

peut-être que l'hypothèse d'une simple constante cosmologique est à écarter.

Cette discussion illustre que l'interprétation des observations n'est pas indépendante du modèle. C'est l'ensemble modèle-observations dont on juge la crédibilité. Un modèle est un outil de travail, un consensus temporaire, nécessairement limité et ouvert à l'évolution. Il permet de formuler des questions et des modèles concurrents. Cette exploration stimule la réflexion sur la façon de les contraindre ou de mettre en évidence leurs signatures propres. Cela conduit à améliorer la précision de la description théorique du modèle, qui doit être au moins aussi bonne que celle des observations. L'apparition de tensions est signe que le modèle lui-même n'a pas la justesse requise pour les interpréter.

Depuis une vingtaine d'années, certains cosmologistes se proposent d'utiliser des observations non pas pour simplement mesurer les paramètres du modèle du Big Bang (la constante de Hubble par exemple), mais pour éprouver la robustesse de ses hypothèses. Ces dernières étaient suffisamment bonnes par le passé, mais ne le sont peut-être plus pour rendre compte d'effets fins que les astrophysiciens sont aujourd'hui capables de mesurer. On passerait ainsi d'une cosmologie de précision à une cosmologie de justesse. Mais, bien sûr, précision des mesures et justesse du modèle vont de pair.

QUATRE HYPOTHÈSES PRINCIPALES

Quelles sont les hypothèses utilisées par les cosmologistes pour bâtir le modèle du Big Bang? Avec du recul, on en distingue quatre majeures, que l'on notera H1, H2, H3 et H4. Les deux premières concernent les lois fondamentales de la nature. Tout d'abord, on suppose que la gravitation est bien décrite par la théorie de la relativité générale (H1). Cela implique que l'Univers est représenté mathématiquement par un espace-temps dont la géométrie est déterminée à partir des équations d'Einstein. Quant à la matière et ses interactions non gravitationnelles (électromagnétique, nucléaires forte et faible), on suppose qu'elles sont décrites par le modèle standard de la physique des particules (H2). Ces deux hypothèses fixent le cadre théorique du modèle.

Mais il faut également inclure la constante cosmologique et supposer l'existence d'un autre type de matière, la matière noire, dont la nature n'est pas encore déterminée. Il s'agit d'ingrédients qui sortent du cadre théorique de référence mais qui offrent une explication phénoménologique cohérente à de nombreuses observations actuelles (du fond diffus cosmologique à la dynamique des galaxies en passant par celles des amas et les effets de lentilles gravitationnelles).

BULLE DE HUBBLE

Dans le scénario dit « bulle de Hubble », la Voie lactée se trouverait dans une région de densité plus faible que la moyenne, dont le rayon serait d'environ 130 millions d'années-lumière. Cela pourrait induire des biais dans les mesures de distances et, par exemple, fausser l'estimation de la constante de Hubble ou même donner l'illusion d'une expansion cosmique qui accélère.

Ce cadre théorique ne constitue pas directement un modèle cosmologique. Prises dans leur pleine généralité, les équations de la relativité générale sont trop complexes à résoudre. Pour obtenir des solutions, les chercheurs sont contraints d'ajouter une ou plusieurs hypothèses simplificatrices. Ils ne cherchent donc pas « la » géométrie de l'Univers, mais une solution approchée qui en donne une bonne description.

D'après les observations, l'Univers paraît sensiblement identique dans toutes les directions. En première approximation, on suppose donc qu'il est isotrope autour de nous. Cette hypothèse d'isotropie s'accompagne du principe copernicien, qui stipule que nous n'occupons pas une position particulière dans l'Univers (H3). Mathématiquement, cela implique que la distribution spatiale de la matière est homogène, que l'expansion de l'espace est la même dans toutes les directions et en tout point, mais qu'elle peut changer dans le temps.

L'hypothèse H3 définit la géométrie locale de l'Univers. Mais différentes topologies, c'est-à-dire différentes structures globales, sont compatibles avec une géométrie donnée. L'espace pourrait être infini ou éventuellement

Un modèle est un consensus temporaire, nécessairement limité et ouvert à l'évolution

se replier sur lui-même et avoir un volume fini. Par exemple, en deux dimensions, un plan infini, un cylindre ou un tore sont des espaces euclidiens dont les structures globales sont clairement différentes. Cette propriété n'est pas déterminée par les équations de la relativité générale. Dans le modèle du Big Bang, on suppose que l'espace n'a pas de structure topologique complexe (H4).

Ces hypothèses sous-tendent l'interprétation de toute observation puisqu'elles interviennent dans les notions de distances et la modélisation de la propagation de la lumière. Ainsi, dans l'idée d'aller au-delà d'une cosmologie de précision vers une cosmologie de justesse, les chercheurs ont proposé un ensemble de tests de ses hypothèses. Évoquons ici le principe de quelques-uns d'entre eux. ➤

> Pour commencer, la relativité générale est testée avec une extrême précision dans le Système solaire. Cette théorie a par ailleurs conduit à des prédictions conceptuelles majeures qui ont toutes été vérifiées : l'expansion de l'Univers, l'existence des trous noirs et celle des ondes gravitationnelles. Cependant, elle est moins bien testée aux échelles astrophysiques et dans des régimes de très faibles accélérations, qui correspondent à ceux associés à la matière noire et à l'accélération de l'Univers.

Une première façon de mettre à l'épreuve la relativité générale consiste à en tester un élément clé : le principe d'équivalence, qui stipule que tout corps, quelles que soient sa

masse et sa composition chimique, tombe de la même façon dans un champ de gravité extérieur. Depuis 2017, le satellite *Microscope*, du Cnes (Centre national d'études spatiales) et de l'Onera (Office national d'études et de recherches aérospatiales), a testé ce principe avec une précision de l'ordre de 10^{-14} . L'équipe responsable espère améliorer encore la sensibilité de un ordre de grandeur.

UN PRINCIPE AU MICROSCOPE

On peut aussi montrer que le principe d'équivalence est intimement lié au fait que les constantes de la nature ne varient pas dans le temps et l'espace, ce qui est testable en dehors du Système solaire. Depuis des décennies, différentes équipes se sont attachées à mesurer, dans différents systèmes astrophysiques, la valeur de la « constante de structure fine », une constante caractérisant l'interaction électromagnétique. La nucléosynthèse primordiale ou les analyses du satellite *Planck* démontrent que cette constante n'a pas varié de plus d'un millièmème pendant l'histoire de l'Univers ; elle n'a pas varié de plus de 10^{-5} (en valeur relative) au cours des dix derniers milliards d'années, d'après l'étude des spectres d'absorption de quasars ; les analyses géophysiques amènent la contrainte à moins de 10^{-7} lors des deux derniers milliards d'années, et les comparaisons d'horloges atomiques en laboratoire montrent que la variation est inférieure à 10^{-17} par an.

L'essence de la relativité générale repose sur le fait que la matière courbe l'espace-temps et que cette courbure modifie la trajectoire de tout corps matériel et de la lumière. On doit donc observer une déflexion de la lumière passant près d'un astre massif. Les Britanniques Arthur Eddington et Andrew Crommelin, en 1919, ont été les premiers à réaliser une telle mesure lors d'une éclipse solaire : ils ont vérifié que la déflexion de la lumière émise par une étoile lointaine et frôlant le Soleil est compatible avec le champ gravitationnel créé par notre étoile, dont on connaît la masse par ailleurs grâce à la dynamique des orbites planétaires. La mesure de la déflexion de la lumière est un test de cohérence entre diverses observables (ici, deux mesures de la masse du Soleil) dont la violation indiquerait la défaillance d'une des hypothèses (ici, de la relativité générale). Tant que le test est passé avec succès, cela améliore le domaine de validité des hypothèses et des théories utilisées pour interpréter les données et contraint tout scénario qui reposerait sur une hypothèse différente.

En 2001, Francis Bernardeau, du CEA, et moi avons proposé de généraliser ce test classique de la relativité générale aux échelles astrophysiques. En effet, en 2000, Yannick Mellier, de l'institut d'astrophysique de Paris, et son équipe ont détecté pour la première fois des distorsions

LA TENSION ÉMERGENTE SUR LA CONSTANTE DE HUBBLE

Plusieurs approches principales ont été utilisées pour mesurer la constante de Hubble. L'une d'elles consiste à construire une échelle de distance en utilisant en particulier les supernovæ de type Ia et les céphéides (en bleu) ; une autre utilise les décalages temporels des effets de lentilles gravitationnelles ; une troisième méthode se fonde sur l'analyse du fond diffus cosmologique (en rouge). Au cours du temps, les mesures ont gagné en précision et sont aujourd'hui incompatibles, avec des barres d'erreur qui ne se recouvrent plus. Une nouvelle méthode utilise les ondes gravitationnelles (en vert).

La tension entre les différentes déterminations peut avoir différentes origines possibles. On ne peut exclure un biais mal compris dans au moins l'une des méthodes. Il faut aussi noter le fait que le fond diffus cosmologique sonde l'Univers plus primordial, tandis que les échelles de distances et les lentilles gravitationnelles concernent l'Univers plus récent. L'Univers local pourrait ainsi ne pas être représentatif de l'Univers à grande échelle.

Autre possibilité : contrairement au fond diffus cosmologique, l'observation des supernovæ repose sur des faisceaux lumineux fins sensibles à la structure de l'espace à des échelles plus petites que celle du lissage imposé par l'hypothèse d'homogénéité du modèle du Big Bang. Dans ce cas, on ne pourrait pas interpréter les deux observables avec la même géométrie, ce qui nécessiterait de réanalyser la façon de comparer ces observations. Cette tension pourrait aussi, en dernier recours, être le signe d'une nouvelle physique : les cosmologistes évoquent déjà, par exemple, l'effet de l'énergie sombre dans l'Univers primordial, une interaction avec la matière noire, une modification de la relativité, etc. Toutes ces pistes, et d'autres, sont en cours d'exploration.

