

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>