

III. Naissance et évolution de l'Univers

III.1. La formation des éléments chimiques dans l'Univers

Le tableau périodique des éléments contient 92 éléments chimiques naturels : toute la matière de l'Univers visible est constituée de ces éléments avec une prédominance des éléments les plus simples du tableau : l'hydrogène et l'hélium. L'Univers est constitué de **75 % d'hydrogène et 23 % d'hélium**. Les autres éléments chimiques ne représentent que 2 % de la composition de l'Univers.

L'hydrogène et l'hélium ont été formés essentiellement au tout début de l'histoire de l'Univers, entre 3' et 15' après la naissance de l'Univers. C'est ce que l'on appelle la **nucléosynthèse primordiale**. Le terme **nucléosynthèse** désigne le processus de formation des éléments chimiques dans l'Univers.

Les autres éléments du tableau périodique jusqu'au **fer (Fe)** ont été formés à l'intérieur des étoiles. C'est la **nucléosynthèse stellaire** (stella est un mot latin qui veut dire étoile).

Les éléments plus lourds que le fer ont été formés lors de l'explosion des étoiles (supernovae). C'est la **nucléosynthèse explosive**.

La nucléosynthèse primordiale sera examinée dans ce cours, tandis que les deux autres types de nucléosynthèses seront abordés dans le prochain cours sur la naissance et l'évolution des étoiles.

III.2. La théorie du Big-Bang

La théorie la plus largement acceptée concernant l'origine de l'Univers est la **théorie du Big Bang**. Selon cette théorie, l'Univers est en **expansion** et a évolué à partir d'un état **extrêmement chaud et dense** il y a plus de **15 milliards d'années** (13,8 milliards d'années est le chiffre retenu actuellement).

C'est le Russe **Alexandre Friedmann** en **1922** et le Belge **Georges Lemaître** en **1927** qui avaient été les premiers à avancer la théorie d'un Univers primitif chaud et dense qui est entré brutalement en expansion. L'expansion de l'Univers a été découverte en **1929** par l'Américain **Edwin Hubble**. Le terme « Big-Bang » a été utilisé pour la première fois par le physicien anglais **Fred Hoyle** lors d'une émission radio de la BBC en 1950. Fred Hoyle était un farouche opposant au modèle du Big-Bang, et avait utilisé ce mot pour se moquer de cette théorie. Il était partisan de la **théorie de l'état stationnaire** qui stipule que l'Univers est statique et éternel et a toujours existé tel que nous le connaissons aujourd'hui.

La théorie du Big-Bang est basée sur deux faits observationnels qui constituent les « preuves » de cette théorie : **l'expansion de l'Univers**, découvert en **1929**, et le **rayonnement cosmologique à 3 K** découvert en **1965**. A cela s'ajoute une troisième preuve : **l'abondance des éléments légers (hydrogène et hélium)** dans l'Univers.

a. L'expansion de l'Univers

La théorie du Big-Bang est avant tout basée sur le fait que notre Univers est en expansion, c'est-à-dire qu'il se dilate de façon continue depuis son état initial il y a 15 milliards d'années. L'expansion de l'Univers a été découverte par Edwin Hubble en 1929 : ce dernier en examinant les galaxies lointaines avait remarqué que leurs lumières (ou plus précisément les raies spectrales produites par le rayonnement de ces objets) étaient toutes **décalées vers le rouge** et ce décalage était d'autant plus important que la **galaxie était lointaine**. Hubble attribua ce rougissement à **l'effet Doppler**, bien connu en physique.

Selon l'effet Doppler, la longueur d'onde du rayonnement électromagnétique (dont la lumière fait partie) augmente si la source de ce rayonnement est en mouvement d'éloignement par rapport à l'observateur, et cette augmentation est d'autant plus importante que la vitesse d'éloignement est grande. Si la source se rapproche de l'observateur, la longueur d'onde diminue. Ainsi, appliquée à la lumière visible, si la source s'éloigne de l'observateur, la longueur d'onde de la lumière est décalée vers le rouge (car la couleur rouge correspond aux longueurs d'ondes élevées). Si la source se rapproche de l'observateur, la longueur d'onde de la lumière est décalée vers le bleu (car la couleur bleu correspond aux longueurs d'ondes courtes).

Le décalage vers le rouge de la lumière des galaxies a conduit Hubble à postuler que ceci est dû au fait que les galaxies s'éloignent de nous, et la vitesse d'éloignement était d'autant plus élevée que la galaxie est lointaine. C'est la loi de Hubble qui stipule que la vitesse d'éloignement (V) d'une galaxie est proportionnelle à sa distance (D) :

$$V = H \times D$$

H est le coefficient de proportionnalité appelé constante de Hubble. La valeur de H admise actuellement est de 73 (km/s)/Mpc (le Mpc ou Mégaparsec est une unité de distance qui vaut 3,26 millions d'al). Cela veut dire qu'une galaxie située à 3,26 millions d'al de nous a une vitesse de fuite de 73 km/s.

La fuite des galaxies est dû au fait que **l'Univers tout entier est en expansion**. Si l'Univers est actuellement en expansion, ça veut dire que si on remonte le temps dans le passé l'Univers devient de plus en plus petit et donc de plus en plus dense et chaud jusqu'à arriver à un instant où toute la matière de l'Univers sera réunie en un point singulier caractérisé par une densité et une température infinies. C'est l'instant $t = 0$ où l'Univers est entré en expansion. L'expansion de l'Univers est donc la preuve qu'il avait été dans le passé très chaud et très dense et que son histoire a commencé à partir d'un point singulier : c'est la théorie du Big-Bang. Les scientifiques ne savent pas si cet instant $t = 0$ a réellement existé : toute l'histoire de l'Univers telle que nous pouvons la décrire aujourd'hui commence en réalité à 10^{-43} secondes après l'instant $t = 0$.

b. Le rayonnement fossile du fond du ciel (ou rayonnement cosmologique) à 3 K

La deuxième preuve de la théorie du Big-Bang est la découverte en **1965** par **A. Penzias et R. Wilson** du rayonnement du fond du ciel à 3 K. C'est en essayant une nouvelle antenne que ces deux techniciens de la Société Bell ont découvert par hasard un bruit de fond qui semblait provenir de toutes les directions de l'espace. Après vérification, il s'avéra que ce rayonnement capté provenait réellement de l'Univers et correspondait au rayonnement émis par un corps noir à la température de 3 K. Ils venaient en fait de découvrir le rayonnement fossile de l'Univers, un résidu des photons à haute énergie qui emplissaient l'Univers juste après le Big-Bang et qui ont été refroidis par l'expansion de l'Univers. Ce rayonnement est isotrope et homogène, c'est-à-dire qu'il est le même dans toutes les directions et en tout point de l'espace. Il représente la trace historique d'une phase extrêmement chaude de l'Univers, phase dont les radiations continuaient de se propager, mais s'étaient progressivement refroidies sous l'effet de l'expansion. Notons que le physicien américain G. Gamow avait prédit en 1948 l'existence d'un tel rayonnement. A. Penzias et R. Wilson reçurent en 1978 le prix Nobel de physique pour cette découverte.

Avec la fuite des galaxies, le rayonnement à 3 K est l'un des arguments les plus forts en faveur de la théorie du Big Bang.

III.3. Particules et forces fondamentales de l'Univers

a. Les particules fondamentales de l'Univers

Les particules fondamentales sur lesquelles reposent la constitution de la matière sont au nombre de 12 réparties en 3 familles (tableau 1) : chaque famille possède quatre membres : **2 quarks** et **2 leptons** (du grec leptos : petit).

Les 2 quarks de la 1^{ère} famille sont désignés par les symboles u et d (up et down). C'est à partir de ces quarks que sont formés les protons et les neutrons, c'est-à-dire les éléments qui forment les noyaux atomiques. Les protons et neutrons sont appelés **hadrons**. Le proton est composé de **2 quarks u** et **1 quark d**, tandis que le neutron est composé de **2 quarks d** et **1 quark u**.

$$\begin{aligned}\text{Proton} &= 2 \text{ quarks u} + 1 \text{ quark d} \\ \text{Neutron} &= 2 \text{ quarks d} + 1 \text{ quark u}\end{aligned}$$

La charge du quark u est +2/3, tandis que celle du quark d est de -1/3. Donc la charge du proton est +1, tandis que celle du neutron est de 0. Les quarks ne peuvent pas exister à seuls dans la nature. Ils s'associent en paquets de trois pour former les protons et les neutrons.

Les deux leptons de la première famille sont l'**électron (e⁻)** de charge (-1) et le **neutrino électronique** de charge nulle. Les leptons sont toujours seuls dans la nature.

Tous les atomes de la matière ordinaire sont formés de noyaux (protons + neutrons) entourés d'électrons. Donc, toute la matière ordinaire est construite avec les quatre particules de la première famille.

La deuxième et la troisième famille sont constitués de particules beaucoup plus massives que celles de la première famille, mais n'existent pas dans la nature. Elles ne sont

produites aujourd'hui que dans les laboratoires (accélérateurs de particules). Ces particules sont pour la deuxième famille, les quarks **s (strange)** et **c (charm)**, et dans la catégorie des leptons, le **muon (μ)** qui est semblable à l'électron mais 200 fois plus lourd ainsi que le **neutrino muonique (ν_μ)**. La troisième famille comprend les quarks **t (top)** et **b (bottom)**, le lepton **tau (τ)** qui est aussi semblable à l'électron mais 3500 fois plus lourd (on l'appelle parfois l'électron super lourd) et le **neutrino tauique (ν_τ)**.

Chacune de ces 12 particules possède son antiparticule. Ainsi, à l'électron est associé son antiparticule appelé positon de charge +1

Tableau 1 : Les particules fondamentales de l'Univers (les fermions). (Les chiffres entre parenthèses représentent la masse de la particule exprimée en GeV/c²)

Particules	1 ^{ère} famille	2 ^{ème} famille	3 ^{ème} famille	Charge
Quarks	u (up) (0,3) d (down) (0,3)	c (charm) (1,5) s (strange) (0,5)	t (top) (175) b (bottom) (4,5)	+2/3 -1/3
Leptons	e ⁻ (électron) (0,0005) ν_e (neutrino électronique) (0 ?)	μ (muon) (0,106) ν_μ (neutrino muonique) (0 ?)	τ (tau) (1,7) ν_τ (neutrino tauique) (0 ?)	-1 0

b. Les forces fondamentales de l'Univers

L'Univers est gouverné par 4 forces fondamentales : la force gravitationnelle, la force électromagnétique, la force nucléaire faible et la force nucléaire forte (tableau 2).

La gravitation est une force d'attraction, de portée infinie, qui s'exerce entre des objets massifs. Elle est très importante en astronomie mais n'intervient pas au niveau atomique ou subatomique.

La force de gravitation qui agit entre deux corps massifs m_1 et m_2 est proportionnelle au produit de leur masse et inversement proportionnelle à la distance qui les sépare r selon la relation suivante :

$$\mathbf{F} = \mathbf{G} \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

G est la constante de gravitation et vaut $6,674 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$

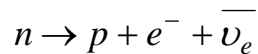
La force électromagnétique se manifeste entre toutes les particules électriquement chargées. Elle est de portée infinie. Elle est responsable de l'ensemble des phénomènes chimiques et biologiques. Cette force est attractive entre les particules de charges opposées et répulsives entre les particules de même charge.

L'intensité de la force électromagnétique entre deux charges électriques est proportionnelle au produit des deux charges et est inversement proportionnelle au carré de la distance entre les deux charges.

$$\mathbf{F} = \mathbf{k} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

La force nucléaire forte lie ensemble les quarks pour former les protons et les neutrons, et lie ensemble ces derniers pour former les noyaux. C'est la force la plus forte parmi les quatre forces fondamentales, mais sa portée est très limitée : elle n'agit qu'au niveau des noyaux atomiques.

La force nucléaire faible est la force qui est responsable de la radioactivité. Elle est par exemple responsable de la transformation d'un neutron en proton avec libération d'un électron et d'un antineutrino.



Dans cette réaction, c'est le quark d qui se transforme en quark u. La force faible a donc le pouvoir de changer la nature des quarks.

La force nucléaire faible est très importante car elle est responsable des réactions de fusion nucléaire qui se produisent au sein des étoiles. C'est donc grâce à cette force que les étoiles (et donc le Soleil) brillent.

A ces forces fondamentales sont associées des **particules médiatrices** appelées **bosons**. On imagine aujourd'hui une force comme l'échange de bosons entre particules fondamentales ou fermions. Ainsi, la particule médiatrice de la **force électromagnétique** est le **photon**. Celle de la **gravitation** est le **graviton**, particule hypothétique (le graviton n'a pas encore été découvert). La **force nucléaire faible** est véhiculée par **trois bosons W^+ , W^- et Z^0** . Les deux premiers interviennent dans les réactions où les charges électriques sont modifiées, tandis que le dernier est échangé dans des réactions qui ne comportent pas des changements de charge. Enfin, la **force nucléaire forte** est transmise par **les gluons** (appelé ainsi car ils collent les quarks entre eux).

Tableau 2 : Les forces fondamentales de l'Univers et les particules médiatrices des forces (les bosons). (Les chiffres entre parenthèses représentent la masse de la particule exprimée en GeV/c^2)

Force	Nucléaire forte	Electromagnétique	Nucléaire faible	Gravitation
Caractéristiques des forces	La plus forte Portée très courte	Portée infinie	Portée très courte	Extrêmement faible Portée infinie
Particules intermédiaires (bosons)	Gluon (0)	Photon (0)	Bosons W^+ (80), W^- (80), Z^0 (91)	Graviton (théorique)
Particules de matières concernées par la force	Les quarks	Particules électriquement chargées	Certains quarks et leptons	Toutes

III.4. Les étapes de formation de l'Univers et son évolution au cours du temps

L'Univers est né à partir d'un état extrêmement chaud et dense. La température et la densité diminuaient au cours du temps avec l'expansion. Durant cette évolution, l'Univers est passé par plusieurs périodes ou ères qui sont représentés sur la figure 1. Les forces fondamentales étaient toutes réunies en une seule force (théorie de la grande unification) au début puis se sont séparées progressivement (figure 1). Les différentes ères de l'Univers sont les suivantes :

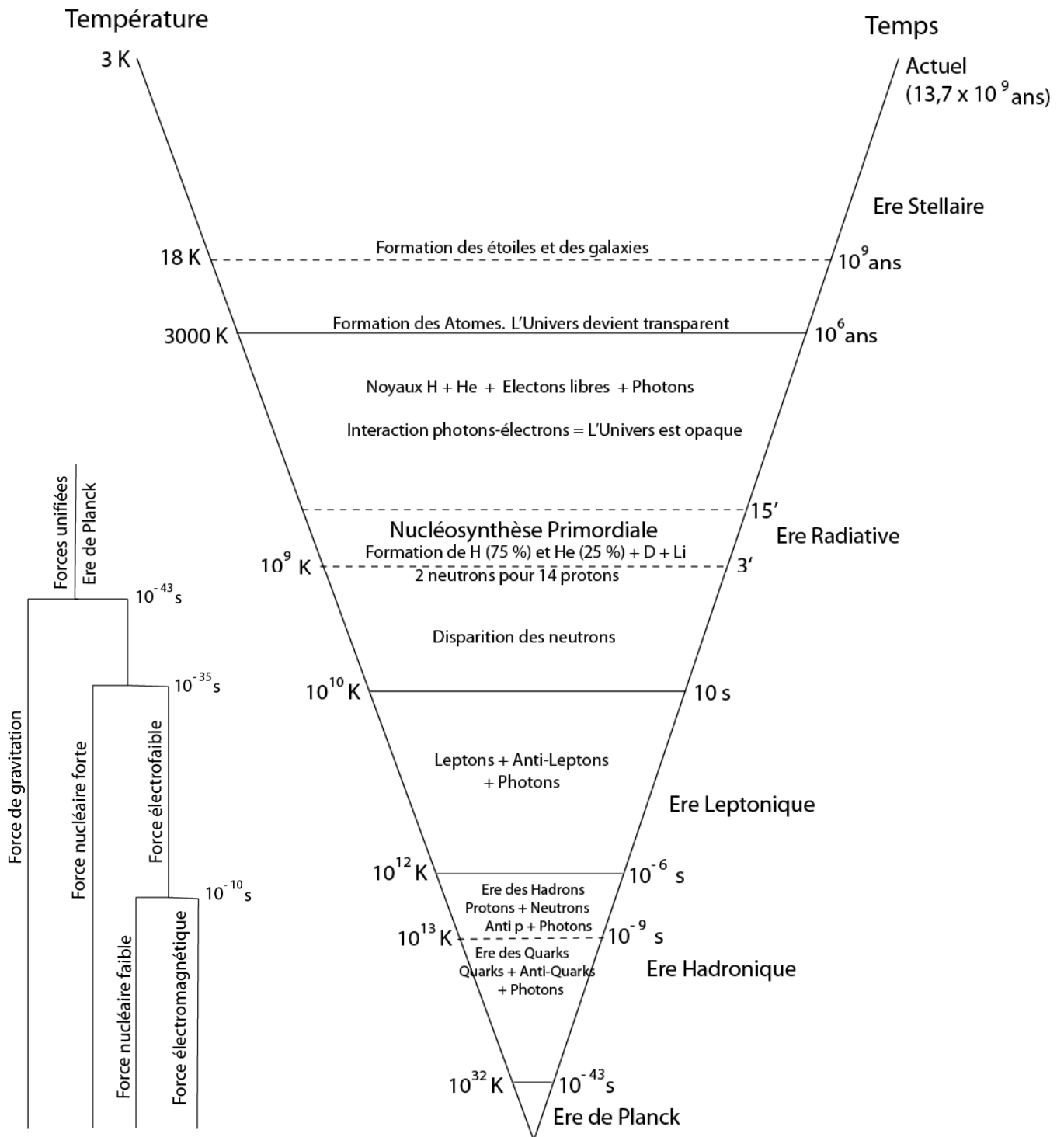


Figure 1 : Différentes étapes de l'histoire de l'Univers et séparation des forces fondamentales

a. Ere de Planck : $t < 10^{-43}$ s ; $T < 10^{32}$ K ; densité $> 10^{96}$ g/cm³

Dans l'état actuel de la physique il n'est pas possible de décrire ce qui s'est passé entre l'instant $t = 0$ et $t = 10^{-43}$ s. Tout ce que l'on sait, c'est que durant cette période, appelée ère de Planck, les quatre forces fondamentales étaient unifiées. La théorie du Big-Bang commence à $t = 10^{-43}$ s : c'est le temps de Planck.

b. Ere hadronique : 10^{-43} s $< t < 10^{-6}$ s ; 10^{32} K $< T < 10^{12}$ K

A la fin de l'ère de Planck, la **force gravitationnelle se sépare des autres forces**. On entre dans l'ère hadronique. La température est tellement élevée que l'Univers est constitué de photons très énergétiques qui ont assez d'énergie pour engendrer des paires particules-antiparticules superlourdes (des quarks) selon la réaction :



C'est l'ère des quarks.

Quand la température a baissé à 10^{27} K (correspondant à $t=10^{-35}$ s), **la force nucléaire forte s'est séparée de la force électrofaible**. A $t = 10^{-10}$ s, quand la température aura baissé à 10^{15} K, **la force électromagnétique s'est séparée de la force nucléaire faible**. A partir de cet instant, l'Univers sera dominé par les 4 forces fondamentales.

Au début de cette ère, l'Univers est tellement dense et chaud que ni les protons ni les neutrons ne peuvent exister. A $t = 10^{-9}$ s après le Big Bang, quand la température aura baissé à 10^{13} K, le rayonnement n'a plus assez d'énergie pour dissocier les assemblages de quarks. Ces derniers se soudent brusquement pour former les protons et les neutrons (hadrons). C'est l'ère hadronique proprement dite.

A la fin de cette période (à $t = 10^{-6}$ s) la température (et donc l'énergie des photons) n'était plus suffisante pour former les hadrons. On entre alors dans l'ère leptonique.

c. Ere leptonique : 10^{-6} s $< t < 10$ s ; 10^{12} K $< T < 10^{10}$ K

Durant cette période, les photons ont assez d'énergie pour former des paires de leptons (électrons par exemple) et antileptons selon la réaction :



L'Univers était composé de photons, de protons et de neutrons qui ont survécu à l'ère hadronique, et d'électrons-positons qui se formaient continuellement ainsi que d'autres leptons (muons, tau). Quand l'Univers était âgé de 10 s, les photons n'avaient plus assez d'énergie pour former les électrons et les positons. C'est la fin de l'ère leptonique. A partir de cet instant, les photons ne pourront plus former de particules et l'Univers ne sera dominé que par les photons : on rentre dans l'ère radiative.

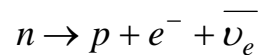
d. Ere radiative : 10 s $< t < 10^6$ ans ; 10^{10} K $< T < 3000$ K

Durant cette période, l'Univers était un océan de lumière (photons) dans lequel flottaient des particules de matières : protons, neutrons, électrons qui ont survécu aux périodes

précédentes. Un événement important dans l'histoire de l'Univers va se produire : la formation des premiers noyaux légers à partir des protons et des neutrons. C'est la **nucléosynthèse primordiale**.

- **Le problème des neutrons**

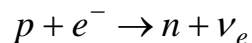
Quand ils sont à l'état libre, les neutrons sont des particules instables. Ils se transforment en protons selon la réaction :



La période (durée de vie) du neutron est de 15' seulement. Les neutrons ne sont stables qu'à l'intérieur des noyaux atomiques, quand ils sont liés aux protons.

Durant l'ère hadronique, protons et neutrons se formaient en même temps et le nombre de protons dans l'Univers était égal à celui des neutrons.

Durant l'ère leptonique, les électrons formés durant cette période se liaient avec les protons pour former des neutrons selon la réaction :



Les pertes de neutrons étaient compensées par la formation de cette particule à partir du proton de telle façon que durant l'ère leptonique le nombre de protons dans l'Univers était aussi égal à celui des neutrons.

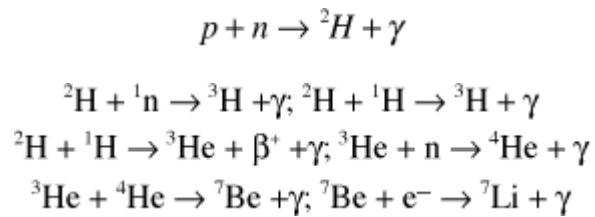
Seulement durant l'ère radiative, il n'y avait plus de production d'électrons et la réaction $p + e^{-} \rightarrow n + \nu_e$ ne pouvait plus se produire. Seule la réaction $n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e$ se produisait, et la quantité de neutrons dans l'Univers commencer à diminuer. Si rien ne s'était passé durant l'ère radiative, tous les neutrons de l'Univers auraient disparu au bout de 15 minutes, et il n'y aurait eu aujourd'hui que des protons dans l'Univers !! C'est la nucléosynthèse primordiale qui va sauver le neutron de la disparition à tout jamais.

A $t = 3'$ lorsque la nucléosynthèse primordiale aura démarrée, la proportion des neutrons dans l'Univers par rapport aux protons sera de 2 neutrons pour 14 protons.

- **La nucléosynthèse primordiale**

Quand la température de l'Univers aura baissé à 10^9 K, le rayonnement n'aura plus assez d'énergie pour casser les **noyaux** atomiques. Alors, protons et neutrons pourront se lier pour former les premiers noyaux légers de l'Univers. Les noyaux formés durant cette période sont ceux du deutérium (isotope de l'hydrogène contenant 1 proton et 1 neutron), le tritium (isotope de l'hydrogène contenant 1 proton et 2 neutrons), l'hélium 3 (isotope de l'hélium contenant 2 protons et 1 neutron), l'hélium 4 (2 protons et 2 neutrons) et enfin le lithium 7 (3 protons et 4 neutrons). La réaction qui se produit le plus est celle de la transformation d'un noyau d'hydrogène (1 proton) en noyau d'hélium 4.

Les réactions de fusion nucléaire qui se sont produites durant la nucléosynthèse primordiale sont les suivantes :



Etant donné qu'au début de ce processus, l'Univers était composé de 2 neutrons pour 14 protons, avec la transformation du proton en noyau d'hélium, on aura 1 noyau d'hélium (2 neutrons + 2 protons) formé pour 12 protons. Etant donné que le nombre de masse de l'hélium est de 4 alors que celui du proton est de 1, la proportion de l'hélium formé durant la nucléosynthèse primordiale sera de 4/16, soit 25 %. Celle de l'hydrogène sera de 75 %. **La proportion actuelle de l'hélium dans l'Univers (25 %) ne peut s'expliquer que dans le cadre de la nucléosynthèse primordiale. Aucun processus dans l'Univers ne peut former la quantité actuelle d'hélium.**

La nucléosynthèse primordiale va durer 15' car la température de l'Univers aura baissé et ne sera plus suffisante pour permettre aux réactions de fusion de se produire. L'Univers sera alors composé de 75 % d'hydrogène, 25 % d'hélium et des traces (0,01 %) d'autres éléments légers formés durant cette étape (deutérium, tritium, hélium 3, lithium 7). C'est la composition actuelle de l'Univers qui a donc été acquise durant cette courte étape qui a duré entre 3' et 15' après le Big-Bang.

Après cette étape, l'Univers a continué à se dilater et à se refroidir. C'est un océan de lumière (photons) dans lequel flottaient des protons libres, des noyaux d'hélium 4, des électrons libres et des neutrinos. Les électrons libres interagissaient sans cesse avec les photons les empêchant de se propager. L'Univers était opaque.

Après 1 millions d'années, la température de l'Univers aura atteint 3000 K. A cette température, le rayonnement ne sera plus capable de dissocier les atomes : les protons et les noyaux d'hélium vont capturer les électrons pour former les atomes d'hydrogène et d'hélium. A ce moment, les photons ne vont plus interagir avec les électrons et vont voyager librement dans l'Univers : le rayonnement se découple de la matière et l'Univers est désormais devenu transparent. Ces photons libres ont continué à se refroidir avec l'expansion de l'Univers et après 13,7 milliards d'années, la température de ces photons a atteint 3 K : c'est le rayonnement fossile détecté par Penzias et Wilson en 1965. Ce rayonnement est donc le plus ancien témoin de l'Univers, quand celui-ci n'était âgé que de 1 millions d'années.

e. Ère stellaire : $t > 10^6$ ans ; $T > 3000$ K

Quand l'Univers est devenu transparent, on est entré dans l'ère stellaire qui est dominée par la matière et qui verra la naissance des étoiles et des galaxies. C'est l'ère que nous vivons et qui dure depuis 14 milliards d'années. Après 10 milliards d'années de la naissance de l'Univers, il y a 4,56 milliards d'années, le Soleil est né ainsi que la Terre.

III.5. Les preuves de la théorie du Big-Bang

La théorie du Big-Bang repose sur trois tests fondamentaux :

- 1) **Le décalage vers le rouge des galaxies (fuite des galaxies)** découvert par E. Hubble en 1929, qui est une preuve de l'expansion de l'Univers.
- 2) **Le rayonnement cosmologique à 3 K** découvert par A. Penzias et R. Wilson en 1965 : c'est la trace des hautes températures qui régnaient dans l'Univers primordial juste après le Big-Bang.
- 3) **L'abondance des éléments légers notamment celle de l'hélium** : les 25% d'hélium contenus aujourd'hui dans l'Univers ne peuvent s'expliquer que s'ils se sont formés durant la nucléosynthèse primordiale.