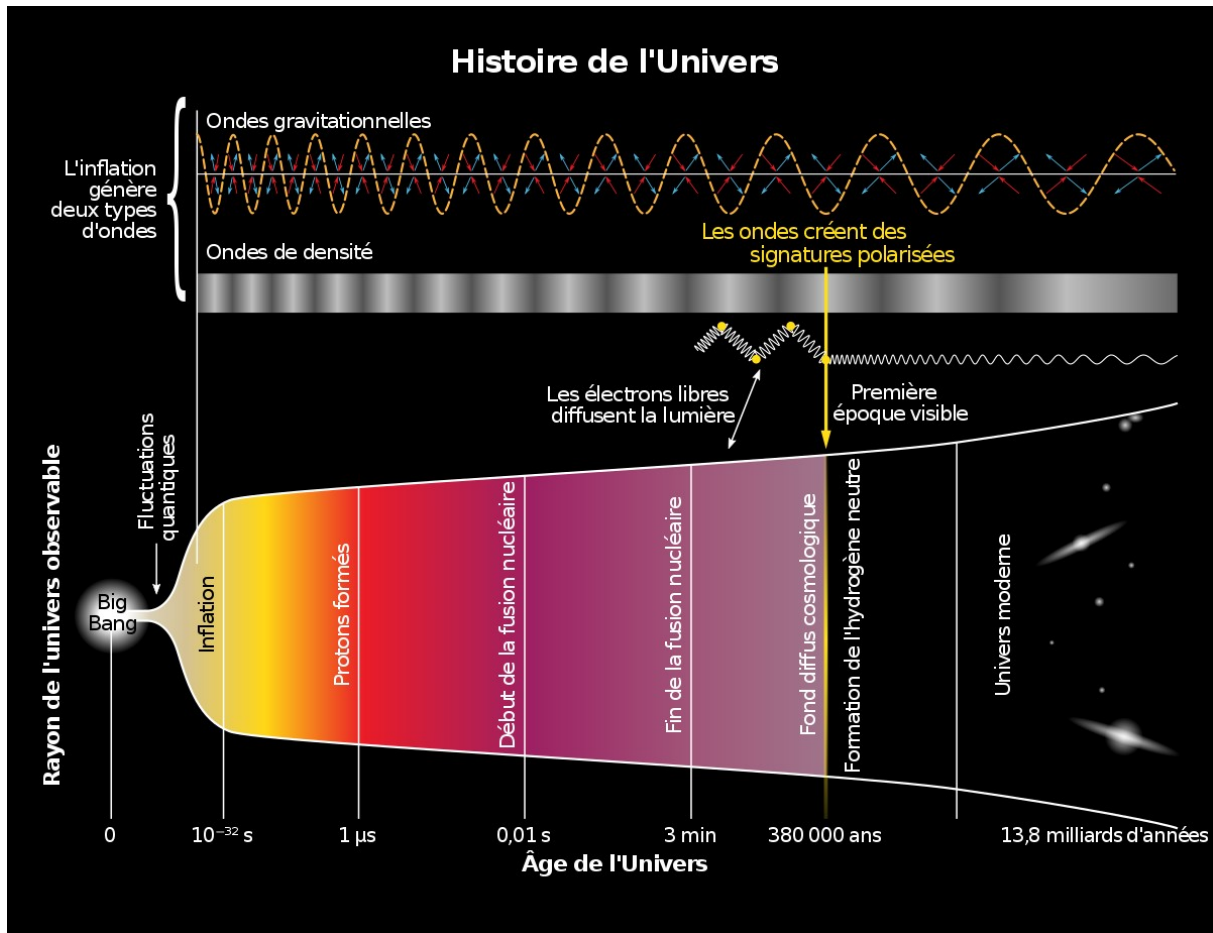


## 2.7.10 Les transitions de phase séparent les forces fondamentales

Lire d'abord le sous-titre *Changements de phase d'un corps pur* au paragraphe *Limites d'application d'une loi d'évolution*.

Sources : [B4] pages 342... et [B54-1] pages 100...



Histoire de l'Univers depuis le Big Bang © Microsoft Bing – Creative Commons

*1<sup>ère</sup> transition : séparation de la gravitation quantique et des trois autres forces*

Après la fin de l'ère de Planck, lorsque la température du plasma de l'Univers était  $\sim 10^{29}$  K (oui : 100 milliards de milliards de milliards de degrés !), celui-ci a subi une première transition, un changement de phase par lequel la force de gravitation quantique s'est séparée des trois autres forces fondamentales : l'Univers est entré dans l'ère de *Grande unification* (Grand Unified Theories), où ces trois forces (force nucléaire, force faible et force électromagnétique) n'en formaient qu'une.

Source : [B176] page 31

A l'ère de Grande unification l'énergie des particules était de l'ordre de  $10^{16}$  GeV (environ  $10^{16}$  fois l'énergie d'un proton au repos). Une telle énergie est si colossale que, pour la produire dans un accélérateur comme celui du CERN, à Genève, il faudrait faire passer la longueur de l'anneau d'accélération de celui-ci de 27 km à  $\sim 70$  années-lumière.

Nous n'avons donc pas le moyen de reproduire les conditions d'énergie de l'ère de Grande unification pour vérifier nos théories, notamment celles des *monopoles magnétiques* qui auraient une énergie de l'ordre de  $10^{17}$  eV.

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

Peu après, lorsque la température du plasma correspondait à une énergie de l'ordre de  $10^{15}$  GeV – c'est-à-dire vers  $10^{-36}$  à  $10^{-35}$  seconde - deuxième transition : la force forte (force nucléaire reliant entre eux les protons et neutrons d'un noyau) s'est séparée de la force électromagnétique et de la force faible, ces deux dernières forces étant unifiées en une force appelée *électrofaible*. La densité de matière du plasma 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*

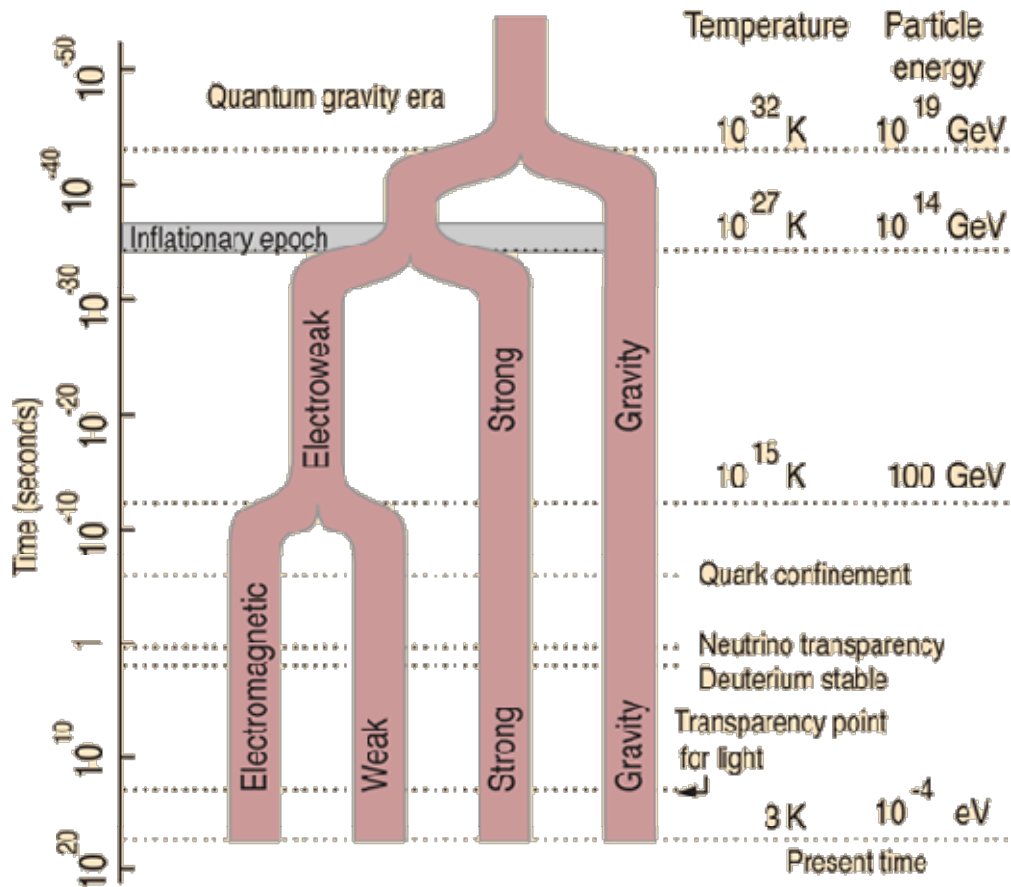
Le temps écoulé ( $10^{-35}$ s) depuis le temps de Planck était alors suffisant (compte tenu du principe d'incertitude de Heisenberg) pour que l'énergie du vide (forme dominante de l'énergie pendant ce temps-là) déclenche une troisième transition de phase : *l'inflation créatrice d'espace à densité d'énergie constante*. L'énergie nécessaire pour maintenir cette densité (donc créer de la matière-énergie) dans un espace en croissance exponentielle a été fournie par le champ de Higgs, portée par le boson de Higgs (voir *Champ et boson de Higgs*) 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. Cette énergie a transformé les particules et antiparticules virtuelles en matière-énergie réelle.*

*4<sup>ème</sup> transition : la force électrofaible se sépare en forces faible et électromagnétique*

Il y eut une quatrième transition de phase après l'inflation, vers  $10^{-12}$  seconde) lorsque l'énergie des particules du plasma était de l'ordre de 100 GeV et la température de l'ordre de  $10^{15}$  degrés K : la force électrofaible s'est séparée en force faible et force électromagnétique dans leur forme actuelle. Pendant ce temps-là, le rayon de l'Univers augmentait et sa température décroissait.

Diagramme résumant ces transitions de découplage des forces fondamentales :



© Microsoft Bing Creative Commons

## 2.7.11 Le confinement des quarks et l'ère hadronique

Source : [B163]

Depuis la fin de l'inflation et jusqu'à ce que l'expansion fasse baisser la température en dessous de  $10^{13}$  K, les quarks étaient trop agités pour que la force nucléaire forte puisse les souder en protons et neutrons : ils restaient donc isolés. Mais après la 4<sup>ème</sup> transition de phase, vers  $10^{-12}$  seconde après le Big Bang, une 5<sup>ème</sup> transition a lieu.

### 5<sup>ème</sup> transition : confinement des quarks

A une température inférieure à  $10^{13}$  K la force forte soude les quarks en hadrons : mésons (1 quark + 1 antiquark) et baryons (3 quarks : proton et neutron).

Les quarks sont alors dits *confinés* et commence l'ère *hadronique* de l'Univers.

L'ère hadronique voit des transformations incessantes de paires de baryons (proton + antiproton ou neutron + antineutron) en paires de photons, ou l'inverse : quand un baryon rencontre son antiparticule tous deux se désintègrent en créant des photons, et deux photons peuvent se combiner en paire baryon-antibaryon.

L'énergie des photons en question est de l'ordre du GeV, voisine de la masse au repos d'un proton ou d'un neutron. Mais l'expansion continuant, la longueur d'onde de tout rayonnement augmente, diminuant d'autant sa fréquence et son énergie : l'ère hadronique cesse donc dès que l'énergie de ses photons ne suffit plus pour

créer des baryons, alors que la réaction inverse de désintégration de paires de baryons en photons se poursuit puisqu'elle n'a pas besoin d'apport énergétique.

On peut alors se demander comment il se fait que nous existons, nous hommes et notre Univers de matière pratiquement sans antimatière, et pourquoi toute matière n'a pas été annihilée à la fin de l'ère hadronique. La réponse est l'objet du paragraphe suivant.

### **2.7.12 Asymétrie matière-antimatière et annihilation baryons-antibaryons**

Source : [B164].

L'exigence de conservation de la charge électrique fait que la production d'une particule à partir du vide quantique ou d'un photon est toujours accompagnée de la production de son antiparticule. Le Big Bang et les quelques instants suivants ont donc créé un nombre égal de baryons et d'antibaryons.

Mais il existe deux transformations spontanées : de baryons en antibaryons et l'inverse, d'antibaryons en baryons. Ces deux transformations se succèdent, oscillant plusieurs millions de fois de l'une à l'autre avant une décomposition. Nous savons que, pour une raison inconnue, il y a eu un peu plus de décompositions finales sous forme de matière que sous forme d'antimatière, environ un milliardième de plus. C'est cette asymétrie qui explique la composition de notre Univers actuel, presque entièrement composé de matière ; elle résulte d'une différence entre les lois physiques qui régissent la matière et celles qui régissent l'antimatière.

### **2.7.13 L'ère leptonique et le découplage des neutrinos**

Source : [B163]

Après l'ère hadronique, environ  $10^{-4}$  seconde après le Big Bang, dans l'Univers désormais composé de baryons sans antibaryons, de leptons et d'antileptons, l'inflation a si fortement diminué l'énergie des photons qu'ils ne peuvent plus créer de protons ; mais ils peuvent encore créer des électrons, car leur masse est environ 1800 fois plus faible que celle d'un proton. L'ère hadronique est donc suivie d'une ère leptonique.

#### **2.7.13.1 Le découplage des neutrinos**

Dans l'Univers comprenant désormais des baryons, des paires lepton-antilepton et des photons, la température continue de baisser avec l'expansion. Lorsqu'elle atteint  $10^{10}$ °K, quelques dixièmes de seconde après le Big Bang, il y a environ 5 protons pour chaque neutron. Une 6<sup>ème</sup> transition de phase se produit alors : *le découplage des neutrinos*.

*6<sup>ème</sup> transition : découplage des neutrinos*

(Revoir si nécessaire la définition de la constante de Boltzmann  $k_B$  au paragraphe *Equipartition de l'énergie entre les degrés de liberté*.)

Jusqu'à cette température-là, les neutrinos étaient soudés par la force faible avec les autres particules. Mais quelques secondes après le Big Bang, lorsque l'énergie  $k_B T$  des particules du plasma passe en dessous de 0.7 MeV environ, l'expansion a trop éloigné les particules pour que la force faible puisse retenir les neutrinos, car elle a

une portée minuscule ( $2 \cdot 10^{-18}$  m) : les neutrinos se séparent donc de la matière et flottent librement, insensibles aux forces de gravitation, électromagnétique ou forte ; ils sont encore présents aujourd'hui et des milliards traversent chacun de nous sans dommage à chaque seconde.

#### Où interviennent les durées de vie du proton et du neutron

La durée de vie d'un proton avant décomposition spontanée est estimée par [B7] page 904 à plus de  $10^{31}$  années, ou  $4.5 \cdot 10^{29 \pm 1.7}$  années selon la Théorie de grande unification.

La durée de vie d'un neutron libre est inférieure à 15 minutes, après quoi il se désintègre spontanément en un proton, un électron et un antineutrino : les neutrons d'un mélange protons + neutrons ont donc tendance à se décomposer en protons. Mais lorsqu'un électron, attiré par un proton et/ou propulsé par la vitesse due à la température, rencontre ce proton, la force faible intervient et transforme ce couple en neutron.

Au total, ces deux réactions en sens inverse conduisent le mélange protons + neutrons à un équilibre dominé par les protons : 1 neutron pour  $\sim 6.3$  protons.

#### **2.7.13.2 Disparition des positrons**

*7<sup>ème</sup> transition : Annihilation des électrons et des positrons*

Lorsque la température est d'environ 1 milliard de degrés, les photons ne peuvent plus se transformer en paires électron-positron (l'antiélectron est appelé positron) : la réaction réversible  $2 \text{ photons gamma} \leftrightarrow 1 \text{ électron} + 1 \text{ positron}$  devient alors impossible vers la droite, les photons n'ayant plus l'énergie minimum nécessaire de 0.511 MeV.

Les paires électron-positron qui existent s'annihilent en émettant des photons, mais comme ce fut le cas pour les baryons, une asymétrie des lois physiques fait qu'il reste seulement un excédent d'électrons, les positrons ayant disparu. L'Univers comprend désormais des protons, des neutrons et des électrons, en plus d'autres particules.

#### **2.7.14 Nucléosynthèse primordiale des noyaux d'hydrogène et d'hélium**

##### Définition

On appelle nucléosynthèse primordiale la synthèse des éléments légers (hydrogène, hélium, lithium) à partir du plasma de particules provenant du Big Bang. Cette synthèse eut lieu entre 0.1 seconde et 3 minutes après le Big Bang ; elle est responsable de plus de 98% de la matière de l'Univers que nous connaissons. Les éléments plus lourds furent synthétisés bien plus tard.

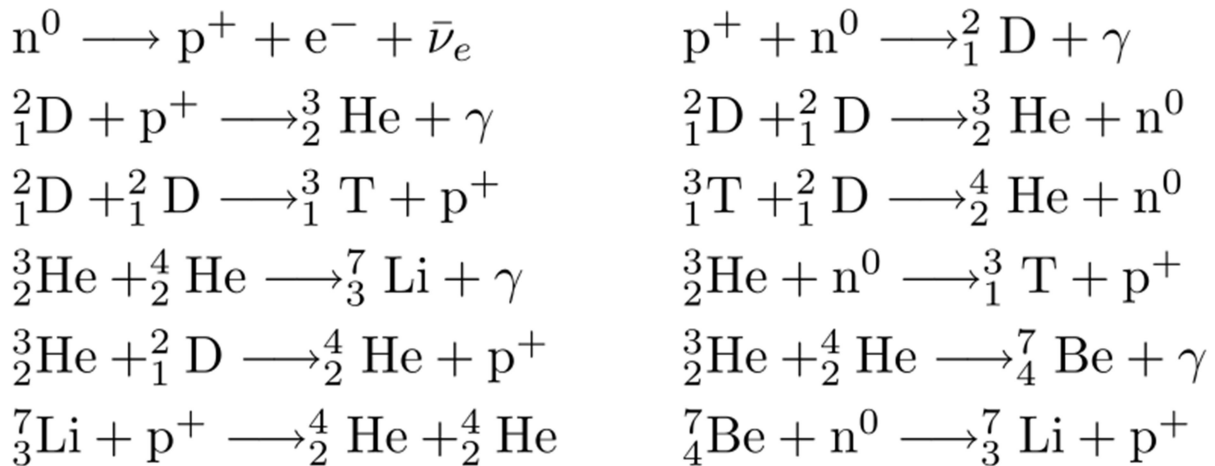
##### Processus de synthèse

0.1 seconde après le Big Bang la température est de 31.5 milliards de degrés et l'Univers est dans l'ère radiative : l'énergie est dominée par celle des photons, aucun atome ou noyau d'atome ne peut être stable. 90 secondes après, la température étant tombée en dessous du milliard de degrés, une nouvelle transition de phase est intervenue : la nucléosynthèse primordiale.

Les chocs d'un proton et d'un neutron produisent un noyau d'hydrogène lourd, isotope appelé aussi deutérium et qui existe encore aujourd'hui en une proportion de l'ordre de 0.01% avec l'hydrogène. Les noyaux ainsi formés ne sont plus brisés par l'impact de photons, qui n'ont plus assez d'énergie.

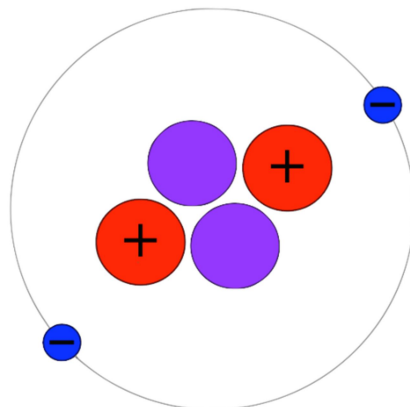
La présence de ces noyaux de deutérium lance une chaîne de réactions très rapide, qui assemble avec eux des protons et des neutrons pour former des noyaux d'hélium 4 : 10 protons + 2 neutrons donnent 1 noyau d'hélium (2 protons + 2 neutrons) et 8 protons libres. Il y a aussi production de Lithium.

Voici le détail des réactions :



Nucléosynthèse primordiale - © Microsoft Bing Creative Commons

$n^0$ =neutron ;  $p^+$ =proton;  $e^-$ =electron;  $\bar{\nu}_e$ =neutrino electron;  
 $\gamma$ =photon gamma;  ${}^2_1\text{D}$ =deutérium ;  ${}^3_1\text{T}$ =tritium ;  ${}^3_2\text{He}$ =hélium 3 ;  
 ${}^4_2\text{He}$ =hélium 4 ;  ${}^7_4\text{Be}$ =béryllium ;  ${}^7_3\text{Li}$ =lithium



Hélium 4 : noyau de 2 protons (+) et 2 neutrons, 2 électrons

© Microsoft Bing Creative Commons

Compte tenu de la désintégration des neutrons et d'autres réactions la masse finale d'hélium représente environ 25% de celle du mélange initial, les 75% restants étant

de l'hydrogène, proportions vérifiées par l'observation astronomique et qui confirment la théorie du Big Bang.

La complexité de la chaîne de réactions forme d'autres noyaux, plus légers comme l'hélium 3, ou plus lourds comme le lithium 7 et le bore 11 ; mais ces noyaux sont instables à cette température-là et leur proportion qui survit est minime. La nucléosynthèse primordiale s'arrête donc, en fait, après production de l'hélium 4.

A la fin de cette phase primordiale de nucléosynthèse, 3 minutes après le Big Bang, l'Univers en expansion rapide contenait, en masse,  $\frac{1}{4}$  d'hélium et  $\frac{3}{4}$  d'hydrogène (la proportion numérique de noyaux d'hélium étant de 6% de celle des protons et des électrons). La théorie de la nucléosynthèse primordiale et les mesures associées confirment remarquablement la théorie du Big Bang.

Tous les éléments de l'Univers autres de l'hydrogène et l'hélium sont synthétisés dans les étoiles et disséminés par leurs explosions en supernovas.

### Plasma

Ces noyaux formés (hydrogène et hélium) ne peuvent être associés à des électrons de manière stable, car la température élevée ionise les atomes au fur et à mesure de leur formation, par chocs d'agitation thermique ou impact de photons : l'espace contient alors du plasma, et de nos jours encore les étoiles, l'espace interstellaire et l'espace intergalactique sont des plasmas.