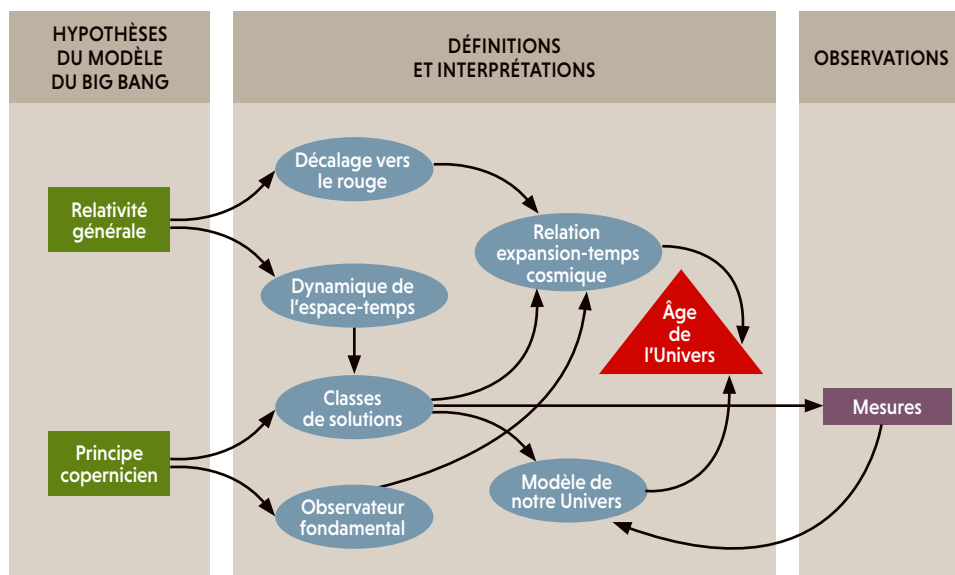


QUEL EST L'ÂGE DE L'UNIVERS ?

On affirme que l'Univers a 13,8 milliards d'années. Il ne s'agit bien sûr pas d'une observation directe. Nous pouvons mesurer l'âge de certains objets astrophysiques, ce qui fournit une limite inférieure sur l'âge de l'Univers, mais ce dernier est déduit du modèle cosmologique dans son ensemble. Cette affirmation repose ainsi sur un tissu d'hypothèses et d'observations.

Il faut tout d'abord définir ce qu'est cet âge, à savoir « la durée écoulée entre la singularité initiale et aujourd'hui, mesurée par un observateur fondamental » (il s'agit d'une classe théorique d'observateurs de référence définie par le principe copernicien et dont le temps propre est le temps cosmique, auquel tout observateur réel peut comparer ses mesures).



En effet, rappelons que, en relativité, la durée écoulée entre deux événements dépend de l'état de mouvement des observateurs. Il s'agit donc d'un âge théorique calculé à partir du modèle, que l'on extrapole jusqu'au Big Bang.

Dans le cadre du modèle du Big Bang, l'affirmation repose donc sur la validité de la relativité générale pour décrire la dynamique de l'expansion, pour définir le décalage spectral (le *redshift*) et le relier au temps. Elle repose aussi sur le principe

copernicien, qui opère un choix de solutions cosmologiques, conduit à la définition des observateurs fondamentaux et permet l'interprétation de toutes les observations qui confortent le modèle. Dans un modèle inhomogène, par exemple, le taux d'expansion serait différent en chaque point de l'Univers et la durée entre la singularité initiale et l'observateur dépendrait de la position de ce dernier dans le cosmos. Il n'y aurait donc pas de notion « universelle »

d'âge de l'Univers et il faudrait préciser quel est l'observateur.

Pour finir, les modèles sont ajustés à partir d'un ensemble de données observationnelles, que l'on utilise pour déterminer la meilleure valeur des paramètres cosmologiques. Avec tous ces éléments, il est alors possible de calculer l'âge de l'Univers. Il en va de même pour presque toutes les affirmations sur la chronologie cosmique, par exemple quand on dit que le fond diffus cosmologique a été émis 380 000 ans après le Big Bang.

> faut en effet formuler un nouveau cadre et s'assurer que l'ensemble des observations, qui étaient expliquées dans l'ancien cadre, restent compatibles avec le nouveau modèle.

Deux modèles différents peuvent d'ailleurs être en accord avec le même jeu d'observations. Si l'on peut toujours jauger leur crédibilité respective en se fondant sur des arguments théoriques, il faut surtout identifier une situation pour laquelle les deux modèles font des prédictions assez distinctes pour être discriminées (voir l'encadré page 36), ce qui stimule la réflexion prospective sur les observations ou expériences futures.

Trancher entre deux modèles peut être très difficile. Prenons un exemple. En 1998, en étudiant les supernovæ de type Ia, deux équipes d'astrophysiciens ont montré que l'expansion cosmique est en accélération, un résultat récompensé par le prix Nobel en 2011. L'explication théorique la plus simple et la plus économique était alors d'accepter que la « constante cosmologique » (une constante que les équations de la relativité générale peuvent contenir) n'est pas nulle.

Cette option était déjà incluse dans l'ensemble des possibilités du modèle; il n'était donc pas nécessaire d'en révolutionner la construction, et encore moins de postuler de nouvelles lois physiques. Cependant, l'interprétation physique de la constante cosmologique en tant qu'énergie du vide pose un problème théorique de compatibilité entre cosmologie et physique quantique. Ainsi, d'autres voies sont explorées pour rendre compte de l'accélération de l'expansion: nous pourrions vivre dans une région où la densité moyenne est plus basse qu'elle ne l'est à très grande échelle (voir l'encadré page ci-contre); il pourrait exister un nouveau type de matière (une « énergie sombre » de nature encore inconnue); ou la théorie de la relativité générale aurait une faille.

Actuellement, aucune déviation aux prédictions du modèle standard avec la constante cosmologique n'est observée. Toutes ces explications alternatives doivent donc être indiscernables de celui-ci à la précision actuelle des mesures et sont donc fortement contraintes. Seules de futures observations démontreront

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. ➤