

explorées, à la recherche 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.

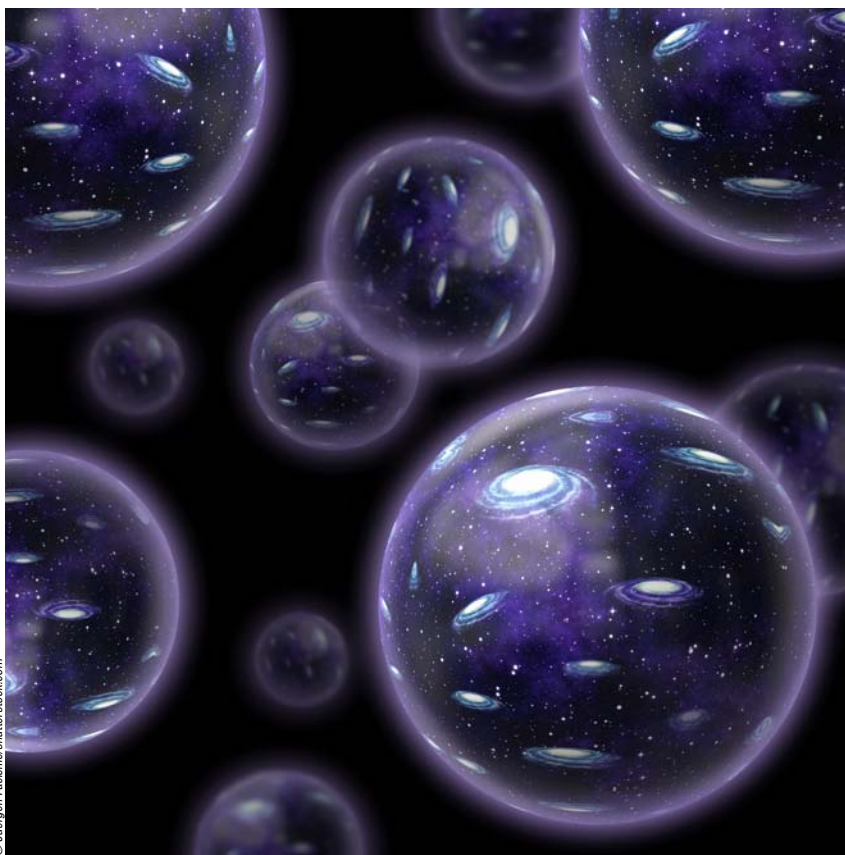
Les modèles de quintessence sont compatibles avec les observations, mais l'évolution temporelle de la quintessence diffère légèrement de celle de la constante cosmologique. De futurs programmes d'observation affineront les diverses mesures astrophysiques pour trancher entre la constante cosmologique et les champs scalaires.

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.

Chercher la quintessence

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.

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 (lauréat du prix Nobel de physique en 1979 avec Sheldon Glashow et Abdus Salam pour la construction du modèle standard électrofaible de la physique des particules). D'après cette idée, la valeur de



2. 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.

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 S. 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 (telle la constante cosmologique, ou la masse de certaines particules) 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 l'apparition de la vie (voir la figure 2).

Aussi élégantes qu'elles soient, ces idées ne font pas consensus, pour plusieurs

Le modèle DGP

Les modèles d'univers dotés de dimensions supplémentaires peuvent offrir des solutions au problème de l'expansion accélérée de l'Univers. Celui développé par Gia Dvali, Gregory Gabadadze et Massimo Porrati modifie les lois de la gravitation.

Ces trois physiciens de l'Université de New York ont construit un modèle d'univers, noté DGP, qui ajoute une unique dimension d'espace aux quatre dimensions de l'espace-temps usuel.

Dans la plupart des modèles, les dimensions supplémentaires sont compactifiées : elles sont si petites qu'elles ne sont pas discernables. Dans le modèle DGP, la cinquième dimension s'étend à l'infini

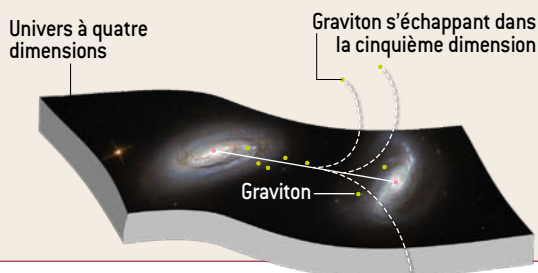
mais seuls les gravitons – les particules qui véhiculent l'interaction gravitationnelle – peuvent s'y propager. Les autres particules ne peuvent échapper à l'espace-temps usuel et, ainsi, la dimension supplémentaire échappe à nos sens mais peut être révélée via son effet sur la gravitation.

Les implications cosmologiques sont importantes. À petite échelle, la probabilité que

les gravitons s'échappent est faible. Ainsi, les équations de la relativité générale reproduisent correctement les lois de la gravitation. À plus grande échelle, une certaine quantité de gravitons fuient dans la cinquième dimension (voir la figure). À de telles distances, les équations de la relativité générale ne décrivent donc plus correctement les interactions gravitationnelles.

L'effet gravitationnel de la matière à grande échelle, qui est surestimé si l'on suppose que la relativité générale est valide sur de telles distances, donne l'impression que l'Univers a une vitesse d'expansion qui augmente.

Ce résultat a trouvé de nombreux échos chez les cosmologistes, mais le modèle DGP présente plusieurs difficultés théoriques et expérimentales.



raisons. D'une part, la règle du jeu n'est pas claire : comment séparer les paramètres que l'on est autorisé à faire varier, et pour lesquels on peut éventuellement donner une explication anthropique, des autres paramètres pour lesquels il pourrait exister une autre explication ? Doit-on aussi faire varier la forme des lois physiques ? D'autre part, personne ne sait comment calculer avec rigueur des probabilités d'apparition de la vie en tenant compte de l'ensemble des univers possibles. Enfin, on ne voit pas bien comment on pourrait réfuter une telle explication. Il se pourrait cependant que cela soit en effet la bonne réponse.

Les modèles de constante cosmologique et de quintessence supposent que les lois de la gravitation, aux plus grandes échelles, sont bien décrites par la relativité générale. Mais peut-être la gravitation suit-elle d'autres lois aux échelles cosmologiques ?

Les physiciens ont souvent rencontré des situations où l'existence de constituants « sombres » était conjecturée à partir de leur

influence gravitationnelle. Cela a conduit à la détection de nouveaux objets ou à la modification de la théorie de la gravitation. Au XIX^e siècle, par exemple, la planète Neptune a été découverte grâce aux calculs de l'astronome Urbain Le Verrier, qui avait supposé sa présence pour expliquer des anomalies dans la trajectoire d'Uranus. La découverte de Neptune fut un succès pour la mécanique céleste fondée sur la théorie newtonienne de la gravitation.

Le Verrier tenta de renouveler son exploit pour expliquer certaines caractéristiques du mouvement de Mercure. Ce fut un échec, et les anomalies de la trajectoire de la planète furent expliquées bien après la mort de Le Verrier par une nouvelle théorie de la gravitation : la relativité générale d'Einstein. La cosmologie actuelle est face à un dilemme analogue : sauver les lois de la gravitation par l'introduction de composants sombres (matière noire et énergie sombre) ou bien tenter de modifier ces lois pour expliquer les observations.

Par exemple, Mordehai Milgrom, de l'Institut Weizmann en Israël, a proposé en 1983 un cadre théorique assez séduisant pour éviter l'hypothèse de la matière noire. Les lois de la gravitation sont modifiées quand l'accélération d'un corps est plus faible qu'une valeur critique. Mais le modèle a ses propres difficultés (voir l'article de Volker Springel page 22).

Modifier la gravitation...

Pour ma part, alors que je travaillais à l'Université de New York en 2001, j'ai remarqué que le modèle dit DGP, proposé peu de temps auparavant par Gia Dvali, Gregory Gabadadze et Massimo Porrati, également à l'Université de New York, fournit une alternative intéressante à l'idée d'énergie sombre. Dans ce modèle, qui suppose en particulier l'existence de dimensions d'espace supplémentaires, la gravitation d'Einstein est modifiée à très grande distance et une accélération cosmique peut apparaître sans qu'il y ait besoin d'une constante cosmologique non nulle (voir l'encadré ci-contre).

Ce modèle est lié à la recherche d'une « gravité massive » où le graviton, l'hypothétique particule médiatrice de la force gravitationnelle, a une masse non nulle. La relativité générale implique que le graviton est de masse nulle. L'interaction a alors une portée infinie et se propage à la vitesse de la lumière. Dans le cas du modèle DGP, le graviton est la seule particule capable de se propager dans la dimension supplémentaire. De façon générale, des particules qui évoluent dans une dimension supplémentaire sont perçues comme un ensemble de particules massives par un observateur qui n'a pas accès à cette dimension. Les gravitons massifs du modèle DGP conduisent à grande distance à une déviation par rapport à la théorie d'Einstein.

On peut d'ailleurs remarquer qu'Einstein croyait (à tort) que l'introduction de la constante cosmologique résulterait en un potentiel gravitationnel semblable à celui créé par un graviton massif. Il existe donc un lien historique entre la constante cosmologique et la gravité massive. Le modèle DGP était le premier cadre proposant explicitement un lien entre accélération cosmique et modification à grande distance de la gravitation. Cependant, ce modèle n'est pas pleinement satisfaisant, puisqu'il rencontre des difficultés théoriques

et observationnelles. Il a néanmoins attiré l'attention de certains physiciens qui s'en sont inspirés.

L'idée était donc de construire une théorie relativiste de la gravitation où le graviton serait de masse non nulle. L'une des motivations est que cette masse, qui peut jouer un rôle analogue à celui de la constante cosmologique, peut être « protégée » par une symétrie et donc avoir une valeur naturellement petite, ce qui évite tout écart par rapport à la relativité générale sur de faibles distances.

Construire une théorie relativiste de la gravitation intégrant un seul graviton massif (et non une infinité comme dans le modèle DGP) et dépourvue de problèmes graves est longtemps resté un défi. Les premiers essais sont même antérieurs à DGP et datent de 1939, avec Markus Fierz et Wolfgang Pauli. Ces physiciens suisses ont introduit une masse pour le graviton de la relativité générale de façon perturbative – c'est-à-dire en ajoutant des termes linéaires de faibles valeurs. Mais en 1970, les physiciens Hendrik van Dam, Martinus Veltman et, indépendamment, Vladimir

Zakharov ont montré que le modèle de Fierz et Pauli ne redonnait pas les équations de la relativité générale lorsqu'on faisait tendre la masse du graviton vers zéro. La théorie restait cohérente, mais elle s'accompagnait d'effets mesurables qui n'ont pas été observés. Deux ans plus tard, Arkady Vainshtein a montré que le problème du modèle venait du traitement linéaire. Il a suggéré qu'un traitement non linéaire pouvait résoudre le problème observationnel, mais des travaux ultérieurs ont montré que d'autres difficultés théoriques surgissaient alors.

...avec un graviton massif

En 2010, en se fondant sur les travaux liés au modèle DGP, Claudia de Rham alors à l'Université de Genève, G. Gabadadze et Andrew Tolley, de l'Université Case Western Reserve, aux États-Unis, ont construit un modèle à graviton massif qui semble dénué des problèmes de ses prédécesseurs. Ce modèle est toujours à l'étude, en particulier ses conséquences cosmologiques.

Il faut souligner qu'il est très difficile de modifier la relativité générale à grande

distance tout en restant en accord avec les différents tests de cette théorie, et il est encore plus difficile de trouver une théorie qui reproduise les différentes propriétés observables de l'énergie sombre et, plus encore, de la matière noire.

Pour l'instant, aucune des approches mentionnées, ainsi que d'autres que nous n'avons pas évoquées (comme celles qui consistent à renoncer en partie au principe cosmologique, ou à tenter d'expliquer l'accélération cosmique par l'effet des hétérogénéités de matière), ne fait l'unanimité, d'autant que le modèle de la constante cosmologique a la vertu de la simplicité et est bien compatible avec les données. Mais les problèmes qu'il pose, on l'a vu, ont engendré bien des travaux qui ont eu aussi le mérite de pousser à mieux comprendre le modèle cosmologique standard.

Les données à venir, notamment celles des grands programmes d'observation tels que *Euclid*, devraient permettre d'invalidier un certain nombre d'approches et de mieux comprendre les propriétés mystérieuses de l'énergie sombre et de la gravitation aux très grandes distances. ■



france culture

LA MARCHÉ DES SCIENCES

Découvertes, inventions, aventures savantes au fil de l'Histoire

Aurélien Luneau
14h-15h / chaque jeudi

franceculture.fr

SCIENCE

© 2014 France Culture. Tous droits réservés. Photo: M. D. / Getty Images



Les Lucaniens, irréductibles Italiques

Agnes Henning