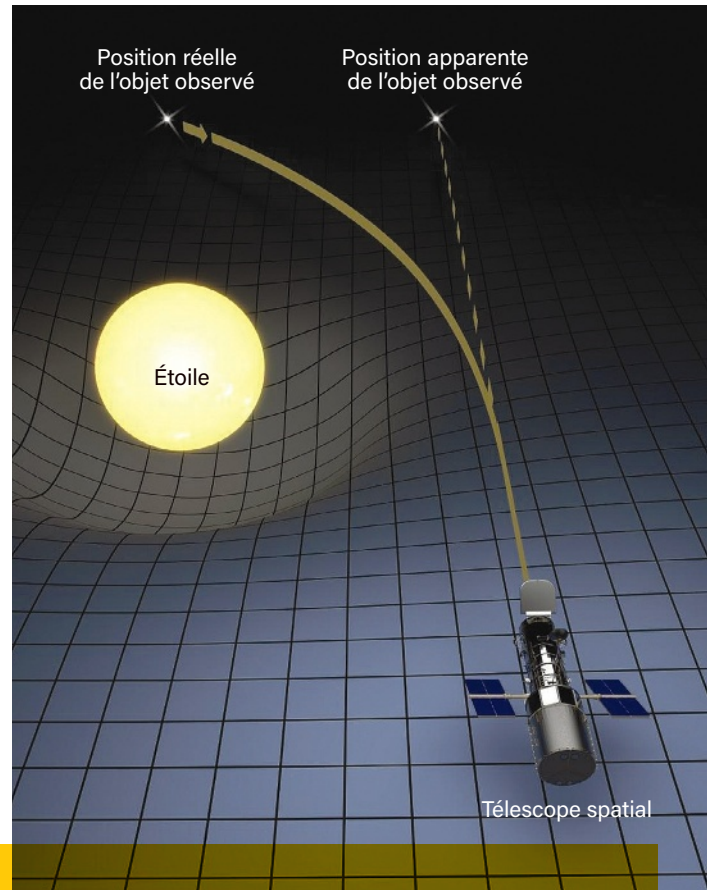


rotation des étoiles au sein d'une galaxie spirale. Comme l'indique la courbe A sur le schéma page précédente, l'astronome américaine a observé que les étoiles se déplaçaient toutes à peu près à la même vitesse, quelle que soit leur distance au centre de la galaxie. Or, d'après les lois de Kepler, plus l'étoile est éloignée de son centre galactique, et plus elle devrait tourner lentement autour (c'est ce qu'indique la courbe B). En somme, c'est comme si les étoiles les plus lointaines étaient en rotation autour de galaxies dix fois plus massives qu'observé. D'après l'astronome, ce phénomène n'était possible que si les galaxies étaient emplies d'énormes quantités de matière invisible, s'étendant même au-delà des objets galactiques visibles les plus distants. Vera Rubin fut donc la première à prouver de manière plus quantitative l'existence de matière noire, et ce avec une précision suffisante pour convaincre la communauté scientifique. Depuis, les preuves se sont accumulées.

LENTILLES GRAVITATIONNELLES

Aujourd'hui, sa présence peut être mesurée de façon plus directe grâce aux lentilles gravitationnelles, une des techniques les plus impressionnantes pour la détection de la matière noire. Le principe repose sur le fait que de grandes quantités de matière (visible ou noire) engendrent de forts champs gravitationnels. À leur tour, ces champs déforment l'espace qui les entoure et modifient la trajectoire de la lumière.

Imaginez que deux personnes tendent horizontalement un drap, et qu'une autre lance



Par son champ gravitationnel, un corps massif (ici, une étoile) déforme la trame de l'espace comme une boule de billard déformerait un drap tendu. Tous les corps passant à proximité suivront la courbure de l'espace déformé. La lumière ne fera pas exception et verra sa trajectoire s'incurver avant d'être captée par un télescope.

dessus une balle de ping-pong. La balle se déplacera en ligne droite, suivant la surface du drap. Supposez maintenant que quelqu'un laisse tomber un objet lourd, comme une boule de billard, au milieu du drap. Celui-ci est alors creusé par une dépression. La balle de ping-pong décrira de fait une courbe en suivant la surface déformée du drap. La lumière se comporte un peu comme la balle de ping-pong. Elle suit la courbure de l'espace dans lequel elle se propage.

Il arrive que deux
amas galactiques
entrent en collision.
On peut faire
l'analogie avec
un match de rugby.

L'espace vide ne contenant aucune matière est semblable au drap tendu. La lumière s'y propage en ligne droite. Mais les objets massifs, comme les étoiles, les galaxies ou les énormes surdensités de matière noire, engendrent tous un fort champ gravitationnel. L'espace qui les entoure est déformé, et la lumière suit la courbure de cet espace déformé. Ce phénomène se produit quand de la lumière passe à proximité du Soleil : elle est légèrement déviée. Une personne qui observe de la lumière provenant d'une étoile située derrière le Soleil aura l'impression

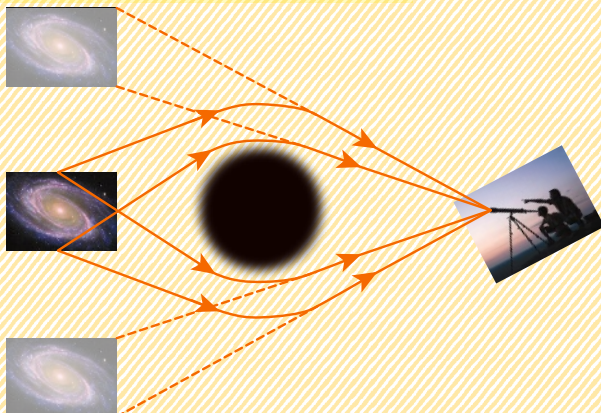
que cette lumière émane d'un autre point, légèrement décalé (voir la figure page précédente).

Une accumulation de matière noire agit à la manière d'une lentille. Ainsi, une partie de la lumière provenant d'une galaxie située derrière une surdensité de matière noire se courbe en passant à côté. La lumière va alors former un anneau tel que celui saisi par le télescope spatial *Hubble* (voir la figure ci-dessous). Quand la galaxie et le télescope ne sont pas parfaitement alignés avec la lentille, on ne voit que de petits arcs. Ces images révèlent qu'une quantité importante de matière se trouve entre les observateurs et la galaxie scrutée. Cette technique est suffisamment puissante pour déterminer la distribution de matière noire dans l'Univers.

COMME DES FANTÔMES

Une autre preuve se récolte au voisinage des galaxies, où la matière noire se concentre. Une galaxie est un amas d'étoiles (la nôtre s'appelle la Voie lactée), et un groupement de plus de cent galaxies est un amas galactique. Il arrive parfois que deux amas galactiques entrent en collision.

On peut faire l'analogie avec un match de rugby. Il faut imaginer que le choc concerne des joueurs normaux, mais aussi des fantômes. Les premiers symbolisent la matière visible de l'amas galactique, tandis que les seconds représentent la matière noire.



Les rayons lumineux émis par une galaxie sont courbés dans les trois dimensions (à gauche, seulement deux sont représentées) après être passés à proximité d'une accumulation de matière noire. Pour un observateur, la galaxie semblera située au-dessus ou au-dessous de sa position réelle. Vu par le télescope *Hubble*, cet effet de lentille gravitationnelle en trois dimensions produit une image de la galaxie en forme d'anneau autour de sa position réelle (à droite).





← L'amas de la Balle résulte de la collision entre deux amas de galaxies. La coloration en rose met en évidence le choc entre particules de matière ordinaire; chauffées, elles émettent des rayons X détectables. Les zones en violet représentent la matière noire, dont la présence a été constatée grâce aux lentilles gravitationnelles. Zéro émission de rayons X: la matière noire est passée comme un fantôme.

Les joueurs normaux se percutent et sont considérablement ralentis. La friction provoque un échauffement général. Mais les fantômes traversent le pack adverse sans être ralentis le moins du monde.

Dans l'«amas de la Balle», le télescope spatial *Hubble* a capturé une image d'une telle collision entre deux amas (voir la photo ci-dessus). La zone en rose à gauche représente la matière visible de l'amas galactique qui va vers la gauche, en d'autres termes l'amas qui vient de la droite. La zone rose à droite montre l'autre amas galactique, qui est arrivé par la gauche et se déplace vers la droite. Sous l'effet de la friction, toute cette matière a été chauffée pendant la collision et a engendré de grandes quantités de rayons X: ce sont ces derniers qui sont représentés en rose. Les zones en violet représentent la matière noire, dont la présence a été détectée grâce aux lentilles gravitationnelles. La coloration violette a ainsi été ajoutée à l'image, alors que les zones en rose correspondent à de la matière ordinaire qui émet des rayons X. Le décalage entre la matière noire (en violet) et la matière visible (en rose) apparaît clairement.

L'UNIVERS DEVIENT TRANSPARENT

De leur côté, les astrophysiciens de la collaboration *Planck* ont déterminé la quantité de matière de l'Univers au moyen d'une autre méthode: en étudiant le fond cosmologique diffus. Avant de résumer ces travaux, remontons aux

premiers temps de l'Univers, à savoir le Big Bang, une explosion massive qui s'est produite il y a 13,8 milliards d'années (voir l'encadré page 98).

Énergie libérée par le Big Bang est d'abord apparue sous forme de rayonnement. Les particules ont commencé à apparaître une fois l'Univers suffisamment refroidi par son expansion. C'est seulement 380 000 ans plus tard, une fois la température descendue jusqu'à (seulement) 6000 °C environ, que les atomes ont commencé à se former, car au-dessus de cette température, ils se brisent. Ce fut un moment critique: l'Univers connut une transition majeure, passant d'une soupe très énergétique de particules chargées à un espace constitué d'atomes neutres, permettant enfin la libre propagation d'ondes électromagnétiques telles que la lumière. À partir de là, l'Univers est devenu transparent, traversé par la lumière. Et celle-ci est toujours présente.

Comment est-ce possible? Il faut comprendre que l'Univers était à l'époque, et est toujours, un immense espace essentiellement vide. Sur Terre, ou sur n'importe quelle étoile, la densité y est bien plus grande, mais les distances entre les astres sont tellement grandes que la densité moyenne de l'Univers ne dépasse pas... 5 protons par mètre cube! Par comparaison, 1 mètre cube d'eau contient 6×10^{29} protons et neutrons, ces deux particules ayant plus ou moins la même masse. Il n'y a donc rien d'étonnant à ce que presque toute la lumière présente