

L'UNIVERS, DU BIG BANG À AUJOURD'HUI

À partir de la théorie de la relativité générale et de la physique des particules, les cosmologistes ont développé un cadre théorique censé décrire l'histoire de l'Univers : le modèle du Big Bang. Notre Univers, vieux de 13,8 milliards d'années, aurait émergé d'une phase très

dense et très chaude. En expansion, il se refroidit et a une histoire thermique riche. Le modèle décrit de façon satisfaisante un grand nombre d'observations : le fond diffus cosmologique, l'abondance des éléments légers, la formation des grandes structures, etc.

1 INFLATION

Date et température inconnues
Phase la plus primordiale du modèle cosmologique et encore spéculative, elle rend compte de l'homogénéité de l'Univers à grande échelle et de l'origine de ses grandes structures.

2 BARYOGENÈSE

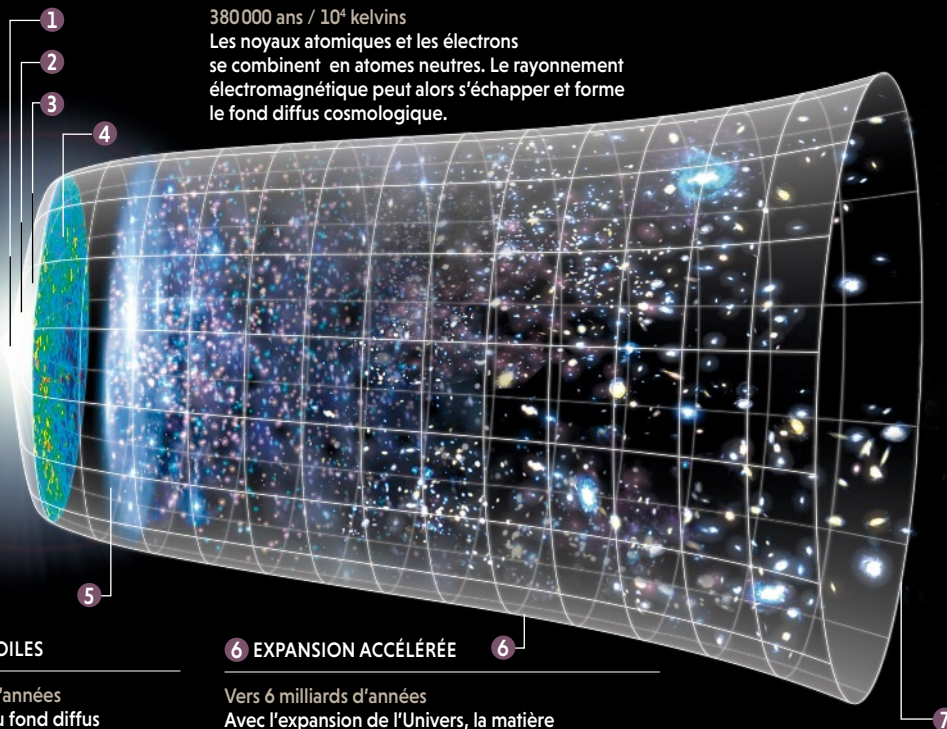
Environ 10^{-32} à 10^{-12} seconde
Période encore mal comprise décrivant la formation des baryons et l'asymétrie entre matière et antimatière.

3 NUCLÉOSYNTÈSE PRIMORDIALE

10^{-3} à 300 secondes / 10^{11} à 10^9 kelvins
Les noyaux atomiques légers (hydrogène, deutérium, hélium et lithium) se forment.

4 FOND DIFFUS COSMOLOGIQUE

380 000 ans / 10^4 kelvins
Les noyaux atomiques et les électrons se combinent en atomes neutres. Le rayonnement électromagnétique peut alors s'échapper et forme le fond diffus cosmologique.



5 PREMIÈRES ÉTOILES

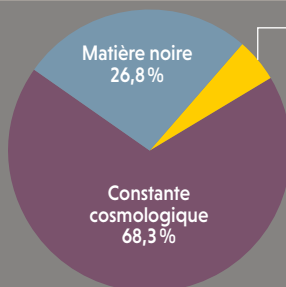
Vers 400 millions d'années
Après l'émission du fond diffus cosmologique, l'Univers est sans étoiles et galaxies. Cette période, les « âges sombres », s'achève avec la formation des premières étoiles.

6 EXPANSION ACCÉLÉRÉE

Vers 6 milliards d'années
Avec l'expansion de l'Univers, la matière et le rayonnement se diluent. L'« énergie sombre » (ou « noire ») devient alors une composante dominante et impose sa dynamique : l'expansion cosmique accélère.

7 L'UNIVERS ACTUEL

13,8 milliards d'années / 2,73 kelvins



Matière ordinaire 4,9 %

LA COMPOSITION ACTUELLE DE L'UNIVERS

Différentes observations ont permis d'estimer le contenu actuel en énergie de l'Univers. La « constante cosmologique » est la composante dominante (68,3 %) ; viennent ensuite la « matière noire » (26,8 %) et la matière ordinaire (4,9 %). Les photons et les neutrinos ne représentent qu'une petite fraction de ce bilan total.

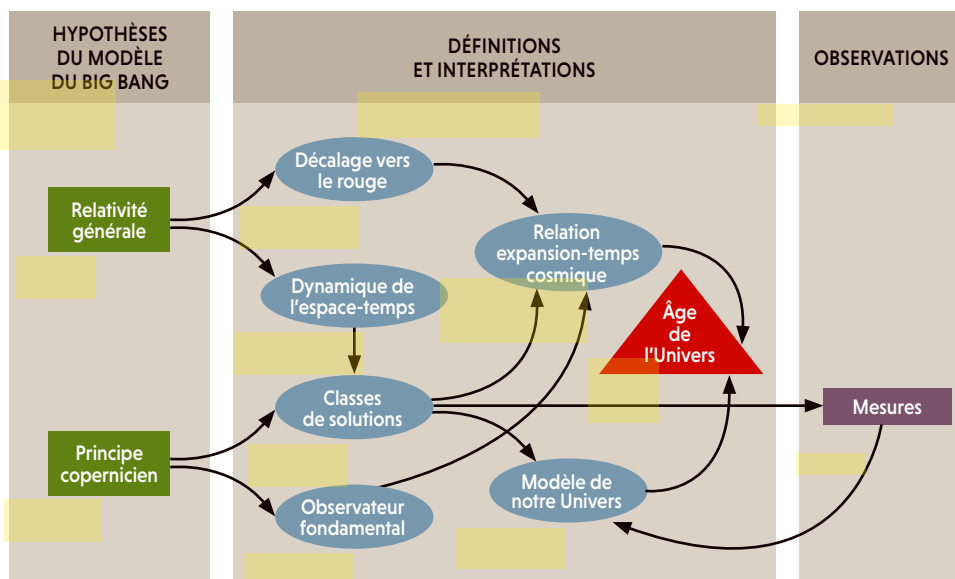
DES QUESTIONS ENCORE OUVERTES

Certains aspects du modèle restent à élucider, comme la nature de la matière noire et de l'énergie sombre. La physique sous-jacente à l'inflation et à la baryogenèse, dans l'Univers primordial, reste très spéculative. Et une théorie quantique de la gravitation sera nécessaire pour décrire les phases antérieures à l'inflation.

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