

> évoluer. Par exemple, il faut accepter que certaines questions restent en dehors de son champ explicatif à un moment donné. Les premiers modèles cosmologiques des années 1920, fondés sur la relativité générale d'Albert Einstein, décrivaient la matière comme un «gaz» d'étoiles ou de galaxies dont il suffisait de connaître la densité moyenne. Par construction, ils étaient inadaptés à l'étude de la formation des galaxies et de leur évolution. Ils ont néanmoins permis d'établir un résultat majeur: loin d'être statique, l'Univers est en expansion. Le Russe Alexander Friedmann et le Belge Georges Lemaître avaient prédit cette dynamique, qui a ensuite été confirmée dès 1929 par l'astronome américain Edwin Hubble en mesurant la vitesse d'éloignement des galaxies en fonction de leur distance. Bien que très limité initialement, ce modèle a fourni le cadre dans lequel allait se construire notre vision actuelle de l'Univers.

UNE CONSTRUCTION PAR ÉTAPES

Le modèle a connu une évolution importante à partir de la fin des années 1930. Des physiciens tels que Robert Herman, Ralph Alpher et George Gamow ont mis en évidence les implications du fait que, dans un espace en expansion, la matière se dilue et se refroidit inévitablement. Ainsi, en remontant le temps, l'Univers devait être dans un état très dense et chaud. Ces chercheurs en ont déduit que les éléments atomiques légers (hydrogène, deutérium, hélium et des traces de lithium) ne pouvaient pas exister dans l'Univers primordial et ont été synthétisés dans les premières minutes de l'histoire cosmique (les autres éléments ne se sont formés que plus tard, dans les étoiles notamment).

On a ensuite compris qu'environ 380 000 ans après le Big Bang, la matière jusqu'alors ionisée est devenue neutre: les noyaux atomiques se sont combinés avec les électrons du milieu. L'Univers est ainsi devenu transparent et le rayonnement électromagnétique (les photons) s'est alors propagé librement. On l'observe aujourd'hui sous la forme du «fond diffus cosmologique». Ces prédictions (l'abondance des éléments légers et le fond diffus cosmologique), confirmées par les observations, représentent deux arguments forts en faveur du modèle du Big Bang.

À partir des années 1960, le modèle a évolué pour inclure la question de l'origine et de l'évolution des grandes structures de l'Univers. Grâce au développement des simulations numériques et des grands relevés observationnels, les astrophysiciens ont commencé à étudier comment les galaxies et les amas de galaxies se forment. Puis, dès les années 1980, les théoriciens se sont penchés sur la

dynamique de l'Univers primordial et ont formulé les théories d'inflation, qui rendent compte des «germes» initiaux nécessaires à la formation de ces grandes structures.

Ces quatre grandes étapes de la construction du modèle du Big Bang se reflètent dans son aspect modulaire. Chaque pan de la théorie complète le précédent en abordant des questions qui étaient en dehors de son champ explicatif et en considérant de nouvelles observations. Certains éléments sont plus solides que d'autres: la physique du fond diffus cosmologique ou de la formation des noyaux légers repose sur l'électromagnétisme et la physique nucléaire, théories bien testées en laboratoire, alors que les théories d'inflation sont plus spéculatives et, bien qu'en accord avec les données actuelles, attendent d'être consolidées aussi bien d'un point de vue théorique qu'observationnel.

Le modèle du Big Bang définit le cadre théorique pour prédire et interpréter les observations. Pour le tester, il faut prédire ce qu'un observateur mesurerait, ce qui nécessite de décrire finement la propagation de la lumière et les biais associés à la position de l'observateur, car ce sont ces prédictions qui sont confrontées aux mesures. Le cadre théorique dicte mais restreint aussi les questions et affirmations que nous pouvons poser sur l'Univers, si bien qu'elles ne peuvent être détachées des hypothèses du modèle. Par exemple, l'affirmation que l'Univers est âgé de 13,8 milliards d'années n'est pas le résultat d'une mesure directe, mais une conclusion reposant sur un ensemble d'observations et d'hypothèses (voir l'encadré page 38).

En pratique, on détermine les valeurs des paramètres cosmologiques (dont la définition et le nombre dépendent du modèle; celui du Big Bang en comprend six principaux) qui donnent le meilleur accord entre les prédictions et un jeu d'observations. Quand la qualité des observations augmente, l'estimation des paramètres cosmologiques s'affine. Ainsi, deux observables dont les mesures sont de plus en plus précises peuvent conduire à un désaccord ou une tension qui n'existait pas à un niveau de précision moindre, comme dans le cas de la mesure de la constante de Hubble (voir l'encadré page 40). Il faut alors démontrer que la précision des prédictions théoriques est au moins aussi bonne que celle des observations.

On doit ainsi se demander si ce désaccord remet en question les observables et leur interprétation ou l'une des hypothèses du modèle, s'il s'agit d'un biais que l'on pouvait jusqu'alors négliger ou si le désaccord est annonciateur d'une «nouvelle physique» à découvrir. Si une observation unique peut mettre en défaut la construction théorique, faire évoluer le modèle est plus compliqué. Il >

LE MODÈLE STATIONNAIRE

Dans les années 1940, le Britannique Fred Hoyle et ses collègues ont proposé un modèle cosmologique dit «stationnaire» où une création continue de matière compense la dilution due à l'expansion de l'Univers. Dans ce cas, il n'y a pas de phase primordiale dense et chaude. Ce cadre théorique a longtemps été un concurrent sérieux au modèle du Big Bang. Mais il est tombé en désuétude, principalement à la suite de la découverte du fond diffus cosmologique.