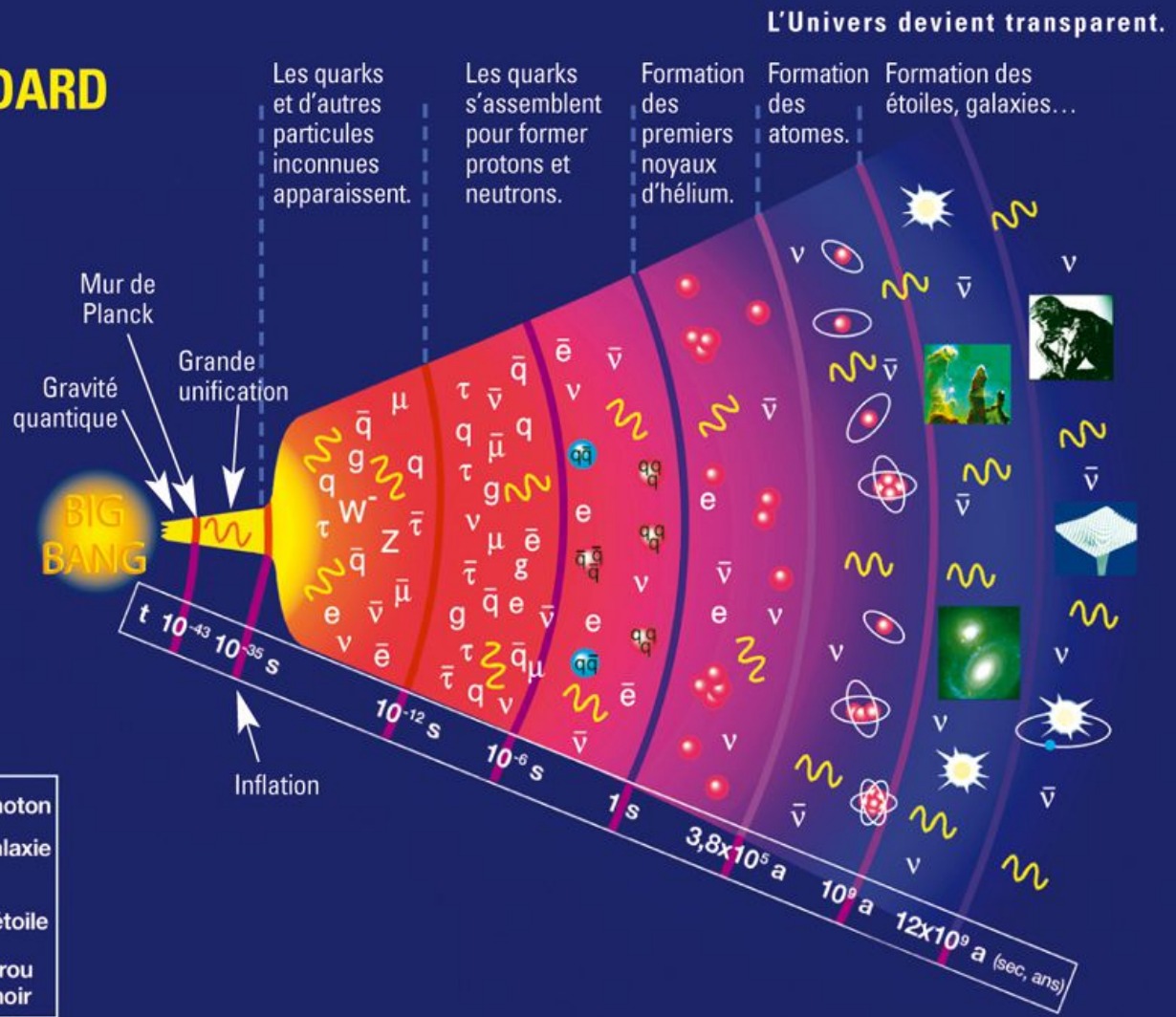


L'évolution de L'univers

L'UNIVERS SELON LE MODÈLE STANDARD

Depuis le Big Bang, l'Univers primordial a franchi de nombreuses étapes durant lesquelles les particules puis les atomes et la lumière ont peu à peu émergé avant qu'étoiles et galaxies ne prennent corps. C'est cette histoire que raconte la théorie du « modèle standard » en vigueur aujourd'hui.



© Particle Data Group, LBNL 2008

L'évolution de L'univers primordial

$$t = 10^{-32} \text{ s} \quad T = 10^{26} \text{ K} \quad \rho = 10^{73} \text{ kg/m}^3$$

Création de la matière

Après le réchauffement postinflationniste, l'Univers est rempli de matière à une densité énorme, 10^{73} kg/m^3 . La température est si élevée que ni les protons ni les neutrons ne peuvent exister : ils sont dissociés en leurs constituants, les **quarks**. On a donc une « soupe » ultradense de quarks, d'électrons, de photons et de neutrinos.

Les expériences effectuées dans les accélérateurs de particules montrent que la création de particules de matière à partir d'une autre forme d'énergie se produit par paires : une particule est toujours associée à une **antiparticule**, qui a la même masse mais dont la charge électrique est de signe opposé. L'antiproton est chargé négativement, et l'anti-électron, connu sous le nom de *positon*, est chargé positivement. Le quark aussi a son antiparticule, l'antiquark. Le photon est une exception : il est sa propre antiparticule.

Lorsqu'une particule rencontre son antiparticule, elles disparaissent toutes deux et sont transformées en énergie (par exemple, en photons) ; à l'inverse, une certaine quantité d'énergie (par exemple, l'énergie cinétique d'une collision) peut donner naissance à une paire particule-antiparticule, mais jamais à une particule seule. Or, il semblerait que l'Univers observable ne contienne pas de quantité appréciable d'antimatière. La solution à ce paradoxe apparent consiste à admettre que l'énergie du vide massif qui s'est transformée en matière lors du réchauffement postinflationniste a engendré un peu plus de particules que d'antiparticules. Selon une théorie récente et encore controversée de la physique des particules, il y aurait un déséquilibre fondamental d'une partie par milliard entre la création de matière et celle d'antimatière. Pour chaque milliard d'antiquarks, un milliard et un quarks seraient créés. Lors de la création initiale de la matière, les paires particules-antiparticules se seraient autodétruites en se transformant en photons, et un seul quark par milliard aurait survécu. Les survivants de ce « carnage » formeraient la matière de l'Univers d'aujourd'hui ; quant aux photons produits, ils seraient venus grossir les rangs du rayonnement de fond cosmologique (RFC).

L'évolution de L'univers primordial

$$t = 0,0001 \text{ s} \quad T = 10^{12} \text{ K} \quad \rho = 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

Formation des protons et des neutrons

Un dix millième de seconde après le Big Bang, la température a baissé suffisamment pour que les quarks se combinent en protons et en neutrons. La masse du neutron est légèrement supérieure à celle du proton; laissé à lui-même, il a une durée de vie moyenne d'environ 10,6 minutes, et se désintègre en proton, en émettant un électron et un neutrino. (À titre d'analogie, on peut considérer que le neutron correspond à un état excité du proton; laissé à lui-même, il revient à son niveau fondamental, c'est-à-dire se transforme en proton.) Toutefois, il y a tellement d'énergie thermique disponible dans l'Univers à la température de 10^{12} K que les protons se transforment en neutrons au même rythme que les neutrons se transforment en protons. Ainsi, le nombre de protons est égal au nombre de neutrons.

$$t = 0,01 \text{ s} \quad T = 10^{11} \text{ K} \quad \rho = 10^{13} \text{ kg/m}^3$$

Les neutrons commencent à dépérir

Au fur et à mesure que la température (donc l'énergie disponible) diminue, la transformation des neutrons en protons — qui est favorisée énergétiquement — devient plus importante que la réaction inverse: le nombre de neutrons diminue au profit de celui des protons. À $t = 0,01$ s, il y a 9 neutrons pour 10 protons.

On remarque que la disparition des neutrons se fait à un rythme beaucoup plus rapide que la désintégration spontanée, dont la période moyenne est de 10,6 minutes; le rythme de transformation est en effet accéléré par la réaction: neutron + positon \rightarrow proton + neutrino.

Les diapos 2-3 et 7-9 sont tirées du livre: « Astronomie et Astrophysique » de Marc Seguin et Benoît Villeneuve (ed.Masson) que je vous recommande.

Les diapos 4-6 sont tirées des chapitres 7 & 8 du livre:

« Cosmology and Particle astrophysics » de Lars Bergström et Ariel Goodbar (ed Wiley-Praxis) que j'ai partiellement traduit et mis en ligne sur le lien : http://www-cosmosaf.iap.fr/Dynamique_Relativiste.pdf

Par ailleurs une large partie de cette présentation reprend des éléments du cours de Ned Wright (avec son aimable consentement) dont la page d'accueil est: <http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm>

L'évolution de L'univers primordial

$$t = 0,0001 \text{ s} \quad T = 10^{12} \text{ K} \quad \rho = 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

Formation des protons et des neutrons

Un dix millième de seconde après le Big Bang, la température a baissé suffisamment pour que les quarks se combinent en protons et en neutrons. La masse du neutron est légèrement supérieure à celle du proton; laissé à lui-même, il a une durée de vie moyenne d'environ 10,6 minutes, et se désintègre en proton, en émettant un électron et un neutrino. (À titre d'analogie, on peut considérer que le neutron correspond à un état excité du proton; laissé à lui-même, il revient à son niveau fondamental, c'est-à-dire se transforme en proton.) Toutefois, il y a tellement d'énergie thermique disponible dans l'Univers à la température de 10^{12} K que les protons se transforment en neutrons au même rythme que les neutrons se transforment en protons. Ainsi, le nombre de protons est égal au nombre de neutrons.

$$t = 0,01 \text{ s} \quad T = 10^{11} \text{ K} \quad \rho = 10^{13} \text{ kg/m}^3$$

Les neutrons commencent à dépérir

Au fur et à mesure que la température (donc l'énergie disponible) diminue, la transformation des neutrons en protons — qui est favorisée énergétiquement — devient plus importante que la réaction inverse: le nombre de neutrons diminue au profit de celui des protons. À $t = 0,01$ s, il y a 9 neutrons pour 10 protons.

On remarque que la disparition des neutrons se fait à un rythme beaucoup plus rapide que la désintégration spontanée, dont la période moyenne est de 10,6 minutes; le rythme de transformation est en effet accéléré par la réaction: neutron + positon \rightarrow proton + neutrino.

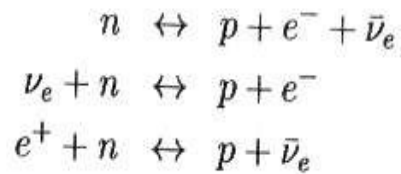
Les diapos 2-3 et 7-9 sont tirées du livre: « Astronomie et Astrophysique » de Marc Seguin et Benoît Villeneuve (ed.Masson) que je vous recommande.

Les diapos 4-6 sont tirées des chapitres 7 & 8 du livre:

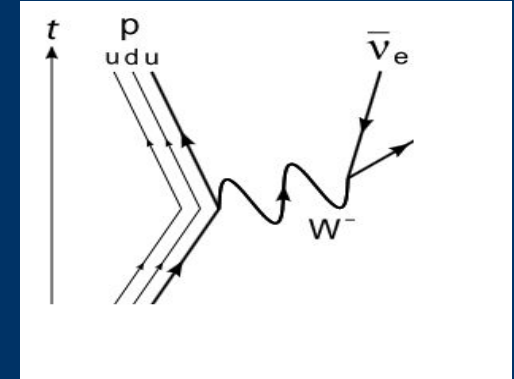
« Cosmology and Particle astrophysics » de Lars Bergström et Ariel Goodbar (ed Wiley-Praxis) que j'ai partiellement traduit et mis en ligne sur le lien : http://www-cosmosaf.iap.fr/Dynamique_Relativiste.pdf

Par ailleurs une large partie de cette présentation reprend des éléments du cours de Ned Wright (avec son aimable consentement) dont la page d'accueil est: <http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm>

L'évolution de L'univers primordial



(8.15)



Ces réactions via l'interaction faible correspondent à des sections efficaces très faibles. Quand la température de l'univers était bien plus grande que la différence de masse entre le proton et le neutron $\Delta m = m_n - m_p = 1,29 \text{ MeV}$, les réactions étaient totalement réversibles. Mais en dessous de 1 MeV , la décroissance de la densité numérique de neutrons du fait de leur masse supérieure commença à devenir importante. Comme les protons et les neutrons étaient non relativistes à ces températures ($T \approx 1 \text{ MeV} \ll m_n, m_p \approx 940 \text{ MeV}$), nous pouvons utiliser l'équation (5.20) pour calculer le rapport :

$$\frac{n_n}{n_p} = e^{-\Delta m/T} = e^{-(1.29 \text{ MeV})/T} \quad (8.16)$$

Ceci montre qu'à haute température, le rapport valait pratiquement 1. Si l'équilibre avait été maintenu, le rapport n'aurait décliné que faiblement à basse température. Cependant les calculs du découplage nous apprennent que ce qui détermine les abondances c'est souvent le gel de l'abondance du fait que le taux d'une réaction comme :

$$\Gamma(\nu_e + n \leftrightarrow p + e^-) \sim 2.1 \left(\frac{T}{1 \text{ MeV}} \right)^5 \text{ sec}^{-1} \quad (8.17)$$

L'évolution de l'univers primordial

chute sous le taux d'expansion quand $T < 0.8 \text{ MeV}$. Alors les neutrons ne sont plus détruits (ou créés) par les deux dernières réactions de (8.15), mais continuent à être décimés par la désintégration de neutron (première réaction). Donc cela est maintenant régi par le processus de désintégration du neutron, de période mesurée en laboratoire, plutôt longue, de 890 secondes environ. La densité numérique des neutrons est donc « gelée » à sa valeur autour d'une température de 0.8 MeV ce qui donne :

$$\frac{n_n}{n_p} \sim e^{-1.29/0.8} \sim 0.2 \tag{8.18}$$

Avant de pouvoir se désintégrer la majorité des neutrons vont s'associer aux protons pour former des atomes d'hélium par l'une des chaînes de réactions



La densité numérique des photons étant très élevée, la photo - désintégration du deutérium était importante et l'abondance du deutérium fut maintenue en dessous de 10^{-10} pendant l'équilibre entraînant un taux très faible de réactions $d+d$, en conséquence peu d'hélium fut produit pour $T > 0.1 \text{ MeV}$. Sous cette température, la photo-dissociation cessa et l'abondance de deutérium crût jusqu'à $10^{-5} - 10^{-3}$, entraînant une fusion en hélium par la réaction $d+d$, consommant la majorité des neutrons : L'estimation de l'abondance ${}^4\text{He}$ est donnée par

L'évolution de l'univers primordial

$$Y(^4\text{He}) \equiv \frac{4n_{\text{He}}}{n_{\text{tot}}} = \frac{4(n_n/2)}{n_n + n_p} = \frac{2n_n/n_p}{1 + n_n/n_p} \quad (8.22)$$

Rappelons que le rapport n_n/n_p était de 0.2 pour $T = 0.8 \text{ MeV}$. Après des neutrons se désintègrèrent, et le rapport à la fin de la nucléosynthèse ($T = 0.01 \text{ MeV}$) était d'environ 0.13. Ceci donne une abondance d'environ 0,24 pour (^4He), ce qu'on retrouve par un calcul plus exact. Ceci est exactement la valeur qu'on mesure dans les étoiles et les gaz pauvres en métal aux incertitudes de mesure près.

Considérons maintenant la question du découplage des neutrinos de l'équilibre thermique dans l'univers primordial. Comme nous l'avons indiqué, les particules interagissant faiblement comme les neutrinos, se découplent en dessous d'une température T_{dec} quand le taux d'interaction entre les particules n'est plus assez rapide pour lutter contre l'expansion de Hubble de l'espace. Les médiateurs des interactions faibles sont les particules W et Z qui sont massives $m_w = 80 \text{ GeV}$ et $m_z = 91 \text{ GeV}$.

Les neutrinos se sont découplés à une température d'environ 4 MeV, mais leur fonctions de distribution ont conservé le profil thermique, simplement décalés vers le rouge par l'expansion cosmique. Mais comme ils étaient déjà découplés au moment du «réchauffement» quand les électrons et les positrons sont devenus non relativistes, le fond de neutrinos cosmologiques est plus froid que celui des photons.

Comme le RFC (photons) a maintenant une température de 2.73K, il doit y avoir un fond de neutrinos cosmologique ayant un spectre d'énergie de Fermi Dirac de température $T_\nu = 1.95 \text{ K}$. Comme des neutrinos d'une énergie aussi faible interagit très faiblement avec la matière, c'est un défi extrême pour la physique expérimentale du 21^{ème} siècle de les détecter directement.

L'évolution de L'univers primordial

$t = 1 \text{ s}$

$T = 10^{10} \text{ K}$

$\rho = 10^9 \text{ kg/m}^3$

L'hélium est inaccessible



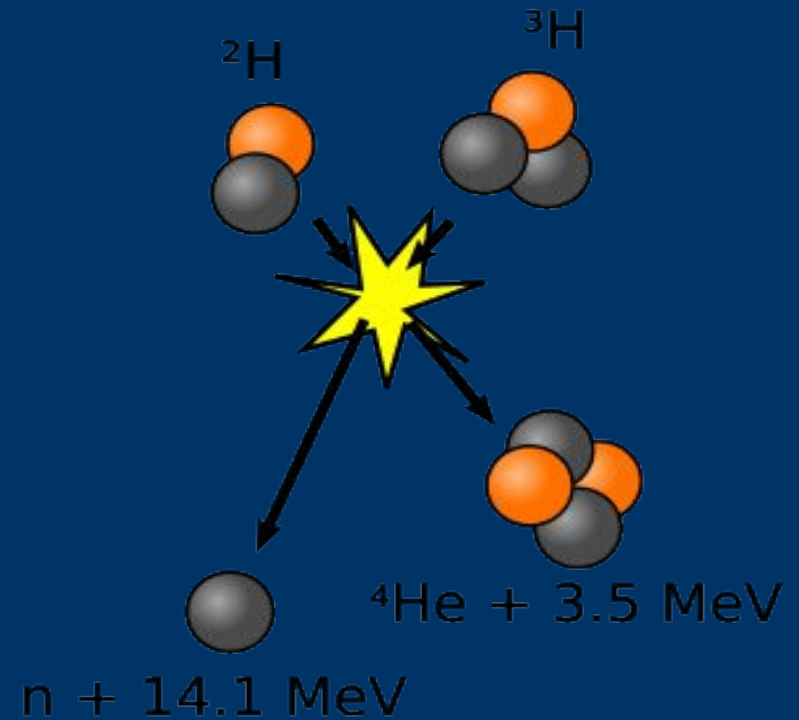
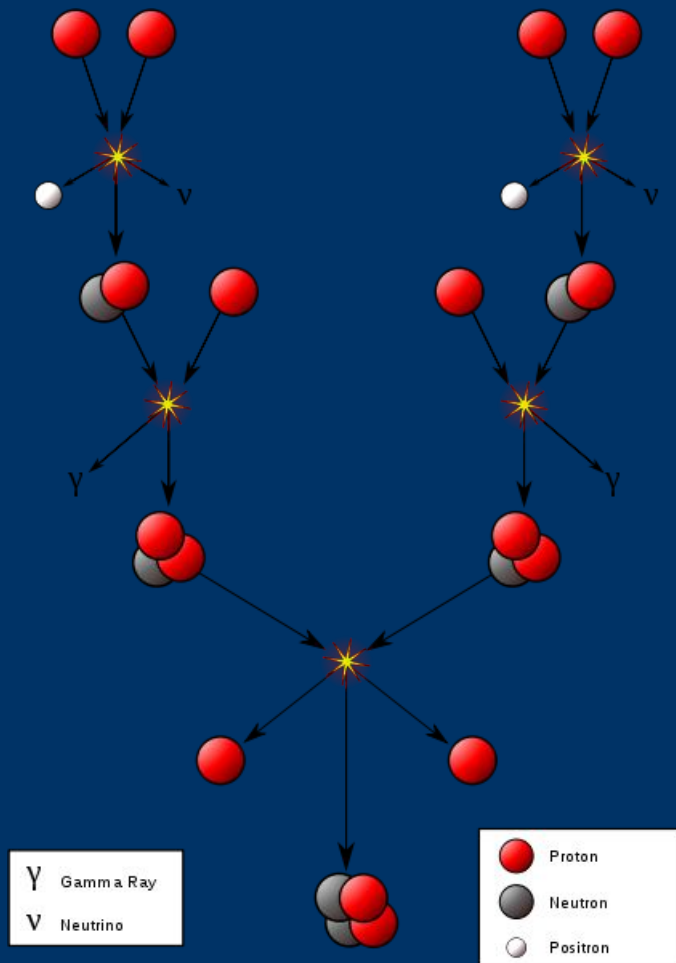
Une seconde plus tard, la température est tombée à 10^{10} K , et il ne reste plus qu'un seul neutron pour trois protons. La seule façon pour les neutrons restants de survivre serait de s'incorporer avec des protons dans des noyaux énergétiquement stables comme le deutérium (1 proton + 1 neutron) ou l'hélium 4 (2 protons + 2 neutrons).

À $T = 10^{10} \text{ K}$, la température est suffisamment basse pour permettre l'existence de noyaux d'hélium 4, mais la probabilité de formation spontanée d'un noyau composé de quatre particules à partir de particules dis-

persées est pratiquement nulle. Comme nous l'avons vu à la section 8.4, la formation de l'hélium 4 procède par étapes: formation d'un noyau de deutérium, qui entrera ensuite en collision avec un proton pour former de l'hélium 3 (2 protons + 1 neutron) qui, à la suite d'autres collisions, donnera finalement de l'hélium 4. Or le noyau de deutérium est beaucoup moins «solide» (beaucoup moins stable énergétiquement) que le noyau d'hélium 4; à $T = 10^{10} \text{ K}$, la température est encore trop élevée pour permettre son existence. Les neutrons continuent donc de se faire «manger» par les positons en vertu de la réaction mentionnée à l'étape précédente.

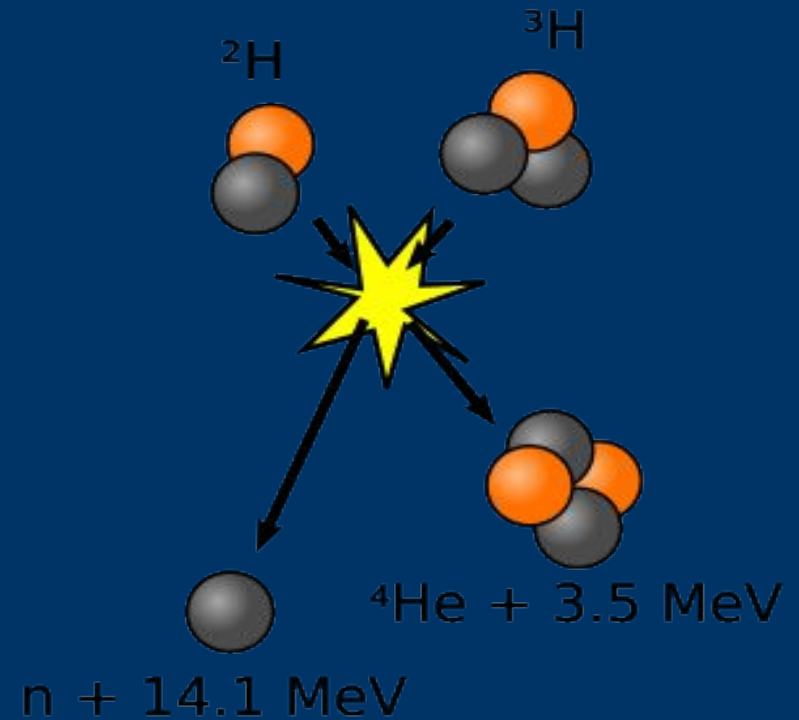
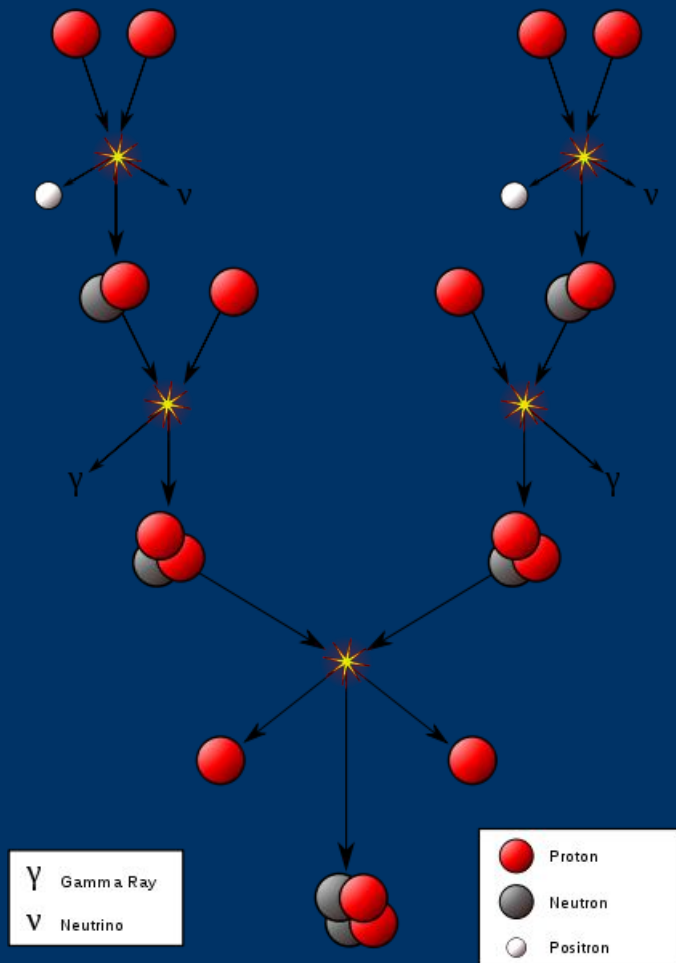
L'évolution de L'univers primordial

Exemple de réactions \rightarrow ${}^4\text{He}$



L'évolution de L'univers primordial

Exemple de réactions \rightarrow ${}^4\text{He}$



Energie de liaison dans le noyau

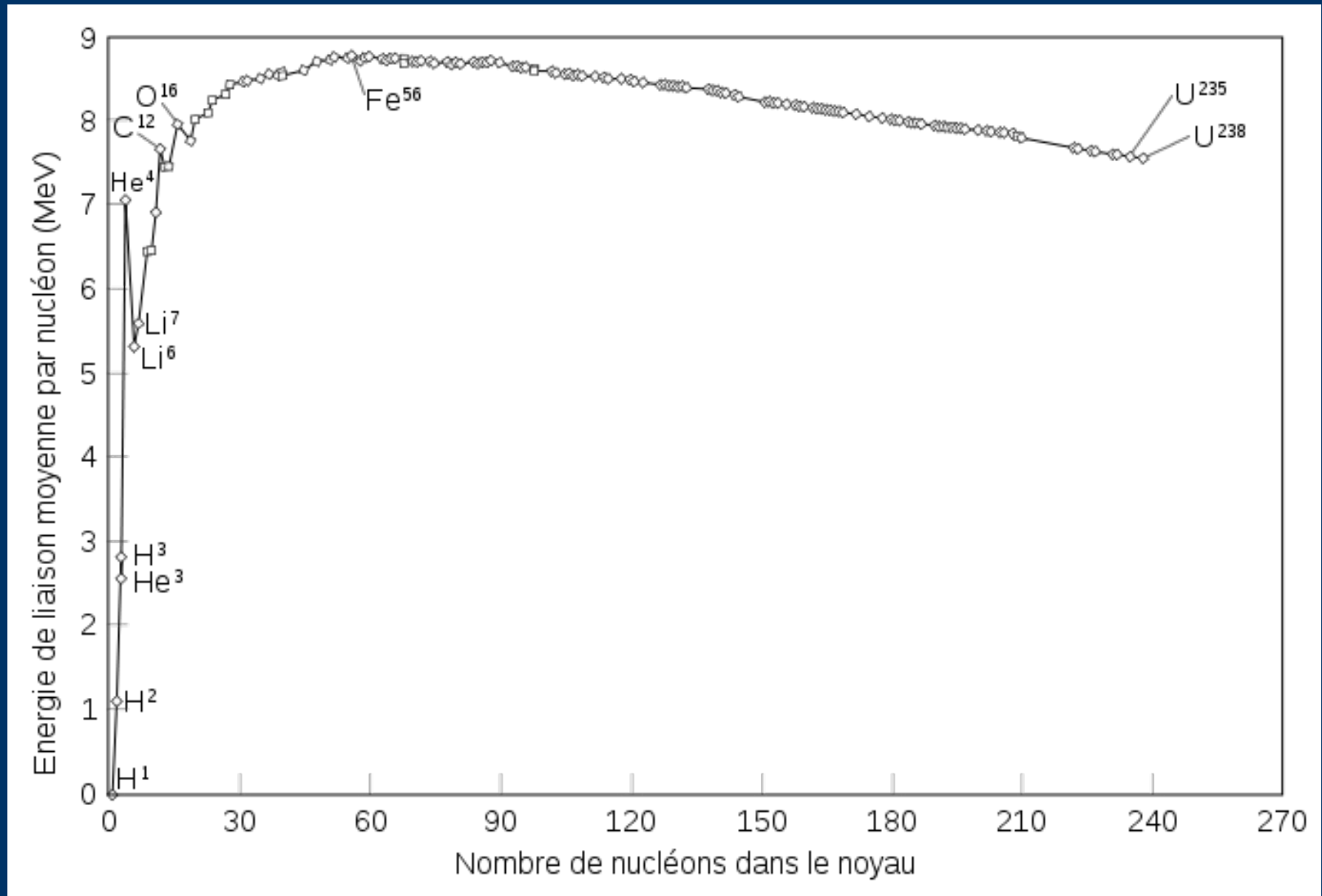


tableau-periodique.fr

PERIODE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	Hydrogène 1 H																	Hélium 2 He
2	Lithium 3 Li	Béryllium 4 Be											Bore 5 B	Carbone 6 C	Azote 7 N	Oxygène 8 O	Fluor 9 F	Néon 10 Ne
3	Sodium 11 Na	Magnésium 12 Mg											Aluminium 13 Al	Silicium 14 Si	Phosphore 15 P	Soufre 16 S	Chlore 17 Cl	Argon 18 Ar
4	Potassium 19 K	Calcium 20 Ca	Scandium 21 Sc	Titane 22 Ti	Vanadium 23 V	Chrome 24 Cr	Manganèse 25 Mn	Fer 26 Fe	Cobalt 27 Co	Nickel 28 Ni	Cuivre 29 Cu	Zinc 30 Zn	Gallium 31 Ga	Germanium 32 Ge	Arsenic 33 As	Sélénium 34 Se	Brome 35 Br	Krypton 36 Kr
5	Rubidium 37 Rb	Strontium 38 Sr	Yttrium 39 Y	Zirconium 40 Zr	Niobium 41 Nb	Molybdène 42 Mo	Technétium 43 Tc	Ruthénium 44 Ru	Rhodium 45 Rh	Palladium 46 Pd	Argent 47 Ag	Cadmium 48 Cd	Indium 49 In	Étain 50 Sn	Antimoine 51 Sb	Tellure 52 Te	Iode 53 I	Xénon 54 Xe
6	Césium 55 Cs	Baryum 56 Ba		Hafnium 72 Hf	Tantale 73 Ta	Tungstène 74 W	Rhénium 75 Re	Osmium 76 Os	Iridium 77 Ir	Platine 78 Pt	Or 79 Au	Mercur 80 Hg	Thallium 81 Tl	Plomb 82 Pb	Bismuth 83 Bi	Polonium 84 Po	Astate 85 At	Radon 86 Rn
7	Francium 87 Fr	Radium 88 Ra		Rutherfordium 104 Rf	Dubnium 105 Db	Seaborgium 106 Sg	Bohrium 107 Bh	Hassium 108 Hs	Meitnerium 109 Mt	Darmstadtium 110 Ds	Roentgenium 111 Rg	Copernicium 112 Cn	Ununtrium 113 Uut	Ununquadium 114 Uuq	Ununpentium 115 Uup	Ununhexium 116 Uuh	Ununseptium 117 Uus	Ununoctium 118 Uuo
				Lanthane 57 La	Cérium 58 Ce	Praséodyme 59 Pr	Néodyme 60 Nd	Prométhium 61 Pm	Samarium 62 Sm	Europium 63 Eu	Gadolinium 64 Gd	Terbium 65 Tb	Dysprosium 66 Dy	Holmium 67 Ho	Erbium 68 Er	Thulium 69 Tm	Ytterbium 70 Yb	Lutécium 71 Lu
				Actinium 89 Ac	Thorium 90 Th	Protactinium 91 Pa	Uranium 92 U	Neptunium 93 Np	Plutonium 94 Pu	Américium 95 Am	Curium 96 Cm	Berkélium 97 Bk	Californium 98 Cf	Einsteinium 99 Es	Fermium 100 Fm	Mendélévium 101 Md	Nobélium 102 No	Lawrencium 103 Lr

Légende:

- Non-métaux
- Métaux alcalins
- Métaux alcalino-terreux
- Métaux de transition
- Métaux pauvres
- Métalloïdes
- Halogènes
- Gaz nobles
- Lanthanides
- Actinides

L'évolution de L'univers primordial

$t = 100 \text{ s}$ $T = 10^9 \text{ K}$ $\rho = 10^5 \text{ kg/m}^3$

**Le deutérium devient stable:
les neutrons sont sauvés**



Lorsque la température a suffisamment diminué pour atteindre environ 100 fois la température actuelle du centre du Soleil, le deutérium devient stable. En quelques dizaines de secondes, tous les neutrons survivants sont incorporés dans des noyaux de deutérium, qui à leur tour fusionnent pour former le plus stable de tous les noyaux légers, l'hélium 4.

Au moment où le deutérium devient stable, il ne reste qu'un neutron pour sept protons, soit 2 neutrons pour 14 protons. Les 2 neutrons se combinent avec 2 protons pour former un noyau d'hélium 4, et il reste 12 protons, soit 12 noyaux d'hydrogène. On obtient donc un atome d'hélium 4 pour 12 d'hydrogène, soit (puisque la masse d'un atome d'hélium 4 représente celle de 4 atomes d'hydrogène) une proportion de 4 unités de masse d'hélium 4 pour 12 d'hydrogène. L'hélium représente donc $4/(4 + 12) = 25 \%$ de la masse totale de l'Univers, ce qui correspond à peu près aux observations actuelles. (L'hélium produit depuis par les étoiles ne représente en effet qu'une fraction négligeable de la masse totale d'hélium présente dans l'Univers.) Ce scénario explique donc les taux d'hélium 4 observés: cette concordance est une des meilleures confirmations de la théorie du Big Bang.

On remarquera que la réaction de base de la chaîne proton-proton (section 8.4), $\text{proton} + \text{proton} \rightarrow \text{He}^2 \rightarrow \text{deutérium}$ (par le processus β) joue un rôle négligeable dans la nucléosynthèse primordiale, par rapport à la réaction directe $\text{proton} + \text{neutron} \rightarrow \text{deutérium}$.

Et si les neutrons n'avaient pas été sauvés ?

- La physique et la chimie auraient été bien différentes car par exemple il n'existe pas d'isotope stable du carbone (de nombre atomique 6, c'est à dire comportant 6 protons) sans neutrons. L'isotope le plus stable est le carbone 12 (6 protons + 6 neutrons).
- Itou pour l'oxygène, l'azote etc.. qui avec l'hydrogène sont les constituants de la chimie de la vie, du moins telle qu'on la connaît !!!

L'évolution de L'univers primordial

$t = 12$ jours $T = 10^7$ K $\rho = 0,001$ kg/m³

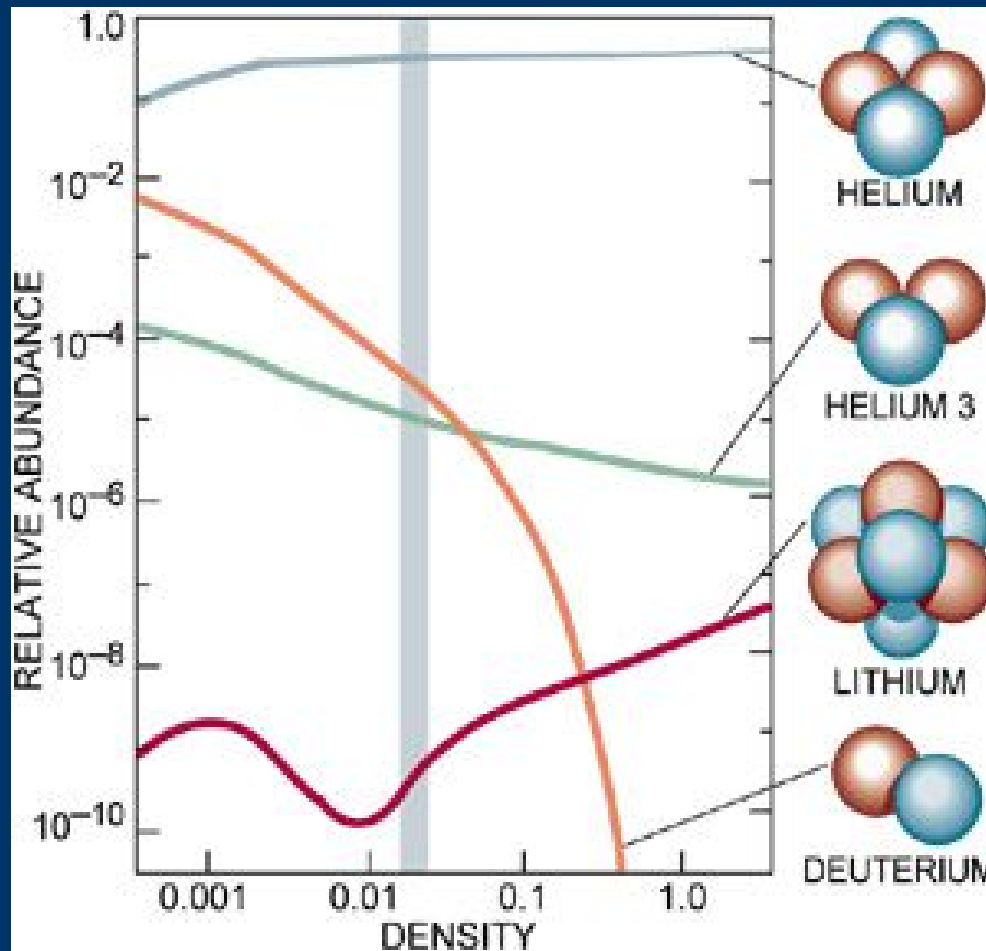
**L'hélium reste coincé:
les noyaux lourds devront attendre**

Douze jours après cette orgie de fusion nucléaire qui a sauvé les neutrons d'une mort certaine, la température est égale à celle que l'on rencontre au cœur du

Soleil aujourd'hui, ce qui est assez élevé pour que des réactions de fusion nucléaire continuent à avoir lieu. Toutefois, il n'y aura pratiquement pas de fusion nucléaire primordiale après l'hélium 4. Le problème, c'est que la réaction hélium 4 + proton donne un noyau dont le nombre de masse est 5, tandis que la réaction hélium 4 + hélium 4 donne un noyau de masse 8; or, il n'y a aucun noyau stable de masse 5 ou 8.

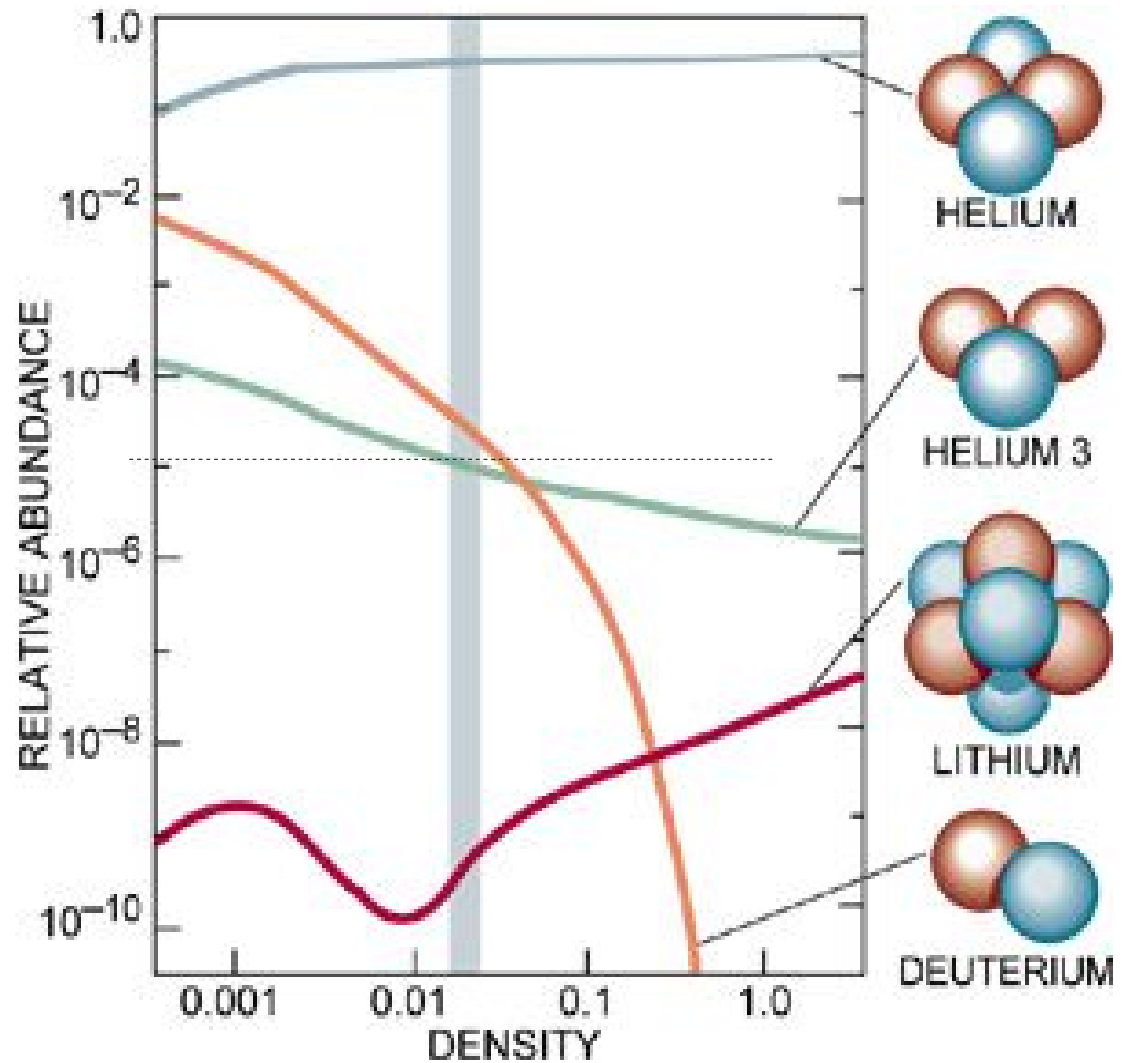
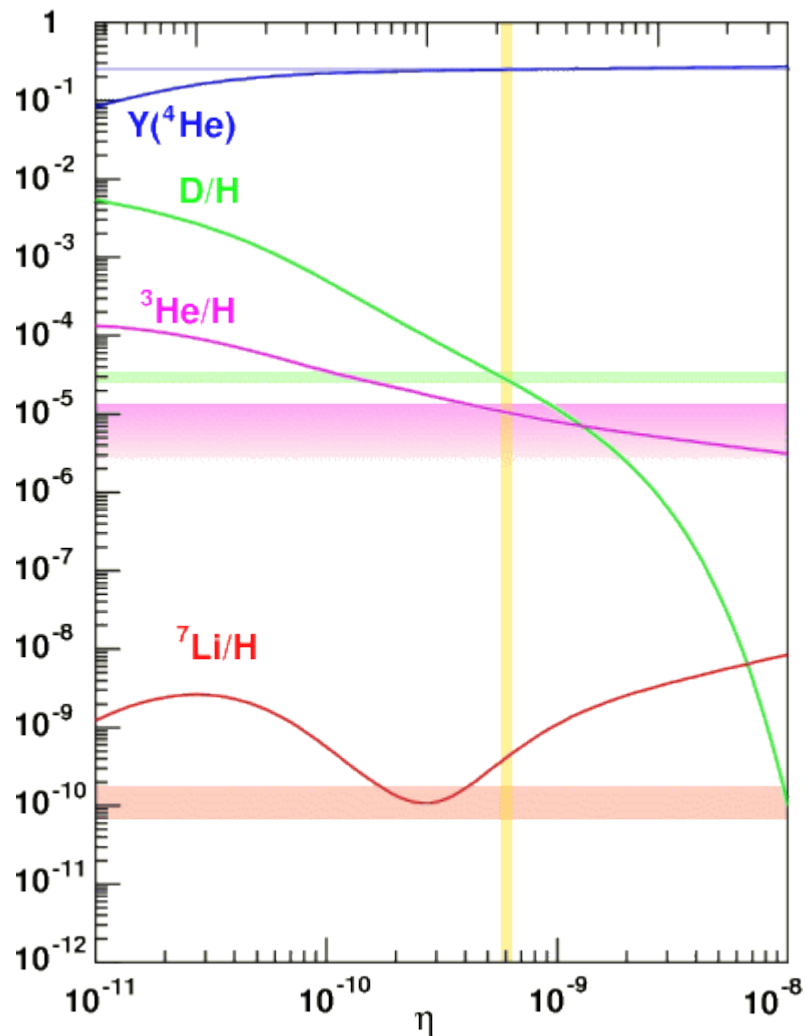
Nous avons vu à la section 8.4 qu'il est possible de vaincre le « mur de l'hélium » au cœur des étoiles grâce à la réaction triple alpha. Cette réaction, qui ouvre la porte à la formation de tous les noyaux plus lourds que l'hélium, est toutefois assez lente et exige des conditions déterminées de température et de densité. Elle est irréalisable aux densités relativement faibles et dans l'intervalle de quelques jours qui caractérisent le début de l'Univers. Ainsi, seuls quelques atomes de carbone isolés verront le jour. En revanche, l'hélium 4 pourra réagir avec quelques noyaux d'hélium 3 survivants pour former du lithium (3 protons + 4 neutrons). La fusion nucléaire primordiale s'arrêtera là.

L'évolution de L'univers primordial



Prédiction par la théorie du Big-Bang de l'abondance des éléments primordiaux synthétisés en fonction de la densité relative (en $\Omega_B \cdot h^2$) de Baryons (la zone grisée correspond à $\Omega_B = 0,04$ environ pour $h = 0,73$)

Abondances en fonctions du ratio baryons/photons



L'évolution de L'univers primordial

Entre 1950 et 1960 la théorie en vigueur pour la formation des éléments chimiques dans l'Univers résultait du travail de G.Burbidge, M.Burbidge, Fowler, et Hoyle.

La théorie nommée BBFH postulait que tous les éléments étaient produits soit au cœur des étoiles ou lors de l'explosion de supernova. Si cette théorie connaissait un succès relatif, elle se révéla muette sur certains aspects importants.

Par exemple, la synthèse de l'hélium par les étoiles et supernova ne pouvait générer qu'une quantité d'hélium bien plus faible que celle observée (25% en masse).

De même pour le deutérium qui ne peut pas être produit par des réactions dans les étoiles puisqu'au contraire il y est détruit !

En conséquence la théorie BBFH était incapable de prédire ces résultats.

Grâce aux travaux d'investigation de George Gamow et de ses collaborateurs, il existe une théorie satisfaisante qui rend compte de la production des éléments légers dans l'univers primordial. Dans l'univers primordial, la température était si élevée que la matière était totalement ionisée et dissociée. En gros, trois minutes après le Big Bang la température phénoménale initiale de 10^{32} Kelvin de l'Univers était tombée à approximativement 10^9 Kelvin. A cette température, la nucléosynthèse, en fait la production des éléments légers peut se produire. En peu de temps, protons et neutrons entrent en collision pour produire du Deuterium (un proton lié à un neutron). La plupart du Deuterium entre en collision avec d'autres protons et neutrons et produisent de l'Helium et un peu de Tritium (un proton et deux neutrons). Un peu de Lithium 7 est également produit par la coalescence d'un noyau de Tritium et de deux de Deuterium.

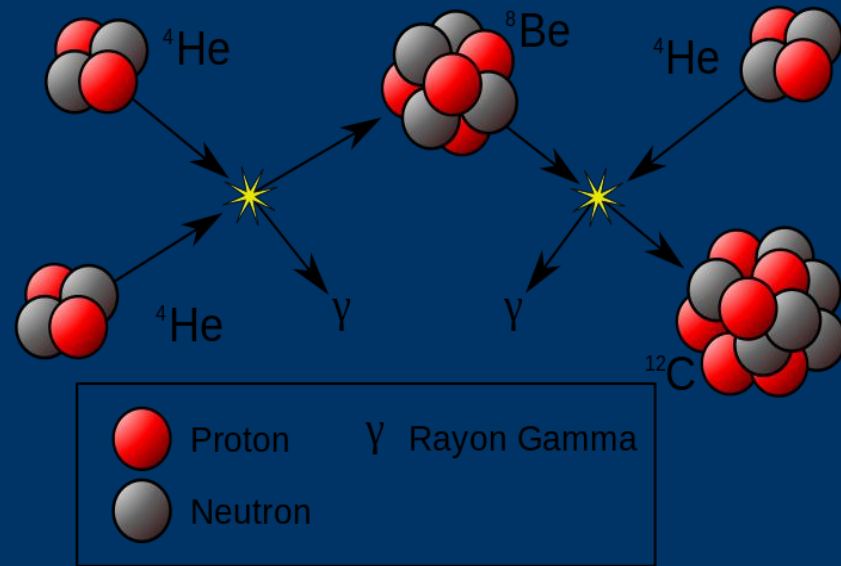
La théorie Big Bang prédit que la nucléosynthèse produit environ 25% de la masse de l'Univers sous forme d'Helium. Elle prédit également environ 0.01% de Deuterium, et de faibles quantités de Lithium. Le point important est que cette prédiction dépend fortement de la densité de baryons (neutrons et protons) au moment de la nucléosynthèse.

De plus une valeur de cette densité de baryons peut expliquer toutes les abondances d'un coup. En termes de densité critique de matière, la densité de baryons requise est de quelques % (La valeur exacte dépend de la valeur de la constante de Hubble). Cette valeur relativement basse implique que la matière noire ne devrait pas, du moins totalement, être baryonique et que nous devons donc considérer l'existence de candidats comme les particules « exotiques ».

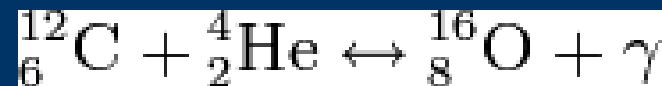
Dans tous les cas l'abondance de Helium est supérieure à 23% de la masse, ce qui est une preuve sérieuse que l'Univers est passé par une phase très chaude. C'est une des pierres angulaire du modèle du Big Bang chaud. Ceci est confirmé par les abondances des autres éléments légers pour une densité de baryon particulière et indépendamment par la mesure de la densité des baryons à partir des anisotropies du RFC.

Ce sont ces éléments, qui justifient le modèle résultant du Big Bang, qui prédit ces phénomènes, que nous avons exposé.

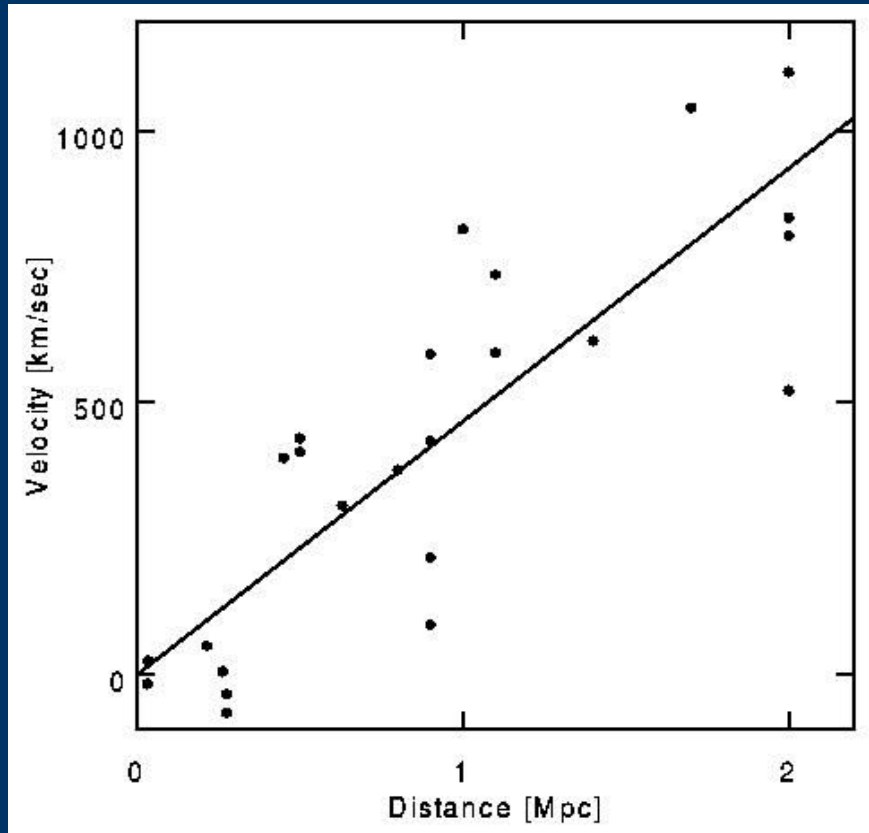
Au-delà de l'hélium, réaction triple alpha



La réaction (2) a posé un problème à première vue insoluble. En effet on trouve une grande quantité de carbone ${}^{12}\text{C}$ dans l'Univers. Mais des calculs théoriques ont montré que le béryllium ${}^8\text{Be}$ avait une demi-vie de l'ordre de 10^{-16} secondes. Cela signifie qu'il est hautement improbable que l'on puisse fabriquer du ${}^{12}\text{C}$ en quantités importantes à partir du ${}^8\text{Be}$. Pour tenter de résoudre ce problème, Fred Hoyle avait suggéré que la réaction entre le ${}^4\text{He}$ et le ${}^8\text{Be}$ devait être en résonance avec un niveau d'énergie inconnu du ${}^{12}\text{C}$. Si ce niveau résonnant existe, alors, la section efficace de la réaction numéro 2 sera considérablement augmentée, la rendant par là même possible. Quelques années après cette prédiction, des mesures en laboratoire ont montré qu'effectivement, cet état excité existait. Ce carbone disponible va pouvoir réagir lui aussi avec les atomes d'hélium présents selon la réaction suivante:



Observations critiques



En 1929 Hubble déclara que les vitesses radiales des galaxies étaient proportionnelles à leur distance. Le décalage spectral (vers le rouge) est une mesure de sa vitesse radiale de fuite et peut être mesuré à l'aide d'un spectromètre pour calculer le décalage Doppler. L'abaque ci contre reprend les données de Hubble en 1929 : La pente de la ligne interpolée qui est de 464 km/sec/Mpc , est appelée constante de Hubble constant, H_0 .

Comme les kilomètres et les Mégaparsecs ($1 \text{ Mpc} = 3,086 \cdot 10^{24} \text{ cm}$) sont des unités de distance, les unités simplifiées de H_0 sont $1/\text{temps}$, et la conversion est donnée par: $1/H_0 = (978 \text{ Giga-années})/(H_0 \text{ en km/sec/Mpc})$

Observations critiques

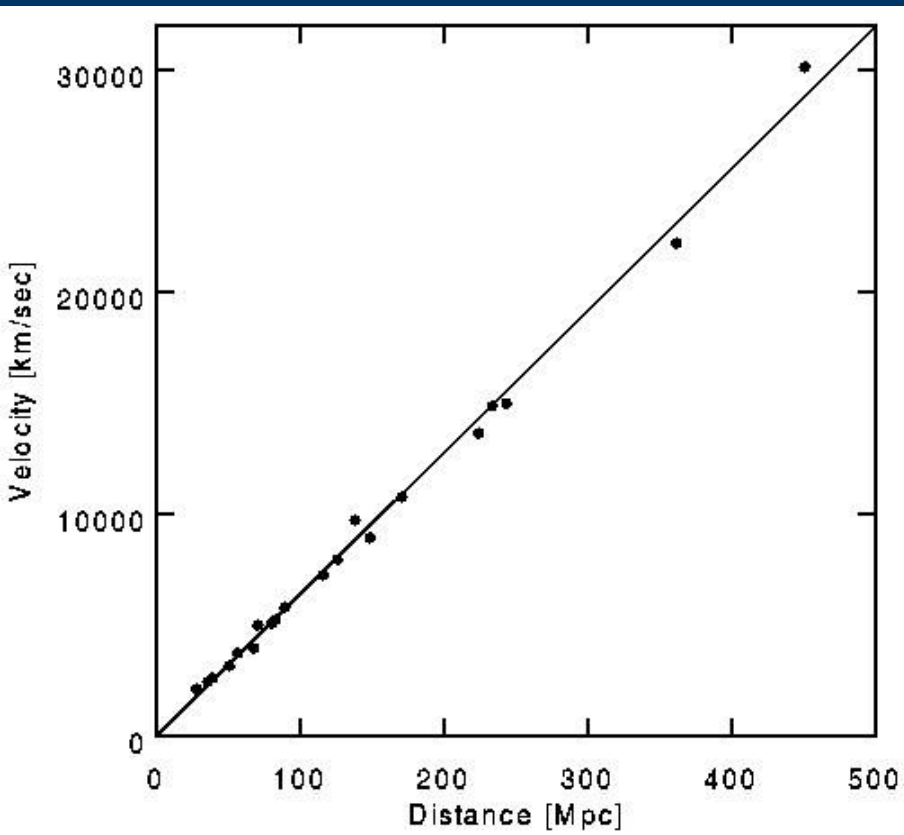
Donc l'inverse de la valeur de la constante de Hubble est environ de $2 Ga$. Ceci est censé être l'âge de l'Univers et nous savons (et cela était connu en 1929) que l'âge de la terre est supérieur à 2 milliards d'années. Cette valeur de H_0 , pour ce modèle cosmologique, fut accueillie avec le plus grand scepticisme et motiva le développement du modèle d'état stationnaire

Cependant des travaux ultérieurs montrèrent que Hubble avait confondu deux types de Céphéides (étoiles variables) utilisées pour étalonner les distances et aussi que ce que Hubble croyait avoir identifié à des étoiles brillantes dans des galaxies lointaines étaient en fait des régions $H II$.

Ces corrections conduisirent à diminuer la valeur de la constante de Hubble : Il y a actuellement principalement deux groupes qui utilisent les Céphéides:

Observations critiques

L'équipe (**HST Distance Scale Key Project**) (Freedman, Kennicutt, Mould et al) a obtenu 72 km/sec/Mpc , tandis que le groupe Sandage, utilisant aussi les observations du HST des Céphéides pour étalonner les supernovae de Type Ia, a obtenu $57 \pm 4 \text{ km/sec/Mpc}$. D'autres méthodes pour déterminer l'échelle des distances s'appuient sur le retard temporel des lentilles gravitationnelles et l'effet Sunyaev-Zeldovich dans les amas distants : ces méthodes sont indépendantes de l'étalonnage par les Céphéides et donnent des valeurs cohérentes avec les moyennes de celles obtenues par les deux autres groupes utilisant le HST: $65 \pm 8 \text{ km/sec/Mpc}$. Ces résultats sont cohérents avec la combinaison de ceux résultants de l'anisotropie du RFC et de l'expansion accélérée qui donne $71 \pm 3,5 \text{ km/sec/Mpc}$. De cette valeur de H_0 on déduit un âge $1/H_0$ de 14 Ga , alors que l'âge effectif déduit du modèle donne $13,7 \pm 0,2 \text{ Ga}$. WMAP (2008): $H_0 = 70,1 \text{ km/s par Mpc} \pm 1,3$, âge de l'Univers $13,73 \cdot 10^9$ années $\pm 0,12$



Les données de Hubble en 1929 étaient en fait imprécises, du fait que les galaxies ont aussi des vitesses propres "erratiques" de plusieurs centaines de km/s alors que ses données n'allaient pas au delà de *1200 km/sec*. Ceci a conduit certains à proposer une loi de type quadratique de décalage vers le rouge mais les données représentées ci contre sur les supernovae de Type Ia par Riess, Press and Kirshner (1996) portant au delà de *30000 km/sec* nous offrent une confirmation spectaculaire de la loi de Hubble. $v = dD/dt = H * D$.

La ligne interpolée dans ce graphique correspond à *64 km/sec/Mpc*.

Observations critiques

Comme nous mesurons la vitesse radiale en utilisant l'effet Doppler cela est souvent appelé le décalage spectral (vers le rouge) *redshift*.

Ce décalage spectral z est défini tel que :

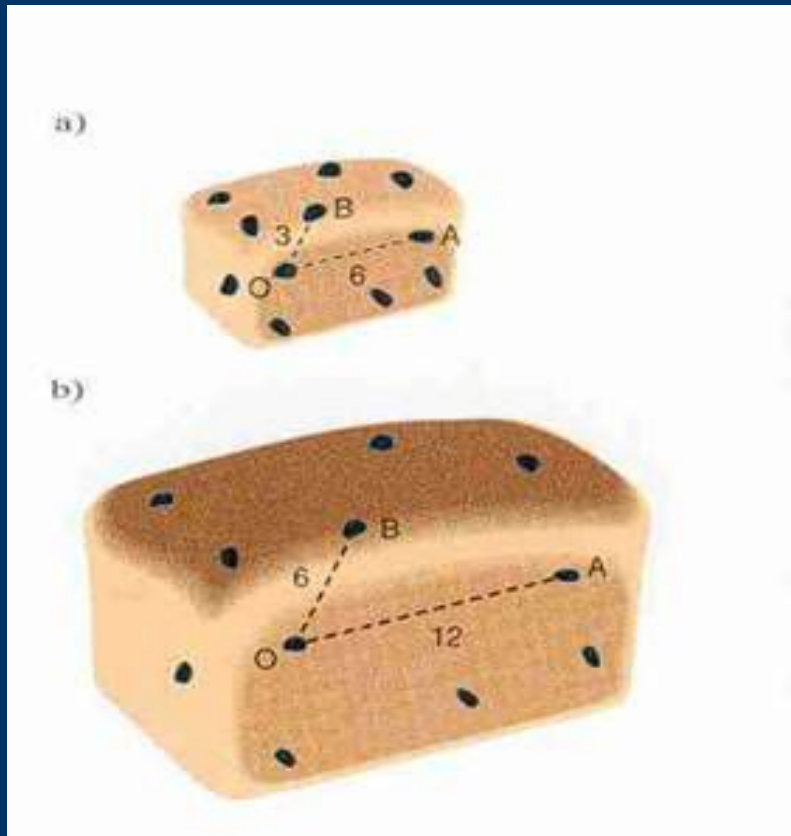
$$1 + z = \lambda(\text{observé})/\lambda(\text{émis})$$

où λ est la longueur d'onde caractéristique d'une raie ou d'un motif dans le spectre d'un objet. La relativité restreinte nous dit que z est donné par: $1 + z = [((1+v/c)/(1-v/c))]^{1/2}$ alors $v = cz + \dots$

Mais les corrections d'ordre supérieur (les) dépendent de la relativité générale et du modèle particulier d'univers.

L'indice "0" dans H_0 indique la valeur actuelle de cette variable dépendant du temps. Comme $1/H_0$ est approximativement l'âge de l'Univers, la valeur de H dépend du temps. Une autre variable d'indice 0 est t_0 , l'âge de l'Univers.

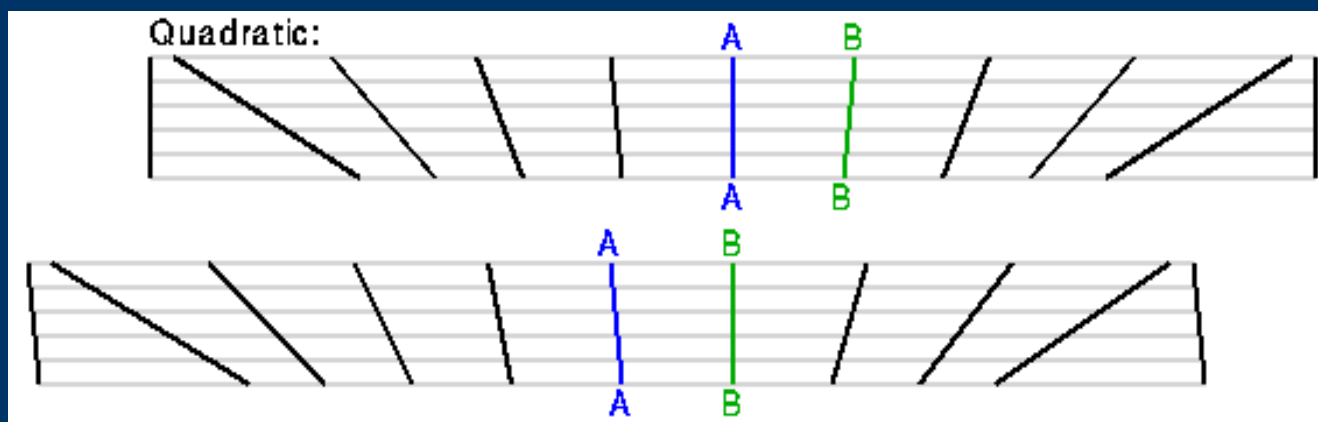
Observations critiques



La relation linéaire entre z et la distance est compatible avec le principe Copernicien : nous ne sommes pas dans une position privilégiée dans l'Univers. Tous les points s'éloignent les uns des autres comme le montre l'image du pudding (à gauche).

La vitesse de récession est symétrique: Si A voit B s'éloigner (observe un rayonnement émis par B décalé vers le rouge), alors B voit A s'éloigner (observe un rayonnement émis par A également décalé vers le rouge).

Observations critiques



Une loi quadratique $v(sq) = D^2$ par contre se transforme en une loi non quadratique anisotropique quand on change de point de vue comme montré ci dessous. Donc si nous supposons une loi quadratique vitesse/distance [par rapport à nous], un observateur dans une autre Galaxie va constater une loi différente qui va être différente dans les différentes directions [non isotrope]. Donc si nous voyons une loi quadratique, alors B verra des vitesses radiales plus élevées dans une direction que dans l'autre [+ élevé vers la droite sur la figure ci dessus]. Ceci conduit à un point privilégié dans l'Univers, un "centre", seul point d'où on voit une loi de récession isotrope dans toutes les directions. Comme nous constatons une loi de Hubble isotrope soit nous sommes au centre de l'Univers, ce qui est anti- Copernicien soit la loi est linéaire, seule possibilité pour être compatible avec l'homogénéité et l'isotropie de l'Univers.

Observations critiques

La loi de Hubble génère une expansion homologue qui ne change pas la forme des objets alors que les autres lois possibles liant vitesse et distance conduisent à des distorsions pendant l'expansion.

La figure ci dessous montre le résultat de l'expansion d'un objet d'un facteur 2 en utilisant la loi de Hubble $v = H * D$ au milieu, une loi à vitesse constante $v = G * D^0$ à gauche et une loi quadratique $v = I * D^2$ à droite.



Observations critiques

La loi de Hubble définit un référentiel privilégié en tout point de l'Univers. Un observateur en mouvement propre par rapport au "flot de Hubble" va observer des décalages vers le bleu dans la direction du mouvement et vers le rouge dans l'autre au lieu d'un décalage isotrope vers le rouge des galaxies.

Nous pouvons donc observer notre mouvement par rapport au flot de Hubble, qui caractérise notre mouvement relatif par rapport à l'Univers observable.

Un observateur co-mobile est au repos par rapport à ce référentiel privilégié. Notre système solaire n'est pas co-mobile, nous avons une vitesse relative de 370 km/sec par rapport à l'univers observable. Le groupe local de galaxies, dans lequel la voie lactée est incluse laisse apparaître un mouvement relatif de 600 km/sec par rapport à l'Univers observable.

Observations critiques

Hubble mesura aussi le nombre de galaxies et leurs luminosités dans les différentes directions du ciel.

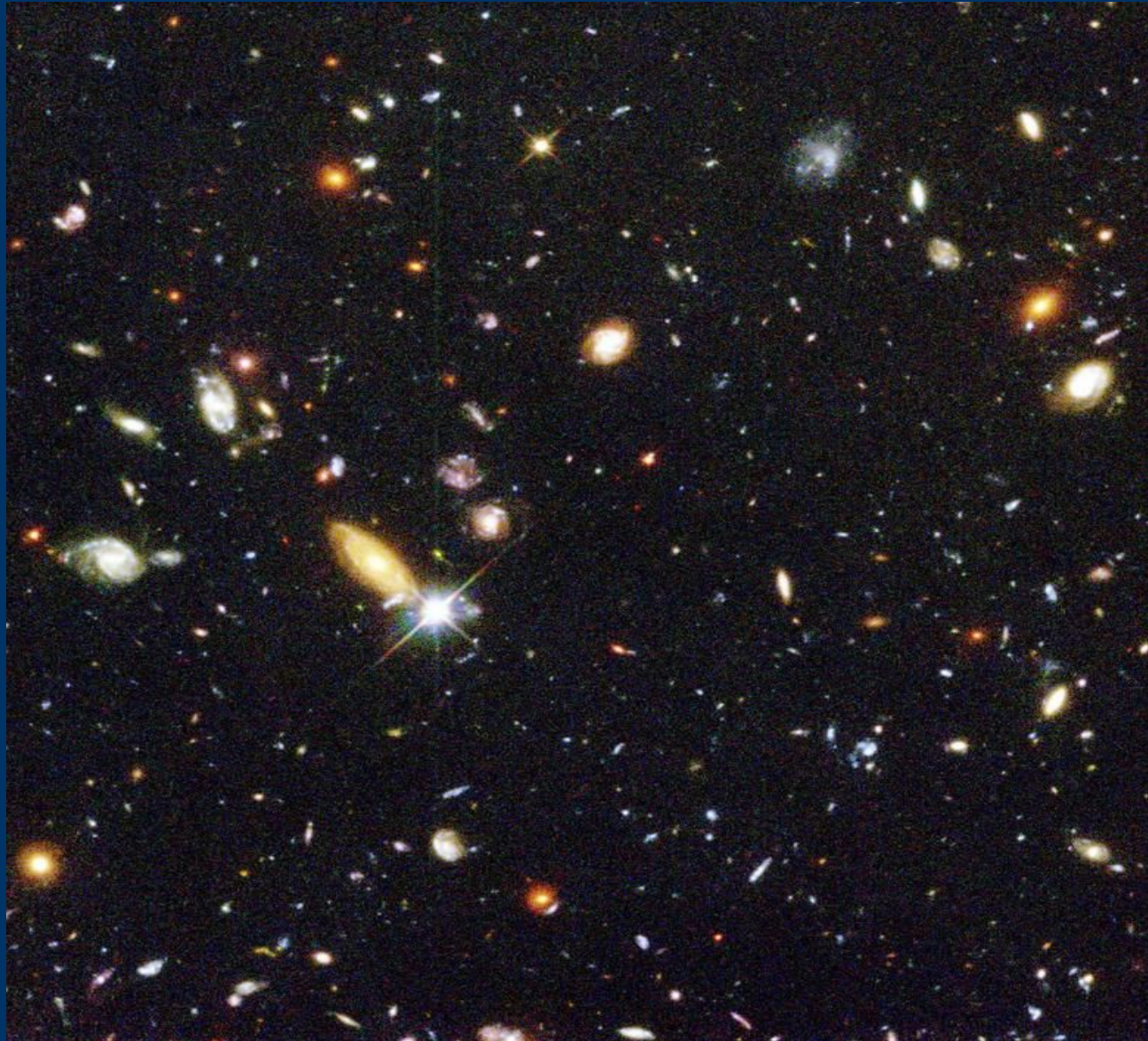
Il trouva environ le même nombre de galaxies peu brillantes dans toutes les directions , même s'il y a excès important de galaxies brillantes dans la partie nord du ciel.

Quand une distribution est la même dans toutes les directions, elle est *isotrope*.

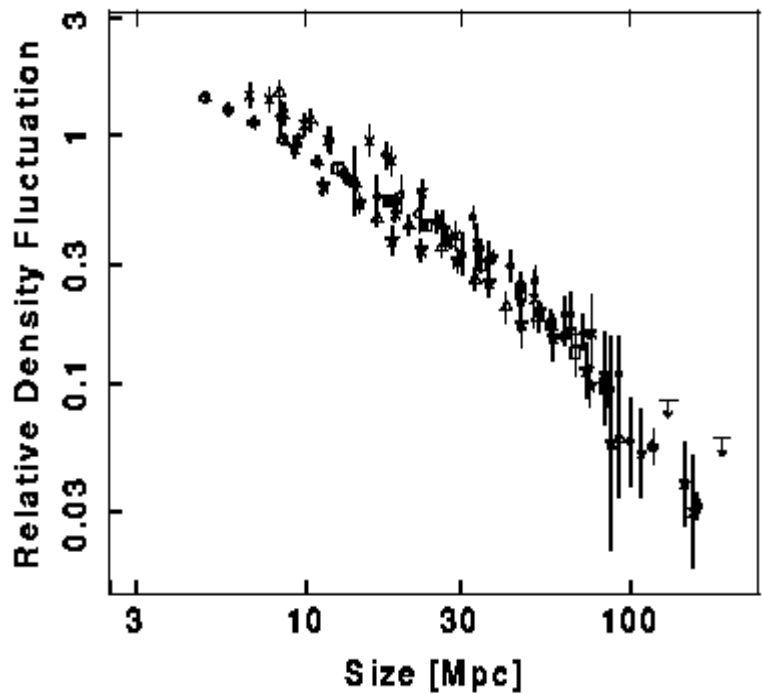
Ensuite il observa les galaxies de luminosité apparente supérieure à $F/4$, et il en compta 8 fois plus que de galaxies de luminosité apparente supérieure à F .

Comme une luminosité divisée par 4 correspond à une distance double , le volume correspondant est 8 fois plus grand, son observation confirme donc *l'homogénéité* approchée (densité uniforme) de l'Univers à grande échelle .

Champ profond: Hubble Space Telescope



Observations critiques



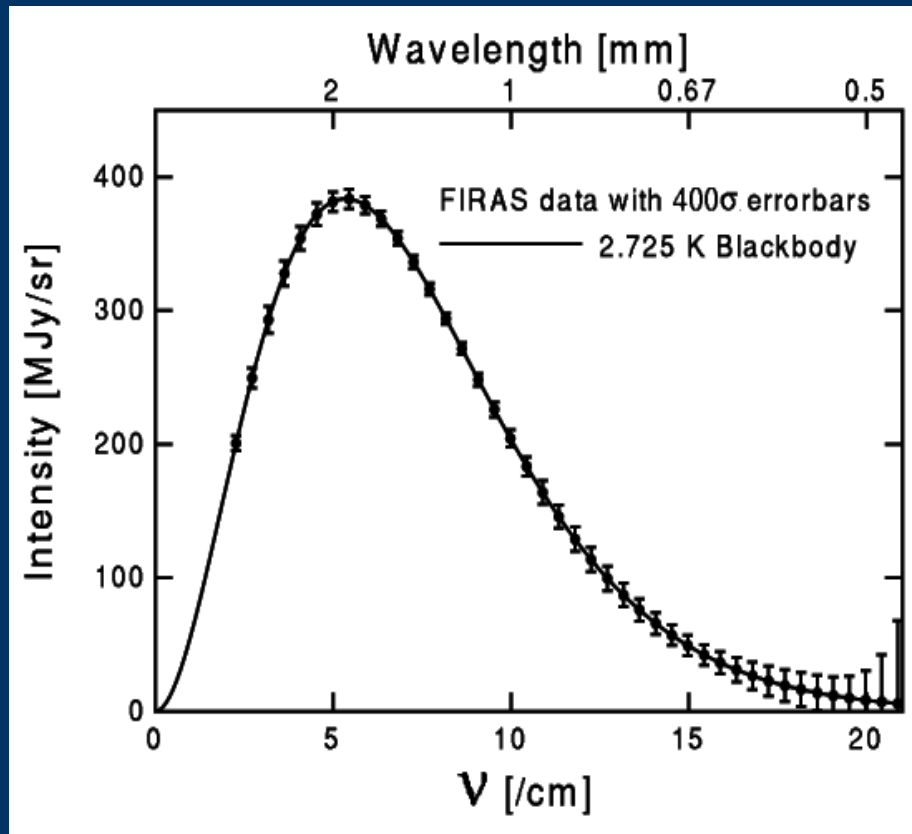
Bien sûr l'Univers n'est que approximativement homogène et isotrope même à grande échelle, car il y a des régions notoirement plus denses comme la Terre. Mais il peut être statistiquement homogène et isotrope comme le montre un champ simulé de galaxies après lissage des détails.

Peacock and Dodds (1994, MNRAS, 267, 1020) ont examiné les proportions de fluctuation de densité dans l'Univers proche, fonction du rayon de la région considérée et après passage par un filtre "haut de forme", ils ont trouvé:

Pour des régions de 100 Mpc , l'Univers est homogène à quelques % près.

Des études sur le décalage spectral de régions très grandes ont confirmé cette tendance vers une homogénéité croissante lorsque l'échelle s'accroît, même si la distribution des galaxies proches sont très inhomogènes (Amas de Virgo, ...).

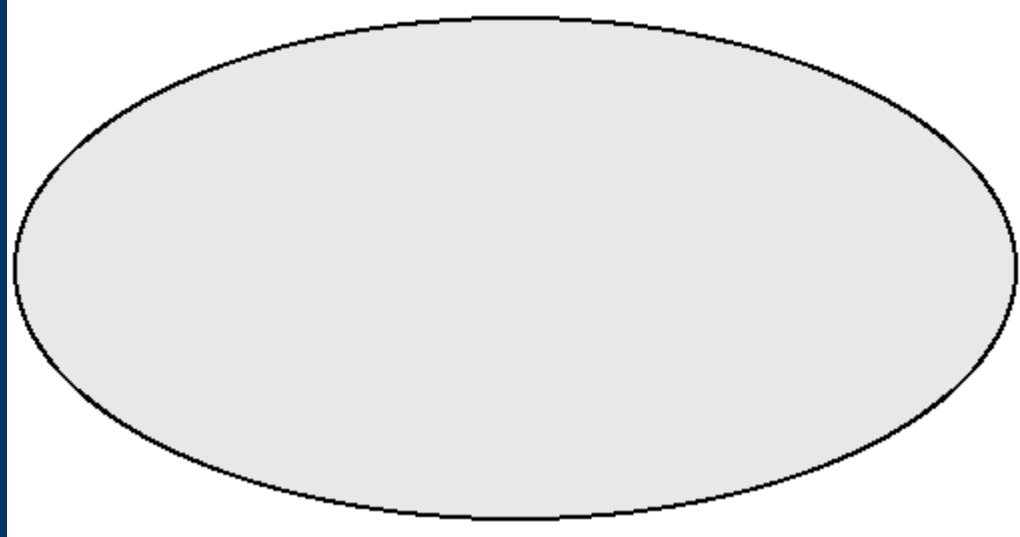
Observations critiques



L'hypothèse d'isotropie et d'homogénéité de l'Univers s'est trouvée confortée après que Penzias et Wilson eurent découvert le rayonnement de fond cosmologique (RFC) en 1965. Il ont observé un rayonnement isotrope, provenant de toutes les directions du ciel, de 7.35 cm de longueur d'onde de type "corps noir" équivalent à une température de 3.5 ± 1 degrés Kelvin à l'époque [**2,725 K selon WMAP**] [Les degrés Kelvin ont la même échelle que les degrés Celsius mais leur référence est le zéro absolu, ainsi la glace fond à 273.15 K .]

Un corps noir absorbe tous les rayonnements qu'il reçoit et a une température constante. Les caractéristiques du RFC ont été mesurées par de nombreuses expériences. Ci dessous les mesures faites l'instrument FIRAS sur le satellite COBE [confirmé et amélioré par WMAP]:

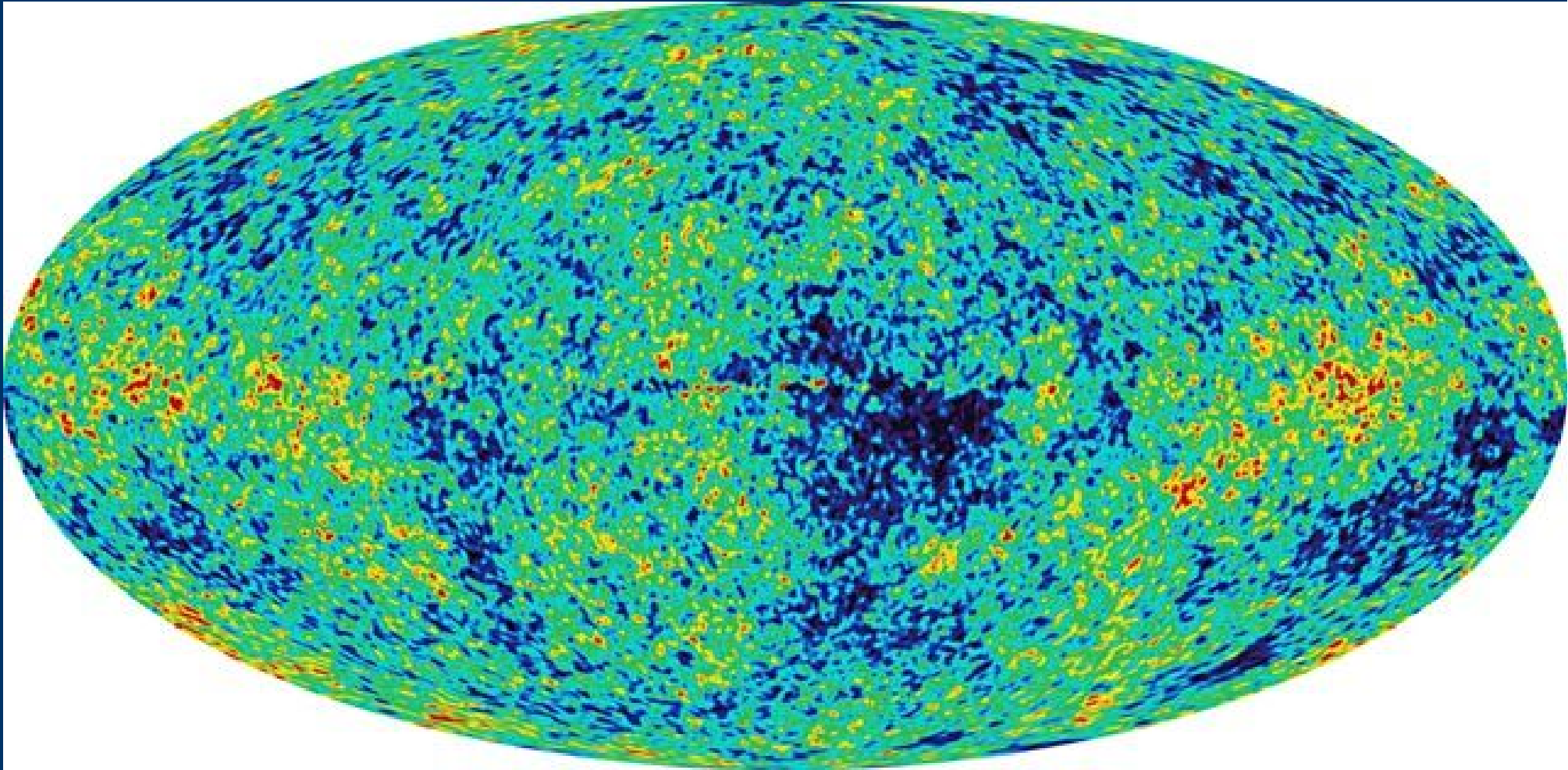
Observations critiques



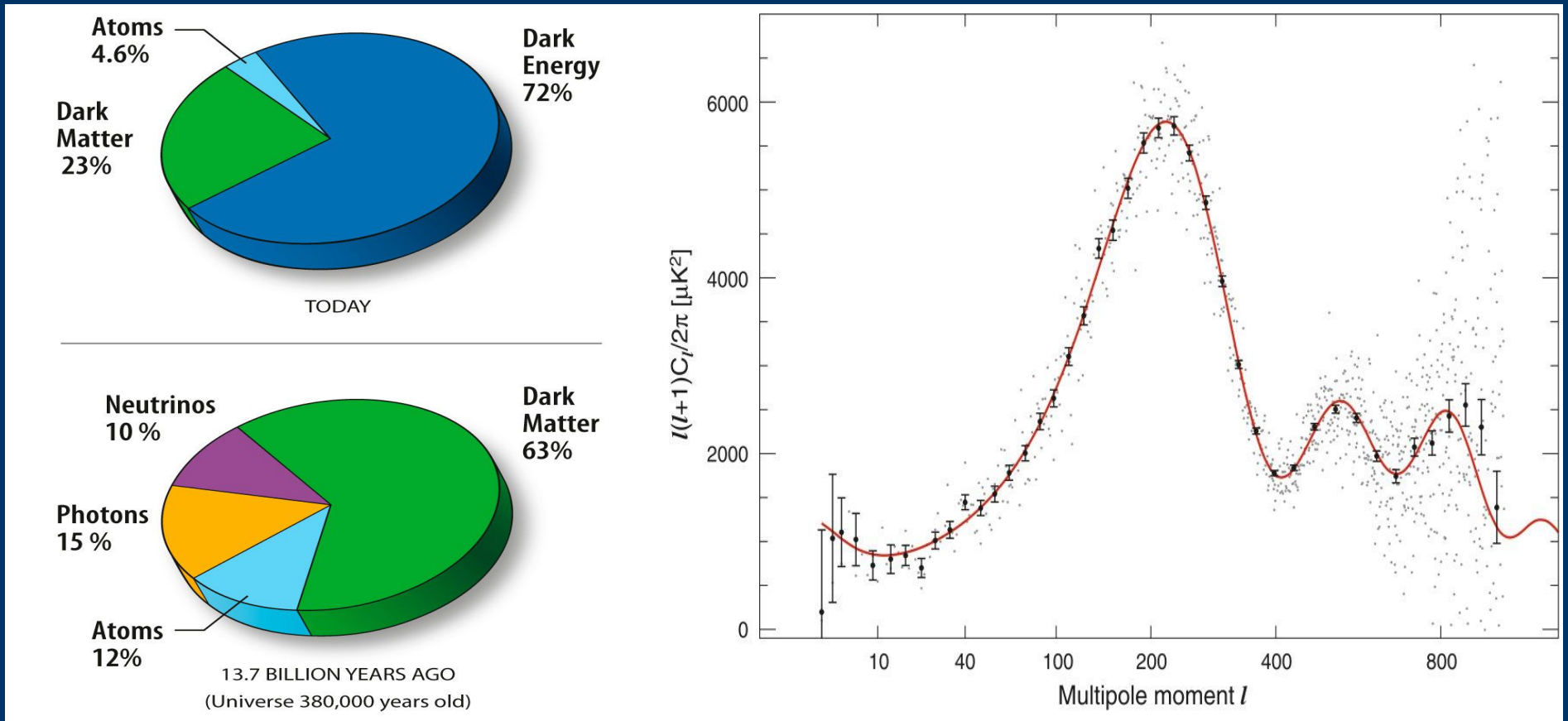
Sur l'axe des x , on représente l'inverse de la longueur d'onde en $1/[longueur\ d'onde\ en\ cm]$. Sur l'axe des y , on représente la puissance par unité de surface par unité de fréquence [dans des bandes de largeur constante], par unité d'angle solide en Méga-Janskies par stéradian. 1 *Jansky* vaut 10^{-26} Watts par mètre carré par Hertz. Les barres d'erreurs ont été dilatées d'un facteur 400, on peut ainsi voir l'excellente adéquation avec le spectre de rayonnement d'un corps noir à une température $T_o = 2.725\ K$. La température du RFC est presque la même dans tout le ciel. . La figure ci dessous montre cela avec une échelle linéaire de gris telle que $3^\circ K$ est blanc et $0^\circ K$ est noir..

Rayonnement fossile Cosmologique (WMAP)

Echelle de contraste 10^{-5}



Compléments WMAP



- A gauche décomposition du Ω total en ses différentes composantes à deux époques de l'univers.
- A droite spectre de puissance en fonction de modes.

Compléments résultats

Best-fit cosmological parameters from WMAP five-year results[5] Parameter	Symbol	Best fit (WMAP only)	Best fit (WMAP + SNe + BAO)
Hubble's constant ($\text{km}/\text{Mpc}\cdot\text{s}$)	H_0		0.701 ± 0.013
Baryonic content	$\Omega_b h^2$	0.02273 ± 0.00062	0.02265 ± 0.00059
Cold dark matter content	$\Omega_c h^2$	0.1099 ± 0.0062	0.1143 ± 0.0034
Dark energy content	Ω_Λ	0.742 ± 0.030	0.721 ± 0.015
Optical depth to reionization	τ	0.087 ± 0.017	0.084 ± 0.016
Scalar spectral index	n_s		
Running of spectral index	dn_s / dk	-0.037 ± 0.028	
Fluctuation amplitude at $8h^{-1}$ Mpc	σ_8	0.796 ± 0.036	0.817 ± 0.026
Age of the universe (Ga)	t_0	13.69 ± 0.13	13.73 ± 0.12
Total density of the universe	Ω_{tot}		1.0052 ± 0.0064
Tensor-to-scalar ration	r	<0.20	—

Conclusion

COBE du fait de sa faible résolution, ne fut pas capable de discerner des domaines suffisamment petits correspondant aux "germes" des amas ou même super amas de galaxies, mais si nous utilisons la propriété "que le spectre de puissance est indépendant d'échelle" pour extrapoler les données de COBE à des échelles plus petites, nous trouvons que les forces gravitationnelles sont suffisamment fortes pour produire les amas tels que nous les voyons, mais sous réserve que ces forces ne soient pas opposées à d'autres.

Si la matière de l'univers n'est composée que de éléments chimiques ordinaires, alors il y avait des forces importantes qui s'opposaient avant le découplage, car les électrons libres qui sont maintenant liés à des atomes se couplèrent très facilement avec les photons et étaient très efficaces pour diffuser les photons du fond Cosmologique.

Nous pouvons donc conclure que l'essentiel de la matière dans l'univers est de la "matière sombre" qui n'émet pas, n'absorbe pas, et ne diffuse pas la lumière (photons). De plus les observations des supernovae distantes ont montré que la composante principale de l'univers était de l'énergie du vide ce qui produit une expansion accélérée de l'univers. Cette conclusion étrange a été confortée par une analyse plus fine de l'anisotropie du CMB qui a été une des missions de WMAP.

L'équation d'Einstein

- Entre 1907 et fin 1915 Einstein s'est intéressé à l'application de la théorie de la relativité à la gravitation.
- Il a essentiellement procédé par analogie avec l'équation de Poisson telle qu'elle est définie en mécanique classique: $\Delta\Phi = 4\pi G\rho$
- De son intuition que la gravitation n'était pas une force mais la manifestation de la courbure de l'espace temps (ceci pour satisfaire au principe d'équivalence) il a construit la relativité générale qui est une théorie géométrique de la gravitation dont l'équation fondamentale s'écrit:

$$(\mathbf{R}_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu} \mathbf{R}) = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

- A gauche c'est un objet géométrique (le tenseur d'Einstein, constitué du tenseur de Ricci et de sa trace pour respecter la conservation covariante de l'énergie-impulsion) à la place du potentiel newtonien et à droite c'est l'expression de la matière énergie en relativité.
 - Dans l'application cosmologique il a rajouté ultérieurement une constante cosmologique pour trouver une solution statique qui a donné lieu de nombreux débats et rebondissements.
-
-

Métrie de Robertson Walker, équations de Friedmann

- En utilisant les propriétés d'isotropie et d'homogénéité de l'espace, on peut déduire une forme générique de métrique $g_{\mu\nu}$, qu'on va pouvoir utiliser dans l'équation d'Einstein pour dériver les équations de Friedmann.
- Cette métrique, en coordonnées sphériques, s'écrit:

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) [dr^2/(1-kr^2) + r^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)]$$

- En insérant cette métrique dans l'équation de Friedmann et en choisissant le référentiel tel que le tenseur énergie impulsion soit diagonal, ce qui montre que c'est la matière qui détermine ce référentiel particulier où les observateurs au repos sont co-mobiles de l'expansion, on va obtenir deux équations de Friedmann.
 - Une pour la composante temporelle, l'autre pour une composante spatiale (l'univers étant homogène et isotrope une seule équation suffit). On utilise:
- $a''/a = - (4\pi G/3).(\rho + 3 p)$
 - $(a'/a)^2 = 8\pi.G.\rho /3 - k/a^2$
- On peut aussi utiliser l'équation de conservation.

$$d(\rho.a^3) / dt = a^3 (\rho' + 3 p. a'/a) = - p.d (a^3) / dt .$$