

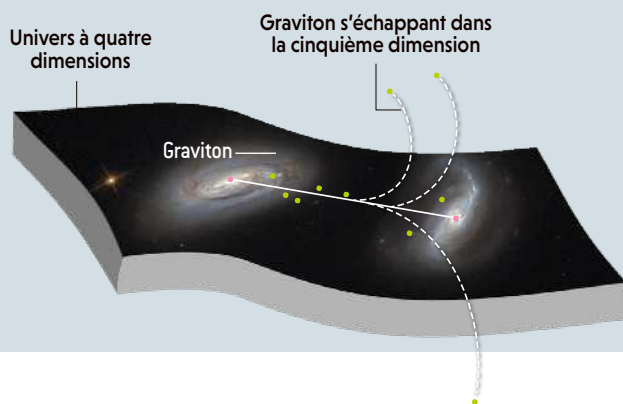
LE MODÈLE DGP

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.



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. ■

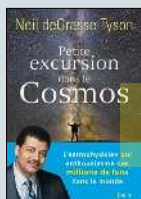
BIBLIOGRAPHIE

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.



Petite excursion dans le cosmos

NEIL DEGRASSE TYSON

ÉDITIONS BELIN, 2017

(160 PAGES, 14,90 EUROS)

Vérifiez bien vos poches. Vous n'avez rien oublié? Alors c'est parti pour une petite excursion dans le cosmos afin de comprendre les mystères de l'Univers...

Dans son style caractéristique, mélange d'érudition, d'humour et d'intelligence, la star de l'astrophysique sait mettre à la portée du plus grand nombre l'essentiel des grands mystères du cosmos, du Big Bang aux trous noirs, des quarks à la mécanique quantique. Un livre indispensable pour acquérir le b.a.-ba de toutes les découvertes qui fondent notre compréhension actuelle de l'Univers.



Chroniques de l'espace

JEAN-PIERRE LUMINET

LE CHERCHE-MIDI/FRANCE INTER, 2019

(180 PAGES, 14,80 EUROS)

Il y a cinquante ans, un homme a marché sur la Lune. L'auteur a commémoré cette prouesse par des chroniques sur France Inter tout l'été 2019. Elles sont désormais éditées. Jean-Pierre Luminet y retrace la fabuleuse épopée de l'exploration spatiale et nous invite également à voyager dans le futur et dans tout l'Univers. Le message est important: le véritable, grand et noble objectif de l'exploration spatiale n'est pas de conquérir, mais de comprendre. Et en comprenant ce qui nous est étranger et si lointain, nous nous comprenons mieux nous-mêmes, en vue de construire un monde meilleur.



L'insoutenable gravité de l'univers

GABRIEL CHARDIN

LE POMMIER, 2018

(464 PAGES, 25,00 EUROS)

Plus d'un siècle après la construction par Einstein de la théorie de la relativité générale, la gravitation reste une énigme. Alors que c'est la force la plus immédiate à nos sens! La découverte des ondes gravitationnelles, témoins des premiers instants de l'Univers, constitue une nouveauté forte, mais les résultats obtenus sont difficiles à expliquer par le modèle cosmologique standard, censé décrire l'Univers de la façon la plus précise possible... Et s'il fallait carrément changer de modèle d'Univers pour résoudre l'énigme?



La fabuleuse histoire de l'univers

JACQUES PAUL ET JEAN-LUC ROBERT-ESIL

DUNOD, 2019

(336 PAGES, 19,90 EUROS)

D'où viennent les étoiles et les planètes? Qu'est-ce que l'horizon d'un trou noir? L'Univers est-il infini? Depuis que nous avons conscience du monde, nos regards sont tournés vers le ciel, cherchant des réponses. Du début de son expansion, il y a 13,8 milliards d'années, au froid absolu de ses derniers instants, les auteurs racontent la fabuleuse l'histoire de notre Univers. Plongez dans ce livre et laissez-vous guider à la découverte des mystères du Cosmos ainsi que des efforts de l'humanité pour l'explorer.



JEUNESSE

Atlas des aventures spatiales

STUDIO MUTI

LA MARTINIÈRE JEUNESSE, 2019

(56 PAGES, 14,50 EUROS)

Partez pour un incroyable voyage dans l'espace. Après l'exploration du Soleil et de la Lune, traversez le système solaire et notre galaxie, apprenez les origines de l'Univers et du temps lui-même. Cet ouvrage invite les lecteurs à imaginer ce que pourrait devenir le tourisme spatial, explore des concepts tels que la gravité, la vitesse de la lumière et la relativité. L'atlas est en lien avec une application gratuite qui contient plus de cinquante vidéos de la Nasa, de l'ESA et de l'ESO pour plonger le lecteur au cœur de l'espace.