

> 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