

- 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.

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 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.

MODIFIER LA GRAVITATION...

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.

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 page ci-contre).

Ce modèle a suscité un regain d'intérêt pour 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 liait (à tort) l'introduction de la constante cosmologique et 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 et sa cosmologie fournissent 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.

Le modèle DGP conduit à une théorie où le graviton serait de masse non nulle

En particulier, il a conduit à tenter 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.

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.

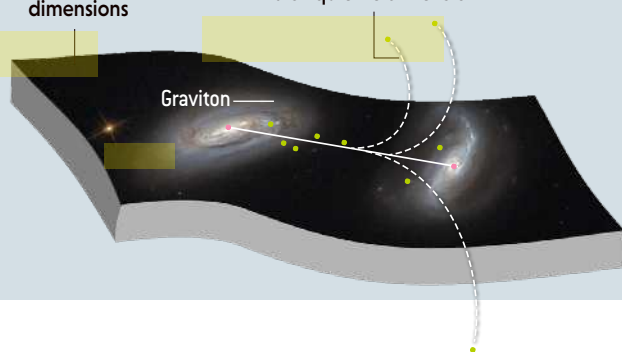
Dans la plupart des modèles, les dimensions supplémentaires sont compactifiées : elles sont si petites qu'elles ne sont pas discernables. Dans le modèle DGP, la cinquième dimension s'étend à l'infini, mais seuls les gravitons – les particules qui véhiculent l'interaction gravitationnelle – peuvent s'y 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.

Univers à quatre dimensions

Graviton s'échappant dans la cinquième dimension



Construire une théorie relativiste de la gravitation intégrant un seul graviton massif (et non une infinité comme dans le modèle DGP) et dépourvue de problème grave 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 d'autres difficultés théoriques ont surgi ensuite.

... AVEC UN GRAVITON MASSIF

Après le modèle DGP, un premier progrès important a été fait en 2009-2010 où j'ai pu montrer, en collaboration avec Eugeny Babichev et Riad Ziour, que les idées de Vainshtein fonctionnaient bien comme prévu. À peu près en même temps, 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'invalider un certain nombre d'approches et de mieux comprendre les propriétés mystérieuses de l'énergie sombre et de la gravitation aux très grandes distances. D'ores et déjà, nombre de modèles de gravitation modifiée ont pu être exclus grâce à l'observation des ondes gravitationnelles par la collaboration *Ligo-Virgo* en 2015. En particulier, une contrainte très forte est venue de l'observation d'une fusion d'étoiles à neutrons à la fois par le canal des ondes gravitationnelles et par le canal des ondes électromagnétiques. Cette observation, lors de l'été 2017, a montré que la vitesse de propagation des ondes gravitationnelles ne pouvait pas différer beaucoup de celle de la lumière contrairement à ce qui était prévu par un certain nombre de modèles. Cette faculté d'exclure des modèles de gravité modifiée par des observations n'est pas la moindre de leur vertu. ■

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.