

# Inflation, Big Bang et Multivers

*L'Univers selon nos connaissances début 2014*

Mise à jour : 28/01/2018

## Table des matières

<b>1. Rappels de physique.....</b>	<b>2</b>
1.1 Energie.....	2
1.2 Pression.....	3
1.3 Spin, fermions et bosons .....	3
1.4 Champ et boson de Higgs.....	4
<b>2. L'univers en expansion.....</b>	<b>6</b>
2.1 Les trois rayons de l'Univers .....	6
2.2 Big Bang, puis inflation, puis expansion.....	7
2.2.1 L'Ère de Planck .....	8
2.2.2 Transitions de phase séparant les forces fondamentales .....	9
2.2.3 Inflation et transport d'énergie par le boson de Higgs.....	10
2.2.4 Dilatation d'espace à échelle constante.....	11
2.2.5 L'inflation se poursuivra éternellement par endroits .....	12
2.2.6 L'expansion avec dilution et refroidissement.....	13
2.2.7 Les fluctuations quantiques à l'origine des galaxies .....	13
2.2.8 Les ondes gravitationnelles, preuve physique de l'inflation .....	14
2.3 L'espace relativiste de l'Univers soumis à l'expansion.....	14
2.3.1 Considérations philosophiques sur la causalité .....	14
2.3.2 Modèle théorique du Big Bang .....	15
2.3.2.1 Déformation de l'espace.....	15
2.3.2.2 Evolution de l'Univers .....	16
2.3.3 Les diverses formes prises par la matière-énergie .....	17
2.4 Trois observations expliquées par l'inflation .....	17
2.4.1 L'homogénéité et l'isotropie de l'horizon cosmologique .....	17
2.4.2 L'espace plat .....	18
2.4.3 Les monopoles magnétiques.....	18
<b>3. L'univers infiniment grand a une masse infinie .....</b>	<b>19</b>
<b>4. Les multivers, des univers parallèles .....</b>	<b>20</b>
4.1 Les multivers de niveau 1 .....	20
4.2 Les multivers de niveau 2 .....	20
<b>5. Références.....</b>	<b>21</b>

# 1. Rappels de physique

## 1.1 Energie

L'énergie peut prendre plusieurs formes, toutes mesurées avec la même unité : le joule. Ainsi :

- L'énergie *mécanique* se manifeste lorsque le point d'application d'une force  $F$  (en Newtons, N) se déplace de  $L$  (en mètres). L'énergie mise en jeu  $E$  (le travail de la force) est alors  $E = FL$  (produit de la force par le déplacement).
- L'énergie *cinétique*  $E$  est celle d'un corps de masse  $M$  se déplaçant à la vitesse  $V$ . On a alors  $E = \frac{1}{2} MV^2$ .

### Température

La température est toujours une manifestation d'énergie cinétique. Dans un liquide ou un gaz, les molécules se déplacent sans cesse et dans un solide les atomes vibrent et oscillent autour d'une position moyenne. L'énergie cinétique  $\varepsilon$  de chaque molécule est donnée par  $\varepsilon = \frac{3}{2}kT$ , où  $T$  est la température en degrés Kelvin (abréviation K) et  $k$  est la constante de Boltzmann ( $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  joule par degré Kelvin).

Il est remarquable que cette formule s'applique à toutes les molécules, quelle que soit leur masse, les petites comme les grosses ; à une température  $T$  donnée, une petite molécule de masse  $m$  se déplacera plus vite (vitesse  $v$ ) qu'une grosse molécule de masse  $M$  (vitesse  $V$ ), car :  $\frac{3}{2}kT = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}MV^2$ . Au zéro absolu ( $T = 0$ , soit  $-273.16$  degrés Celsius) - dont une molécule peut s'approcher mais pas l'atteindre - sa vitesse serait nulle.

- L'énergie *potentielle*  $E$  est celle d'un objet qui subit l'action (la force) d'un champ de force (électrique, gravitationnel...) dans lequel elle est plongée. Exemple : une masse  $M = 2$  kg située à  $H = 1.5$  m au-dessus du sol subit une force verticale de haut en bas  $P$  (la force de la pesanteur, son poids) due à l'attraction qu'exerce le champ gravitationnel de la Terre.

La pesanteur exerce sur une masse  $M$ , à la surface de la Terre, une force  $P = Mg$ , où le coefficient  $g$  est l'accélération de la pesanteur,  $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup> ; donc  $P = 2 \cdot 9.81 = 19.62$  N (newtons).

Si on lâche la masse, elle tombe jusqu'au sol en un temps  $t$  tel que :

$H = \frac{1}{2}gt^2$ , c'est-à-dire  $1.5 = \frac{1}{2} \cdot 9.81 \cdot t^2$ , d'où  $t = 0.55$  s. Au moment de l'impact, sa vitesse  $v$  est  $v = gt = 5.42$  m/s et son énergie cinétique  $E = \frac{1}{2}Mv^2$ , d'où  $E = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 5.42^2 = 29.4$  joules.

Cette énergie cinétique acquise par la masse  $M$  provient d'une diminution  $E'$  de son énergie potentielle initiale donnée par  $E' = HP = 1.5 \cdot 19.62 = 29.4$  joules. Donc  $E' = E$  : *l'énergie potentielle s'est transformée en énergie cinétique.*

- L'énergie *de masse* d'une masse  $M$  immobile est donnée par la célèbre équation qu'Einstein a établie dans sa théorie de la Relativité Restreinte :  $E = Mc^2$ , où  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide,  $c = 299\,792\,458$  m/s (un peu moins de 300 000 km/s).

Cette équation affirme qu'une masse  $M$  équivaut à une énergie  $E$ , en laquelle elle peut se transformer ; inversement, une énergie  $E$  peut se transformer en une masse  $M$ .

Exemple : si on comprime un ressort avec une force constante  $F$  en déplaçant son extrémité de  $L$ , on fournit au ressort une énergie  $E = FL$ , qu'il peut restituer en se détendant. Lorsqu'il est comprimé, le ressort a une énergie potentielle égale à  $E$ , énergie qui se traduit par un accroissement de sa masse de  $M = E/c^2$  : si on pesait soigneusement le ressort comprimé, on le trouverait plus lourd de  $M$  qu'avant compression.

## 1.2 Pression

La pression  $P$  (en  $N/m^2 =$  pascals Pa) résulte de l'action d'une force  $F$  s'exerçant sur une surface  $S$ . Si elle est uniformément répartie sur cette surface,  $P = F/S$ . En un point entouré d'un élément de surface  $dS$  sur lequel s'exerce une force  $dF$ , la pression est  $dF/dS$ .

Considérons un espace plein d'air fermé par une enveloppe, comme l'intérieur d'un pneu. Par convention, on attribue à la pression *de compression* s'exerçant sur le pneu de l'extérieur (due au poids de la voiture) un signe positif ; on attribue à la pression *de dilatation* s'exerçant de l'intérieur du pneu sur son enveloppe un signe négatif.

La pression d'un fluide sur une surface est due aux chocs des molécules du fluide sur cette surface, chocs dus aux mouvements incessants de ces molécules qui résultent de leur température.

Une telle pression existe même dans l'espace intergalactique où règne un vide poussé. On n'y trouve, en moyenne, qu'environ un atome d'hydrogène par mètre cube : la température  $T$  de cet atome étant supérieure au zéro absolu, il a une énergie cinétique, donc aussi une vitesse capable de pousser une surface atteinte.

De même, au centre d'une étoile où la température (de l'ordre de 20 millions de degrés) décompose les molécules et ionise les atomes, l'agitation thermique de la matière (ou les déplacements de l'énergie équivalente) crée une pression sur toute surface.

## 1.3 Spin, fermions et bosons

Le spin  $\vec{s}$  est une grandeur vectorielle, *moment angulaire intrinsèque* d'une particule qui a les dimensions d'un moment cinétique (produit vectoriel d'une longueur  $\vec{r}$  par une masse  $m$  et par une vitesse  $\vec{v}$  :  $\vec{s} = \vec{r} \wedge m\vec{v}$ ).

Le spin est analogue à la rotation d'une particule sur elle-même, sans être une rotation : c'est une propriété intrinsèque d'une particule, au même titre que sa charge électrique ou sa masse.

Le module  $s$  du vecteur spin  $\vec{s}$  est quantifié : c'est un multiple entier (0, 1, 2...) ou demi-entier (1/2, 3/2, ...) de  $\hbar = h/2\pi$ , multiple qui peut prendre les  $2s+1$  valeurs :

$$-s ; -s+1 ; \dots ; 0 ; \dots ; s-1 ; s.$$

Le spin d'un électron ou d'un proton valant  $\frac{1}{2}$  (c'est-à-dire  $\hbar/2$ ), l'électron et le proton peuvent avoir 2 valeurs de spin :  $-\frac{1}{2}$  et  $+\frac{1}{2}$ . Le photon a un spin 1, le graviton (s'il existe) un spin 2, le baryon  $\Omega^-$  (oméga moins) un spin  $3/2$ , etc. Ce module est absolument constant, mais *l'axe de rotation du spin peut adopter n'importe quelle direction de l'espace.*

L'inversion du sens du vecteur spin d'une particule, remplacé par le vecteur opposé, correspond à un changement de polarisation.

Les spins de l'électron et du proton sont à la base des propriétés magnétiques de la matière. Une particule de spin non nul se comporte comme un petit barreau aimanté.

Le spin est donc une propriété fondamentale d'une particule : la description de l'état de celle-ci est incomplète sans le spin, aussi incomplète que si elle omettait son impulsion (quantité de mouvement). Cette propriété est si fondamentale qu'elle permet de classer les particules en deux catégories :

- Les particules de spin demi-entier ( $1/2\hbar, 3/2\hbar, 5/2\hbar \dots$ ), appelées *fermions*.

Exemples de particules de spin  $\frac{1}{2}$  ( $=\frac{1}{2}\hbar$ ) : l'électron, le proton et le neutron. Ce spin est constant en grandeur - et sans rapport avec la masse ou la vitesse de la particule - mais il peut changer de signe comme si la particule inversait son sens de rotation. Les particules soumises à l'interaction électromagnétique ont un moment magnétique colinéaire (parallèle dans l'espace) à leur vecteur spin.

- Les particules de spin entier ( $0, \hbar, 2\hbar, 3\hbar \dots$ ), appelées *bosons*.

Exemples de particules de spin 1 ( $=\hbar$ ) : le photon (eh oui, même un photon de masse nulle peut avoir un moment cinétique, ce qui prouve que le spin n'est pas lié à une masse en rotation) ; les bosons W et Z, et le gluon.

Le boson de Higgs a un spin 0.

*Au plan philosophique, l'existence du spin nous conduit à admettre qu'il peut exister des propriétés fondamentales de la matière-énergie sans rapport avec des concepts issus de nos sens comme la masse. Nous en avons déjà un exemple avec le photon, particule-onde de masse nulle, mais d'énergie  $h\nu$  non nulle, d'impulsion non nulle et de spin non nul. C'est là une des raisons pour représenter la réalité à l'échelle atomique avec des formules mathématiques.*

## 1.4 Champ et boson de Higgs

Le champ de Higgs existe partout dans l'Univers, dans l'intérieur des atomes comme entre les étoiles. Comme les autres champs, il transporte de l'énergie ; mais contrairement aux autres champs, ce n'est pas un champ de force : il ne fait qu'attribuer leur masse aux particules de masse non nulle, *toutes* les particules de masse non nulle.

Par cette inertie, ces particules s'opposent à toute variation de vecteur vitesse, exigeant donc une force pour produire cette variation.

Le champ de Higgs est un champ d'énergie *scalaire* : il n'a pas de direction privilégiée, il s'oppose aux variations de vecteur vitesse dans toutes les directions. Il

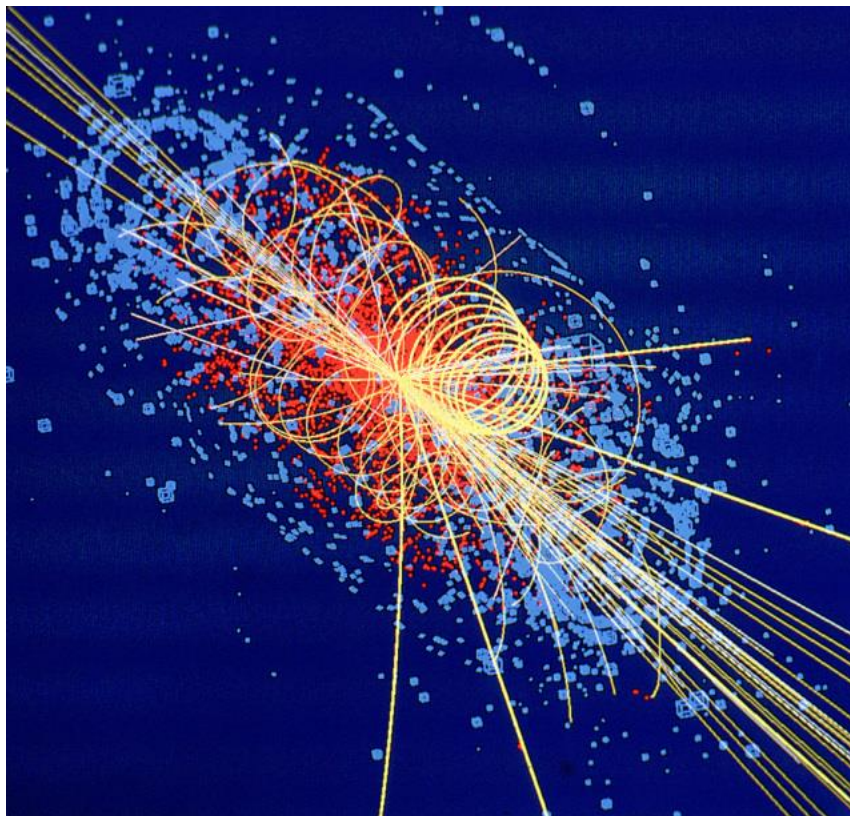
a un spin nul. Mais sa propriété la plus étonnante est que son énergie est plus grande dans un champ nul que dans un champ non nul ; il n'a donc pu conférer leurs masses aux particules, après le Big Bang, que lorsque l'Univers se fut suffisamment refroidi et que sa densité d'énergie ait suffisamment diminué.

Plus l'interaction d'une particule donnée avec le champ de Higgs est intense, plus sa masse d'inertie est grande.

Le champ de Higgs a une grande importance dans la Théorie électrofaible : il explique la masse des bosons vecteurs  $W$  et  $Z^0$ , particules porteuses de l'interaction faible, et l'absence de masse du photon, porteur de l'interaction électromagnétique.

Comme les autres champs de la Théorie quantique, le champ de Higgs a un boson porteur de son interaction : le *boson de Higgs* (particule fondamentale découverte le 04/07/2012), d'une masse de 126 GeV, susceptible de se décomposer de diverses manières (par exemple, d'après le Modèle standard un boson de Higgs devrait se décomposer sitôt produit en un quark  $b$  et un antiquark  $\bar{b}$ ).

La masse des particules  $W$  et  $Z$  leur est conférée par le boson de Higgs au moyen du *mécanisme de Brout-Englert-Higgs*.



CERN (Lucas Taylor 2013) : Production d'un boson de Higgs par la collision de 2 protons avec une énergie de 14Tb ( $14 \cdot 10^{12} \text{eV}$ ) ; le boson se décompose rapidement en 4 muons non absorbés par le détecteur. Les lignes sont des trajectoires des autres produits de la collision, et l'énergie déposée dans le détecteur forme des taches bleues.

## Le boson de Higgs est responsable de la création de matière-énergie par l'inflation

Selon [9] page 345 : Si on suppose que l'inflation provient d'une transition [de phase, comme le passage de l'état solide à l'état liquide] mettant en jeu le boson de Higgs des Théories de grande unification [voir *Théories de jauge*], alors la température de la transition sera de l'ordre de  $10^{15}$  GeV. [Compte tenu de la relation temps-température] le calcul donne un temps de l'ordre de  $10^{-36}$  seconde après le Big Bang et une durée du même ordre pour une expansion d'un facteur  $e=2.718$ . Si la transition doit durer assez pour au moins 70 expansions successives de ce facteur, l'Univers en inflation grossira d'un facteur de l'ordre de  $e^{70} \approx 10^{30}$ .

## 2. L'univers en expansion

En 1929, l'astronome américain Edwin Hubble mesura la distance et la vitesse de galaxies lointaines par rapport à la Terre. La mesure de la distance n'était pas très précise, mais celle de la vitesse l'était parce qu'on mesure avec précision le décalage  $Z$  des raies spectrales de la lumière de la galaxie, où  $Z = (\lambda_{\text{galaxie}} - \lambda_{\text{fixe}}) / \lambda_{\text{fixe}}$ .

Dans cette formule,  $\lambda_{\text{galaxie}}$  est la longueur d'onde d'une certaine raie du spectre de la galaxie qui s'éloigne et  $\lambda_{\text{fixe}}$  est la longueur d'onde de cette même raie mesurée dans un laboratoire terrestre.  $\lambda_{\text{galaxie}}$  est plus grande que  $\lambda_{\text{fixe}}$  car l'expansion de l'Univers dilate les longueurs d'onde.

Hubble s'aperçut que plus une galaxie est loin de nous, plus elle s'éloigne rapidement : quelle que soit la direction de l'espace où on regarde, les galaxies lointaines s'éloignent de nous à une vitesse proportionnelle à leur distance.

Il énonça donc ce qui est devenu la *Loi de Hubble* :  $v = Hd$ , où :

- la vitesse d'éloignement  $v$  est en km/s ;
- la distance  $d$  est en mégaparsecs (1 Mpc = 3.26 millions d'années-lumière =  $3.09 \cdot 10^{19}$  km) ; plus une galaxie est loin, plus on la voit telle qu'elle était il y a longtemps.
- la constante  $H$  (constante de Hubble) vaut 69.6 km/s/Mpc.

La Terre est le centre de l'Univers observable. Mais aucun point de l'Univers n'est privilégié, son expansion affecte tous ses points et depuis le même instant, le Big Bang. Les lois physiques y sont les mêmes partout.

### 2.1 Les trois rayons de l'Univers

Il y a 3 réponses à la question : « Quel est le rayon de l'Univers ? »

- On appelle *Univers observable* la sphère de l'intérieur de laquelle la lumière a eu le temps de nous parvenir en 13.8 milliards d'années, c'est-à-dire depuis le Big Bang ; son rayon est  $R = 47$  milliards d'années-lumière. La loi de Hubble ne peut s'expliquer que par une expansion simultanée de cet Univers en tous ses points.
- L'Univers observable n'est pas le même que celui du *Volume de Hubble*, intérieur à la sphère de la surface de laquelle les galaxies s'éloignent de nous à une vitesse inférieure ou égale à  $c$ . La différence de rayon entre l'Univers

observable et le Volume de Hubble est due à l'expansion, dont la vitesse a varié : elle a décré pendant les premiers 8 à 9 milliards d'années et croît depuis.

Une galaxie située à l'extérieur du Volume de Hubble, mais dont la lumière nous parvient parce qu'elle est partie il y a entre 9.1 et 13.8 milliards d'années, s'éloigne de nous à une vitesse supérieure à  $c$ . Une telle vitesse ne contredit pas la Relativité Générale, car [celle-ci ne limite à  \$c\$  que les vitesses de ce qui est matière ou rayonnement](#), pas celle de l'expansion.

- La sphère de *l'Univers physique* actuel, de rayon  $R = 47$  milliards d'années-lumière, contient environ  $10^{11}$  galaxies,  $10^{23}$  étoiles. La lumière des galaxies à sa surface (appelée *fond diffus cosmologique*) nous parvient encore, car elle est partie il y a 13.8 milliards d'années, quand l'Univers était beaucoup plus petit. Mais leur lumière *partie aujourd'hui* ne nous parviendra plus. [8]

Au-delà du Volume de Hubble, la vitesse d'éloignement est plus rapide que  $c$

La surface de l'Univers observable s'éloigne de nous environ 6 fois plus vite que la vitesse de la lumière.

L'Univers n'a aucune raison de n'exister qu'à l'intérieur du Volume de Hubble, lui-même intérieur à l'Univers observable. Bien qu'on ne puisse pas voir cet espace *tel qu'il est aujourd'hui*, on sait qu'il existe, donc qu'il contient *des points qui s'éloignent de nous plus vite que la vitesse  $c$* , points que nous ne verrons donc jamais. On est certain de cette existence, car on voit des galaxies (appelées *quasars*) dont le décalage  $Z$  est supérieur à 1.4 (exemple :  $Z = 5$ , qui correspond à une distance d'environ 25 milliards d'années), ce qui s'explique par le fait que la lumière que nous en recevons est partie à un moment où l'Univers était beaucoup plus petit et a eu le temps d'arriver ; nous voyons aujourd'hui les astres tels qu'ils étaient lorsqu'ils ont émis la lumière que nous observons, il y a parfois plus de 13 milliards d'années. Les astres les plus lointains dont la lumière a eu le temps de nous parvenir sont à 47 milliards d'années-lumière, rayon de *l'Univers existant* (ou *Univers physique*).

Mais, objecteront certains, Einstein a démontré qu'aucune vitesse supérieure à  $c$  n'est possible : aucun déplacement de matière, aucun rayonnement, aucune conséquence d'un phénomène physique ne peut se propager plus vite que la lumière ! C'est vrai, mais cette objection ne tient pas : l'expansion de l'Univers, où toute distance et toute longueur grandit, échappe à la contrainte de vitesse inférieure ou égale à  $c$ . Pour un observateur donné, tout se passe comme si tous les objets lointains d'un Univers sans expansion s'éloignaient en se déplaçant, mais en réalité c'est l'espace lui-même qui grandit : une règle de 50 cm grandit et toute mesure d'objet voisin de l'espace par rapport à cette règle reste constante.

## 2.2 Big Bang, puis inflation, puis expansion

Sources : [6], [7] et [9]

Depuis l'invention du terme, on a appelé « Big Bang » le commencement de l'Univers, il y a 13.8 milliards d'années. Il était alors très petit (de l'ordre de la *longueur de Planck*) et il a commencé son expansion, croissance de son diamètre qui se poursuit toujours et donc voici des détails.

### 2.2.1 L'Ère de Planck

Nous ne connaissons pas l'état exact de l'Univers à l'instant 0 de son explosion initiale. Nous savons seulement qu'il était extrêmement petit et qu'il existe une distance  $l_p$  en dessous de laquelle l'espace physique lui-même ne peut plus être considéré comme continu 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 ;
- $G$  est la constante universelle de gravitation  $G = 6.67 \cdot 10^{-11}$  Nm<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup> ;
- $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide,  $c = 299\,792\,458$  m/s.

#### L'Ère de Planck

Au début de l'Univers, immédiatement après du Big Bang pendant une durée de l'ordre de  $10^{-43}$  seconde appelée *Ère de Planck*, l'Univers contenait une sorte de « soupe quantique » 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.

Mais l'Univers a rapidement commencé à se dilater par inflation, *en créant littéralement de l'espace et de la matière-énergie, à densité 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 la création d'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.

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.

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 quantique.

Cette durée est le « *temps de Planck* »  $t_p$  mis par la lumière pour parcourir la distance de Planck  $l_p$ . Il vaut  $l_p/c$  :

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

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



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

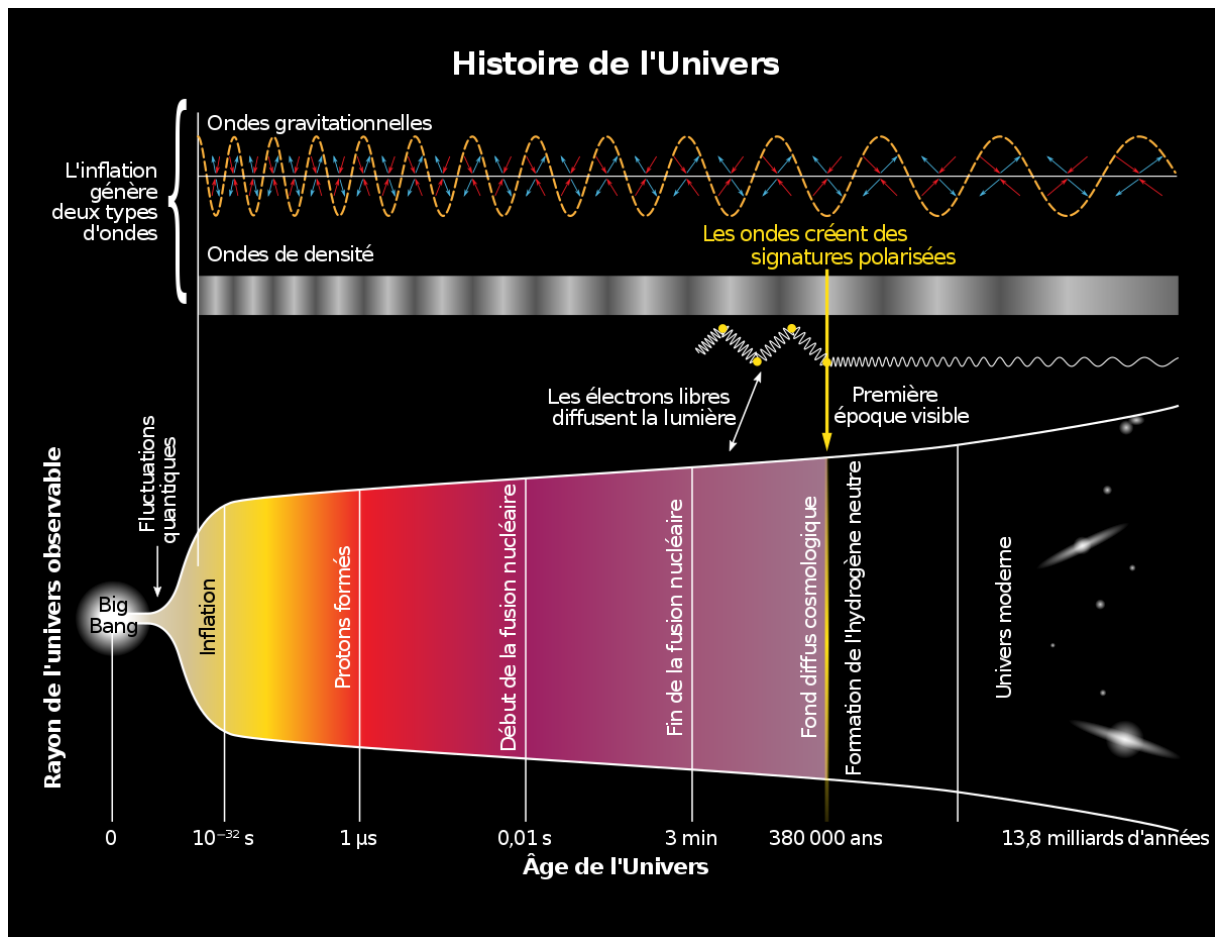
Cette densité est colossale : elle correspond approximativement à celle résultant de la compression d'une centaine de galaxies dans le volume d'un noyau atomique, environ 1 fermi cube ( $10^{-45} \text{ m}^3$ ) !

La « masse de Planck »  $m_p$ , [matière-énergie](#) contenue dans un cube de  $l_p$  de côté, est donnée par la formule :

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

Un objet de masse  $m_p$  et de dimension  $l_p$  serait un trou noir quantique de diamètre  $l_p$ .

## 2.2.2 Transitions de phase séparant les forces fondamentales



*1<sup>ère</sup> transition : séparation de la gravitation quantique et des trois autres forces*  
 Après le temps de Planck la « soupe » de l'Univers a subi une première transition, un changement de phase par lequel la force de gravitation quantique s'est séparée des trois autres forces fondamentales.

*2<sup>ème</sup> transition : séparation de la force forte et de la force électrofaible*

Un peu plus tard, lorsque la température de la soupe correspondait à une énergie de l'ordre de  $10^{15}$  GeV – c'est-à-dire vers  $10^{-36}$ s - deuxième transition : la force forte (force nucléaire reliant entre eux les protons et les neutrons d'un noyau) s'est séparée de la force électromagnétique et de la force faible, ces deux forces étant unifiées en une force appelée électrofaible. La densité de la soupe de l'Univers était alors de l'ordre de  $10^{80}$  kg/m<sup>3</sup>.

*3<sup>ème</sup> transition : l'inflation créatrice d'espace et d'énergie*

Le temps écoulé depuis le temps de Planck était alors suffisant pour que l'énergie du vide (forme dominante de l'énergie pendant ce temps-là) déclenche une troisième transition de phase : *l'inflation créatrice d'espace à densité constante*. L'énergie nécessaire pour maintenir cette densité dans un espace en croissance exponentielle a été fournie par le champ de Higgs, portée par le boson de Higgs (voir ce titre), présent dans tout l'Univers. *C'est ainsi que s'est créée l'énergie de l'Univers existant encore aujourd'hui sous forme de matière-énergie.* (Détails plus bas).

*4<sup>ème</sup> transition : séparation de la force électrofaible*

Signalons enfin une quatrième transition de phase survenue à cette époque-là, lorsque l'énergie décroissante des particules de la soupe était de l'ordre de 100 GeV : la force électrofaible s'est séparée en force faible et force électromagnétique dans leur forme actuelle.

Pendant tout ce temps-là, le diamètre de l'Univers augmentait et sa température décroissait.

### **2.2.3 Inflation et transport d'énergie par le boson de Higgs**

Les équations de la Relativité Générale admettent une solution particulière, instable, où la dilatation de l'espace se produit à *densité de matière-énergie constante* : au fur et à mesure qu'il augmente de volume, *l'espace crée de la matière dans la même proportion, sa densité restant constante !*

Bien entendu, la matière créée provient de quelque part, il n'y a pas de création magique à partir de rien. L'expansion résulte d'une pression négative, *qui crée de l'énergie-matière en même temps qu'elle dilate l'espace. Cette énergie-matière provient de l'énergie potentielle de l'espace lui-même, qui décroît.*

Analogie : l'énergie cinétique d'un corps qui tombe provient de la décroissance de l'énergie potentielle du champ de gravitation dont la force le fait tomber.

Pendant la phase d'inflation, l'énergie potentielle de chaque point de l'Univers pouvait devenir aussi négative que nécessaire, pour alimenter l'inflation en baissant.

Comme le champ électromagnétique, le champ de Higgs transporte de l'énergie. La transformation de son énergie en énergie de l'Univers occupant le volume créé a eu lieu grâce au boson de Higgs, qui a effectué la conversion nécessaire en se comportant comme s'il était de la matière. Pendant cette transformation, l'énergie potentielle de chaque point de l'Univers pouvait devenir aussi négative que nécessaire, pour alimenter l'inflation en baissant.

Ce processus d'expansion auto-entretenu de l'espace crée la quantité de matière-énergie qu'il faut, à la vitesse qu'il faut, pour que sa densité soit constante. La croissance est exponentielle : toutes les  $T$  secondes, l'espace double dans chacune des trois dimensions, le volume et la masse étant multipliés par 8. La vitesse de croissance des dimensions double aussi : elles croîtront 2 fois plus vite pendant les  $T$  secondes suivantes. Une région A, 2 fois plus éloignée de nous qu'une région B, s'éloignera 2 fois plus vite. La force gravitationnelle d'expansion due à la pression négative est 3 fois plus forte que la force d'attraction due à la masse, d'où le résultat explosif.

### Des valeurs extrêmes

La suite  $1 ; 2 ; 4 ; 8 ; \dots ; 2^n \dots$  croît très vite avec  $n$ . Ainsi, avec  $n = 16$  elle atteint 65 536, avec  $n = 50$  elle atteint 1 125 899 906 842 624 (~1125 trillions), etc. On sait que pour notre Univers la durée  $T$  fut de l'ordre de  $10^{-38}$  seconde et qu'il y eut environ  $n = 260$  doublements, multipliant son rayon par environ  $2 \cdot 10^{78}$ . La durée totale de l'ensemble de ces doublements fut inférieure à  $10^{-35}$  seconde : ce processus fut donc extrêmement rapide, permettant à la fin à un rayon lumineux de parcourir à la vitesse  $c$  moins de  $3 \cdot 10^{-27}$  mètre (1 trillion de fois moins que le diamètre d'un proton.)

Cette phase brève de l'évolution de l'Univers est appelée *inflation*. Lorsqu'elle commença, l'Univers pesait une centaine de grammes et était un milliard de fois plus petit qu'un proton ; lorsqu'elle prit fin, l'Univers avait une quinzaine de centimètres de diamètre et avait la même quantité d'énergie (future matière-énergie) qu'aujourd'hui.

L'inflation a pris fin comme elle avait commencé, sur une transition de phase de la soupe quantique de l'Univers, lorsque la température est passée en dessous d'une certaine valeur.

### **2.2.4 Dilatation d'espace à échelle constante**

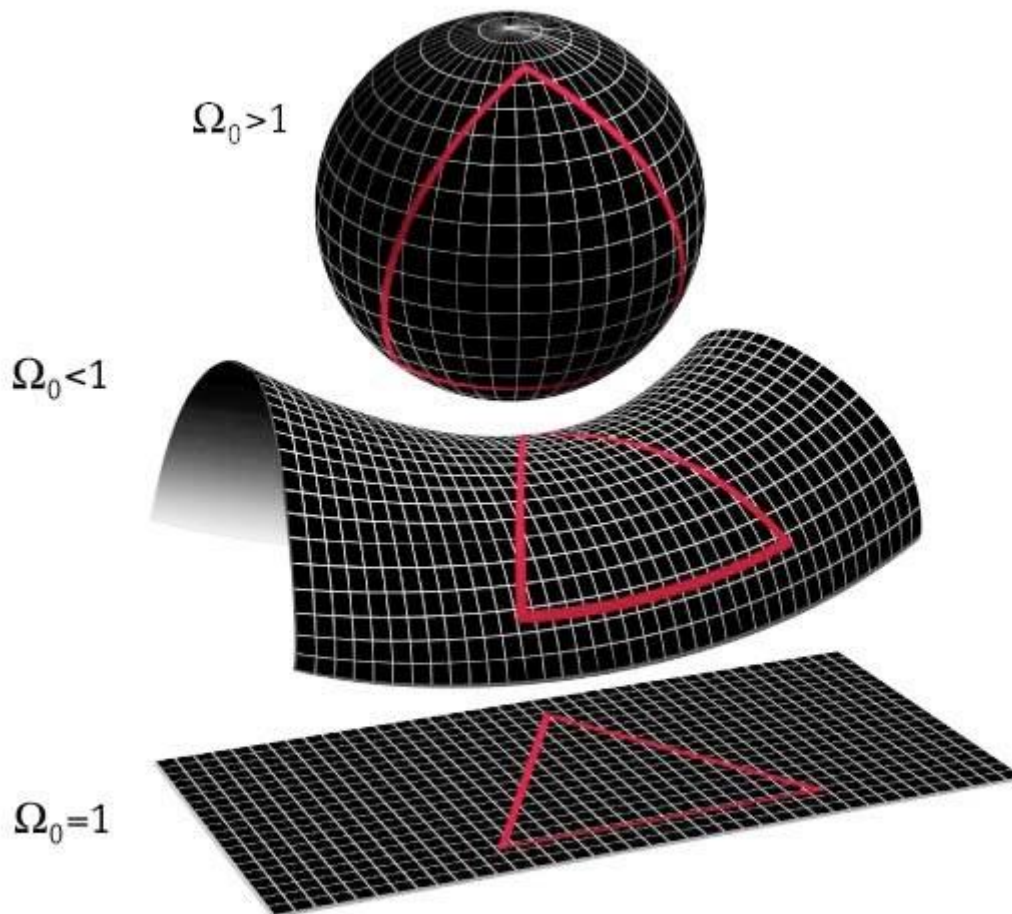
Pendant l'inflation l'espace s'est dilaté à *échelle constante*, en conservant les formes. Dans une telle dilatation, tout se passe comme lorsqu'on augmente l'échelle d'une carte de France : la forme du pays est la même à l'échelle 1cm = 10km qu'à l'échelle 1cm = 2km, seule la carte change de taille. La propriété de conservation des formes est restée vraie pendant toute la durée de l'inflation, bien que la taille de l'Univers ait été multipliée par  $2 \cdot 10^{78}$  (oui : 2 suivi de 78 zéros).

Les variations de densité créées et amplifiées par l'inflation ont produit des régions ayant des formes particulières. Le respect de cette conservation des formes est mesuré par une variable appelée  $\Omega = \rho/\rho_0$ , rapport entre la densité de l'Univers  $\rho$  et une densité critique  $\rho_0 = 9 \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3$ .

Cette densité critique, observée encore aujourd'hui à grande distance, correspond à 6 atomes d'hydrogène par mètre cube d'espace de l'Univers.

La conservation parfaite des formes de l'Univers a lieu pour la densité critique  $\Omega_0 = 1$ . Lorsque  $\Omega > 1$ , la matière-énergie a tendance à se regrouper à petite échelle de distances, alors que lorsque  $\Omega < 1$  elle se regroupe plutôt à grande échelle. La mesure actuelle de  $\Omega$  pour l'espace lointain donne  $\Omega = 0.96$  : le regroupement de matière-énergie s'est produit plutôt à grande échelle, au début de l'inflation. La forme d'une région affectée à ce moment-là a subi la dilatation du reste de l'inflation. Dans l'espace proche de notre amas local de galaxies, où ce que l'on voit est des milliards

d'années plus récent qu'à grande échelle, il n'y a pas eu de regroupement mesurable dû à l'inflation.



Géométries de l'espace : sphérique, hyperbolique et plat

### 2.2.5 L'inflation se poursuivra éternellement par endroits

L'inflation ultra-rapide et à densité constante, qui a concerné au début tout l'espace qui est devenu *notre* Univers, a pris fin au moins dans notre amas local de galaxies. L'Univers que nous voyons se dilate beaucoup plus lentement : son rayon double tous les 8 milliards d'années environ, alors qu'il doublait au début à chaque  $10^{-38}$  seconde. Dans notre région, *l'inflation* est devenue de *l'expansion*.

La théorie montre que l'inflation n'a pas été la même dans tout l'Univers. Nous savons qu'il y a des régions où elle se poursuit de nos jours et continuera indéfiniment, alors que dans d'autres elle est devenue ou deviendra de l'expansion.

Il existe donc un processus physique qui transforme l'énergie de la forme qui se dilate à densité constante en la forme à conservation d'énergie totale de notre vie quotidienne. C'est dans cette dernière forme que la matière-énergie existe dans les régions de notre Univers, en expansion lente depuis l'inflation.

Nous savons qu'à *chaque instant il se crée dans l'Univers plus de matière par inflation qu'il ne s'en transforme* : l'inflation continuera donc éternellement ; et un certain nombre de régions encore en cours d'inflation finiront par se transformer en régions en expansion.

### 2.2.6 L'expansion avec dilution et refroidissement

A la fin de l'inflation il y avait dans l'Univers assez de matière-énergie pour que l'attraction gravitationnelle apparaisse et la ralentisse. Elle se poursuit sous une forme qui dure toujours, 13.8 milliards d'années après : l'expansion. Cette nouvelle forme de croissance de l'Univers n'est plus à densité constante mais à *matière-énergie constante*.

Or, à matière-énergie constante l'Univers en expansion se dilue, sa densité et sa température décroissant. Cette décroissance permet, en moins d'une seconde, l'apparition de la *force forte* (qui assure la cohésion des noyaux atomiques, malgré la répulsion entre protons de charge positive), de la *force faible* (qui intervient dans des décompositions de fermions) et de la *force électromagnétique*. La formation des protons et neutrons à partir des quarks commença.

Quelques minutes après, les premiers noyaux atomiques simples commencèrent à se former à partir de protons et de neutrons. Très dense, l'Univers était alors encore opaque, la lumière ne pouvant se propager.

380 000 ans après, un nombre suffisant d'électrons et de protons s'associèrent en atomes pour que la lumière ne soit plus dispersée et puisse se propager : l'Univers devint transparent. La lumière qui en sortit alors (appelée *rayonnement fossile*) nous parvient toujours, sous forme de *fond diffus cosmologique*, mais l'expansion en a tellement dilaté les ondes que leur longueur est dans la gamme millimétrique et correspondent à une température de 2.7°K, proche du zéro absolu.

### 2.2.7 Les fluctuations quantiques à l'origine des galaxies

La Mécanique quantique montre qu'en tout point de l'Univers (dans l'espace intergalactique comme à l'intérieur d'un atome) l'énergie potentielle n'est pas définie et stable, elle a une plage de variation qui dépend de la largeur de l'intervalle de temps où on l'observe : l'énergie peut varier d'autant plus que l'intervalle de temps est réduit. Bien entendu, le principe de conservation de l'énergie reste respecté *en moyenne* : un « emprunt » momentané d'énergie à l'espace environnant est restitué l'instant d'après.

Ces variations brusques d'énergie sont appelées « fluctuations quantiques ». On ne peut prévoir ni *où* une fluctuation se produira, ni *quand*, ni *avec quelle variation d'énergie*  $\Delta E$ . On sait seulement que la durée  $\Delta t$  d'une fluctuation d'énergie  $\Delta E$  est telle que  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{1}{2}\hbar$  où  $\frac{1}{2}\hbar = 0.527 \cdot 10^{-34}$  joule.seconde.

Dans l'Univers de taille subatomique du début de l'inflation, des fluctuations quantiques (dont l'effet est encore visible dans le fond diffus cosmologique) ont produit des variations locales de densité de la matière-énergie. L'influence de la gravitation amplifia ces irrégularités dans la distribution de l'énergie, amplification qui créa des ondes gravitationnelles et finit par créer des galaxies : de l'énergie se transforma en matière visible et matière noire.

La gravitation rapprocha ensuite des molécules de cette matière (essentiellement de l'hydrogène), qui s'agrégèrent en formant des nuages. Ceux-ci se contractèrent ensuite par attraction gravitationnelle, produisant des étoiles dans des régions de densité supérieure à celle du vide environnant, régions qui devinrent des galaxies.

### **2.2.8 Les ondes gravitationnelles, preuve physique de l'inflation**

Dans sa Relativité Générale, Einstein prédit l'existence d'ondes gravitationnelles. Les fluctuations quantiques ont « fripé » l'espace, y causant des ondulations de densité (régions comprimées alternant avec des régions dilatées) qui perturbent la trajectoire de la lumière qui les traverse ; ce phénomène est de nature quantique, dû à des *gravitons* (particules qui transmettent la force de gravitation, conjecturées mais non encore observées) qui apparaissent et disparaissent dans le « vide » spatial. Ces ondulations polarisent la lumière du fond diffus cosmologique qui les traverse, polarisation non encore mise en évidence par des télescopes avec certitude mi-2015.

L'existence de cette polarisation serait une preuve expérimentale de l'inflation. Ce phénomène est le seul à expliquer l'intensité et la longueur colossale des ondulations vues, de l'ordre du milliard d'années-lumière. Des ondes gravitationnelles générées par la collision avec fusion de deux trous noirs (de masse comparable au Soleil) ont déjà été observées, mais leur taille est de l'ordre du diamètre du Soleil, 1.4 million de km, et leur mesure extrêmement difficile.

## **2.3 L'espace relativiste de l'Univers soumis à l'expansion**

Puisque l'Univers grandit depuis des milliards d'années, comment cette expansion a-t-elle commencé ? A quoi ressemblait l'Univers initial ?

### **2.3.1 Considérations philosophiques sur la causalité**

Cette question admet implicitement que toute situation observée à un instant donné a pour cause un phénomène d'évolution, lui-même conséquence d'une situation précédente, etc. Les hommes ont postulé ce principe par induction à partir de constatations physiques relevant de ce que j'appelle le « principe de stabilité » : *les mêmes causes produisent les mêmes effets.*

Ce principe implique qu'une loi d'évolution est stable : elle est la même en tous lieux et à tout moment. Il n'implique pas qu'une situation apparue ou constatée *pour la première fois* résulte d'un phénomène qui la précédait ; si ce n'est pas le cas, si une situation *nouvelle* peut apparaître sans résulter d'une situation précédente, il n'y a pas de contradiction avec le principe de stabilité du moment que :

- la structure de cette situation (ses composantes et leurs relations) ne contredit pas de loi de structure existante ;
- son évolution postérieure ne contredit pas de loi d'évolution existante.

Bref, notre principe de causalité est fait pour prévoir l'avenir à partir du passé. Il n'exige nullement que la chaîne de causalité remonte à l'infini dans le passé, tant pis pour les philosophes qui ne s'en sont pas aperçu et se sont crus obligés de postuler une « cause première », une « cause sans cause » comme Dieu. Rien n'interdit que l'Univers ait toujours existé, si toutes ses lois d'évolution ont été et sont stables après

leur première application. Rien n'oblige une loi d'évolution physique d'avoir existé avant la première fois où il existe une situation à laquelle elle doit s'appliquer ; la physique n'a pas besoin des Idées éternelles de Platon.

### 2.3.2 Modèle théorique du Big Bang

Ce modèle de l'origine et de l'évolution de l'Univers est basé sur la théorie de la Relativité Générale d'Einstein et le Principe cosmologique.

- La Relativité Générale est une théorie de la gravitation, valable pour les corps en mouvement comme pour les corps immobiles. Elle affirme que la présence d'une masse déforme l'espace environnant, faisant en sorte que le plus court chemin entre deux points n'est plus nécessairement une ligne droite. Elle décrit une relation entre espace et temps, et la manière dont une masse se déplace et un observateur mesure le temps dans cet espace-temps déformé. Cette théorie a été vérifiée expérimentalement d'innombrables fois, ainsi que ses prédictions.
- Le Principe cosmologique décrit la distribution de la matière dans l'Univers, et de son équivalent, l'énergie. Il a été formulé pour satisfaire une exigence de la Relativité Générale, qui a besoin de postuler une densité de matière-énergie en chaque point de l'Univers pour y décrire avec des équations simples la déformation, donc les évolutions d'un corps dans l'espace-temps.

On a admis que cette densité de matière-énergie  $\rho$  était constante parce que l'Univers apparaissait homogène et isotrope : en observant loin, dans toutes les directions de l'espace, la distribution des galaxies est la même et la température du rayonnement émis par le fond du ciel est la même. Le Principe cosmologique postule donc cette homogénéité et cette isotropie.

#### 2.3.2.1 Déformation de l'espace

Dans ces conditions, la Relativité Générale prévoit que l'espace adopte une forme qui dépend du rapport  $\Omega = \rho/\rho_0$  entre la densité  $\rho$  et une densité critique  $\rho_0 = 9.10^{-27}$  kg/m<sup>3</sup> (pour une constante de Hubble  $H = 69.6$  km/s/Mpc, valeur actuelle qui a changé avec le temps).

Sachant que la masse d'un atome d'hydrogène est de  $1.67.10^{-27}$  kg, on voit que la densité critique  $\rho_0$  correspond à environ 6 atomes d'hydrogène par m<sup>3</sup>.

Selon la valeur de  $\Omega$ , les formes prises par l'espace sont décrites par les [schémas précédents](#) fournis par la NASA [\[1\]](#).

Selon le cas, on voit que la somme des angles d'un triangle est :

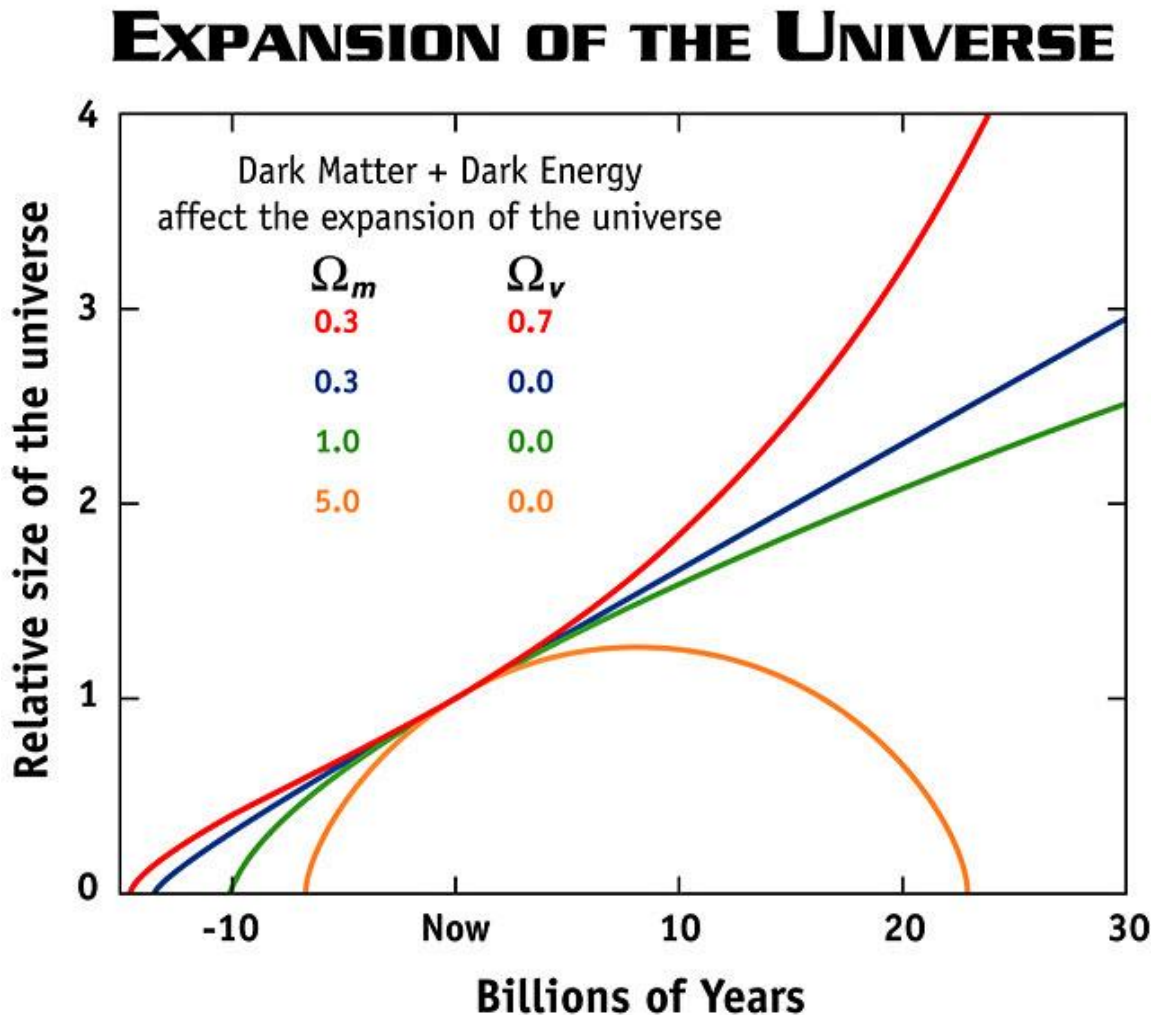
- supérieure à 180° si  $\Omega > 1$  (espace "sphérique" - en allant toujours tout droit on revient au point de départ : l'Univers est dit "fermé") ;
- inférieure à 180° si  $\Omega < 1$  (espace hyperbolique en forme de selle - en allant toujours tout droit on ne revient jamais au point de départ : l'Univers est "ouvert") ;
- égale à 180° si  $\Omega = 1$ , densité dite "critique" correspondant à environ 6 atomes d'hydrogène par m<sup>3</sup> (espace "plat" - notre espace euclidien habituel - en allant toujours tout droit on ne revient jamais au point de départ : l'Univers est "ouvert").



Dans chacun des cas, chaque côté de triangle est une "ligne droite", plus court chemin entre ses sommets.

### 2.3.2.2 Evolution de l'Univers

Selon les valeurs de  $\Omega$ , l'évolution dans le temps de la taille de l'Univers est schématisée par les graphiques ci-dessous, également dus à la NASA [1] :



En abscisses : le temps, en milliards d'années ; en ordonnées : la taille relative de l'Univers par rapport à notre Univers actuel.

$\Omega_m$  et  $\Omega_v$  représentent des proportions relatives de la densité totale  $\Omega = \Omega_m + \Omega_v$  :

- $\Omega_m$  provenant de la masse de matière ([baryonique + non-baryonique](#)), visible (étoiles, poussières) ou invisible (matière noire), masse qui exerce une force d'attraction gravitationnelle ;
- $\Omega_v$  provenant de *l'énergie noire* due à l'espace lui-même (évoquée [plus bas](#)). Cette énergie exerce une force de pression gravitationnelle négative, qui provoque une accélération de l'expansion de l'Univers ;
- La courbe **rouge** représente le cas où la majeure partie de la densité (70 %) vient de l'énergie noire et où l'expansion de l'Univers (ouvert) accélère. Nous



savons depuis 1998 (Prix Nobel de physique 2011) que c'est le cas de l'Univers réel. La courbure de l'espace est si faible qu'il nous paraît plat :  $\Omega \sim 1$ .

- La courbe **bleue** est un cas théorique où  $\Omega$  est faible et il n'y a pas d'énergie noire. L'Univers est alors aussi ouvert, mais son expansion ralentit.
- La courbe **verte** est un cas où  $\Omega$  a la valeur critique de 1 et il n'y a pas d'énergie noire. L'Univers est ouvert et son expansion ralentit.
- La courbe **orange** est un cas où  $\Omega$  est si fort que la gravitation finit par faire se contracter l'Univers, qui se réduira un jour à un point, situation appelée *Big Crunch*.

### 2.3.3 Les diverses formes prises par la matière-énergie

Nous savons aujourd'hui que la matière-énergie de l'Univers se répartit comme suit :

- 5 % de matière ordinaire (celle que nous voyons dans les planètes, étoiles, galaxies, poussières et atomes d'hydrogène) ; elle est dite "baryonique" (protons, neutrons et électrons) ;
- 27 % de matière noire, non baryonique, transparente et n'émettant pas de lumière, qui n'agit sur la matière ordinaire que par attraction gravitationnelle ;
- 68 % d'énergie noire, de nature physique inconnue mais due à l'espace lui-même. Son effet est une pression négative, qui accélère la dilatation de l'espace. Pendant les 7 à 8 premiers milliards d'années de l'Univers la pression d'expansion a diminué avec le temps sous l'effet de la gravitation, rendant cette expansion de moins en moins rapide. Pendant ce temps-là, la pression négative accélératrice de l'énergie noire augmentait automatiquement avec le volume de l'espace. Elle a fini par inverser le sens de variation de l'expansion, qui depuis s'accélère.

Les forces de gravitation dues à la matière baryonique et à la matière noire conservent la forme des galaxies (dimension : 100 000 années-lumière) et celle des amas de galaxies (10 millions d'années-lumière) ; à leur échelle l'expansion est négligeable. Mais l'énorme volume intergalactique produit assez de pression négative pour que l'expansion de l'Univers dans son ensemble accélère.

## 2.4 Trois observations expliquées par l'inflation

Trois faits à expliquer apparaissent lorsqu'on observe l'Univers à très grande distance : le problème de l'horizon, le problème de l'espace plat et le problème des monopoles magnétiques.

### 2.4.1 L'homogénéité et l'isotropie de l'horizon cosmologique

En observant aussi loin que possible, c'est-à-dire le fond du ciel, on s'aperçoit que sa température absolue (en degrés K) est partout la même à 0.002 % près, quelle que soit la direction de l'espace. Si l'expansion de l'Univers avait commencé plus tôt dans certaines régions que dans d'autres, certaines régions auraient disposé de plus de temps que d'autres pour se dilater et se refroidir, et les variations de température observées auraient été bien plus grandes que 0.002 %.

Il n'y a pas eu, non plus, d'égalisation de la température entre régions, faute de temps : entre régions opposées de notre Univers visible, éloignées de plus de 13.8

milliards d'années-lumière, une égalisation n'aurait pas eu le temps de se propager, car une vitesse de propagation est au plus égale à celle de la lumière,  $c$ .

Conclusion : toutes les régions de l'Univers ont disposé du même temps de refroidissement ; *le Big Bang s'est donc produit dans tout l'Univers en même temps*. Cette conclusion concernant l'homogénéité et l'isotropie thermiques des régions les plus lointaines de l'Univers visible est appelée *Problème de l'horizon*.

L'explication de ce problème tient en un mot : *l'inflation*.

Avant elle, l'Univers était si petit qu'on peut le supposer homogène et isotrope ; il avait les mêmes propriétés partout. L'inflation a été tellement rapide que d'éventuelles hétérogénéités apparues après son commencement n'ont pas eu le temps de se propager : deux points initialement très proches ont fini par s'éloigner l'un de l'autre à une vitesse très supérieure à  $c$ . L'inflation a préservé l'homogénéité initiale et explique l'homogénéité actuelle à 0.002 % près.

(Ce n'est que depuis la fin de l'inflation, pendant l'expansion qui dure toujours, que les conséquences d'une évolution physique en un point A peuvent se propager vers un point B, à une vitesse toujours limitée par  $c$  ; c'est ce qui nous permet de voir des galaxies à des années-lumière de nous, dans leur état lors de l'émission de la lumière que nous en recevons.)

#### 2.4.2 L'espace plat

Les mesures très précises faites dans l'Univers montrent qu'il est plat : sa densité relative totale  $\Omega = \Omega_m + \Omega_v$  est très voisine de la densité critique, 1. Cette propriété est d'autant plus surprenante qu'en 13.8 milliards d'années la moindre différence entre  $\Omega$  et 1 aurait été amplifiée par la gravitation et l'espace serait visiblement sphérique ou hyperbolique : le graphique d'évolution précédent le montre.

Cette propriété s'explique également par l'inflation. Si l'espace avant l'inflation avait été courbe (sphérique-fermé ou hyperbolique-ouvert, selon l'endroit) l'énorme dilatation le ferait apparaître plat à un observateur ultérieur qui n'en voit qu'une petite partie. C'est pourquoi l'humanité a cru pendant si longtemps que la Terre est plate.

#### 2.4.3 Les monopoles magnétiques

Paul Dirac (Prix Nobel de physique 1933) a prédit en 1931 l'existence d'une particule appelée *monopole magnétique*, qui équivaldrait à un aimant réduit à un seul de ses pôles. L'existence d'une seule de ces particules suffirait pour expliquer la quantification de la charge électrique, toujours multiple de celle de l'électron  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  coulomb. Cette quantification est largement prouvée expérimentalement sans être justifiée théoriquement, mais l'existence physique de monopoles n'a jamais pu être ni prouvée (peut-être parce que leur masse supposée serait trop grande pour nos accélérateurs de particules), ni observée en astronomie.

La théorie de l'inflation admet la possibilité d'apparition de monopoles avant ou pendant l'inflation, mais celle-ci en diluerait le nombre tellement que leur observation deviendrait extrêmement improbable. La non-observation de monopoles magnétiques est donc cohérente avec la théorie de l'inflation, sans en constituer une preuve.

### 3. L'univers infiniment grand a une masse infinie

Source : [\[6\]](#)

#### L'Univers est plat, donc infini

Nous avons vu [ci-dessus](#) que la Relativité Générale prévoit 3 géométries possibles de l'Univers compatibles avec son évolution : selon la valeur du rapport de densités  $\Omega$ , l'espace peut être sphérique, hyperbolique ou plat (euclidien).

- Si l'espace est sphérique à grande échelle, sa sphère ne peut être qu'immense pour expliquer qu'à l'échelle de notre Univers observable il est plat. On peut donc le considérer comme plat (euclidien) avec une approximation très acceptable.
- Si l'espace est hyperbolique à grande échelle, il a une propriété de répétition : un déplacement rectiligne toujours dans la même direction finit par revenir au même point. En regardant très loin dans deux directions opposées, par exemple le fond diffus cosmologique à la limite de l'Univers observable, on devrait voir les mêmes images. Or il n'en est rien : notre Univers n'est donc pas hyperbolique.

En pratique, donc, *notre Univers est plat* :  $\Omega=1$ . Nous savons aussi que s'il était de dimension finie on n'observerait, dans le fond diffus cosmologique, que des ondulations de température (donc de densité d'énergie) de fréquences bien définies. Comme on n'observe aucune régularité de cette espèce, nous devons admettre - au moins en première approximation - que l'Univers est aussi *infiniment grand*.

S'il est vraiment infiniment grand, l'Univers a aussi un âge infini, car il n'a pu devenir infiniment étendu en un temps fini : *il a donc toujours existé*. Cette conclusion est conforme avec l'espace-temps de la Relativité Générale d'Einstein ; et elle ne contredit pas le fait que l'âge de notre Univers *visible* est de 13.8 milliards d'années correspondant à un rayon de 47 milliards d'années-lumière, car il peut exister des régions extérieures. Mais tout cela n'est qu'une approximation, rappelons-le.

#### Comment l'Univers infiniment grand peut-il être en expansion ?

Quand on parle d'expansion de l'Univers on parle de la croissance des distances entre galaxies lointaines : l'Univers infini a été, reste et restera infini. En outre, les distances entre galaxies proches, appartenant à un même amas, sont bien plus affectées par le rapprochement gravitationnel que par l'expansion, qui n'est sensible qu'à très grande échelle.

#### L'univers contient une masse-énergie infinie

A très grande échelle, mettons au-delà de 100 millions d'années-lumière, la densité de matière-énergie observée dans l'Univers est constante : sa répartition est uniforme, à toutes les distances et dans toutes les directions ; on doit donc postuler qu'elle est la même, aussi, au-delà de notre Univers observable, donc que *la quantité de matière-énergie contenue dans l'Univers infini est infinie*.

## 4. Les multivers, des univers parallèles

Source : [\[6\]](#)

### 4.1 Les multivers de niveau 1

Notre Univers physique de rayon 47 milliards d'années-lumière est grand par rapport à la Terre, mais pas infini. En fait, sa matière ne peut y être distribuée que d'un nombre fini de façons.

Plus précisément, considérons les protons qui composent l'Univers. Chacun a un rayon de 0.84 fm (fermi ou femtomètre =  $10^{-15}$ m) dans des conditions habituelles. Si la température augmente énormément, atteignant par exemple 100 millions de degrés comme au cœur des étoiles les plus chaudes, l'agitation des protons devient telle que deux protons voisins peuvent se rapprocher ; mais en aucun cas ils ne pourront violer le principe d'exclusion de Pauli, qui leur interdit d'occuper la même position ou même de s'approcher à moins d'une distance minimum. D'a près [\[6\]](#) page 130, il y aurait alors, au maximum,  $10^{80}$  protons dans l'Univers, donc 2 à la puissance  $10^{80}$  possibilités différentes de les placer ; ce nombre est colossal, mais pas infini.

Si l'Univers est bien infini on trouvera nécessairement une infinité d'univers finis comme le nôtre, *des copies exactes du nôtre*, qui constitue une des configurations possibles. Et il y aura aussi une infinité d'univers de chaque configuration donnée.

L'ensemble de ces univers constitue un *Multivers de niveau 1*. Ils sont tous régis par les mêmes lois physiques que notre Univers. Et comme ils font partie du même Univers englobant, ils peuvent théoriquement entrer un jour en contact ; nous pourrions alors, en principe, voir à l'intérieur des plus proches... si l'expansion n'a pas trop éloigné les points de contact pour que la lumière ait le temps de nous parvenir.

### 4.2 Les multivers de niveau 2

Nous avons vu que l'inflation de l'Univers [continuera éternellement par endroits](#) alors qu'elle s'est arrêtée dans d'autres, comme dans notre amas local de galaxies.

Il est possible que la transformation de la matière-énergie à densité constante en matière-énergie à énergie totale constante ait commencé plus tard dans certaines régions, nous ne le savons pas. Ces hypothétiques régions sont séparées de la nôtre (l'Univers observable) et entre elles par des régions encore en inflation : elles constituent de multiples univers parallèles, dont l'ensemble est un *Multivers de niveau 2*.

Ces univers parallèles séparés par des régions encore en inflation sont disjoints : rien ne peut passer de l'un à l'autre, le temps s'écoulant trop vite dans les régions en inflation qui les séparent. Si cette hypothèse de Big Bangs distincts est vérifiée, l'Univers minuscule du début a aujourd'hui une structure arborescente, avec des « branches » en inflation terminées par des « feuilles » en expansion.

Chacun de ces univers-feuilles, aujourd'hui en expansion et peut-être immense, a commencé comme une région minuscule que l'inflation a gonflé de manière explosive : *la nature a créé un espace infini contenant une masse de matière-énergie infinie à partir d'un espace fini avec une masse finie.*

Enfin, les lois *fondamentales* de la physique (par exemple celles de la théorie des cordes, si un jour on peut la vérifier par ses conséquences) doivent être les mêmes dans tous ces univers parallèles, mais les autres lois et les constantes peuvent être différentes.

**Daniel MARTIN**

[Retour page d'accueil](#)

## 5. Références

[1] NASA - *Foundations of Big Bang Cosmology* (January 2014).

[http://wmap.gsfc.nasa.gov/universe/bb\\_concepts.html](http://wmap.gsfc.nasa.gov/universe/bb_concepts.html)

[2] *History of the Universe* (November 2000)

<http://www.pbs.org/wgbh/nova/universe/historywave.html>

[3] Nature - *All you need to know about gravitational waves* (March 2014)

<http://www.nature.com/news/all-you-need-to-know-about-gravitational-waves-1.14886>

[4] Nature - *Telescope captures view of gravitational waves* (14 March 2014)

<http://www.nature.com/news/telescope-captures-view-of-gravitational-waves-1.14876>

Observation incertaine, les ondes gravitationnelles ne sont pas prouvées mi-2015.

[5] Nature - *How to see quantum gravity in Big Bang traces - Gravitons could be detectable in the cosmic microwave background*

<http://www.nature.com/news/how-to-see-quantum-gravity-in-big-bang-traces-1.13834>

[6] Max Tegmark (professeur de physique au M.I.T.)

- "Our Mathematical Universe" - (Alfred A. Knopf, New York, 2014)

- "Parallel Universes" (2003) <http://space.mit.edu/home/tegmark/multiverse.pdf>

[7] "The Hidden Reality - Parallel Universes and the Deep Laws of the Cosmos" par [Brian Greene](#) (Vintage Books - Random House - 2011)

[8] A SPECTROSCOPIC REDSHIFT MEASUREMENT FOR A LUMINOUS LYMAN BREAK GALAXY AT  $Z = 7.730$  USING KECK/MOSFIRE - 3 mai 2015 -

<http://arxiv.org/pdf/1502.05399v2> - Annonce de la découverte d'une galaxie extrêmement lointaine, la plus lointaine connue à ce jour : elle est à 30 milliards d'années-lumière et sa lumière a mis environ 13 milliards d'années à nous parvenir compte tenu de l'expansion de l'Univers.

[9] (Pour le boson de Higgs et le déroulement de l'inflation)  
Cours *Relativité générale* par Thomas A. Moore – Traduit par Richard Taillet –  
Editions De Boeck Supérieur (2014) – 481 pages.

[Retour page d'accueil](#)