

L'addition d'une constante cosmologique ajoute un nouveau contenu à l'Univers

l'expansion de l'Univers s'éloigne de nous à la vitesse de 2100 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, 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 ont entrepris de mesurer les variations de vitesse de l'expansion entre aujourd'hui et il y a plusieurs milliards d'années (*voir À la poursuite de l'énergie sombre, par J. Frieman, page 84*). 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 attendu, 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 » (*voir Indispensable constante cosmologique, par J.-P. Luminet, page 92*). Elle 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 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 PRESSION NÉGATIVE

Une autre propriété étrange de la constante cosmologique est qu'une pression négative lui est associée. 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.

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 1 watt pendant moins d'un millionième de seconde!

Compte tenu de ces propriétés, la nature de l'énergie noire est énigmatique. 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'absence de matière, tout volume d'Univers doit contenir une certaine énergie (on parle d'énergie du vide) et une pression, dues aux fluctuations quantiques du vide et qui sont compatibles avec les caractéristiques de la constante cosmologique.

UN PROBLÈME DE 120 ORDRES DE GRANDEUR

L'énergie du vide pourrait donc résoudre la question de la nature de l'énergie sombre, mais la valeur que l'on calcule pour la densité d'énergie du vide et celle requise pour l'énergie sombre de la cosmologie sont incompatibles. Une estimation simple indique que l'énergie du vide dans un volume égal à celui d'une piscine olympique devrait suffire à pourvoir aux besoins énergétiques de l'humanité pendant 10^{97} ans ! Ce résultat est supérieur de plus de 120 ordres de grandeur à ce qui est nécessaire selon les observations cosmologiques.

Comment résoudre ce problème ? En réalité, les physiciens ne savent pas calculer rigoureusement la valeur de l'énergie du vide dans le cadre de la théorie quantique des champs. Par ailleurs, il est possible d'obtenir une valeur en accord avec les observations cosmologiques en la fixant «à la main», par l'ajustement de certains paramètres. Mais aucun principe connu ne justifie ce qui apparaît alors comme un tour de passe-passe et qui nécessite un ajustement extrêmement fin des paramètres (à plus de 120 décimales près si l'on considère le calcul simple mentionné plus haut). C'est ce que l'on nomme le premier problème de la constante cosmologique.

Un second problème apparaît lorsqu'on constate que la densité d'énergie associée à la constante cosmologique dans l'Univers aujourd'hui est du même ordre que celle de la matière (ordinaire et noire), alors même que le rapport de ces deux densités d'énergie a changé au cours de l'histoire cosmique. Il semble donc que l'humanité soit apparue à un moment particulier de l'histoire de l'Univers, celui où ces deux densités d'énergie sont proches. Certains chercheurs s'efforcent d'expliquer cette «coïncidence cosmique» qui traduit aussi le fait que l'accélération cosmique n'a débuté que récemment dans l'histoire de l'Univers.

Plusieurs approches ont été suivies pour tenter de résoudre les problèmes posés par la constante cosmologique. Mais avant d'en décrire certaines, précisons qu'aucune n'est unanimement partagée.

Le premier problème de la constante cosmologique a été énoncé bien avant la découverte de l'accélération de l'expansion cosmique, et à une époque où l'on penchait pour une décélération de l'expansion cosmique, avec une constante

cosmologique nulle. La densité d'énergie du vide calculée devait donc être nulle, ce que contredisait l'estimation évoquée précédemment. Pour y remédier, une idée était d'introduire une nouvelle symétrie en théorie quantique des champs, qui impose que cette valeur soit nulle sans avoir à faire des ajustements artificiels. Notons que si une telle symétrie existait, elle pourrait aussi conduire à une faible valeur qui suffirait à expliquer l'expansion accélérée de l'Univers. Il suffit pour cela de supposer que la symétrie est légèrement brisée dans l'Univers.

Une telle symétrie est par exemple la «supersymétrie», qui stipule que chaque particule du modèle standard a un «superpartenaire». Ces particules appariées ont la même masse mais des spins différents et leurs contributions à l'énergie du vide s'annulent mutuellement. Ainsi, l'énergie totale du vide serait nulle. Malheureusement, l'Univers ne semble pas supersymétrique, puisque l'électron, par exemple, n'a pas de superpartenaire de même masse. Si la supersymétrie existe, elle est nécessairement brisée et les superpartenaires ont alors une masse plus élevée. Cependant, le degré de brisure requis par la physique des particules est trop important pour résoudre le problème de l'énergie du vide. Notons en revanche que la supersymétrie, brisée, pourrait apporter une solution au problème de

Avec l'inflation éternelle, des bulles d'univers peuvent apparaître aléatoirement

la matière noire. Les particules supersymétriques sont activement recherchées, en particulier au LHC, mais aucune n'a été découverte pour le moment, ce qui met de nombreux modèles de matière noire sous tension.

Les théoriciens ne parviennent pas à résoudre les problèmes soulevés par la constante cosmologique, une situation d'autant plus frustrante que les observations indiquent une valeur non nulle de cette constante. D'autres pistes sont cependant explorées, à la recherche



La théorie du multivers suppose que des bulles-univers ont des constantes fondamentales différentes, fixées aléatoirement lors de leur formation. Dans ce cadre, certains physiciens ont recours au principe anthropique pour expliquer la valeur de l'énergie du vide : la bulle-univers dans laquelle nous sommes a les bons paramètres pour que la vie se soit développée.

d'autres contenus matériels qui produiraient une expansion cosmique accélérée. On désigne ainsi sous le terme générique de « quintessence » de tels composants matériels. Par exemple, l'existence d'un champ « scalaire » (c'est-à-dire dont le spin est nul, tel le champ de Higgs associé au boson de Higgs) peut conduire à une accélération de l'expansion cosmique.

Les modèles de quintessence sont compatibles avec les observations, mais l'évolution temporelle de la quintessence diffère légèrement de celle de la constante cosmologique. De futurs programmes d'observation affineront les diverses mesures astrophysiques pour trancher entre la constante cosmologique et les champs scalaires. On attend beaucoup en particulier de l'observatoire spatial européen *Euclid*, qui doit être lancé en 2022.

Un paramètre que l'on cherche ainsi à mesurer avec toujours plus de précision est le rapport entre la densité de l'énergie sombre et sa pression (dans des unités choisies pour rendre ce rapport adimensionnel). Ce paramètre, nommé paramètre d'état de l'énergie sombre et noté en général w , est égal à -1 pour une constante cosmologique. Il diffère en général de -1 pour un modèle de quintessence. Lorsque c'est le cas, la densité d'énergie associée n'est plus constante, mais varie au cours de l'histoire cosmique. C'est cette variation dans le temps que les cosmologistes veulent mettre en évidence.

Les modèles de quintessence ne parviennent en général pas à expliquer le premier problème de la constante cosmologique. Mais certains

pourraient apporter un éclairage intéressant sur le second problème *via*, par exemple, un couplage entre le champ scalaire et la matière ordinaire ou noire, et qui expliquerait le fait que les densités d'énergie de quintessence et de matière sont du même ordre de grandeur aujourd'hui. Grâce à un tel couplage, la densité d'énergie de la quintessence est corrélée lors de l'histoire cosmique avec celle de la matière.

L'APPROCHE ANTHROPIQUE

Une autre voie qui a le mérite de résoudre les deux problèmes à la fois est une approche anthropique conçue en particulier par l'Américain Steven Weinberg (Prix Nobel de physique en 1979). D'après cette idée, la valeur de la constante cosmologique est fixée librement au début de l'histoire de l'Univers. En imaginant tous les univers possibles, seuls ceux où cette valeur est proche ou inférieure à celle observée aujourd'hui permettent le développement de la vie telle que nous la connaissons. En effet, dans un univers où la constante cosmologique serait très supérieure à celle que nous inférons aujourd'hui, l'accélération de l'expansion cosmique aurait commencé trop tôt pour que se forment des structures telles que des étoiles ou des galaxies riches en éléments chimiques complexes. Dans un tel univers, la vie telle que nous l'observons n'aurait pas pu apparaître. Comme nous existons, il est normal d'observer une faible valeur (éventuellement nulle) de la constante cosmologique.

Depuis l'idée de Steven Weinberg, la théorie des supercordes et certains modèles d'inflation cosmique (nommés « inflation éternelle ») ont renforcé cette explication anthropique en fournissant un cadre théorique expliquant comment la valeur de la constante cosmologique pourrait avoir été « tirée au sort » dans les premiers instants de l'Univers. En effet, la théorie des supercordes conduit à penser que les valeurs de certains paramètres qui nous apparaissent comme des constantes de la nature peuvent varier dans l'Univers très primordial et se fixer parmi un très grand nombre de possibilités. Chaque combinaison donne un univers aux propriétés physiques différentes.

Par ailleurs, dans les scénarios d'inflation éternelle, qui peuvent également être incorporés dans certains modèles issus des supercordes, des bulles d'univers où les constantes de la nature prennent des valeurs différentes peuvent apparaître aléatoirement. Elles sont d'abord microscopiques, puis enflent jusqu'à devenir des univers séparés causalement les uns des autres. Chaque univers possède alors son propre jeu de paramètres et seuls certains sont compatibles avec la vie (*voir la figure ci-dessus*).

Aussi élégantes qu'elles soient, ces idées ne font pas consensus, pour plusieurs raisons. D'une part, la règle du jeu n'est pas claire : ➤