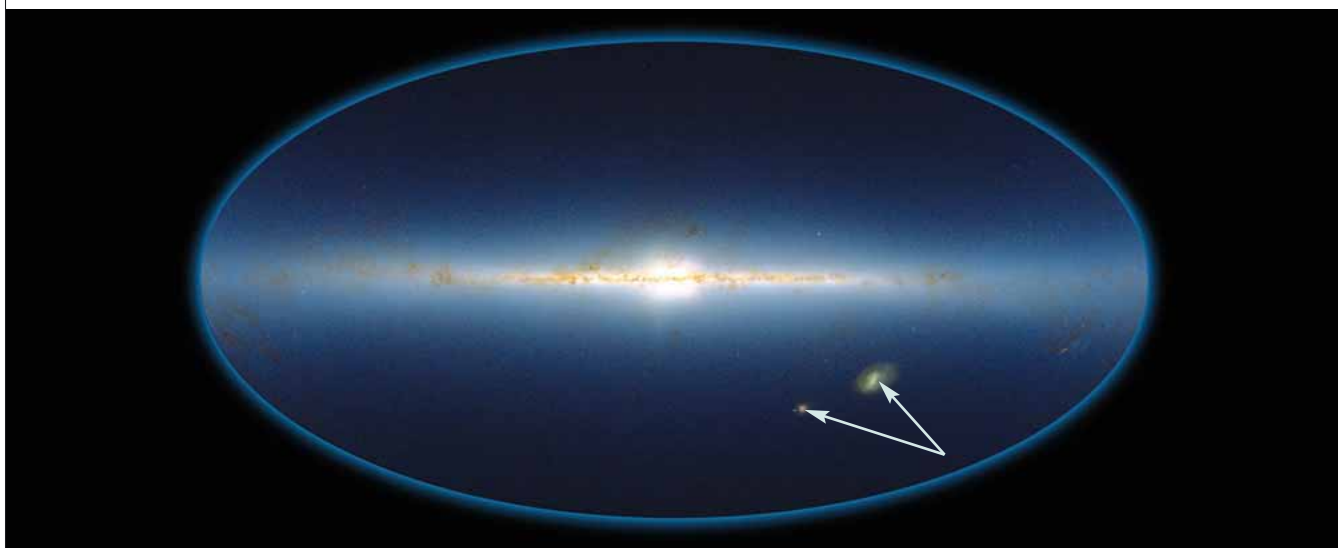


Odyssée dans la part sombre de l'Univers

La cosmologie serait-elle entrée dans une des phases les plus passionnantes de son histoire ? Les astrophysiciens et physiciens des particules le pensent, vu la moisson de données transmise par les télescopes qu'ils ont posés à terre, voire sous terre, et même dans des satellites, pour tenter d'élucider les mystères de la structuration de l'Univers. De l'analyse de ces données, ils attendent un éclaircissement sur les différentes versions du plus célèbre modèle cosmologique : le big bang. Mais ils espèrent aussi que ces données leur permettront bientôt de lever une partie du voile sur le double mystère de la matière et de l'énergie noires.



La Voie lactée dans le domaine infrarouge avec les Nuages de Magellan, deux galaxies satellites de la nôtre visibles à droite de l'image. Image mosaïque obtenue par le *Two Micron All Sky Survey*, programme conjoint de l'Université du Massachussets, de l'Institut de technologie de Californie et financé par la NASA.

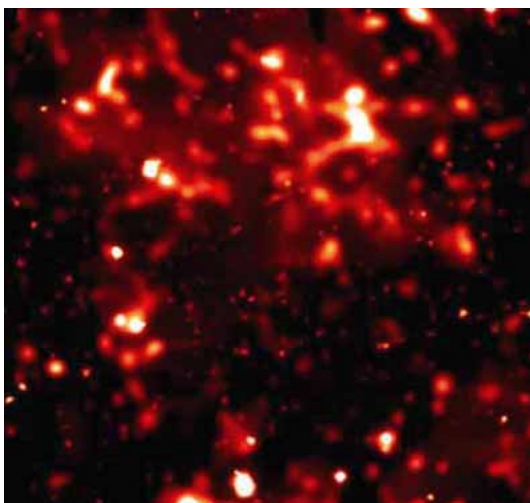
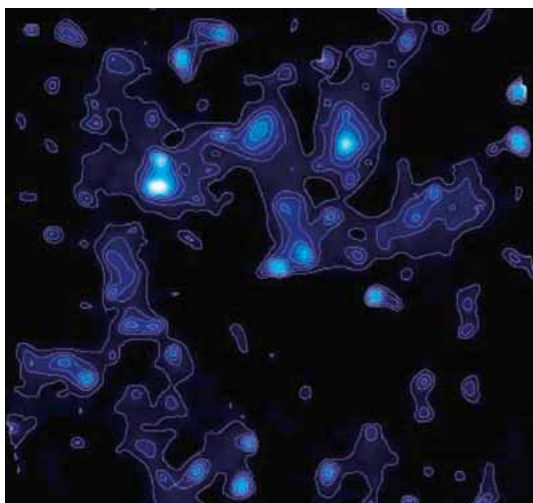
1. L'énigmatique matière noire

Astrophysique et observation de la matière noire

Regroupant des dizaines de milliards d'étoiles, les galaxies peuvent elles-mêmes s'assembler par dizaines ou centaines et former aussi des amas. Les mouvements qui les animent intriguent depuis longtemps les astrophysiciens, d'autant que des études récentes concluent qu'une partie de la masse de l'Univers échapperait aux observations des chercheurs. L'atome ne serait-il alors que l'écume de la matière ?

Il arrive qu'un astre se découvre par le seul calcul. Ainsi, en 1844, l'astronome Friedrich Bessel⁽¹⁾ attribue les anomalies du mouvement propre apparent de l'étoile Sirius à la présence d'un « compagnon » invisible. Dix-huit ans plus tard, la confirmation de ce calcul arrive par la découverte d'une **naine blanche** faisant de Sirius une **étoile** binaire. Dans la foulée, en 1846, Urbain Le Verrier⁽²⁾ et John-Couch Adams⁽³⁾

envisagent qu'une planète inconnue soit à l'origine des mouvements d'Uranus, là encore qualifiés « d'anormaux ». Suivant les indications d'Urbain Le Verrier, l'astronome Johann Galle⁽⁴⁾ observe ensuite la **planète** Neptune à moins d'un degré de la position calculée à partir des écarts que manifeste Uranus par rapport aux **lois de Newton**. En 1932, Jan Oort⁽⁵⁾ étudie la distribution des vitesses d'étoiles situées dans



R. Massey/NASA

Carte de la matière noire (en bleu, à gauche) et de la matière visible (en rouge, à droite) d'une même région de l'Univers. Les concentrations les plus denses de matière se retrouvent identiques sur les deux images, démontrant que la matière visible se concentre dans les régions où la matière noire domine.

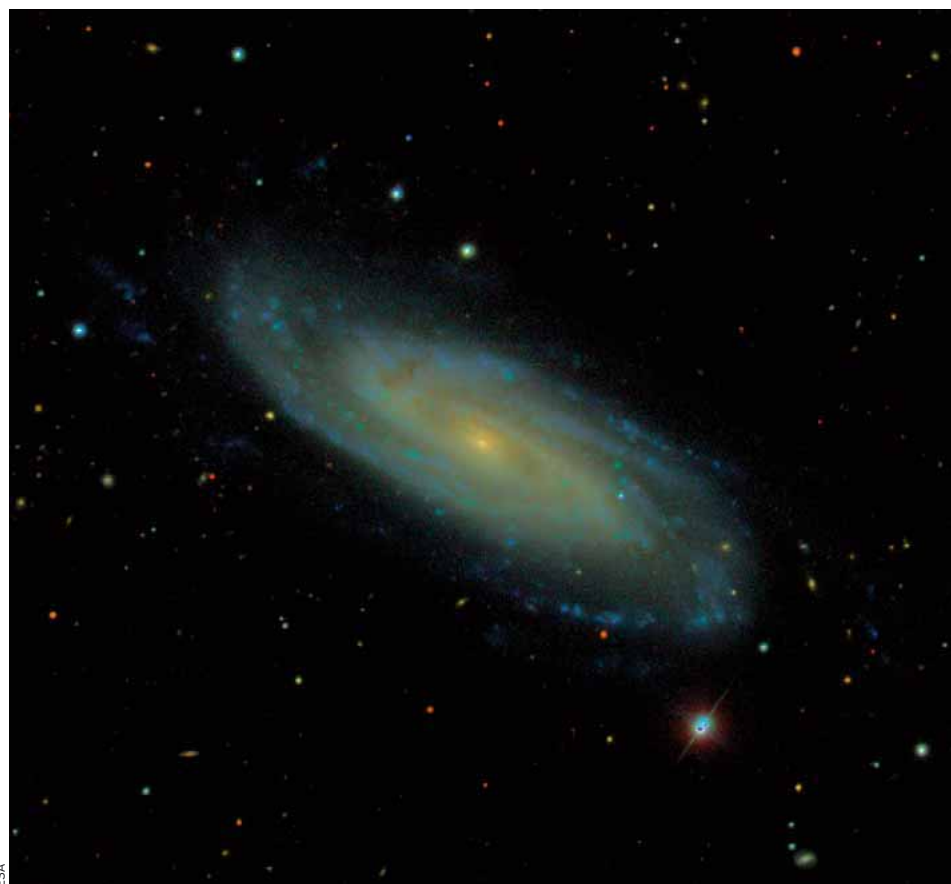
le voisinage du **Soleil** pour déterminer le champ gravitationnel local. Il suggère que ces étoiles ne contribuent que pour moitié à la quantité de matière nécessaire pour expliquer leurs mouvements. Parallèlement, l'Américain Fritz Zwicky⁽⁶⁾ étudie la distribution des vitesses des **galaxies** dans le grand amas de la constellation boréale nommée Coma Berenices. Et, en 1933, il peut également avancer que les galaxies de l'**amas** ne représentent que 10 % de la masse nécessaire pour expliquer les vitesses mesurées. L'essentiel de la masse de l'amas serait donc une forme non lumineuse. Malgré son importance, cette découverte ne trouvera guère de retentissement et plus de quarante ans s'écouleront avant qu'une accumulation de données, conduisant toutes à ce même constat, ne la fasse revenir au premier plan. Aujourd'hui, près de quatre-vingts ans après l'observation de Fritz Zwicky, ses conclusions se confirment : une fraction importante de la masse de l'Univers ne serait effectivement pas lumineuse !

La **matière noire** soulève donc une série d'interrogations – en relation ou pas entre elles – qui se posent aussi bien à l'échelle des galaxies, que des amas de galaxies ou de l'Univers tout entier.

La matière noire dans les galaxies

La vitesse de rotation d'une galaxie spirale se mesure par le **décalage Doppler**, soit de la lumière des étoiles formant le disque de cette galaxie, soit de

nuages d'**hydrogène** neutre localisés au-delà de son bord lumineux. La courbe obtenue, représentant la vitesse de rotation du disque en fonction de la distance au centre de la galaxie, permet de déterminer la distribution de masse de la galaxie, tout comme une planète en orbite autour du Soleil permet de déduire la masse du Soleil si la distance qui le sépare de la planète est connue. Mais il se trouve que la comparaison entre cette distribution de masse déterminée par l'influence gravitationnelle



ESA

Image de la galaxie spirale NGC 3198 dont la courbe de rotation indique que les étoiles qui la composent ne contribuent que faiblement à sa masse. Il semblerait que, comme beaucoup d'autres, cette galaxie soit entourée d'un halo massif de matière sombre.

(1) Friedrich Bessel (1784-1846), astronome et mathématicien allemand, fondateur de l'école allemande d'astronomie d'observation.

(2) Urbain Le Verrier (1811-1877), astronome et mathématicien français spécialiste en mécanique céleste.

(3) John-Couch Adams (1819-1892), astronome et mathématicien britannique ayant prédit l'existence et la position de la planète Neptune, en ne se basant que sur les mathématiques.

(4) Johann Galle (1812-1910), astronome allemand de l'observatoire de Berlin.

(5) Jan Oort (1900-1992), astronome néerlandais, directeur de l'observatoire de Leyde de 1945 à 1970, qui mena de nombreuses recherches sur notre Galaxie.

(6) Fritz Zwicky (1898-1974), astrophysicien américano-suisse, connu comme le plus grand découvreur de supernovae.

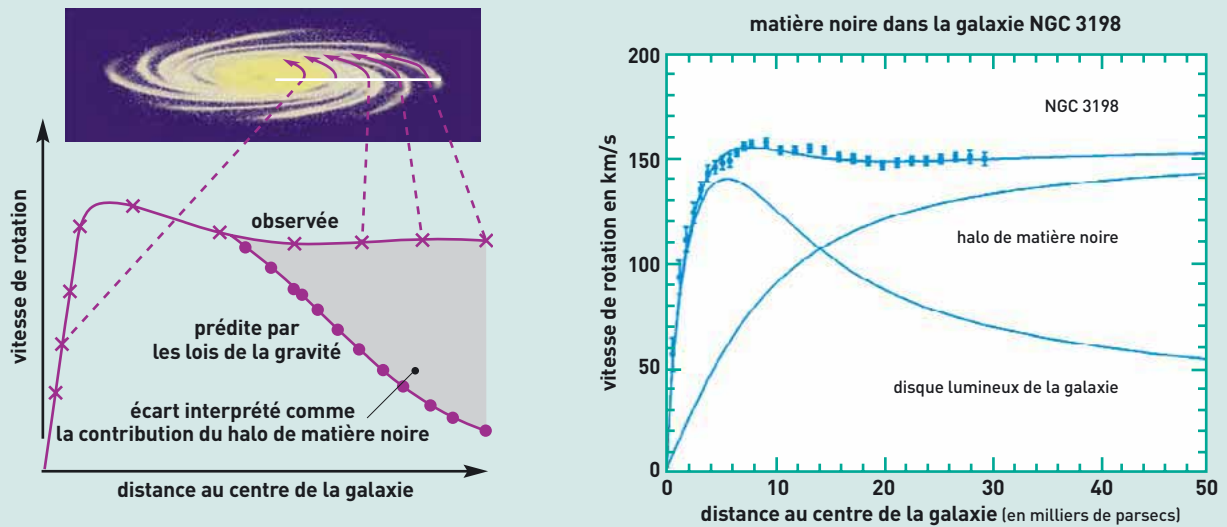


Figure 1. La vitesse de rotation des galaxies spirales suggère qu'elles contiennent une importante quantité de matière sombre. En effet, contrairement à la décroissance prédite d'après la baisse de luminosité du disque d'étoile, au fur et à mesure de l'éloignement du centre de la galaxie, la vitesse de rotation mesurée demeure constante.

de la galaxie et celle estimée à partir de la **luminosité** des étoiles, laisse apparaître un net désaccord. En effet, la luminosité du disque stellaire décroissant exponentiellement en fonction de la distance avec le centre de la galaxie, tout laisse à penser que la masse de la galaxie se concentre essentiellement dans son centre ; pourtant, la vitesse de rotation demeurant constante, aussi loin qu'on pousse la mesure, ce résultat démontre qu'au contraire, une importante quantité de matière se trouverait dans les régions de luminosité faible ou nulle (figure 1). Des études systématiques, portant sur des milliers de galaxies, attestent à la fois le caractère universel de ce phénomène et la présence d'un excédent de matière noire dans presque toutes les galaxies spirales. Cette anomalie s'explique par la présence

d'un **halo** massif, grossièrement sphérique, s'étendant de dix à vingt fois plus loin que le disque d'étoiles. Pour l'hypothèse la plus courante, ce halo sombre se compose d'astres compacts très faiblement lumineux : planètes, étoiles en fin de vie ayant brûlé tout leur combustible (naines blanches) ou **trous noirs**. Restait à vérifier cette hypothèse, d'où l'expérience EROS (pour Expérience de recherche d'objets sombres), conduite par l'Irfu, qui a mesuré, nuit après nuit, la lumière des étoiles de deux galaxies satellites de la **Voie lactée** : les Nuages de Magellan. Il s'agissait de chercher une amplification lumineuse temporaire causée par la gravitation d'un astre sombre du halo, lors de son passage sur la ligne de visée d'une des étoiles observées. Dix années de « traque » permettront d'exclure l'hypothèse que le halo sombre de notre Voie lactée soit majoritairement constitué d'astres non lumineux. Et donc, la nature de cette matière sombre garde tout son mystère.

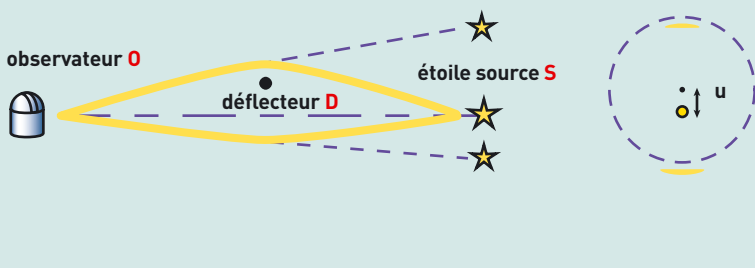
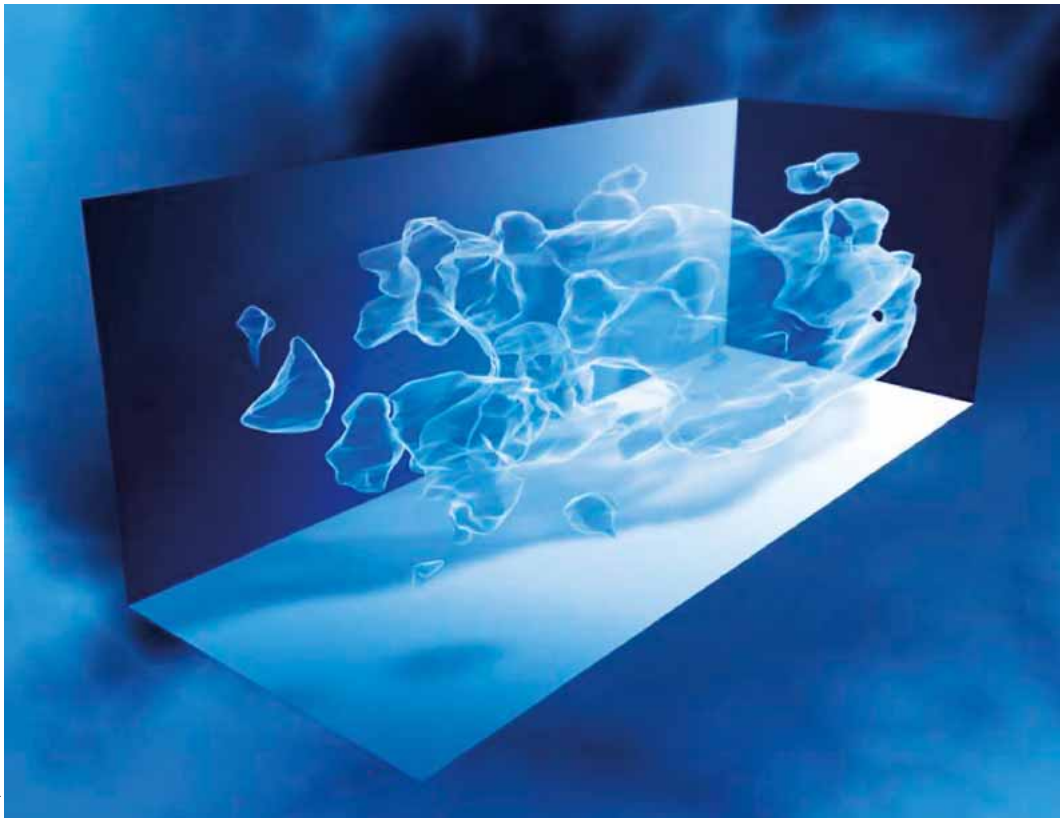


Figure 2. Schéma décrivant le principe du mirage gravitationnel. À gauche : l'astre sombre central déforme l'espace-temps modifiant le trajet des rayons lumineux qui passent dans son voisinage. À droite : les deux trajets lumineux possibles donnent chacun une image déformée de l'étoile ou de la galaxie située derrière l'astre responsable du mirage gravitationnel (« u », le paramètre d'impact, représente la distance entre l'objet massif et la ligne de visée vers l'étoile ; l'effet de mirage gravitationnel est d'autant plus prononcé que « u » s'avère petit).

La matière noire dans les amas de galaxies

Les premiers soupçons sur la présence de matière noire dans les amas de galaxies remontent à Fritz Zwicky. En 1933, il avança que l'amas nommé Coma Berenices contient nettement plus de matière sombre que de matière lumineuse. Son analyse s'appuyait sur un résultat de mécanique classique, dit *théorème du viriel*, selon lequel, dans un système en équilibre dynamique, la somme de l'énergie potentielle et du double de l'énergie cinétique, est égale à zéro. D'où l'estimation immédiate de la masse de l'amas de galaxies, en fonction de sa taille et de la vitesse des galaxies le composant. Cette méthode laisse néanmoins planer quelques incertitudes découlant de la difficulté de dénombrer les galaxies composant les



Carte tridimensionnelle de la matière noire déduite de la distribution des arcs dans la portion d'Univers observée.

amas, sans y intégrer des galaxies extérieures, tout en comptant des galaxies de très faible luminosité. En outre, l'amas ne se trouve pas toujours en équilibre dynamique (condition d'application du théorème du viriel) car le temps de sa mise en équilibre peut dépasser les dix milliards d'années. Enfin, la situation n'offre qu'une vue partielle car toutes les distances apparaissent en projection et n'autorisent que la mesure des seules vitesses radiales.

Pourtant, les résultats obtenus par l'analyse du rayonnement X, émis par le gaz chaud diffus localisé entre les galaxies des amas, vont confirmer cette hypothèse. Les mesures réalisées par des satellites comme Röntgensatellit (ROSAT), lancé par l'Allemagne en 1990, XMM-Newton, de l'Agence spatiale européenne (ESA), ou encore Chandra, de la NASA, lancés tous deux en 1999, sont unanimes : le gaz qui baigne les galaxies semble en équilibre dans le champ de gravité de l'amas, lequel est engendré par les galaxies, le gaz chaud et la matière noire. De plus, l'intensité de l'émission X du gaz permet de calculer non seulement la masse de gaz mais aussi le potentiel gravitationnel dans lequel il se trouve plongé et donc, la masse totale de l'amas. Pour un amas typique, les étoiles représenteraient donc 2 à 4 % de la masse totale et le gaz chaud 12 à 16 % seulement. Même en tenant compte de la matière sombre déduite de l'étude de leurs courbes de rotation, les galaxies apparaissent donc comme négligeables dans le bilan de la masse des amas.

En 1986, une autre méthode fondée sur l'étude de *mirages gravitationnels* présents autour des amas de galaxies a confirmé ces résultats (figure 2). Parmi les observations les plus spectaculaires figurent celles d'*arcs lumineux* montrant des décalages spectraux nettement supérieurs à celui de l'amas. Les astro-

physiciens y voient des images de galaxies situées derrière l'amas et déformées par le champ gravitationnel de celui-ci. Il s'agit de mirages gravitationnels, ce que la **théorie de la relativité générale** d'Albert Einstein permet de comprendre. En effet, si la gravitation résulte de la déformation imposée par la matière et l'énergie à l'**espace-temps**, alors la lumière elle-même devient sensible à la gravité puisqu'elle suit les lignes du plus court chemin de l'espace-temps courbé par la matière. Outre ces arcs lumineux, les observations révéleront également un phénomène encore plus fréquent, celui des « arcslets », petites images de galaxies d'arrière-plan, légèrement tordues par le champ de l'amas. La répartition, l'orientation et l'intensité de ces distorsions permettent de reconstituer, avec une remarquable précision, la distribution de masse de l'amas responsable. Une équipe internationale de scientifiques, comprenant des chercheurs de l'Irfu, a ainsi réalisé la première carte tridimensionnelle de la distribution de matière noire dans une portion d'Univers.

Ces études, indépendantes les unes des autres, convergent en faveur de masses élevées pour les amas de galaxies. Elles confirment donc les résultats obtenus par les distributions de vitesses et l'émission X.

La matière noire à l'échelle de l'Univers

L'étude du **rayonnement** à 2,7 K qui baigne aujourd'hui l'ensemble de l'Univers permet également de déterminer la composition de l'Univers dans son ensemble. D'où vient ce rayonnement ? Notre Univers étant en expansion, il a dû passer par une phase plus dense et plus chaude que celle qui

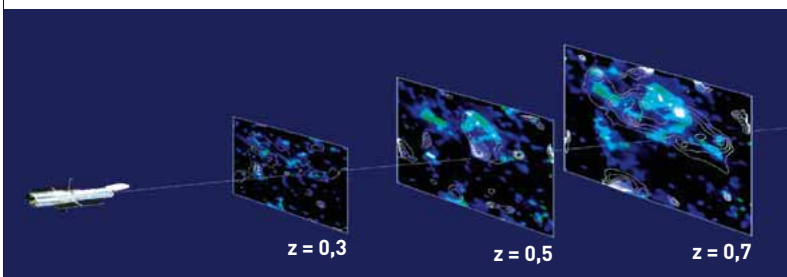


NASA

Les arcs lumineux autour de l'amas de galaxie Abell 2218 sont des images déformées de galaxies situées derrière l'amas photographié. Le champ gravitationnel de l'amas agit comme une lentille déformant les objets en arrière-plan.

prévaut actuellement. Après 380 000 ans d'expansion, l'Univers s'est suffisamment refroidi pour que les électrons et les protons s'assemblent pour former des atomes d'hydrogène neutre. Toutes les conditions se trouvaient ainsi réunies pour que la lumière se propage librement sans trop interagir avec la matière. Cette lumière fossile a véhiculé, jusqu'à nos jours, des informations précieuses sur les conditions régnant alors dans l'Univers. Or, dans cette image à 2,7 K, d'infimes inhomogénéités, de température apparaissent, traduisant l'existence d'autres inhomogénéités, notamment de densité de matière. Pour les astrophysiciens, il s'agit de galaxies et d'amas de galaxie en germes. Dans le **Modèle standard** de la **cosmologie**, l'étude statistique de ces inhomogénéités a permis d'estimer la densité de matière et d'énergie présente dans l'Univers avec une surprise à la clé: non seulement la densité de matière dépasse d'un facteur dix la densité de matière lumineuse (étoiles, gaz ...) mais la densité totale d'énergie dans l'Univers surpasse aussi celle de la matière (voir *Astrophysique et observation de l'énergie noire*, p. 81). Ceci induit la présence d'une composante d'énergie non détectée jusqu'alors.

Néanmoins, cette étude recèle encore des incertitudes. Aussi a-t-il fallu tester la validité des résultats annoncés par des études indépendantes. Des mesures récentes, portant sur la distribution spatiale des galaxies semblent privilégier une séparation inter-galaxies de 150 millions de **parsecs**, correspondant à une prédiction des modèles de matière noire froide (voir *Théorie de la matière noire*, p. 77). L'explication vient du fait que de petites fluctuations opérant dans l'Univers primordial – contenant à la fois des **photons**, des électrons et de la matière noire – évoluent à la manière d'une **onde** sphérique sous l'effet de la pression des photons et cela, jusqu'à la formation des premiers atomes d'hydrogène. Les photons s'échappent alors du mélange et l'onde demeure figée à la distance qu'elle a parcourue pendant 380 000 ans (l'âge de l'Univers lors du gel de l'onde). Aujourd'hui, cela correspond à une taille de 150 millions de parsecs. Les galaxies se construisent dans les régions plus denses, de sorte qu'elles se retrouvent essentiellement à la position de la fluctuation initiale ou du bourrelet de matière distant de 150 millions de parsecs. La mesure de cette distance confirme la densité de matière dans l'Univers, corroborant les résultats apportés par les études sur le rayonnement à 2,7 K, ainsi que l'existence d'une grande quantité de matière noire à l'échelle de l'Univers.



R. Maassay/NASA

Cartographie de la matière noire selon la distance dans trois tranches d'Univers correspondant à un âge de 7 ($z = 0,7$), 9 ($z = 0,5$) et 10 ($z = 0,3$) milliards d'années, et montrant la concentration progressive de matière noire au cours de l'évolution cosmique. z désigne le *redshift*, ou décalage vers le rouge. Plus z est grand, plus la distance spatio-temporelle de l'objet est grande.

> Nathalie Palanque-Delabrouille

Service de physique des particules
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
CEA Centre de Saclay (Gif-sur-Yvette)

> Roland Lehoucq

Service d'astrophysique (SAP)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)