

2.7.7 Big Bang, la naissance de l'Univers

Sources : [B54-1], [B55], [B175]

Historique

Le premier cosmologiste à avoir proposé que l'Univers est né d'une grande explosion a été l'abbé Georges Lemaître, en 1927 ; mais sa proposition n'a pas retenu l'attention des scientifiques.

C'est Edwin Hubble qui a publié, en 1929, le premier article montrant la relation entre décalage spectral (« redshift ») et distance, preuve expérimentale de l'expansion de l'Univers. On lui attribue - et à lui seul compte tenu de la modestie de l'abbé Lemaître qui n'a pas fait valoir son antériorité – la découverte de cette expansion.

Le terme « Big Bang » a été inventé en 1946 par George Gamow [B175], pour désigner l'explosion du début de l'Univers, il y a 13.8 milliards d'années.

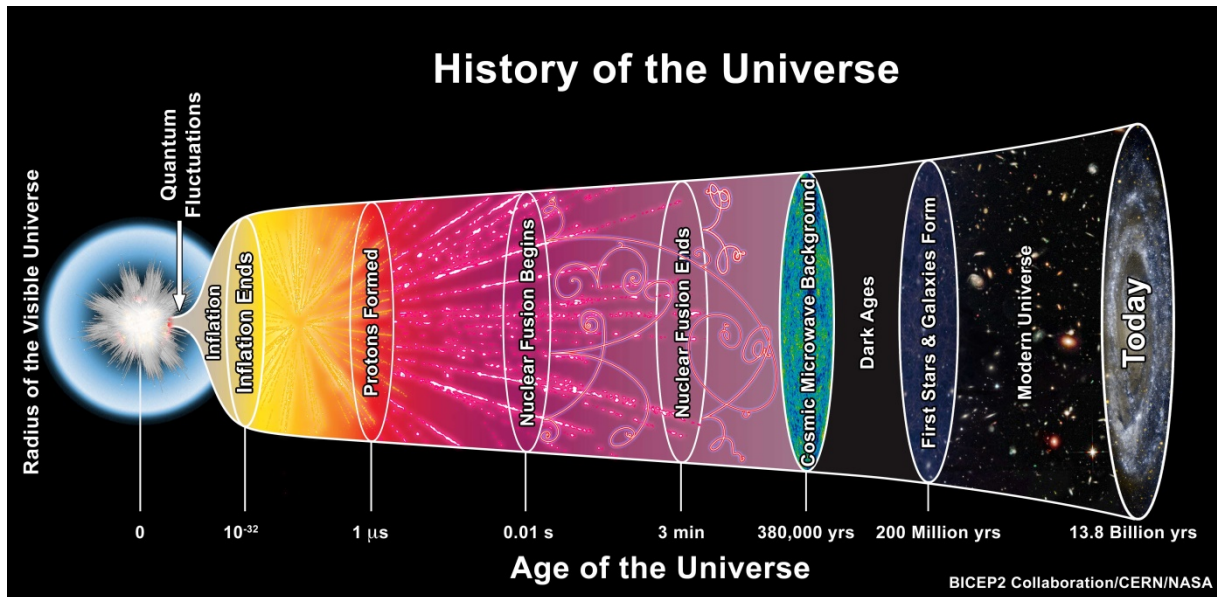
La théorie du Big Bang a l'avantage d'être une solution du paradoxe d'Olbers :

- La lumière a une vitesse finie : $c = 2.99792458 \cdot 10^8$ m/s ;
- L'Univers observable (définition plus loin) a un âge fini : 13.8 milliards d'années ;
- L'Univers observable est en expansion accélérée, sa sphère limite s'éloignant plus vite que la vitesse de la lumière ;
- La lumière qui nous vient de toutes les directions est le fond diffus cosmologique, dont la longueur d'onde n'est visible qu'avec un radiotélescope;
- Il fait noir la nuit parce que la densité d'astres visibles, qui diminue avec la distance (étoiles à proximité, galaxies au loin), est faible.

La naissance de l'Univers

Lors du Big Bang l'Univers était très petit (de l'ordre de la *longueur de Planck*) et il a commencé son expansion, croissance de son rayon qui se poursuit toujours et dont voici des détails.

Il faut bien comprendre que l'explosion du Big Bang a eu lieu dans tout l'Univers en même temps, pas en un certain point de l'Univers. L'inflation et l'expansion qui ont suivi ont aussi affecté tout l'espace en même temps (voir *Homogénéité et isotropie s'expliquent par la théorie du Big Bang*).



Evolution de l'Univers depuis le Big Bang - © BICEP2/CERN/NASA – Creative Commons

On ne connaît pas la cause de cette explosion : peut-être n'a-t-elle pas de cause si elle est due à une fluctuation quantique dans un espace-temps préexistant [B200]. On sait seulement que l'existence du Big Bang explique beaucoup de constatations physiques et qu'elle est cohérente avec les équations d'état de l'Univers comme *l'Equation d'Einstein* et *l'Equation d'évolution de Friedmann*.

Selon [B176] page 85, la température à l'instant du Big Bang dépassait nettement 10^{12} °K (un trillion de degrés). L'énergie conférée aux particules à une telle température décompose même les noyaux atomiques en protons et neutrons. Aujourd'hui nous sommes encore entourés des « cendres » de cette explosion sous forme de fond diffus cosmologique à 2.7°K, après des milliards d'années d'expansion et de refroidissement.

La Théorie du Big Bang ne décrit pas l'explosion elle-même, mais ce qui s'est passé après [B199]. Elle a suscité trois questions si fondamentales qu'une absence de réponse l'aurait remise en cause :

- *Le Problème de l'horizon* ;
- Le problème de l'espace plat, très homogène et isotrope ; Voir :
 - *Problème de l'espace plat, c'est-à-dire de courbure nulle* ;
 - *Principe cosmologique : l'espace est homogène et isotrope*.
- Le problème des *monopoles magnétiques*.

Voir les paragraphes correspondants aux titres en italiques ci-dessus.

2.7.8 L'ère de Planck

Nous ne connaissons pas l'état exact de l'Univers à l'instant 0 de son explosion initiale, état appelé *singularité cosmologique*. Nous savons seulement qu'il était extrêmement petit et qu'il existe une distance l_p en dessous de laquelle l'espace lui-même doit être considéré comme différent du nôtre, et nos lois physiques (y compris

celles de la Mécanique quantique) ne s'appliquent plus. Cette distance minimum est appelée « *distance de Planck* » ou « longueur de Planck » l_p et vaut :

$$l_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 1.6 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

où :

- $\hbar = h/2\pi = 1.054589 \cdot 10^{-34}$ joule .seconde ; (\hbar se prononce h-barre)
- G est la constante universelle de gravitation $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$;
- c est la vitesse de la lumière dans le vide, $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$.

Le postulat de l'espace quantifié

Les physiciens supposent donc que l'espace n'est pas divisible à l'infini et qu'il existe un « atome d'espace » grand comme une longueur de Planck (les anciens Grecs appelaient « atome » la plus petite partie de la matière, partie indivisible). Toute longueur d'objet physique est multiple de la longueur de Planck.

L'ère de Planck : les premiers 10^{-43} seconde

Au début de l'Univers, immédiatement après le Big Bang pendant une durée de l'ordre de 10^{-43} seconde appelée *ère de Planck*, l'Univers était dominé par les effets quantiques de l'énergie de gravitation.

L'univers contenait un plasma dont la densité d'énergie était si élevée qu'elle pouvait faire se rapprocher des particules à une distance inférieure à la distance de Planck. Ces particules étaient des particules et antiparticules virtuelles – quarks-antiquarks et leptons-antileptons - apparaissant et disparaissant aussitôt et animées d'une énergie énorme. La charge électrique totale nulle de l'Univers étant invariable (c'est un principe de la physique) il y avait autant de particules que d'antiparticules.

Mais l'Univers a rapidement commencé à se dilater par inflation, *en créant littéralement de l'espace et de l'énergie du vide, à densité d'énergie constante*, puis plus lentement par expansion en diluant son énergie. Et l'expansion continuant encore de nos jours, il n'y a plus jamais eu d'endroit où la densité d'énergie était suffisante pour contraindre des particules à s'approcher plus près que l_p ... sauf dans les trous noirs.

A des distances de l'ordre de celle de Planck et des densités d'énergie suffisantes pour créer un trou noir, la Mécanique quantique et la Relativité générale s'appliqueraient toutes deux... si on en avait une synthèse, qu'on n'a pas, hélas.

Avec nos connaissances actuelles, aucune distance inférieure à l_p n'a de sens pour un phénomène physique. Le postulat de continuité de l'espace n'est pas vrai pour des distances inférieures ; en tout cas, nous ne pouvons pas le supposer aujourd'hui.

Pendant l'*ère de Planck*, les quatre forces fondamentales (force nucléaire, force faible, force électromagnétique et gravitation) n'en faisaient qu'une et nos lois physiques actuelles ne s'appliquaient pas : l'Univers ne contenait que de l'énergie sous forme de « soupe (plasma) quantique ».

Le postulat du temps quantifié

Cette durée de 10^{-43} seconde est le « *temps de Planck* » t_p mis par la lumière pour parcourir la distance de Planck l_p . Il vaut l_p/c :

$$t_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} = 0.5391 \cdot 10^{-43} \text{ s} \quad \text{où } \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

Cette durée est un quantum de temps : nous ne pouvons pas supposer de durée plus petite avec notre physique, le temps n'étant pas continu. Toute durée est multiple d'un temps de Planck.

Au temps de Planck t_p l'Univers était extraordinairement dense, sa densité étant appelée « *densité de Planck* » D_p et valant :

$$D_p = \frac{c^5}{\hbar G^2} = 5.1 \cdot 10^{96} \text{ kg/m}^3$$

Cette densité est colossale : elle correspond approximativement à celle résultant de la compression d'une centaine de galaxies dans le volume d'un noyau atomique, environ 1 fermi cube (10^{-45} m^3) !

La *masse de Planck* m_p , matière-énergie contenue dans un cube de l_p de côté, est donnée par la formule :

$$m_p = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 2.177 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$$

L'énergie de Planck E_p se déduit de la masse en appliquant la formule $E = m_p c^2$:

$$E_p = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} = 1.956 \cdot 10^9 \text{ joule} = 1.22 \cdot 10^{19} \text{ GeV}$$

Le plus petit trou noir possible

Un objet de masse m_p et de dimension l_p serait un trou noir quantique, le plus petit trou noir possible.

L'ère de superunification

L'ère de Planck est aussi appelée *ère de superunification*, pour indiquer que les 4 forces fondamentales (de gravitation, électromagnétique, forte et faible) formaient une même énergie, produisant un effet global sur le plasma-énergie existant dans ces conditions extrêmes de température et d'énergie des particules.

Nous pensons qu'à la fin de l'ère de Planck l'Univers était extrêmement petit, probablement moins de 10^{-50} m , et que sa température était incroyablement élevée : de l'ordre de 10^{50} K .

Signification cosmologique de la longueur de Planck

(Citation de [B173] page 214)

"La longueur de Planck a une signification tout à fait remarquable pour un théoricien de la physique. Nous avons l'habitude de penser à la gravité comme étant tellement plus faible que les forces électriques et nucléaires qu'elle n'a strictement aucun rapport avec le comportement des particules élémentaires ; mais il n'en est pas ainsi quand les particules de matière s'approchent les unes des autres à une distance de l'ordre de la longueur de Planck. A cette échelle-là, la gravité est non seulement aussi puissante que les autres forces mais elle les dépasse."
(Fin de citation)