

L'univers Primordial : Genèse du Cosmos

Avant-propos :

N'ayant pu faire ma Space News dû aux circonstances compliquées je tenais tout de même à fournir un travail pour remplacer. J'ai ainsi rédigé et illustrer une explication de ce qu'est l'Univers Primordial. Les lecteurs ayant déjà de bonnes connaissances verront que certaines périodes ne sont pas évoquées, que certains concepts physiques sont très lissés voire ignorés. C'est une volonté personnelle, l'Univers primordial est une période très complexe de la cosmologie standard et je me voyais mal parler ici de la fluctuation quantique, de la brisure de symétrie ou de la chromodynamique. Toutes les illustrations sont libres de droit car elles l'étaient déjà lorsque je les ai récupérées, je les ai ensuite modifiées (traduction, complétion, amélioration de la netteté) et je les remets à disposition. Petite exception pour les *figures n.6, 7 et 8* que j'ai fait moi-même et pour lesquelles je demanderais juste d'être crédité à la réutilisation. De plus, les trois tableaux utilisés viennent des pages Wikipédia associées. Ce fut un office plutôt laborieux et je tiens à remercier spécialement Victor Lamarche, également élève à PPR il a un excellent niveau dans le domaine et m'a donc bien aidé dans mes recherches, il candidate par ailleurs à *EVH astro* l'année prochaine.

Sommaire :

1. Introduction
2. Qu'est-ce que l'univers primordial
3. Temps et ère de Planck
4. Ère de la Grande Unification
5. Formation des Quarks et Antiquarks
6. Plasma quarks-gluons
7. Naissance des leptons
8. Ere hadronique ou baryogénèse
9. Nucléosynthèse primordiale
10. Fond diffus cosmologique

Introduction :

Nous parlerons aujourd'hui de l'Univers Primordial, en somme, les 400 000 années ayant suivies le Big-Bang. Nous partons donc du principe durant les lignes à venir que l'Univers a bel et bien commencé par un Big Bang, excluant ainsi les théories peu probables telles que celle d'un univers qui fut depuis toujours à l'État stable, celle de l'univers de plasma ou encore des théories bien plus fumeuses. Nous nous intéressons à ce qui a suivi ce que l'on pourrait appeler le temps 0, par conséquent, si vous êtes connaisseur et/ou partisan de la théorie du Big Bounce rien ne viendra à son encontre ici car nous ne parlerons ni du Big Bang ni de ce qu'il l'a ou ne l'a pas précédé. J'ai décidé de traiter ce sujet tout d'abord parce que j'ai trouvé qu'en ce moment j'avais beaucoup trop d'heures de sommeil à disposition mais surtout parce que des recherches sur l'un des chapitres de cette présentation : le Plasma Quarks-Gluons, est arrivée à un terme et nous met ainsi dans un état de *presque* complet de l'Univers primordial.

Qu'est-ce que l'univers primordial :

Le terme d'Univers primordial désigne donc les débuts de l'Univers, mais comment délimite-t-on un « début » ? S'il était pour Raymond Devos difficile de définir les deux bouts d'un bout de bois, il est ici assez aisé de délimiter les deux bouts de l'Univers Primordial. En effet, comme vous le voyez sur la *figure n.1*, cette période de l'Univers commence avec la Big Bang et s'achève lors du fond diffus cosmologique, lors de la formation des premiers atomes. Cette illustration est grandement simplifiée et vous verrez dès le prochain chapitre que nous parlerons de périodes n'apparaissant pas sur la figure.

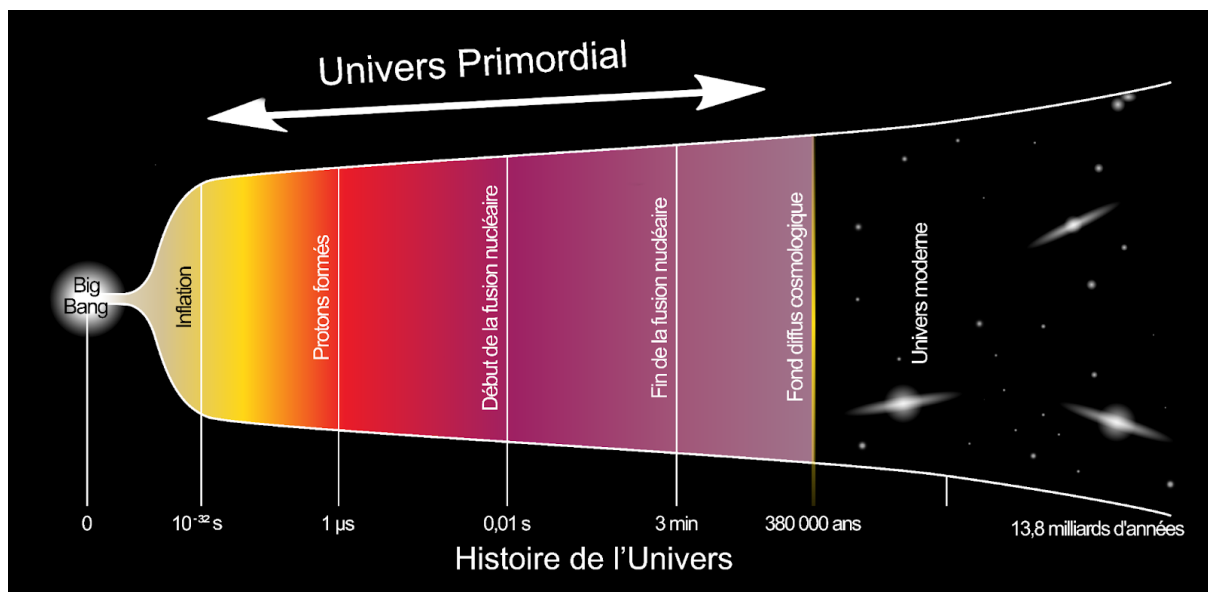


Fig. n.1

Temps et ère de Planck :

Avant de parler directement de l'ère ou époque de Planck il est important de rappeler les notions d'interactions fondamentales qui sont au nombre de 4 : la force électromagnétique, la force forte, la force faible et enfin la gravitation. Aujourd'hui ces forces qui régissent les lois et de la physique relativiste et de la physique quantique sont scindées, distinctes, mais fût un temps, le temps de Planck, où ces forces ne faisaient qu'un. Quand je dis qu'elles ne faisaient qu'un il faut comprendre que dans l'état présent des choses, ces forces ont des *puissances* très disparates. En effet, leur puissance est mesurée grâce à une unité relative et tout à fait arbitraire n'ayant pas de nom. Comme vous le voyez dans ce tableau de la *figure n.2*, l'interaction forte porte bien son nom car elle définit l'unité de puissance. En comparaison, l'interaction électromagnétique est 100 fois inférieure, l'interaction faible est 100 000 fois inférieure et la gravitation est 10^{16} quadrillions de fois inférieure. Vous pouvez voir le détail de ces forces dans la *figure n.2*.

| Interaction | Puissance relative approximative | Rayon d'action (m) |
|-------------------|----------------------------------|----------------------|
| Forte | 1 | $2,5 \cdot 10^{-15}$ |
| Électromagnétique | 10^{-2} | ∞ |
| Faible | 10^{-5} | 10^{-18} |
| Gravitation | 10^{-40} | ∞ |

Fig. 2.

Maintenant ces notions intégrées, et en sachant que 1 est le maximum de puissance que puisse atteindre une force, dans un état de l'Univers extrêmement chaud et contenant donc une quantité d'énergie immense, ces forces pourraient s'équilibrer, atteindre cette même puissance de 1 et ainsi s'exercer de façon complémentaire. Un tel niveau d'énergie et de chaleur tendrait vers la température de Planck qui est de $10^{32} \text{ }^{\circ} \text{K}$ sans pour autant l'atteindre mais nous reviendrons là-dessus plus tard. Le problème, c'est que nos outils actuels (donc la physique quantique et la relativité) nous permettent d'étudier la gravitation et les effets quantiques (les trois autres interactions fondamentales) mais uniquement séparément. La situation semble donc tout à fait aporétique si tant est que nous ne disposons pas des outils théoriques pour décrire, définir cet instant. Seule information qu'on peut établir avec nos connaissances actuelles : l'ère de Planck, qui comme on vient de le voir représente jusqu'ici l'aporie finale de la physique moderne, s'étend donc de l'hypothétique moment 0 jusqu'à 10^{-43} secondes après. Pas vraiment concluant pour un début n'est-ce pas ? Rassurez-vous, plus le temps avance, plus notre compréhension et connaissance de l'Univers primordial est vaste

au fur et à mesure que les forces se séparent. Ce temps de 10^{-43} est par ailleurs ce que l'on nomme temps de Planck. Le système d'unités de Planck désigne un ensemble de constantes de limites naturelles. Nous avons déjà parlé de certaines de ces constantes, vous les trouverez toutes avec les équations qui y sont associées dans la *figure n.3*.

| Nom | Dimension | Formule | Valeur approchée (en unités du SI) |
|-----------------------|--------------------------|--|--|
| Longueur de Planck | longueur (L) | $l_P = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}}$ | $1,616 \times 10^{-35} \text{ m}$ |
| Masse de Planck | masse (M) | $m_P = \sqrt{\frac{c\hbar}{G}}$ | $2,177 \times 10^{-8} \text{ kg}$ |
| Temps de Planck | temps (T) | $t_P = \frac{l_P}{c} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$ | $5,391 \times 10^{-44} \text{ s}$ |
| Température de Planck | température (Θ) | $T_P = \frac{m_P c^2}{k_B} = \frac{\sqrt{c^5 \frac{\hbar}{G}}}{k_B}$ | $1,416\,833\,139 \times 10^{32} \text{ K}$ |
| Charge de Planck | charge électrique (Q) | $q_P = \sqrt{c\hbar 4\pi\epsilon_0}$ | $1,875 \times 10^{-18} \text{ C}$ |

Fig. n.3

Comme vous pouvez le voir, ces unités sont exprimées en fonction d'autres constantes fondamentales : vitesse de la lumière et constante de gravitation universelle entre autre. Ces constantes définissent les limites physiques de notre Univers : la longueur, la durée, la masse, et la charge la plus petite possible d'une part et d'autre part la température et donc l'énergie maximale atteignable.

L'ère de Planck prend fin en un instant appelé « mur de Planck » à partir duquel la gravitation se sépare des trois autres forces qui restent encore confondues comme vous pouvez le voir sur la *figure n.4*. A compter du passage de ce mur, nous pouvons décrire l'univers car la gravitation et les effets quantiques sont désormais distincts.

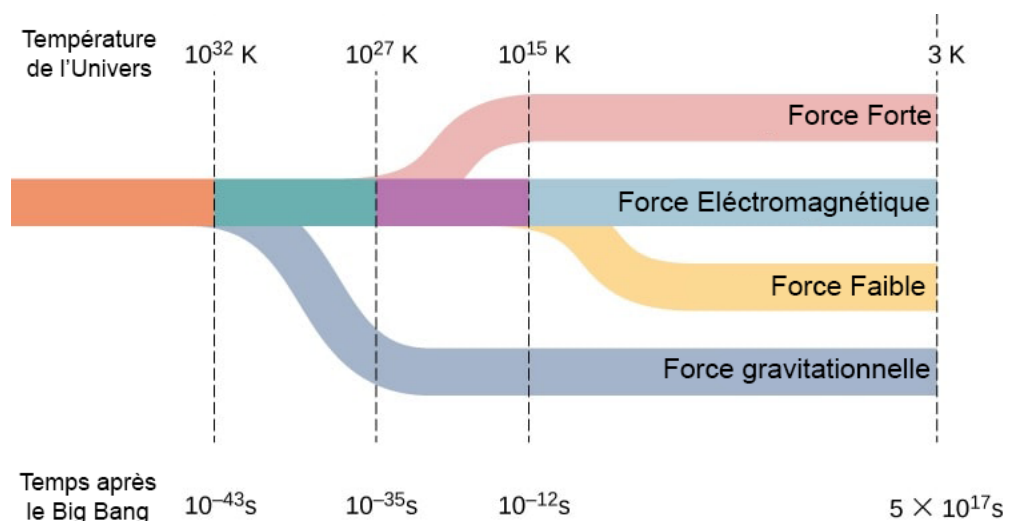


Fig. 4

Ère de la Grande Unification :

L'ère de grande unification prend place à la suite de l'ère de Planck, entre 10^{-43} et 10^{-35} secondes après le Big Bang. Lors de cette époque, selon les théories de grande unification, l'énergie de l'univers est toujours légèrement inférieure à l'énergie de Planck dont nous avons parlé précédemment. Cette grande quantité d'énergie répartie en tout point de l'espace entraîne, selon la relativité générale d'Einstein, une grande force de répulsion. Cette force est si conséquente que l'Univers connaît alors une phase d'expansion fulgurante qu'on appelle l'inflation cosmique. Cette dite expansion se manifeste par une multiplication du volume de l'univers par un facteur 10^{76} . Pour avoir un point de comparaison, depuis cet instant, en 13,7 milliards d'années, le volume de l'Univers a été multiplié par 10^{27} . Pour donner suite à cette phase d'expansion fulgurante, l'Univers fait environ la taille d'un pamplemousse, un pamplemousse d'une densité proche de l'infini. Si vous faites les calculs de la vitesse de l'expansion de l'Univers durant la phase inflationnaire, vous trouverez une vitesse supérieure à celle de la lumière. Ce résultat peut sembler en totale contradiction avec la relativité générale qui dit qu'aucun corps, aucune particule, ne peut dépasser ou même atteindre la vitesse de la lumière. Cependant, ici, ce n'est pas un corps qui se déplace, ce n'est pas le contenu, c'est le contenant. En effet dans cette situation c'est l'espace lui-même qui s'agrandit, la distance entre deux objets croît plus vite que la vitesse de la lumière mais aucun des deux objets n'atteint cette célérité.

Cette période de l'Univers Primordial se clos par la séparation de deux forces et plus précisément deux effets quantiques : la force forte et la force électrofaible (voir *figure n.4*). La force gravitationnelle et la force forte sont donc désormais bien distinctes mais la force électromagnétique et la force faible sont encore confondues et portent le nom de force électrofaible.

Formation des Quarks et Antiquarks :

En cet instant, à 10^{-32} secondes après le Big Bang, se forme l'ébauche de la matière, on voit apparaître les premières particules élémentaires. Avant d'aller plus loin, il est de rigueur de préciser ce que sont ces dites particules car je me suis rendu compte que nombreuses sont les personnes qui considèrent les protons, neutrons comme des particules élémentaires. Contrairement à ce que l'on pourrait donc penser, ni le proton, ni le neutron, ne sont des particules élémentaires. En effet, les nucléons sont donc sécables. Assez ironique quand on sait qu'ils sont les constituant des atomes, nommés d'après le grec atomos signifiant déjà insécable. Les atomes sont à fait sécables comme vous le savez par fission nucléaire, mais leurs nucléons le sont aussi. En brisant les nucléons, on découvre les quarks qui apparaissent à 10^{-32} secondes après le Big Bang, ces particules élémentaires forment donc principalement les nucléons mais également nombre de particules plus rares comme les pions, les lambdas ou encore les kaons. Les quarks et les électrons ne sont pas les seules particules élémentaires, il en existe 11 autres répartis dans deux *familles* : les *leptons* et les *bosons* comme vous pouvez le voir sur la *figure n.5*.

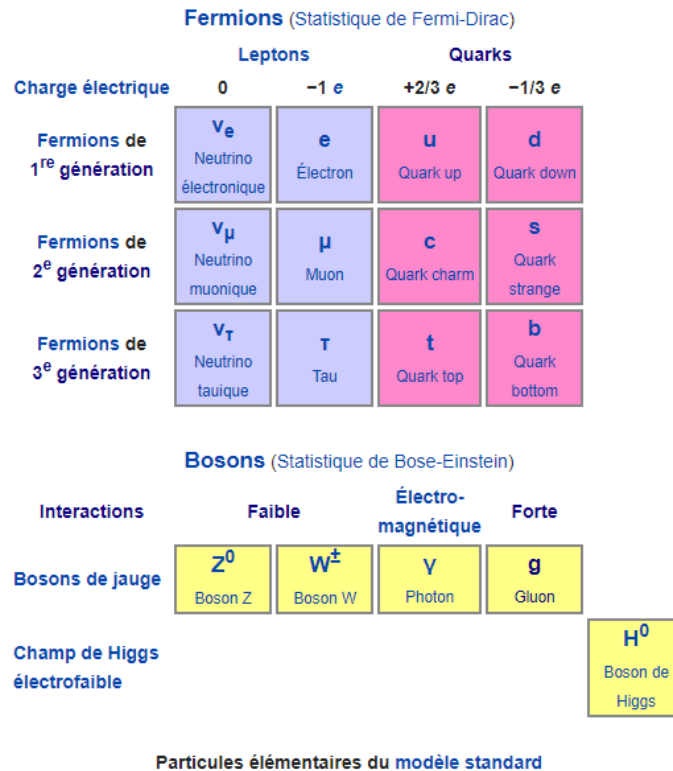


Fig. 5

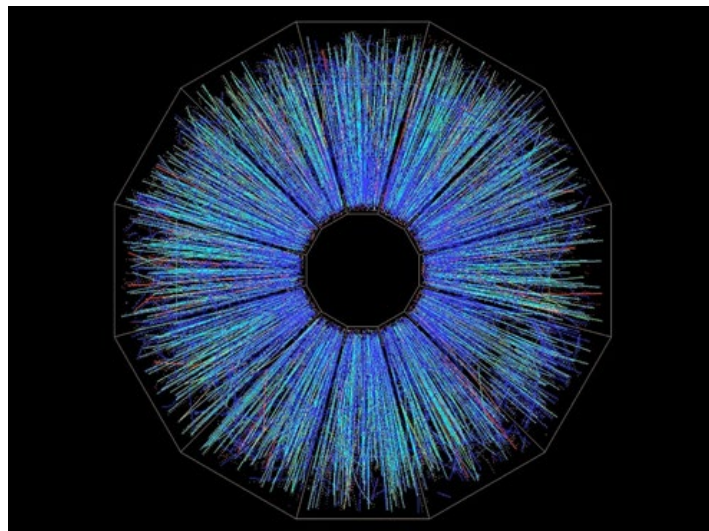
Les quarks sont donc les composants primaires de la matière, les plus petites briques possibles. Ce sont eux qui constituent toutes les particules composites tels que les protons ou les neutrons dont nous avons parlé précédemment. D'ordinaire, ils sont *confinés* (terme technique qui désigne le rassemblement de quarks en une particule plus grande) entre eux par la force forte et permettent ainsi de créer principalement des nucléons. Il existe à ce moment de l'Univers deux grands type de quarks, qu'on différencie par la charge électrique qu'ils portent. On les appelle les *ups* et les *downs* (Voir première génération des quarks sur la *figure n.5*), les *ups* portent une charge électrique positive de $+\frac{2}{3}$ et les *downs* une charge négative de $-\frac{1}{3}$. Les quarks peuvent normalement se rassembler. Cependant, ici, à 10 puissance -32 secondes après le big bang, les conditions de température et de pression sont gargantuesques et empêchent les quarks de se confiner. En effet, la force forte s'exerce de moins en moins quand les particules se trouvent extrêmement proche. De plus, les quarks sont créés en même temps que leur homologue d'antimatière : les antiquarks. Les antiquarks détiennent une propriété très intéressante : en effet lorsqu'un quark rencontre un antiquark les deux s'annihilent et libèrent de l'énergie. C'est pour ces deux raisons précises que les quarks étaient dans l'impossibilité de se rassembler avec les gluons et de former des nucléons. Cette structure de la matière où baignent des quarks et gluons fut nommée Plasma quarks-gluon.

Plasma quarks-gluons :

Le plasma quarks-gluons est considéré comme un état de la matière qu'on décrit généralement comme étant une soupe extrêmement chaude et dense. Cette *soupe* est principalement composée de quarks et de gluons (d'autres particules élémentaires appartenant à la famille des bosons, voir *figure n.5*) se déplaçant librement. Il est important de notifier cette liberté qui, en conditions classiques, est tout à fait inhabituelle. En effet les quarks sont liés entre eux par les gluons et il est particulièrement ardu de les séparer. Rappelons-le, c'est principalement la température exceptionnellement élevée qui provoque chez les quarks des agitations d'intensité supérieure à celle de la force forte, les empêchant de s'assembler. S'ajoute à cela le fait que cette phase ou l'Univers est très dense à pour effet donc de rapprocher grandement les particules hors, plus les particules sont proches et moins la force forte à d'impact, ce qui complique encore plus le rassemblement de quarks car trop proches et trop agités. Ce plasma quark-gluon était la seule matière présente en cet instant de l'Univers et nous permet d'en savoir beaucoup sur son histoire. Les chercheurs ont donc voulu l'étudier plus profondément et en ont pour cela recréé dans un collisionneur de particules. Ces études nous ont récemment permis d'établir plusieurs caractéristiques du QGP (Quarks-Gluons Plasma) :

On a confirmé le fait que les hadrons (toutes les particules composées de quarks) et donc toutes les molécules et atomes de notre univers proviennent de ce plasma quark-gluon. En effet, lors du refroidissement de l'univers la force forte a pu faire son boulot et les quarks se sont assemblés. De là en a découlé les étoiles, les planètes, tout. On pourrait ainsi pousser plus loin la citation d'Hubert Reeves « Nous sommes tous des poussières d'étoiles » en disant que nous sommes tous des portions du plasma quarks-gluons mais je vous l'accorde, on perd grandement de la superbe de la citation.

Nous avons longtemps pensé que ce plasma était une sorte de gaz, mais nous avons observé qu'il changeait de forme, caractéristique qu'on associe généralement aux liquides, on assimile sa texture à celle d'un fluide. Cela semble peu important mais cela a pu permettre aux scientifiques de mieux retracer l'évolution du plasma dans l'espace et par conséquent de mieux comprendre et appréhender l'Univers Primordial.



Modélisation numérique du QGP

Peu après, à 10^{-12} secondes les deux dernières forces encore confondues, la force électromagnétique et la force faible se séparent (voir *figure n.4*) alors que la température descend aux alentours des 10^{15} ° K, commence alors la naissance des leptons.

Naissance des leptons :

L'Univers s'est refroidi, il est moins dense et les particules déjà présentes sont moins agitées, à 10^{-12} secondes l'Univers présente des conditions propices à l'apparition de nouvelles particules : les leptons. Ces particules appartiennent à la famille des fermions dans laquelle on retrouve également les quarks (voir *figure n.4*). Cette sous famille regroupe des particules élémentaires négatives (électron, muon et tau) ou électriquement neutres (neutrinos électroniques, muoniques et tauiques). Les neutrinos, peu connus du grand public sont des particules dont l'existence a été postulée pour la première fois en 1930 par Wolfgang Pauli. Ils sont nécessaires à la physique moderne car ils jouent un rôle majeur dans la radioactivité β et la désintégration qui y est associée. Les électrons sont bien connus mais ses homologues de deuxième et troisième génération (voir *figure n.4*) sont déjà moins rependus. Le muon, 207 fois plus lourd que l'électron est assez peu rependu dans l'Univers. Sa présence et son rôle dans certaines interaction est indispensable mais ne relève pas du sujet du livre en plus d'être relativement complexe. Le tau (aussi appelé lepton tau) quand à lui à une masse 1200 fois supérieure à celle d'un électron et est assez semblable au muon dans ses propriétés.

Ainsi, on assiste à la première vraie diversification de la matière : au milieu de cette soupe de quarks et de gluons (ainsi que leurs homologues d'antimatière) viennent donc d'apparaître de nouvelles particules qui par ailleurs sont bien plus légères (ainsi que leurs homologues d'antimatière).

Ere hadronique ou baryogénèse :

Lorsque l'univers entame l'ère hadronique à 10^{-6} secondes il s'est grandement refroidi. En effet, si vous souvenez bien, l'instant après le Big Bang la température était de 10^{32} ° K, elle est désormais de 10^{13} ° K ce qui signifie qu'en l'espace de 10^{-37} secondes, la température a diminué de près de dix millions de milliards de fois. Si la température diminue de façon perpétuelle c'est que l'expansion de l'Univers continue, à tel point qu'après une microseconde après le Big Bang, l'Univers pourrait contenir l'actuel système solaire. L'énergie est alors de plus en plus étalée, diffuse, et les quarks n'ont donc plus assez d'énergie pour exister seuls. Heureusement, la force forte qui s'est séparée du reste des forces à la fin de la Grande Unification (voir *figure n.4*) va à ce moment, comme dit

précédemment, rassembler (le terme précis est *confiner*) les quarks en particules plus grandes par le biais des gluons. Les gluons sont également des particules élémentaires qui appartiennent à la famille des bosons, cette famille de particule a pour propriété d'être le vecteur des interactions fondamentales. Une fois liés, ils forment les premiers nucléons : protons et neutrons.

Cette phase est également appelée baryogénèse car des particules constituées de trois quarks sont appelées des baryons.

Au niveau de la répartition, un proton est constitué de deux quarks up et un quark down ce qui revient donc à une charge de $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3}$ ce qui induit une charge positive de valeur +1. Le neutron pour sa part est constitué de deux quarks down et un quark up ce qui induit donc une charge de $\frac{2}{3} - \frac{2}{3}$ donc à une charge nulle. Vous trouverez à la *figure 7* une illustration de la composition des nucléons.

Vous pouvez voir sur la *figure n.6* la composition d'un baryon composé ici de quarks quelconques pour l'exemple.

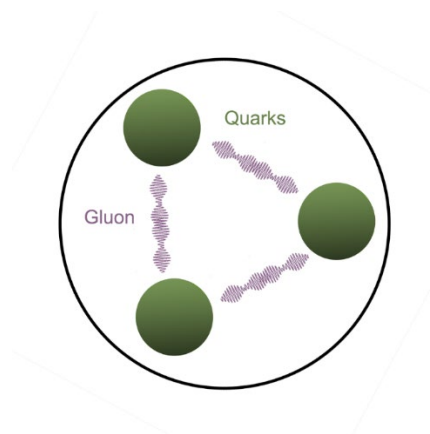


Fig. 6

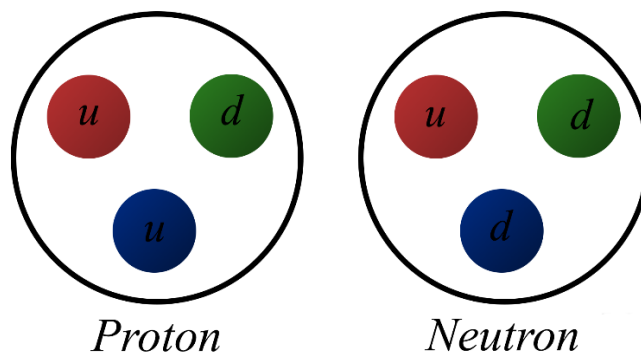


Fig. 7

Nucléosynthèse primordiale :

A la fin de la baryogénèse, une seconde après le Big Bang, l'Univers a encore une densité 3,8 milliards de fois supérieure à celle de l'eau. Durant les 0,01 secondes suivant la fin de la baryogénèse, la force forte continue son office en liant désormais entre eux les baryons, protons et neutrons, afin de former les premiers noyaux d'Hydrogène. S'ensuit, durant entre 3 et 15 minutes (les durées diffèrent selon les calculs), la fusion nucléaire primordiale durant laquelle ces noyaux existants entrent en collision afin de former en premier lieu des isotopes de noyaux d'hydrogène (deutérium ^2H et tritium ^3H), puis de noyaux Hélium (He) et enfin, ces noyaux entrent en collision et forment des éléments plus lourds (voir *figure n.8*). Cette suite d'événements constitue la nucléosynthèse primordiale, la première formation de noyaux atomiques de l'histoire mais pas à la première formation d'atomes, en effet, à ce stade là de l'Univers, les électrons se baladent encore librement. Ce détail a une lourde conséquence, la matière n'est pas encore électriquement neutre.

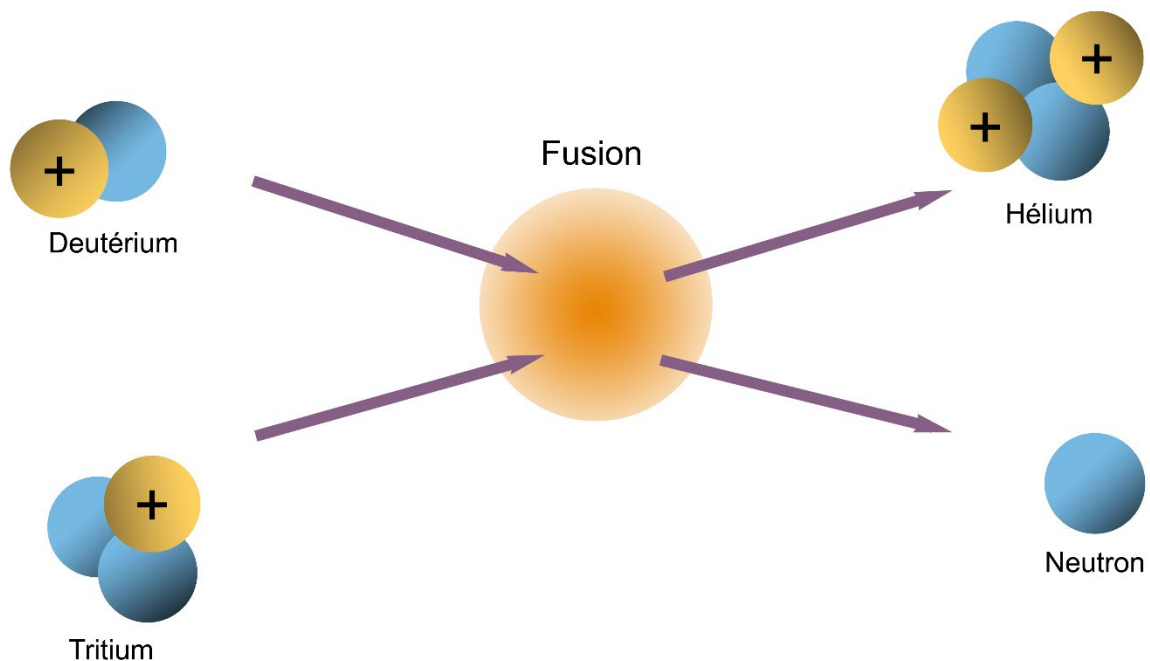


Fig. 8

Fond diffus cosmologique :

On appelle *fond diffus cosmologique* la première émission de rayonnements de l'histoire de l'Univers et correspond au premier instant auquel les photons ont pu interagir avec l'espace-temps. L'Univers est alors âgé de 380 000 ans et est bien moins dense et chaud que durant la nucléosynthèse primordiale. Si c'est à ce moment là que les photons interagissent avec l'espace-temps pour la première fois c'est que jusqu'ici, ils étaient *piégés*. En effet les photons, qui par ailleurs appartiennent à la famille des bosons (voir *figure n.5*) sont sensibles à la force électromagnétique et interagissent constamment avec les électrons qui se déplacent encore librement ; les photons sont condamnés à *rebondir* contre les électrons sans jamais pouvoir s'échapper. Cependant, à 380 000 ans après le Big Bang, la température n'est plus que de 2973°K (2700°C) et les électrons ne disposent plus d'assez d'énergie pour rester seuls et s'associent donc aux protons et aux noyaux d'atomes déjà formés : les premiers atomes sont nés, nous quittons l'Univers Primordial. Résulte de cette première diffusion de photons l'image de l'Univers *figure n.9*. L'Univers ne ressemblait bien entendu pas à ça : il s'agit d'un planisphère de la vue depuis l'intérieur de l'Univers et vision thermique. Voyez donc cette image rapportée par l'observatoire européen Planck comme une carte météo de la période juste après l'Univers Primordial ; les différences représentant les fluctuations de température : les anisotropies. Les différences de températures ne sont cependant pas ici de quelques degrés mais de quelques fractions de Kelvin. En effet, la température est alors de 2,7°K soit -271°C, deux degrés au-dessus du zéro absolu. Ce grand refroidissement s'explique toujours et encore par l'expansion du cosmos, cette température est par ailleurs très homogène : très peu de variation d'un point à l'autre de l'Univers.

Le fond diffus cosmologique a une importance majeure dans la théorie du Big Bang et plus précisément sur la partie de l'inflation. Effectivement, en l'an 380 000, la température est la même (à quelques fractions de Kelvin près) en tout point de l'Univers. Cette répartition est bien trop homogène pour être l'œuvre du hasard ce qui signifie que ces différentes régions ont dû à un certain moment s'échanger de l'information. Avec un Univers si vaste dans lequel rien ne peut dépasser la vitesse de la lumière un échange d'informations permettant un tel équilibre thermique est inenvisageable ce qui signifie qu'à un certain moment, la matière était bien plus proche, c'est l'époque *ante-inflationnaire*.

L'histoire est trop longue et n'a pas forcément sa place ici mais je vous invite à vous renseigner sur la découverte du fond diffus cosmologique par les deux scientifiques Penzias

et Wilson qui encore un cas de sérendipité menant à un prix Nobel. Stephen Hawking en parle notamment dans l'un des premiers chapitres de son livre *une brève histoire du temps* que je vous recommande vivement par ailleurs.

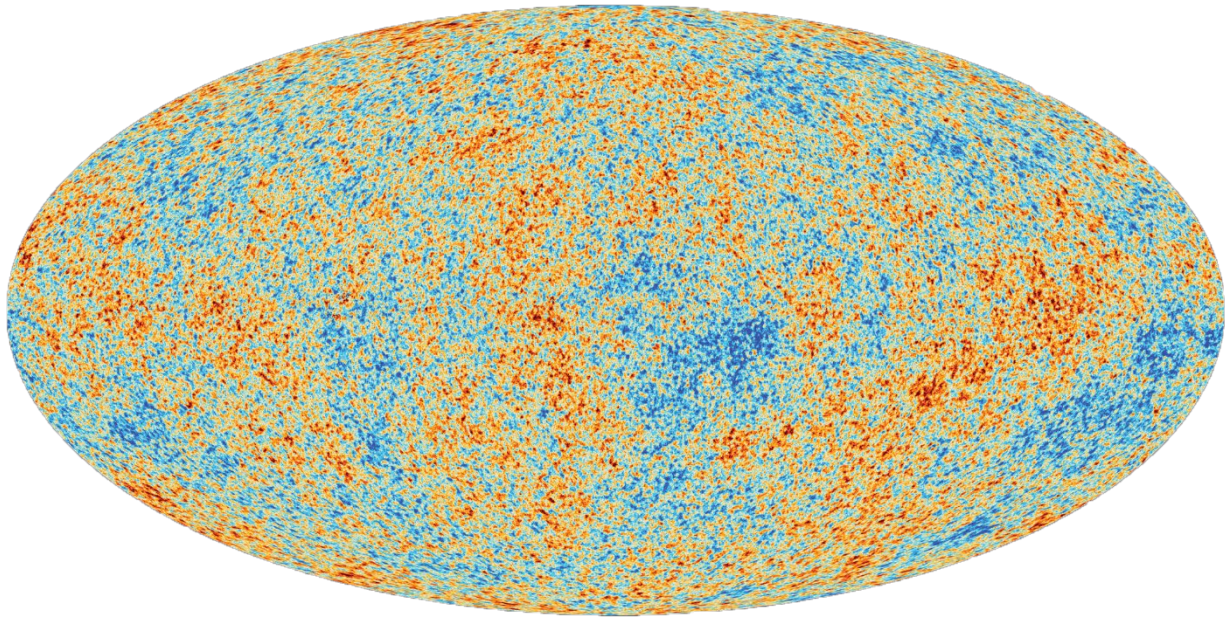


Fig. 9

Sources des illustrations :

Modélisation numérique du QGP :

<https://scitechdaily.com/science-made-simple-what-are-quarks-and-gluons/>

Image thermique du fond cosmologique diffus :

https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2018/07/Planck_s_view_of_the_cosmic_microwave_background

Sources :

Temps et ère de Planck :

https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%88re_de_Planck

<https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Unites-de-Planck.html>

<https://www.cea.fr/comprendre/Pages/matiere-univers/essentiel-sur-4-interactions-fondamentales.aspx>

Ere de la Grande Unification :

https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%88re_de_grande_unification

<https://www.astropolis.fr/articles/histoire-de-univers/la-premiere-seconde-de-l%27univers/la-premiere-seconde-de-l%27univers.html>

<https://trustmyscience.com/qu-est-ce-que-l-ere-de-grande-unification/>

<https://www.techno-science.net/definition/2843.html>

Formation des Quarks en Antiquarks :

<https://www.matierevolution.fr/spip.php?article4399>

Plasma Quarks-Gluons :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Plasma_quarks-gluons

<https://home.cern/fr/science/physics/heavy-ions-and-quark-gluon-plasma>

<https://www.astropolis.fr/articles/histoire-de-univers/la-premiere-seconde-de-l%27univers/la-premiere-seconde-de-l%27univers.html>

https://fr.wikipedia.org/wiki/Particule_%C3%A9l%C3%A9mentaire

<https://www.wionews.com/science/astronomers-reveal-what-happened-in-first-microsecond-of-big-bang-387469>

Naissance des leptons :

<http://benvtt04.free.fr/L2/semestre%204/CH1-geochimie.pdf>

Baryogénèse :

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Baryog%C3%A9n%C3%A8se>

<https://www.astronomes.com/le-big-bang/naissance-matiere>

Nucléosynthèse primordiale :

<https://www.astronomes.com/le-big-bang/nucleosynthese-primordiale>

<https://www.techno-science.net/definition/6641.html>

Fond diffus cosmologique :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Fond_diffus_cosmologique

<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/univers-rayonnement-fossile-74/>

<http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Fond%20diffus%20cosmologique/fr-fr/>