

matière noire et 70 pour cent d'énergie sombre (voir la figure 1).

La présence de matière noire a été mise en évidence quand on a comparé la quantité de matière baryonique présente dans certaines galaxies à la quantité de matière nécessaire pour expliquer les mouvements dus aux forces gravitationnelles au sein de ces mêmes galaxies. Constatant que la matière baryonique ne suffisait pas à expliquer ces mouvements, les astrophysiciens ont conjecturé la présence d'une nouvelle forme de matière aux propriétés gravitationnelles analogues à celles de la matière ordinaire, mais n'interagissant pas avec elle : la matière noire.

La force gravitationnelle exercée par la matière noire est attractive. Elle tend donc à freiner le mouvement relatif de deux corps libres de toute force autre que gravitationnelle, qui s'éloigneraient. On suppose que la matière noire est composée de particules, et de nombreuses expériences visent à les détecter et ainsi à déterminer la nature de la matière noire (voir les articles de Volker Springel page 22 et de Richard Taillet page 30).

La composante de l'Univers qui nous intéresse ici est l'énergie sombre, dont les propriétés gravitationnelles sont, comme nous le verrons, plus exotiques que celles de la matière (baryonique et noire). L'idée de son existence est née lorsqu'on a cherché à mesurer les variations de la vitesse d'expansion de l'Univers, dans les années 1990.

Mesurer l'expansion de l'Univers

La dynamique de l'Univers aux grandes échelles a été découverte dans les années 1920, lorsque l'on a observé que le spectre de la lumière provenant de galaxies lointaines était décalé vers le rouge de façon systématique. Ce résultat est dû à l'effet Doppler : la longueur d'onde d'un signal sonore ou électromagnétique s'étire quand l'émetteur s'éloigne du récepteur. L'astronome Edwin Hubble a établi une relation de proportionnalité, la « loi de Hubble », entre la vitesse de fuite et la distance des galaxies. Un objet deux fois plus distant qu'un autre fuit ainsi à une vitesse deux fois plus élevée. Dans le cadre de la relativité générale, les observa-

tions de Hubble ont été interprétées comme une expansion de l'Univers : c'est l'espace, dans lequel sont situées les galaxies, qui s'étire et donne l'impression que les objets s'éloignent les uns des autres. Le coefficient de proportionnalité de la loi de Hubble est nommé constante de Hubble. Il a été déterminé avec une précision de l'ordre de un pour cent et vaut environ 21 kilomètres par seconde et par million d'années-lumière. Ainsi, une galaxie distante de 100 millions d'années-lumière et emportée par l'expansion de l'Univers s'éloigne de nous à la vitesse de 2 100 kilomètres par seconde, soit près de 8 millions de kilomètres par heure.

En accord avec le principe copernicien (ou principe cosmologique), qui postule qu'il n'existe pas de lieu privilégié dans l'Univers, un observateur qui scruterait le cosmos aujourd'hui depuis une autre galaxie que la nôtre obtiendrait les mêmes résultats ; en particulier, il mesurerait la même valeur pour la constante de Hubble.

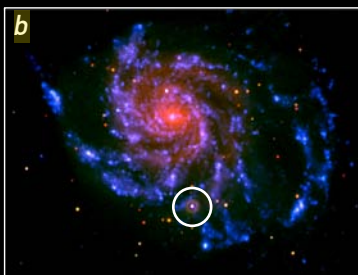
Cependant, le principe cosmologique n'implique pas qu'un observateur ayant mesuré la constante de Hubble dans le passé obtienne le même résultat. En effet,

LES SUPERNOVÆ DE TYPE IA POUR CARTOGRAPHIER L'UNIVERS

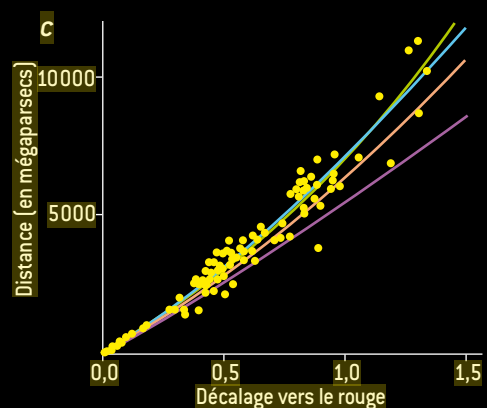
Les supernovæ de type Ia sont qualifiées de chandelles standard cosmologiques, car lorsque ces étoiles explosent, elles émettent toujours la même quantité de lumière (en fait, il existe des variations qui sont corrélées à d'autres paramètres mesurables tels que la durée de l'explosion et dont tiennent compte les observateurs pour étalonner cette quantité de lumière). De fait, elles servent de référence pour mesurer les distances dans l'Univers. L'émission de lumière est considérable : une supernova peut devenir plus brillante que la galaxie qui l'abrite (a et b). Il est ainsi possible d'observer ces explosions dans des objets très lointains. Comme la quantité de lumière émise est connue, on peut, en observant une supernova, en déduire sa distance. On mesure aussi le décalage vers le rouge

de son spectre lumineux, dont on déduit la vitesse à laquelle la supernova s'éloigne, ce qui correspond à la vitesse d'expansion de l'Univers.

En réalisant cette mesure pour un grand nombre de supernovæ situées à différentes distances, on détermine la dynamique d'expansion de l'Univers. Les mesures publiées en 1998 ont montré que l'expansion s'est accélérée depuis quelques milliards d'années (c). Les supernovæ les plus proches de nous n'ont subi qu'une faible variation de vitesse de l'expansion (leur distance et leur vitesse suivent une loi linéaire, la loi de Hubble). En revanche, pour les supernovæ lointaines (donc plus anciennes), la vitesse s'écarte de la loi linéaire et est plus faible : l'expansion était donc plus lente dans le passé.



LES MESURES DE LA DISTANCE ET DE LA VITESSE d'éloignement (reliée au décalage vers le rouge du spectre) des supernovæ proches (telles SN 2011fe dans la galaxie M101 avant, a, et pendant l'explosion, b) vérifient la loi de Hubble linéaire (c). Les variations de la vitesse d'expansion se manifestent pour les supernovæ lointaines (les courbes correspondent à différents modèles cosmologiques).



NASA/Smithsonian/Johns Hopkins University/University of Hawaii

la constante a pu varier au cours du temps. Mesurer cette variation consiste précisément à estimer l'accélération ou la décélération de l'expansion de l'Univers. Jusqu'en 1998, le consensus chez les cosmologistes était que l'expansion devait ralentir. En effet, la matière ordinaire et la matière noire s'opposent à l'expansion, un peu comme l'attraction gravitationnelle exercée par le Soleil tend à ralentir le mouvement de fuite d'une comète.

Dans les années 1990, deux équipes, l'une dirigée par Saul Perlmutter (du Laboratoire américain de Berkeley), et l'autre par Brian Schmidt et Adam Riess (respectivement à l'Université de Canberra en Australie, et à l'Université de Californie à Berkeley), ont entrepris de mesurer les variations de vitesse de l'expansion entre aujourd'hui et il y a plusieurs milliards d'années. Ces trois astrophysiciens ont reçu le prix Nobel de physique en 2011 pour ces travaux, qui reposaient sur la mesure de la distance et de la vitesse de fuite de supernovæ de type Ia, un type particulier d'explosion d'étoiles (voir l'encadré page ci-contre). Les premiers résultats ont été publiés en 1998 et ce fut une surprise : l'expansion de l'Univers accélère. Par ailleurs, ce phénomène a débuté relativement récemment dans l'histoire cosmique, quand l'Univers était environ deux fois plus jeune qu'aujourd'hui.

Si ce résultat n'était pas celui que les chercheurs attendaient, il n'est cependant pas difficile à reproduire dans le cadre de la relativité générale : il suffit de donner une valeur non nulle à la « constante cosmologique ». Rappelons que cette constante a été introduite par Einstein dans ses équations de la relativité générale – avant la découverte de l'expansion cosmique – pour que ces équations correspondent à un univers statique. Il suffisait d'ajuster la valeur de cette constante pour contrebalancer l'effet attractif de la matière.

Mais que représente physiquement cette constante cosmologique ? L'ajout de ce terme dans les équations d'Einstein est l'équivalent mathématique de l'addition d'un nouveau contenu dans l'Univers dont les propriétés sont très différentes de celles de la matière ordinaire. Par exemple, ce nouveau contenu a une densité d'énergie constante au cours de l'histoire cosmique, alors que celle de la matière ordinaire diminue avec l'expansion de l'espace-temps (la quantité de matière ordinaire initialement présente dans l'Univers reste constante, tandis que le volume augmente). La densité d'énergie associée à

la constante cosmologique ne varie pas, ce qui signifie que, dans un volume d'Univers dilaté par l'expansion cosmique, il y a une création continue d'énergie.

Une autre propriété étrange de la constante cosmologique est qu'il lui est associée une pression négative. De façon générale, la pression est définie comme une force agissant sur une surface. Par exemple, la pression cinétique d'un fluide est due aux chocs des molécules sur les parois du récipient. Le fluide exerce une poussée sur les parois et la pression est positive. Une pression négative peut apparaître sur les parois d'un récipient, par exemple si la pression extérieure est plus élevée que celle à l'intérieur.

Comment la pression d'une composante de l'Univers agit-elle sur la dynamique de celui-ci ? La pression positive de la matière est interprétée comme un surplus d'énergie cinétique qui s'ajoute au bilan de la densité d'énergie de l'Univers. Elle tend donc à ralentir l'expansion. En revanche, un fluide présentant une pression négative, comme celui associé à la constante cosmologique, a une contribution opposée et crée une sorte de force répulsive : la vitesse d'expansion de l'Univers augmente au lieu de diminuer.

Une pression négative

La constante cosmologique est donc associée à une pression négative et à une densité d'énergie constante, dont la valeur est estimée grâce aux observations astrophysiques. Elle est très faible : l'énergie contenue dans un volume équivalent à celui d'une piscine olympique pourrait alimenter une ampoule de un watt pendant moins d'un millionième de seconde !

À partir de ces propriétés, les physiciens ont commencé à réfléchir à la nature de l'énergie sombre. Une possibilité émerge naturellement dans le cadre de la théorie quantique des champs, qui décrit les interactions fondamentales en combinant la notion de champ – tel le champ électromagnétique – et les règles de la physique quantique. Ainsi, le modèle standard de la physique des particules est formulé dans le cadre d'une théorie quantique des champs. Il est testé notamment dans les accélérateurs de particules tels que le LHC au CERN ; les observations s'accordent avec une grande précision aux calculs théoriques du modèle.

Dans le cadre de la théorie quantique des champs, on montre que, même en

■ L'AUTEUR



Cédric DEFFAYET
est directeur
de recherche
au CNRS et travaille
à l'Institut
d'astrophysique
de Paris et à l'Institut des
hautes études scientifiques.

■ BIBLIOGRAPHIE

C. de Rham *et al.*, **Resummation of massive gravity**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 106, 231101, 2011.

G. Börner, **L'énergie sombre et ses alternatives**, *Dossier Pour la Science*, n° 71, avril-juin 2011.

C. Deffayet *et al.*, **Accelerated universe from gravity leaking to extra dimensions**, *Phys. Rev. D*, vol. 65, 044023, 2002.

G. Dvali *et al.*, **4D gravity on a brane in 5D Minkowski space**, *Phys. Lett. B*, vol. 485, n° 1-3, pp. 208-214, 2000.

■ EN VIDÉO



La physicienne
Nathalie Palanque-
Delabrouille parle
de la recherche
de l'énergie sombre
[https://www.youtube.com/
watch?v=DeAo1ZJxBf8](https://www.youtube.com/watch?v=DeAo1ZJxBf8)