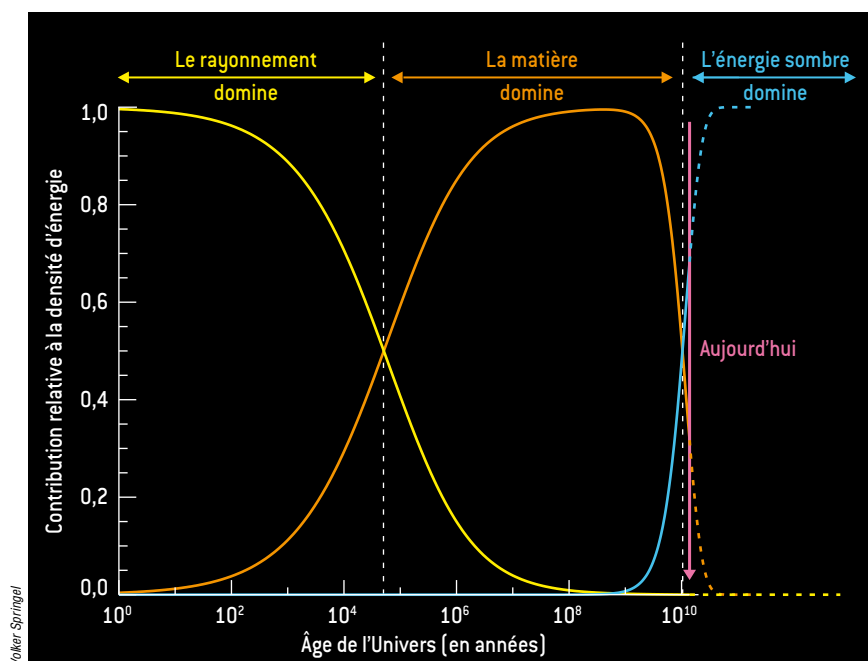




6. LA DENSITÉ D'ÉNERGIE de l'Univers a d'abord été dominée par les photons, qui se sont rapidement dilués en raison de l'expansion de l'Univers. Après 100 000 ans, la matière s'est imposée car elle se dilue plus lentement. L'énergie sombre, dont la densité reste constante malgré l'expansion de l'espace, est devenue l'élément prépondérant vers 10 milliards d'années après le Big Bang. Sa densité est environ deux fois supérieure à celle de la matière aujourd'hui.

Brian Schmidt, de l'Université de Canberra en Australie, et d'Adam Riess, alors à l'Université de Californie à Berkeley, ont montré que l'expansion de l'Univers s'accélère, phénomène qui s'expliquerait grâce à l'énergie sombre. Les astrophysiciens, récompensés en 2011 par le prix Nobel de physique pour cette découverte, avaient étudié un grand nombre de supernovæ lointaines de type Ia. Ces objets correspondent à l'explosion d'étoiles de type naines blanches.

La luminosité d'une supernova augmente rapidement et peut dépasser celle d'une galaxie, puis elle décroît lentement. À partir de cette courbe de luminosité, il est possible de connaître la quantité de lumière émise par la supernova. Les supernovæ sont qualifiées de « chandelles standard », car les astrophysiciens ont utilisé cette luminosité pour déterminer la distance qui sépare la Terre de chaque supernova. Ils ont aussi mesuré le décalage vers le rouge du spectre de chaque supernova, dû à l'allongement de la longueur d'onde de la lumière sous l'effet de l'expansion de l'espace, pour calculer la vitesse d'éloignement de l'astre. Le rapport de la vitesse et de la distance détermine le taux d'expansion de l'Univers sur le parcours de la lumière.

■ BIBLIOGRAPHIE

A. Riazuelo, *La trace de l'invisible*, Dossier Pour la Science, n° 83, avril-juin 2014.

L. Amendola et al., *Cosmology and fundamental physics with the Euclid Satellite*, Living Reviews in Relativity, vol. 16, n° 5, 2013.

C. Frenk et S. D. M. White, *Dark matter and cosmic structures*, Annalen der Physik, vol. 524, pp. 507-524, 2012.

P. J. E. Peebles, *Seeing cosmology grow*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, vol. 50, pp. 1-28, 2012.

G. Bertone et al., *Particle dark matter: evidence, candidates and constraints*, Physics Reports, vol. 405, pp. 279-390, 2005.

À courte distance, la loi dite de Hubble est vérifiée : la vitesse d'éloignement de deux galaxies, en raison de l'expansion de l'Univers, est proportionnelle à la distance qui les sépare. À plus grande distance, la variation temporelle de la vitesse d'expansion cosmique entre également en jeu. Les données des supernovæ ont montré que l'expansion de l'Univers était plus faible dans le passé, donc qu'elle s'accélère depuis environ cinq milliards d'années. L'énergie sombre permet d'expliquer cette observation. En outre, la quantité d'énergie sombre requise par les données concorde avec les résultats obtenus à partir d'analyses du fond diffus cosmologique et d'autres observations.

L'énergie sombre pourrait être ce que les cosmologistes nomment une constante cosmologique, c'est-à-dire une substance dont la densité d'énergie reste constante malgré l'expansion de l'Univers. Sa contribution à la densité d'énergie cosmique dans l'Univers jeune était insignifiante par rapport à celle de la matière. Comme la matière se dilue avec l'expansion, la part de l'énergie sombre dans la densité d'énergie a augmenté progressivement. Aujourd'hui, elle domine et son rôle dans la dynamique de l'Univers est devenu crucial, avec comme effet une accélération de l'expansion.

L'énergie sombre, l'autre inconnue

Une des questions qui intriguent les scientifiques est la raison pour laquelle les densités d'énergie sombre et de matière noire sont du même ordre de grandeur (voir la figure 6). De nombreux chercheurs sont persuadés que cette coïncidence n'est pas un simple hasard. Certains ont développé des modèles qui introduisent une interaction de l'énergie sombre avec la matière noire. Des approches plus radicales misent sur des modifications de la loi de la gravitation elle-même. Les hypothèses ne manquent pas, même si elles semblent parfois exotiques (voir l'article de C. Deffayet page 38).

Les modèles proposés présentent des caractéristiques différentes, mais pour y voir plus clair, contraindre et éliminer des scénarios, de nouvelles observations sont nécessaires. Les scientifiques travaillent depuis plusieurs années, non seulement à mesurer avec encore plus de précision l'accélération de l'expansion de l'Univers,

mais aussi à reconstituer l'histoire de l'expansion. Comprendre l'évolution de l'Univers permettrait de mieux cerner les propriétés de l'énergie sombre et ainsi d'éliminer certaines hypothèses sur sa nature.

Le projet le plus ambitieux dans ce domaine est la mission *Euclid* de l'Agence spatiale européenne. Plus d'un millier de physiciens et d'ingénieurs participent à ce projet. Le satellite doit être lancé vers 2020 et exploitera plusieurs effets physiques pour mesurer l'expansion de l'espace. Parmi ces effets figurent celui de lentille gravitationnelle et les oscillations baryoniques acoustiques. Ces dernières proviennent des oscillations de la matière baryonique dans le plasma primordial, qui laissent aussi leurs traces dans le fond diffus cosmologique. Les oscillations se sont également imprimées dans la répartition de la matière, les zones les plus denses du plasma ayant donné naissance aux galaxies et aux amas de galaxies. Les oscillations peuvent de ce fait être étudiées en examinant la répartition statistique des galaxies dans l'Univers.

Ces oscillations peuvent servir d'échelle de mesure gigantesque. En observant les échelles caractéristiques de distribution de la matière à différentes époques du développement cosmique, il est possible de reconstituer l'histoire de l'expansion de l'Univers.

L'évolution cosmique mesurée par *Euclid*

Pour ce faire, le satellite *Euclid* mesurera le décalage vers le rouge de plus de 100 millions de galaxies. En outre, il déterminera la forme – l'ellipticité – de plus de deux milliards de galaxies. Ces mesures mettront en évidence les déformations dues à l'effet de lentille gravitationnelle, qui à leur tour permettent de mesurer la densité cosmique de matière à différentes époques et la vitesse de développement des structures cosmiques. Cela représentera *in fine* une méthode supplémentaire et indépendante pour mesurer les propriétés de l'énergie sombre.

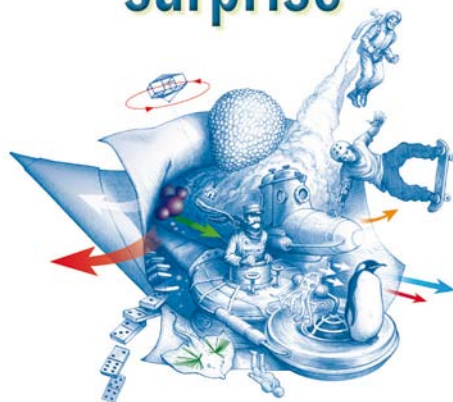
Les astrophysiciens ont accumulé de nombreuses observations, diverses et indépendantes, qui pointent vers l'exis-

tence de la matière noire et de l'énergie sombre. Mais d'autres scénarios sont proposés, étudiés et comparés. Lorsque les scientifiques sont confrontés à plusieurs explications différentes d'un même phénomène, ils choisissent en général la plus simple. Ce principe, connu sous le nom de rasoir d'Ockham, s'applique-t-il à l'hypothèse d'un Univers en majeure partie composé d'une matière noire et d'une énergie sombre ? Aussi audacieuse qu'elle paraisse, cette hypothèse semble mieux placée que tous les autres scénarios quand on considère leur plausibilité et leur simplicité. Mais ce n'est qu'en détectant directement des particules de matière noire que nous pourrions balayer les doutes sur cette dernière. Quant à l'existence de l'énergie sombre, il sera sans doute plus difficile de convaincre les sceptiques : cette composante cosmique sera probablement impossible à détecter directement dans des laboratoires terrestres. La recherche des composantes invisibles de l'Univers reste ainsi l'un des plus grands défis de l'astrophysique et de la cosmologie. ■

La physique surprise

Jean-Michel Courty • Édouard Kierlik

La physique surprise



elin POUR LA SCIENCE

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

Que nous réserve cette Physique surprise ?

Trente-neuf pièces à déguster sans modération, mitonnées par les auteurs. Le style et les croquis, l'actualité et la variété des thèmes vous séduiront, vous amuseront, vous surprendront. Oui, on peut franchir le mur du son en chute libre.

Non, les veines ne sont pas bleues. Oui, on peut séparer le chaud et le froid dans un courant d'air. Alors... Bon appétit !

Éditions Belin/Pour la Science 2013

184 pages – 24 euros – ISBN 978-2-8425-5121-9

Disponible en librairie et sur www.pourlascience.fr