

TESTER LE PRINCIPE COPERNICIEN

Pour construire le modèle du Big Bang, les cosmologistes ont adopté le principe copernicien qui suppose que nous ne vivons pas dans un lieu cosmique privilégié. Quelle que soit sa position dans l'Univers, l'observateur mesurera, en moyenne, les mêmes propriétés. Comment vérifier ce principe alors que nous ne pouvons pas installer un observatoire dans une autre galaxie ?

Il existe plusieurs possibilités. Il faut d'abord comprendre que, dans le vide, la

lumière se propage toujours à la même vitesse. Un observateur situé en O (figure 1) ne peut donc voir que des objets situés sur son cône de lumière (grisé sur le schéma). Plus un astre est distant, plus sa lumière met du temps à nous parvenir. Ainsi, seule une partie finie de l'Univers est observable, si bien que se pose la question de savoir si notre Univers observable est représentatif de l'Univers dans son ensemble. Par ailleurs, il est impossible d'avoir accès aux propriétés de l'Univers en dehors du cône de lumière.

En raison de l'expansion de l'Univers, le spectre de la lumière émise par une galaxie est décalé vers les grandes longueurs d'onde, le décalage étant d'autant plus important que la galaxie est distante. Ce décalage spectral vers le rouge (nommé *redshift* en anglais et noté z) est mesurable, ce qui n'est en général pas le cas de la distance galactique. On peut déduire celle-ci à partir du *redshift* et de la loi d'expansion cosmique, qui dépend du modèle dans son ensemble.

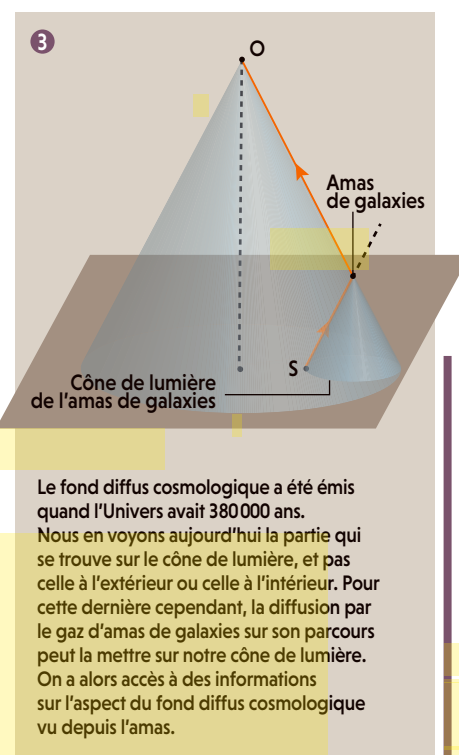
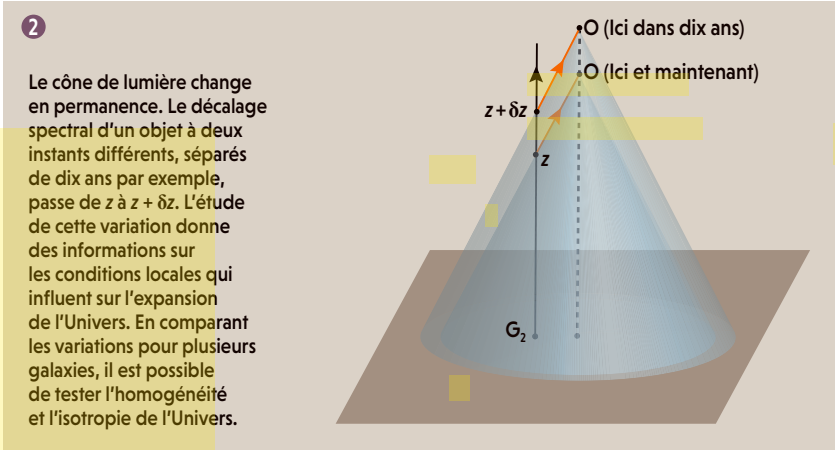
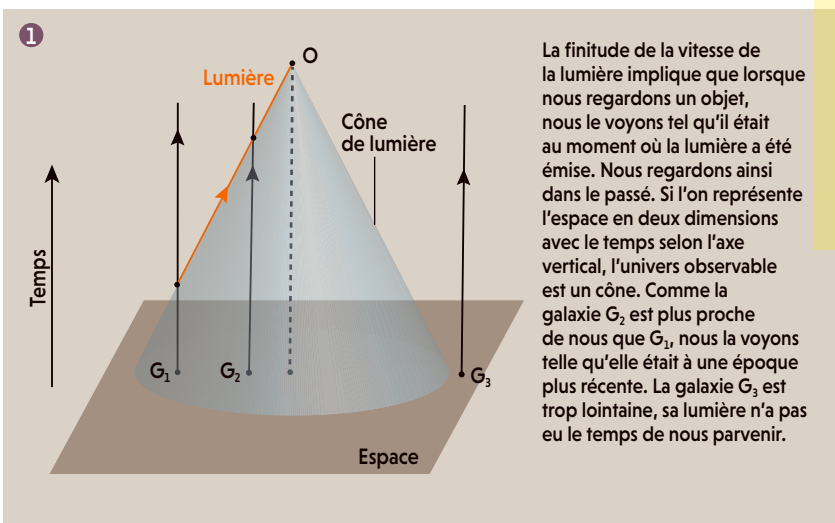
Dès lors, en observant l'Univers à dix ans d'intervalle, on a accès à deux cônes de lumière (figure 2). Durant cet intervalle, le décalage spectral de chaque galaxie change légèrement. Cette variation (δz) donne des informations sur la structure de l'espace en dehors du cône de lumière. En comparant

différents astres le long du cône de lumière, on peut tester le principe copernicien, en tentant à profit le fait que l'Univers n'est pas vu depuis le même point d'observation.

Un autre test du principe copernicien repose sur le fond diffus cosmologique. Ce rayonnement se propage principalement de façon libre depuis son émission 380 000 ans après le Big Bang. Nous l'observons dans

Nous ne pouvons pas installer un observatoire dans une autre galaxie

toutes les directions, telle une sphère qui nous entoure. Son analyse permet de tester l'isotropie de sa température, mais, *a priori*, elle ne fournit aucune information sur l'intérieur de l'Univers observable. Il existe cependant une façon d'accéder à cette information. Une infime partie des photons du fond diffus cosmologique interagissent sur leur trajet avec le gaz chaud des amas de galaxies qu'ils traversent (figure 3). Grâce à cette diffusion, l'« effet Sunyaev-Zeldovich » (du nom des deux physiciens russes qui l'ont proposé, Rashid Sunyaev et Yakov Zeldovich), il est possible de reconstruire certaines propriétés du fond diffus cosmologique tel qu'il serait vu depuis cet amas de galaxies, et donc d'avoir des informations à l'intérieur de notre cône de lumière.



> Nous avons montré qu'il est possible de construire un test du principe copernicien en combinant cette dérive des décalages spectraux à d'autres mesures de distance. Dans les années 1960, les Américains Alan Sandage et George McVittie avaient calculé que cette dérive était très faible, de l'ordre de 10^{-10} en valeur relative en 10 ans pour un objet distant de 5 milliards d'années-lumière. Un tel effet était au-delà de toute mesure possible, ce qui était rassurant, car cela assurait la stabilité des mesures de spectres astrophysiques sur des échelles de temps de plusieurs siècles. Mais avec les développements de la spectrographie à haute résolution, une telle dérive semble aujourd'hui accessible au futur *E-ELT* (*European Extremely Large Telescope*) et son miroir de 39 mètres en construction sur le Cerro Armazones, dans le désert d'Atacama, au Chili.

Presque simultanément, une autre méthode reposant sur l'observation d'amas de galaxies a été proposée (voir l'encadré page ci-contre). Ainsi, le progrès des techniques observationnelles a permis de tirer des informations sur l'Univers «vu d'ailleurs», ce qui est la clé des tests du principe copernicien. Actuellement, nous n'avons que des confirmations indirectes de la validité de l'homogénéité spatiale et il faudra attendre pour la mise en œuvre de ces tests.

L'ISOTROPIE MISE EN DOUTE

Se pose aussi la question de l'isotropie de l'expansion cosmique. L'analyse de la carte des températures du fond diffus cosmologique semble conforter cette hypothèse. Mais jusqu'à quelle précision est-elle valide? Au printemps 2020, en analysant un catalogue de 313 amas de galaxies, et en utilisant une relation phénoménologique entre leur température et leur luminosité, Konstantinos Migkas, de l'université de Bonn, et ses collègues ont annoncé que le taux d'expansion, et donc la constante de Hubble, varierait de plus de 15% selon différentes directions dans l'Univers récent. Ce résultat demande à être confirmé et il faut aussi comprendre pourquoi cette anisotropie n'a pas eu d'impact sur d'autres observables, comme le fond diffus cosmologique.

Le satellite *Euclid* sera encore une fois un outil efficace pour évaluer les écarts à l'isotropie. En effet, comme nous l'avons montré en 2015 avec Cyril Pitrou, de l'institut d'astrophysique de Paris, et Thiago Pereira, de l'université d'État de Londrina, au Brésil, il devrait être possible de mettre en évidence une anisotropie de l'ordre de 1% à partir de l'analyse des distorsions gravitationnelles. D'un point de vue théorique, cette anisotropie, si elle est confirmée, pourrait être apparue tardivement. Elle pourrait être liée à l'accélération de l'expansion et éventuellement à une propriété de l'énergie sombre, ce

qui serait une avancée inestimable dans la compréhension de cette dernière.

Soulignons que dans leur boîte à outils, les cosmologistes ont de nombreux modèles cosmologiques qui ne reposent pas sur l'hypothèse H3: des univers homogènes mais anisotropes (l'expansion n'est pas la même dans toutes les directions) ou hétérogènes (qui peuvent alors avoir un centre). Ces derniers permettent de quantifier les effets d'un écart à l'homogénéité et à l'isotropie et ainsi d'évaluer la pertinence de ce choix.

Soulignons que l'Univers n'est ni homogène ni isotrope de façon évidente. La matière se regroupe dans des galaxies qui s'alignent en amas le long de filaments et qui délimitent de grands espaces vides. Le modèle cosmologique considère ainsi la géométrie de l'Univers moyenné à une certaine échelle, qui n'est pas spécifiée explicitement, et qui est bien plus grande que la distance moyenne entre deux galaxies.

En 2017, avec Pierre Fleury, de l'université autonome de Madrid, et Julien Larena, de l'université du Cap, nous avons soulevé la question difficile de savoir si la géométrie moyenne de l'Univers permet d'interpréter toutes les observations avec la précision requise. En effet, comme la géométrie détermine la propagation de la lumière, il faut démontrer que les déviations à petite échelle entre la géométrie «réelle» et la géométrie moyenne ne sont pas à l'origine de biais dans l'analyse des observations reposant sur des faisceaux lumineux fins (comme c'est le cas pour des objets ponctuels comme des supernovæ, mais pas pour le fond diffus cosmologique).

Enfin, la structure topologique (l'hypothèse H4) a été abondamment discutée depuis plus de trente ans. L'analyse des données du satellite *Planck* montre que l'Univers ne peut pas être plus petit que 96% de la taille de l'univers observable. Mieux, on peut montrer que si sa taille dépasse celle de l'univers observable de 15%, alors on ne peut pas distinguer un Univers très grand, mais fini, d'un Univers infini. Il est d'ailleurs impossible de prouver par l'observation que l'Univers est infini. Seuls des arguments théoriques peuvent éventuellement être utilisés.

La plupart de ces tests seront mis en œuvre dans les années à venir et il sera intéressant d'évaluer la justesse des hypothèses actuelles. Avec les tensions naissantes, ces tests fourniront peut-être des indices, qui serviront de fil d'Ariane providentiel pour mener à une meilleure compréhension de l'origine de l'accélération cosmique et de la nature de la matière noire. Ce fil servira aussi à faire évoluer le modèle du Big Bang ou à le modifier, ou il améliorera son domaine de validité, confortant ainsi certaines de ses conclusions. Cela aussi fait partie d'un modèle vivant. ■

BIBLIOGRAPHIE

C. Pitrou et al., **A new tension in the cosmological model from primordial deuterium?**, *MNRAS*, stab135, 20 janvier 2021.

K. Migkas et al., **Probing cosmic isotropy with a new X-ray galaxy cluster sample through the L_x - T scaling relation**, *Astron. Astrophys.*, vol. 636, A15, 2020.

A. G. Riess et al., **The accuracy of the Hubble constant measurement verified through cepheid amplitudes**, *Astrophys. J. Lett.*, vol. 896(2), L43, 2020.

F. Combes, **Le Big Bang**, Que Sais-je?, 2019.

J.-P. Uzan, **Big Bang. Comprendre l'univers depuis ici et maintenant**, Flammarion, 2018.

SUR LE WEB

Conférence de J.-P. Uzan (TimeWorld 2019), **Peut-on affirmer que l'Univers a 13,8 milliards d'années?**, http://bit.ly/PLS521_Uzan1

Conférence de J.-P. Uzan (SFP, janvier 2020), **Le statut du modèle cosmologique**, http://bit.ly/PLS521_Uzan2