

Le Big Bang

C. LONGUEMARE

1 décembre 2009

Plan

1. Introduction
2. Le vide à la température T
3. L'univers en expansion
4. La découverte du CBR (cosmic background radiation)
5. Déroulement de l'expansion

Les grandeurs

table 1

ν λ z UA aL	fréquence de la lumière longueur d'onde de la lumière décalage Doppler unité astronomique année lumière
$\mathcal{H}$ $\mathcal{G}$ $\mathcal{T}_0$	Constante de Hubble Constante de la gravitation Température du CBR

Les unités

table 2

k	$8,6 \cdot 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$
$\hbar$	$6,5 \cdot 10^{-16} \text{ eV.s}$
c	$3 \cdot 10^5 \text{ km/s}$
eV	$1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
1 g	$6, \cdot 10^{23} \text{ Nucleons}$
UA	$150 \cdot 10^6 \text{ km}$
parsec	$3,09 \cdot 10^{13} \text{ km}$
"	$3,26 \text{ aL}$
a	$3,16 \cdot 10^7$

$$\text{parsec} = 150 \cdot 10^6 \times \left(\frac{180 \times 3600}{\pi} \right) \text{ km}$$

Les distances observables

table 3

Terre-soleil = UA	4,8	10^{-6} parsec	$150 \cdot 10^6 \text{ km}$
1ère étoile	1	parsec	$3,08 \cdot 10^{13} \text{ km}$
rayon galactique	15	kparsec	
1ère galaxie	1	Mégaparsec	M34 (andromède)
amas de la vierge	25	Mégaparsec	
dernière galaxie optique	1	Gigaparsec	
quasars	3	Gigaparsec	
la plus lointaine (2004)	4,0	Gigaparsec	β de 0,996
horizon	4,2	Gigaparsec	

Ondes de photons

table 4

Loi de Planck	e	$h \nu$	$\hbar \omega$
Loi de de Broglie	$\vec{p}$	$\frac{h}{\lambda} \vec{u}$	$\hbar \vec{k}$

- Si l'onde se déplace dans la direction $\vec{u}$ et à la vitesse c dans le vide, la phase de l'onde s'écrit

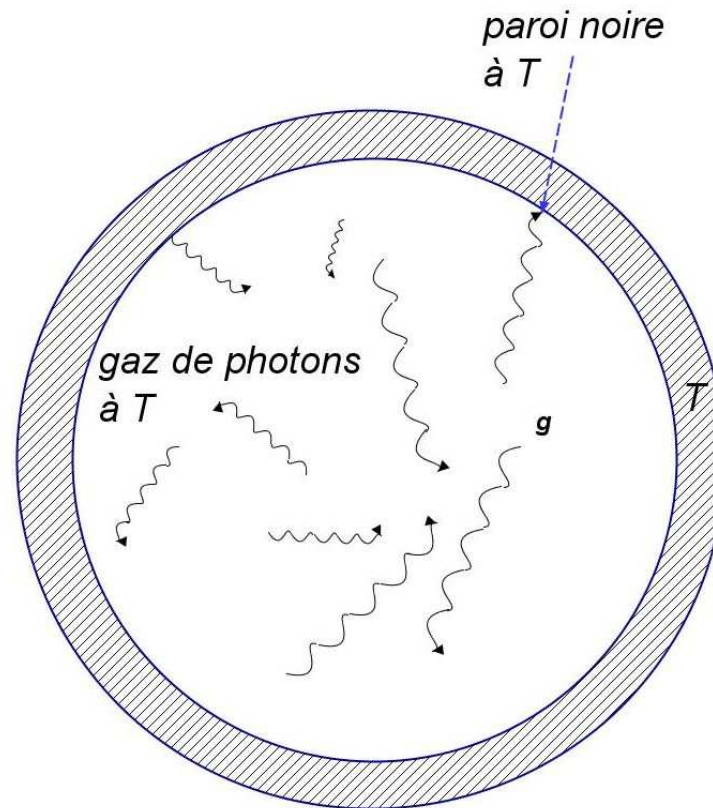
$$\phi(t, \vec{x}) = -2\pi(\nu t - \lambda^{-1}(\vec{x} \cdot \vec{u})) = -\omega t + \vec{k} \cdot \vec{x}$$

- Le photon associé à cette onde est une "particule" de masse nulle.

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad e = c p$$

Gaz de photons

Au contact d'une paroi à la température T , le vide se charge d'un gaz de photons.



Le vide chaud

- On quitte le régime des basses températures quand les photons sont capables de créer des paires

$$\gamma + \gamma \leftrightarrow e^+ + e^-$$

- Le nombre d'électrons n'est plus fixé ; ce nouveau régime s'installe quand :

$$h\nu \sim 2mc^2 \sim kT \text{ soit } T \sim \frac{2mc^2}{k} \quad 2mc^2 = 1,022 \text{ MeV}$$

- Pour les électrons , cette température est de $11,6 \cdot 10^9 \text{ K}$. Cette température joue un rôle crucial dans la théorie du Big Bang.
- C'est aussi à cette température que la différence neutron - proton disparaît avec la croissance de la température.

$$M_n - M_p = 1,30 \text{ MeV}/c^2$$

Un peu de Thermodynamique

- La paroi de la source est "un corps noir", la distribution satisfait à la loi de Planck

$$f(\nu) = \frac{4\pi}{c^3} \frac{2}{\exp(\beta h \nu) - 1} \nu^2 d\nu \quad \text{avec } \beta = \frac{1}{kT} \quad (1)$$

- le nombre de photons n'est pas fixé (un caractère bosonique)

$$N_\gamma = V \times \int f(\nu) d\nu = b V T^3$$

- l'énergie interne du gaz de photons ($e = h\nu$)

$$U = V \times \int h\nu f(\nu) d\nu = a V T^4$$

- l' émittance (puissance rayonnée / unité de surface) est * :

$$R = \frac{c}{4} \left(\frac{U}{V} \right) = \frac{c}{4} a T^4 = \sigma T^4 \quad (Watt/m^2)$$

- l'énergie moyenne des photons $\langle e \rangle = 2,7 k T$

* $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$ est la constante de Stefan Boltzmann

Le gaz d'électrons

- la distribution de Maxwell avec $|\vec{p}| = p$

$$f(p) = \frac{4\pi}{h^3} \frac{2}{\exp(\beta (e - \mu)) + 1} p^2 dp \quad \text{avec} \quad \beta = \frac{1}{kT} \quad (2)$$

- le nombre d'électrons est fixé (un caractère fermionique)

$$N_e = N = V \times \int f(p) dp$$

- l'énergie interne du gaz

$$U = V \times \int e(p) f(p) dp = N \left(\frac{3}{2} k T + mc^2 \right)$$

- l'énergie moyenne des électrons

$$\langle e \rangle = mc^2 + 1,5 k T$$

Le vide à haute température

1. On quitte le régime des basses températures quand les photons sont capables de créer des paires $e^+ e^-$:

$$\gamma + \gamma \leftrightarrow e^+ + e^-$$

Lorsque celui-ci se produit, il apparaît dans le vide une nouvelle espèce de particules et le nombre d'électrons n'est plus fixé .

2. Ce nouveau régime s'installe quand * :

$$h\nu \sim 2mc^2 \sim kT \Rightarrow \quad T \sim \frac{2mc^2}{k} \quad 2mc^2 = 1,022 \text{ MeV}$$

3. Cette température joue un rôle crucial dans la théorie du Big Bang car les électrons apparaissent aux dépens des photons à cette température (ou inversement)
4. C'est aussi vers cette température que la différence neutron - proton disparaît (ou inversement)

$$M_n - M_p = 1,30 \text{ MeV}/c^2$$

*cette température est de $11,6 \cdot 10^9 \text{ K}$.

1. La dynamique (expansion contraction) de l'univers est une conséquence de la relativité générale d'Einstein. L'évolution est "déterminée" par la **densité d'énergie** contenue dans l'univers supposé homogène .

La vitesse de l'expansion de Hubble :

$$v = \mathcal{H} \times d$$

$$\mathcal{H} = 72 \pm 10 \text{ km/sec/Megaparsec} *$$

2. $\mathcal{H}^{-1}$ est un temps , le temps de Hubble qui est qualitativement l'âge de l'univers que nous connaissons.

$$t_{\infty} = \mathcal{H}^{-1} = 13,7 \cdot 10^9 \text{ a}$$

3. Mesure de la vitesse radiale des galaxies par l'effet Doppler relativiste :

$$\nu' = \nu \times \gamma (1 - \vec{\beta} \cdot \vec{u})$$

*[http ://www.cfa.harvard.edu/ huchra/hubble/](http://www.cfa.harvard.edu/huchra/hubble/)

si la vitesse est une expansion radiale

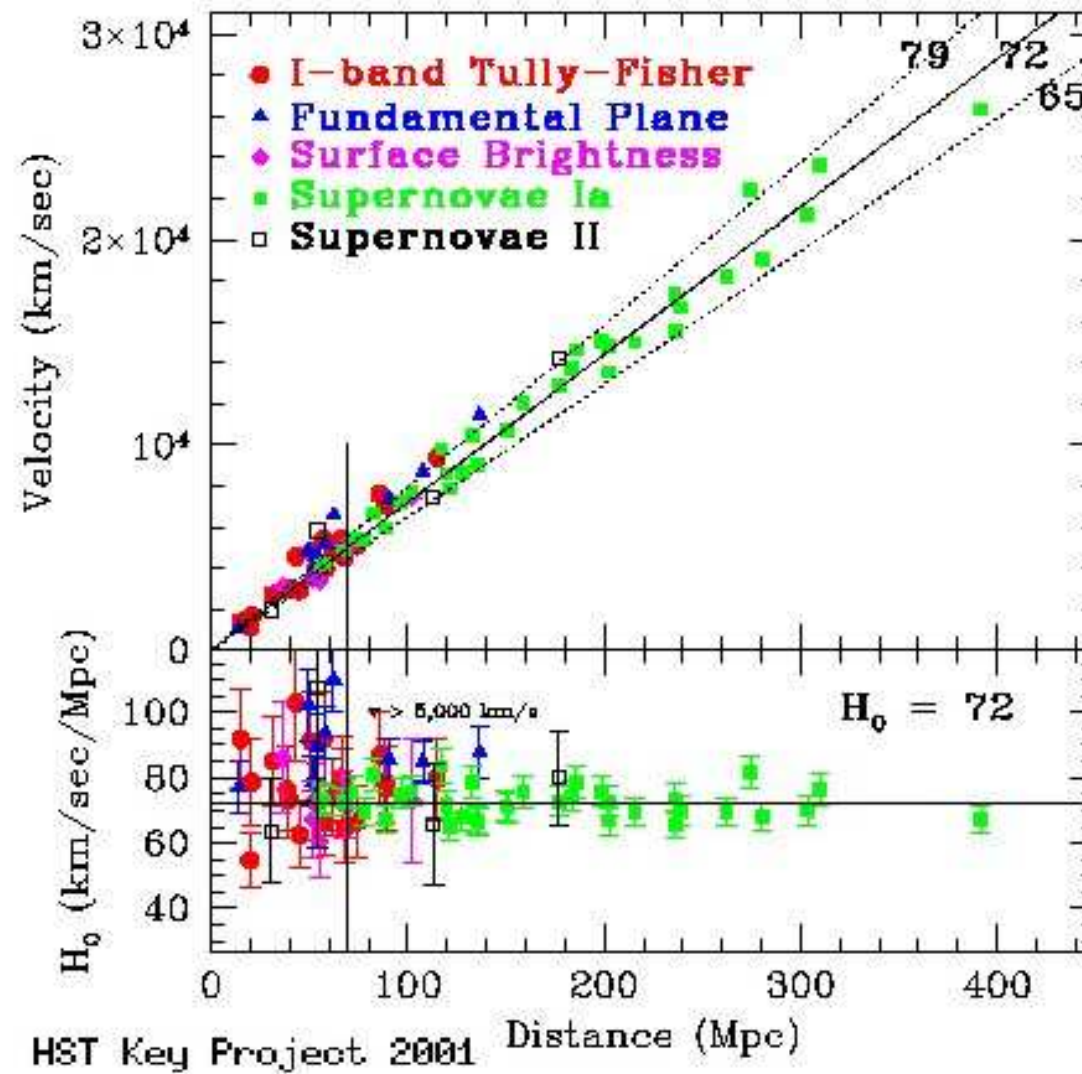
$$\frac{\nu'}{\nu} = \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}} \sim 1 - \beta + \dots$$

4. Expérimentalement on mesure un décalage vers le rouge ($\nu' < \nu$ ou $\lambda' > \lambda$) qui est total si la vitesse est proche de la vitesse de la lumière c'est à dire si la distance est le rayon de Hubble :

$$R_H = d_\infty = \frac{c}{\mathcal{H}} = 4,2 \cdot 10^9 \text{ parsec}$$

C'est la distance de notre horizon.

La loi de Hubble



Friedmann et la densité critique

1. Il existe une relation entre taux d'expansion, courbure spatiale et densité d'énergie, donné par les équations de la relativité générale appliquées à un modèle d'univers homogène et isotrope. Dans ce contexte, ces équations s'appellent équations de Friedmann :

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\mathcal{H}^2}{c^2} + \frac{K}{a^2} \right) = \frac{4\pi G}{3 c^4} u_c, \quad \text{dimension } L^{-2}$$

où $\mathcal{H}$ est le taux d'expansion par unité de temps , $K a^{-2}$ la courbure spatiale, u_c la densité d'énergie, c la vitesse de la lumière et G la constante de Newton.

2. La densité critique u_c est définie par la valeur que prend la densité d'énergie u_c en l'absence de courbure spatiale. On a donc

$$u_c \equiv \frac{3\mathcal{H}^2 c^2}{8\pi G} = 6,2 \text{ keV cm}^{-3} \quad \text{dimension } E L^{-3}$$

1. La dynamique (expansion / contraction) est conditionnée par la densité critique que l'on peut introduire par un raisonnement classique : Considérons une galaxie de masse m à la distance d de l'observateur quand l'expansion est conditionnée par la constante de Hubble :

$$\begin{aligned}E_c &= \frac{1}{2}mv^2 \text{ avec } v = \mathcal{H} \times d \\E_p &= -\mathcal{G}\frac{Mm}{d} \text{ avec } M = \frac{4\pi}{3}\rho d^3 \\E_t &= E_c + E_p = \frac{md^2}{2}(\mathcal{H}^2 - \frac{8\pi}{3}\rho\mathcal{G})\end{aligned}$$

la densité critique vaut donc

$$\rho_c = \frac{3\mathcal{H}^2}{8\pi\mathcal{G}} = 1,1 \cdot 10^{-26} \text{ kg m}^{-3} \quad u_c = \rho_c \times c^2 = 6,2 \text{ keV cm}^{-3}$$

2. La densité d'énergie critique vaut $6,2 \text{ keV/cm}^3$ soit environ 10 nucléons par mètre cube . Seulement 20% de cette énergie a été observée dans l'univers sous forme de masse ou de matière connue.

Découverte du CBR

- Penzias et Wilson (Compagnie de téléphone BELL) découvre en 1964 un rayonnement électromagnétique isotrope d'origine astrophysique : **cosmic background radiation**

$$\lambda = 7,35 \text{ cm} \quad \nu = 4,08 \text{ GHz}$$

La température de ce rayonnement thermique est de 3 K

- Ce rayonnement est isotrope, on l'observe sur terre comme en satellite ou en ballon (l'ionosphère est transparente)
- Il suit la loi de Planck pour une température qui est la température de l'univers* . L'univers est donc un système très froid avec des points chauds.

$$T_0 = 2,725 \text{ K (mesure de WMAP)}$$

- Les fluctuations de température sont de $2 \cdot 10^{-4} K$.

*[http ://map.gsfc.nasa.gov/news/](http://map.gsfc.nasa.gov/news/)

Abstract COBE-93 * : We present a determination of the cosmic microwave background dipole amplitude and direction from the COBE Differential Microwave Radiometers (DMR) first year of data. Data from the six DMR channels are consistent with a Doppler-shifted Planck function of dipole amplitude

$$\Delta T = 3.365 \pm 0.027 \text{ mK}$$

toward direction (l, b) ($264^\circ.4 \pm 0^\circ.3, 48^\circ.4 \pm 0^\circ.5$)

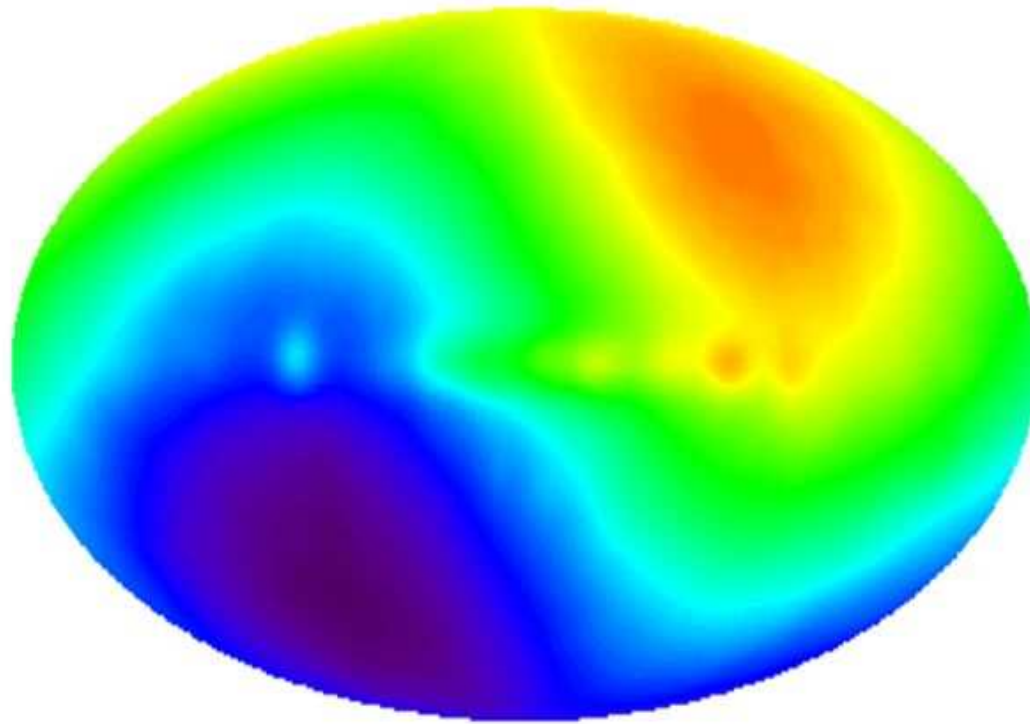
The implied velocity of the Local Group with respect to the CMB rest frame is

$$v_{LG} = 627 \pm 22 \text{ km/s}$$

toward (l, b) ($276^\circ \pm 3^\circ, 30^\circ \pm 3^\circ$)

DMR has also mapped the dipole anisotropy resulting from the Earth's orbital motion about the Solar system barycenter, yielding a measurement of the monopole CMB temperature T_0 at 31.5, 53, and 90 GHz, $T_0 = 2.75 \pm 0.05 \text{ K}$

*<http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=4124870>



The implied velocity of the Local Group with respect to the CMB rest frame is :

$$v_{LG} = 627 \pm 22 \text{ km/s toward (III, bII) } 276^\circ \pm 3^\circ, 30^\circ \pm 3^\circ)$$

Les seuils

- A haute température , le "rayonnement" peut produire de la matière, par exemple les particules connues qui sont des leptons (e^- , μ , τ , ν) ou des hadrons (Mésons ou Baryons). Ces processus sont possibles si la température est suffisante (table 6) :

$$h\nu = kT \geq mc^2$$

table 6

particule	T en milliard de K	$2mc^2$ en MeV
ν, γ	0	0
e	10	1
π	1000	100
$N = p \text{ ou } n$	10 000	1000

- Quand ces réactions sont possibles le vide devient "inerte" .

Déroulement de l'expansion

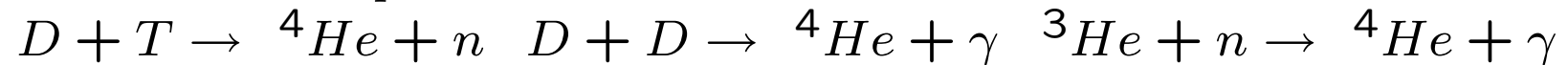
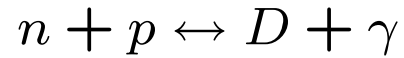
1. La conservation des nombres Leptoniques et Baryoniques et la symétrie matière anti-matière imposent des contraintes strictes à la matérialisation ou à son processus inverse.
2. Hormis le proton et le neutron, toutes particules lourdes connues ($M > 100 \text{ MeV}/c^2$) sont instables et ont des durées de vie au repos inférieures à la microseconde.

$$\tau \leq 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

3. Les interactions fortes sont extrêmement rapides et efficaces, elles dominent les autres processus quand elles sont possibles.
4. Les réactions nucléaires ne peuvent produire des noyaux par interaction forte que dans un domaine d'énergie situé entre la barrière coulombienne et l'énergie de liaison des nucléons :

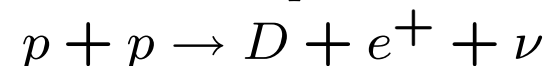
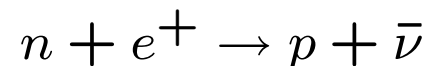
$$E_{\text{coulomb}} \sim 1 \times Z_1 Z_2 \text{ MeV} \quad E_{\text{liaison}} \sim 10 \times Z \text{ MeV}$$

5. Ci dessous quelques réactions électromagnétiques et fortes de synthèse nucléaire dans l'univers primordial.



6. En première approximation, les interactions faibles n'interviennent que quand l'univers est assez compact, soit dans les toutes premières secondes soit, et principalement, lors de la nucléosynthèse stellaire qui s'installe au centre des étoiles, sur des durées de l'ordre du milliard d'années.

exemples : la disparition des neutrons et la synthèse du deutérium :



Plan 1

1.	temps en s	T en milliard de K	Quantum d'énergie MeV
	0,01	100	10

2. Tous les hadrons ont disparu **par annihilation (forte)** ou désintégration, la physique des particules n'intervient plus mais...

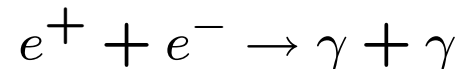
Il reste en équilibre :

$$\gamma \ e^+ \ e^- \ \nu \ \bar{\nu} \ + \text{ quelques nucléons non-relativistes } n \text{ ou } p$$

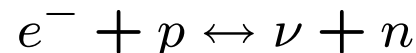
3. **Il existe un excès relativement faible de Baryons (neutrons + protons)** pour expliquer la présence des baryons (matière) dans l'univers actuel ; cet excès provient de la période antérieure ($t \leq 0,01 \text{ s}$) et relève donc de la physique des hautes énergies.

1.	temps en s	T en milliard de K	Quantum d'énergie MeV
	1	10	1

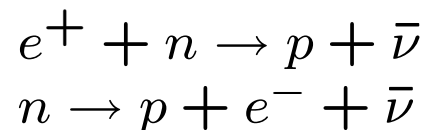
2. Les électrons et positrons s'annihilent et "réchauffent" l'univers.



Il existe également un excès relativement faible d'électrons pour expliquer la neutralité électrique de l'univers actuel. Les neutrinos (ν_L) étant les partenaires symétriques des électrons, l'univers connaît à ce stade un excès de neutrinos.



3. Les neutrons commencent à se transformer en protons car les réactions inverses ne sont plus possibles à cause de la différence de masse n-p qui est de $1,3MeV/c^2$.



4. Les neutrons encore libres disparaissent également à cause de la nucléosynthèse du deutérium, du tritium, de l'Hélium 3 et Hélium 4 qui peut encore se faire à travers la barrière coulombienne et produire des noyaux stables qui survivent.
5. L'Hélium 4 étant le mieux lié il va survivre en plus grande proportion :

$$\frac{{}^4\text{He}}{\text{H}} = 25\% \quad \frac{\text{D}}{\text{H}} = 0,1\% \quad \frac{{}^3\text{He}}{\text{H}} = 0,1\% \quad \% \text{ en masse}$$

Phase 3

1.

temps en s	T en milliard de K	Quantum d'énergie MeV
200	1	0,1

2. Les réactions nucléaires s'arrêtent après quelques minutes, l'univers primordial est constitué de matière , essentiellement un plasma d'électrons , de protons et d'hélium noyés dans une mer de photons et de neutrinos/antineutrinos.

$$\gamma \nu \bar{\nu} e^- p {}^4\text{He}... \text{ avec } \frac{N_p}{N_\gamma} = 10^{-9}$$

3. L'univers est dominé par l'interaction électromagnétique.
4. Le gaz de neutrinos se découple et n'évolue plus que du fait de l'expansion ("**neutrino freeze out**").

Phase 4

1.

temps en années	T en millions de K	Quantum d'énergie eV
1 million	0,1	10
2. Les atomes se forment et l'univers devient neutre donc transparent : les photons se découplent (**photon freeze out**) ; le gaz de photons n'évolue plus qu'à cause de l'expansion.
3. L'univers est dominé par la gravitation qui va ultérieurement former les galaxies ; elles sont alors embryonnaires et ne vont être actives que vers un milliard d'années. Les fluctuations de température du CBR actuel sont l'empreinte laissée par ce processus sur le rayonnement .

Phase 5

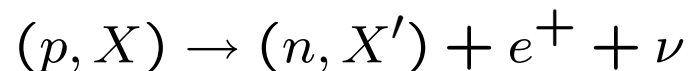
1.

temps en années	T en K	Quantum d'énergie eV
10 milliards	1	0,0001

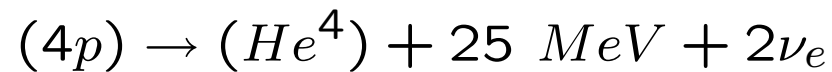
2. C'est l'univers actuel, on y observe la radiation CBR à 3K, de l'hydrogène et de l'hélium en grande quantité et des noyaux plus lourds produits pendant 12 milliards d'années par l'activité des étoiles rassemblées en galaxies.

La nucléosynthèse stellaire

1. C'est un processus extrêmement lent qui ne peut s'opérer qu'à température élevée et sous une forte pression (table 5). Ces conditions ne sont réalisables qu'au coeur des étoiles.
2. A la surface de l'étoile, la température est beaucoup plus faible ($T_{\odot} \sim 5000 \text{ K}$ pour le soleil); la surface est en contact avec l'espace interstellaire à $T = 3 \text{ K}$ et elle rayonne, sous forme de photons, l'essentiel de l'énergie produite au centre de l'étoile par la nucléosynthèse; 20% de cette énergie s'échappe sous forme de neutrinos
3. Pour l'essentiel la nucléosynthèse stellaire consiste à transformer des protons en neutrons liés; cette transformation s'accompagne de l'émission d'un neutrino.



4. Le cycle p-p qui produit de l'hélium est actuellement actif dans le soleil peut se résumer à une transformation de quatre protons en Hélium avec une libération de 25 MeV sous forme de chaleur et de deux neutrinos .



5. Conditions solaires :

table 5

T	$15 \cdot 10^6 \text{ K}$
kT	$1,5 \text{ keV}$
pression	$100 \cdot 10^9 \text{ Atm}$
$T_{\odot}$	5780 K
$R_{\odot}$	$695 \cdot 10^3 \text{ km}$
constante solaire	$5,0 \cdot 10^{26} \text{ W}$
"	$3,1 \cdot 10^{39} \text{ MeV/s}$

Conclusion

1. La théorie du BigBang dont le but est d'interpréter les données astrophysiques à grande échelle, est une composition audacieuse de plusieurs théories physiques
2. La relativité générale qui conduit à un espace en expansion tel que celui de Friedmann et où le volume est une fonction croissante du temps $V(t)$.
3. La thermodynamique qui permet d'établir un lien entre le volume de l'espace et la température du contenu $V(T)$. Curieusement, "l'univers " est aujourd'hui l'objet physique dont la température est déterminée avec la meilleure précision.

$$T_0 = 2.726 \text{ K}$$

4. La physique des particules permet de contruire la dynamique du contenu de cet espace en fonction de la température et de lois expérimentales connues : $\rho(T)$

5. Cependant, de nombreuses questions demeurent :

- * La présence d'un excès de matière Baryonique et Leptonique avant 10^{-2} s brise la symétrie particule-antiparticule et conduit à un univers de matière, pourquoi ?
- * La dynamique des galaxies impose-t-elle l'existence de matière noire ?
- * La dynamique de l'univers suggère l'existence d'une énergie noire.
- * La distribution des galaxies dans l'univers présente des inhomogénéités, pourquoi, comment ?