

quasar dont les rayons lumineux avaient été déviés par une galaxie ou par un groupe de galaxies situés dans la même direction. L'évolution de l'intensité lumineuse des deux images confirma cette hypothèse : les deux images évoluaient conjointement avec un délai fixe. En effet, le trajet des photons, et donc, le temps mis par la lumière pour nous parvenir, diffère pour chacune des images. Lorsque l'intensité du quasar varie avec, en particulier, des sursauts d'intensité,

le sursaut détecté d'abord sur une image est détecté après un délai fixe sur l'autre image.

Voici dix ans, on connaissait 17 mirages gravitationnels ; aujourd'hui, on en a identifié 34, par leur rayonnement visible ou radio ; une dizaine d'arcs dans les amas de galaxies pourraient également s'ajouter à ce total. D'abord considérées comme des curiosités célestes, les lentilles gravitationnelles sont devenues des outils qui nous renseignent sur les galaxies lointaines,

sur la répartition de matière dans l'Univers et, aussi, sur les caractéristiques du gaz qui forme les lentilles : lorsque la lumière d'une galaxie traverse du gaz, celui-ci absorbe une partie de la lumière, de sorte que le spectre enregistré présente des raies d'absorption. Ces dernières, révèlent la nature des molécules et atomes présents dans le milieu traversé. Nous verrons que les raies moléculaires observées dans les lentilles sont particulièrement utiles.

Objets lointains et matière noire

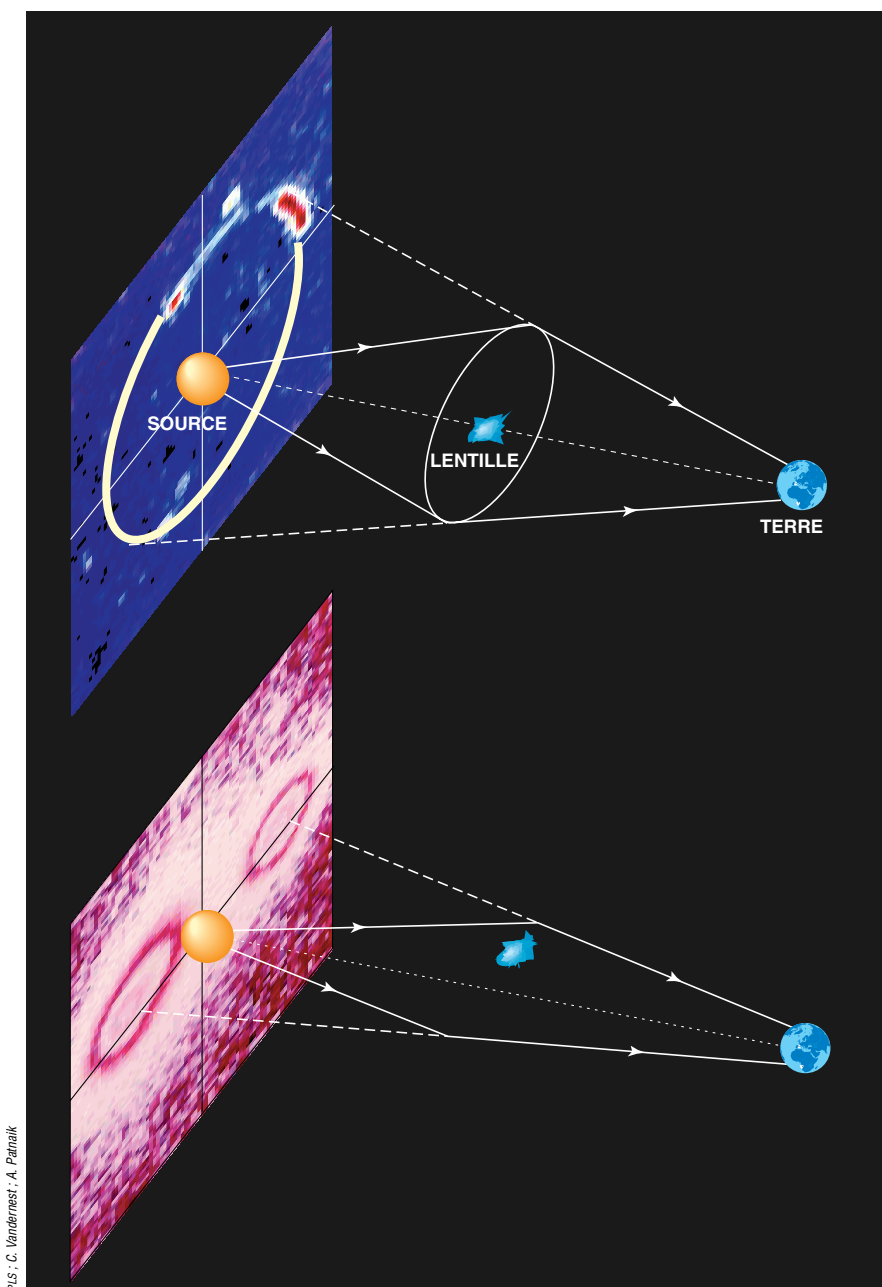
Comme les lentilles optiques, les lentilles gravitationnelles focalisent la lumière. La taille des objets est agrandie, alors que leur luminosité totale reste inchangée. Puisque la probabilité de trouver des objets massifs dans une direction augmente avec la distance, les astres lointains ont le plus de chance d'être agrandis.

Grâce à ces télescopes gravitationnels, des quasars lointains apparaissent sous la forme d'images multiples (voir la figure 2), ou accompagnés d'anneaux d'Einstein, obtenus lorsque l'astre se trouve exactement aligné avec la lentille sur la ligne de visée. Comme l'alignement parfait est très rare, les anneaux sont déformés ou incomplets (voir la figure 4).

Même des galaxies ordinaires peuvent être détectées à de grandes distances, lorsqu'elles se trouvent derrière un amas de galaxies (voir la figure 1) : leur image agrandie devient perceptible. Grâce à ces études, les astronomes espèrent mieux connaître les galaxies lointaines et comprendre leur évolution.

Comment les mirages gravitationnels nous renseignent-ils sur les caractéristiques des lentilles, tout d'abord ? Les mirages résultent d'interactions des rayons lumineux avec le champ gravitationnel de la lentille. Selon la fameuse loi d'Einstein, $E = mc^2$ (où E est l'énergie, m , la masse, et c , la vitesse de la lumière), la masse et l'énergie sont équivalentes. Ainsi, la lumière, transmise par des particules sans masse mais dotées d'une énergie (les photons), est, comme une particule massive, soumise à l'attraction universelle : elle est attirée par le champ gravitationnel de la lentille massive.

Or, le champ gravitationnel de la lentille dépend de la répartition de la masse dans l'espace. Ainsi, en analysant un mirage gravitationnel, on calcule la



PLS : C. Vandermest ; A. Patnaik

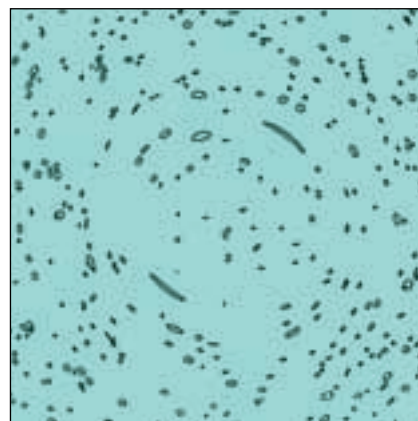
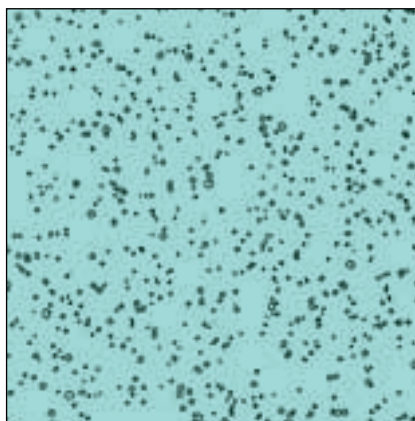
2. LES MIRAGES GRAVITATIONNELS se forment lorsque la lumière d'une source lointaine est déviée par une lentille. Ainsi, on observe des images, non dans la direction réelle de la source, mais dans le prolongement des rayons lumineux qui arrivent sur Terre. Quand l'observateur, la lentille et la source sont parfaitement alignés, l'observateur voit un anneau (en haut). En revanche, un décalage de la lentille provoque la formation de plusieurs images de la même source (voir la figure 4).

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