âge : les objets ayant le plus grand décalage vers le rouge sont aussi les plus jeunes.

La constante de Hubble reste mal connue, en particulier, parce qu'on ne connaît la distance absolue des objets lointains qu'à un facteur deux près. Comment mesurer le plus précisément possible la distance d'objets lointains ?

Tel l'arpenteur, l'astronome reporte son «mètre-étalon» jusqu'aux lointaines galaxies. Pour cela, il procède par étape. La distance des étoiles les plus proches (moins de 900 années-lumière) est déterminée géométriquement par la méthode des parallaxes (la variation de direction



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