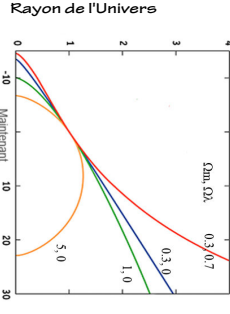


L'évolution du rayon de l'Univers, selon plusieurs modèles cosmologiques, pour diverses valeurs des paramètres Ω_m , la densité de matière noire et Ω_Λ , la densité d'énergie noire de l'Univers. L'évolution de l'Univers est liée à la valeur de $\Omega = \Omega_m + \Omega_\Lambda$.

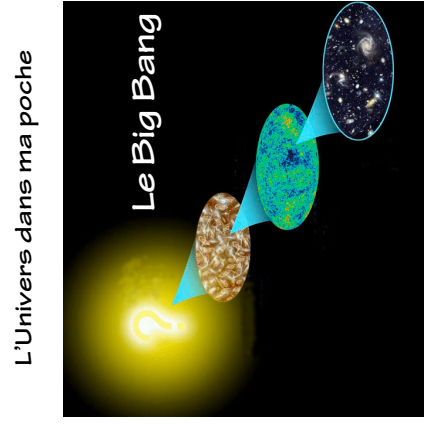
Si $\Omega = 5$, l'Univers se reconstruira en un Big-Crunch (courbe jaune). Si l'Univers a une courbure nulle ($\Omega = 1$), ou négative ($\Omega < 0,5$), l'expansion s'étendra à l'infini (courbes verte et bleue).

Les observations actuelles conduisent à la courbe rouge. La courbure est nulle, et l'expansion s'accélère.



La constante cosmologique

En 1915, Albert Einstein publia les équations de relativité générale, qui relient la géométrie de l'Univers à la quantité de matière et d'énergie qu'il contient. Pour pouvoir rendre compte d'un Univers statique (ce qu'on croyait alors), il avait ajouté un terme, la constante cosmologique Λ . Lorsque il devint évident en 1929 que l'Univers est en expansion, Einstein jugea que l'introduction de Λ était la plus grande erreur de sa vie. Pendant presque tout le XX^e siècle, Λ fut ignoré. Mais en 1998, utilisant les supernovae de type Ia, qui sont des indicateurs de distance bien plus puissants que les Céphéides, deux groupes d'observateurs découvrirent que l'expansion de l'Univers s'accélérait. Ils reçurent le prix Nobel en 2011.



Françoise Combes
Observatoire de Paris

TUMS
N° 12
THE UNIVERSE IN MY POCKET

Jeu

Laquelle de ces images montre les fluctuations du fond diffus cosmologique ?

Réponse au dos

L'horizon de l'Univers observable.

Chaque observateur est au centre d'une sphère qui représente son univers observable. Il ne peut pas observer au-delà de cet horizon. Les galaxies qui peuvent exister au-delà n'ont pas eu le temps de lui envoyer des informations. Leurs photons auraient dû voyager à une vitesse supérieure à celle de la lumière. Le cercle orange autour de l'horizon représente les fluctuations du fond cosmologique.



L'horizon de l'Univers

On peut aujourd'hui retracer toute l'histoire de l'Univers, depuis le Big Bang (voir p. 110). De nombreuses observations confirment ce modèle cosmologique, et les astronomes ont pu explorer presque tout l'Univers observable. Ils ne pourront pas tout observer, bien sûr, car les signaux qui parviennent sur Terre ne peuvent pas voyager plus vite que la lumière, dont la vitesse est 299.792 km/s. Ainsi, observer des objets lointains, revient à remonter le temps. Les galaxies primordiales ont émis il y a 12 ou 13 milliards d'années les photons que nous recevons aujourd'hui. Nous les observons donc dans leur jeunesse. Lorsqu'on observe les photons du fond cosmologique, on remonte ainsi 13,8 milliards d'années (voir page opposée).

Le rayonnement fossile

Au cours de l'expansion, l'Univers se refroidit. Aujourd'hui sa température n'est plus que de 3 degrés absolus (-270 degrés C). L'Univers baigne dans un rayonnement à cette température, relique du Big Bang. Ce rayonnement fut détecté par hasard en 1965 par les radioastronomes Arno Penzias et Bob Wilson qui travaillaient sur des récepteurs de ondes millimétriques. Intrigués par un faible signal venant de toutes les directions, ils discutèrent avec l'astrophysicien Robert Dicke et ses collègues. Ceux-ci suggèrent qu'il s'agissait du rayonnement fossile du Big Bang. Cette découverte reçut le prix Nobel en 1978.



Le Big Bang

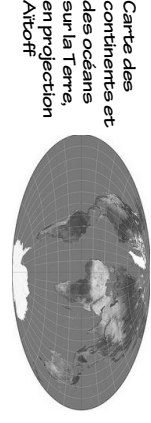
Si l'Univers est en expansion, alors au début il était forcément très dense et très chaud. L'astronome **Fred Hoyle** n'aurait pas ce modèle cosmologique. Pour s'en moquer, dans une émission à la BBC en 1949 il l'appella **Big Bang**. Et c'est ce nom-là qui est resté !

Un des premiers arguments en faveur du Big Bang fut apporté en 1948 par **George Gamow et son étudiant Kalf Alpher qui montrèrent** que seules les conditions de densité et de température extrêmes du Big Bang permettent de former l'hélium, le deutérium et le lithium tels qu'on les observe maintenant dans l'Univers.



G. Gamow

* Voir TUMIP N° 10. 2



Carte des continents et des océans sur la Terre, en projection Aitoff

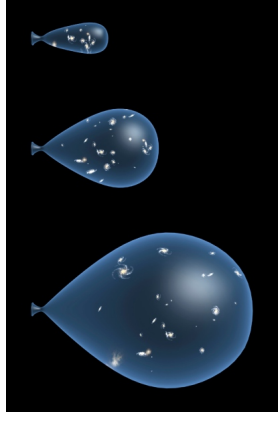
Réponses



Image optique de la galaxie d'Andromède, M31



Fluctuations du fond diffus cosmologique



L'Univers est un peu comme la surface d'un ballon qui se dilate et sur laquelle sont dessinées des galaxies. Chaque observateur dans une galaxie donnée, a l'impression que toutes les autres galaxies s'éloignent, avec une vitesse proportionnelle à leur distance. En 1915, Vesto Slipher étudia les spectres de nébuleuses spirales, et découvrit que la plupart révélait des raies spectrales décalées vers le rouge, indiquant qu'elles s'éloignent de la Terre *. C'était le premier indice - non encore reconnu à l'époque - de l'expansion de l'Univers (voir page ci-contre).

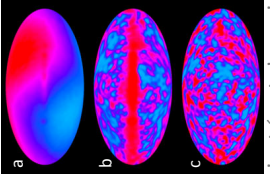
TUMIP Creative Commons



Pour en savoir plus sur cette collection et sur les thèmes présentés dans ce mini-livre tu peux visiter <http://www.tumip.org>

Image de couverture: Brève histoire de l'Univers (voir aussi page 10).
Crédit NASA/WMAP

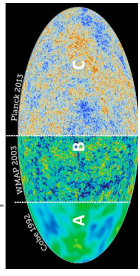
L'Univers dans ma poche N° 12
Ce mini-livre a été écrit en 2020 par Françoise Combes de l'Observatoire de Paris (France).



Cartes du rayonnement micro-onde obtenues par le satellite COBE
a: après soustraction de la partie uniforme du fond diffus cosmologique (FDC)
b: après correction de l'effet global dû au mouvement de notre Galaxie par rapport au FDC,
c: après suppression du rayonnement de la Voie lactée et des galaxies proches,

on découvre enfin les infimes fluctuations du FDC (1/100000 d'amplitude), c'est-à-dire l'état de l'Univers lors de la recombinaison.

Le fond diffus observé par les satellites COBE (1992) (A), WMAP (2003) (B), lancé par la NASA, et Planck (2013) (C), lancé par l'ESA.



Chaque mission montre plus de détails.

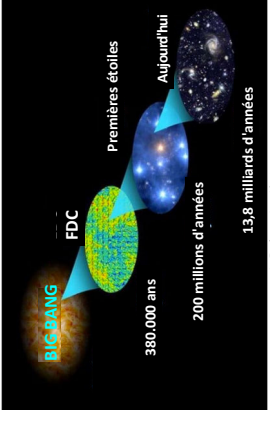
6

L'énergie noire

L'expansion était supposée être ralentie par l'attraction gravitationnelle exercée par toute la matière contenue dans l'Univers. Si l'expansion s'accélérait, comme on le pense maintenant, cela veut dire qu'il existe un autre composant qui, lui, exerce une force répulsive (c'est le rôle que peut jouer la constante cosmologique Λ). Ce composant est appelé **énergie noire**. Il permettrait de rendre compatibles toutes les observations entre elles, comme par exemple la courbure et l'âge de l'Univers (qui ne peut pas être plus petit que l'âge des plus vieilles étoiles). Il reste à trouver la nature de cette énergie noire.

L'histoire de l'Univers telle qu'on la comprend aujourd'hui est décrite p.10 et son destin est schématisé p. 8.

11



Histoire simplifiée de l'Univers:

- Pendant les premières minutes: Big Bang puis formation des particules élémentaires et du rayonnement.
- Après 380.000 ans, recombinaison des protons et des électrons en atomes d'hydrogène.
- Après 200 millions d'années, formation des premières étoiles dans les premières galaxies, et ré-ionisation progressive de l'Univers.
- Enfin, jusqu'à aujourd'hui, transformation des galaxies par fusions de galaxies plus petites.

10

Les fluctuations primordiales

Le rayonnement fossile de l'Univers, qui du fait de l'expansion, est tombé à 3 degrés absolus, a été émis lorsque celui-ci était encore dense et chaud, 380.000 ans après le Big Bang. L'Univers était alors traversé par des ondes qui ont laissé leurs empreintes dans le fond diffus cosmologique. Ce sont les **fluctuations primordiales**, germes des galaxies (voir page 6).

Puis la température de l'Univers est tombée sous 3000K et les protons se sont recombinaison avec les électrons pour donner des atomes d'hydrogène. L'étude statistique des fluctuations montre que l'Univers contient 5% de baryons (la matière telle qu'on la connaît), 25% de **matière noire**, et 70% d'**énergie noire**. Elle indique aussi que l'Univers est plat, et qu'il s'est passé 13,8 milliards d'années depuis le Big Bang. 7

L'expansion de l'Univers

Comment sont nées les galaxies ? Il y a un siècle on savait peu de chose, pas même s'il existait des galaxies en dehors de la nôtre, la Voie lactée.

En 1908, Henrietta Leavitt montra que, pour les Céphéïdes - une classe d'étoiles d'éclat variable - l'intervalle de temps entre deux maxima successifs est lié à la luminosité. Quand en 1925, Edwin Hubble identifia des Céphéïdes dans des **nébuleuses spirales**, il put donc estimer leurs distances et prouver qu'elles sont à l'extérieur de la Voie lactée. Les nébuleuses spirales furent depuis nommées **galaxies**.

En 1927, Georges Lemaître comprit que la « fuite » des galaxies est un effet dû à l'expansion de l'espace. En 1929, Hubble établit le rapport entre distance et vitesse de fuite des galaxies. Cette relation capitale, d'abord appelée loi de Hubble s'appelle depuis 2018 loi de Hubble-Lemaître. 3