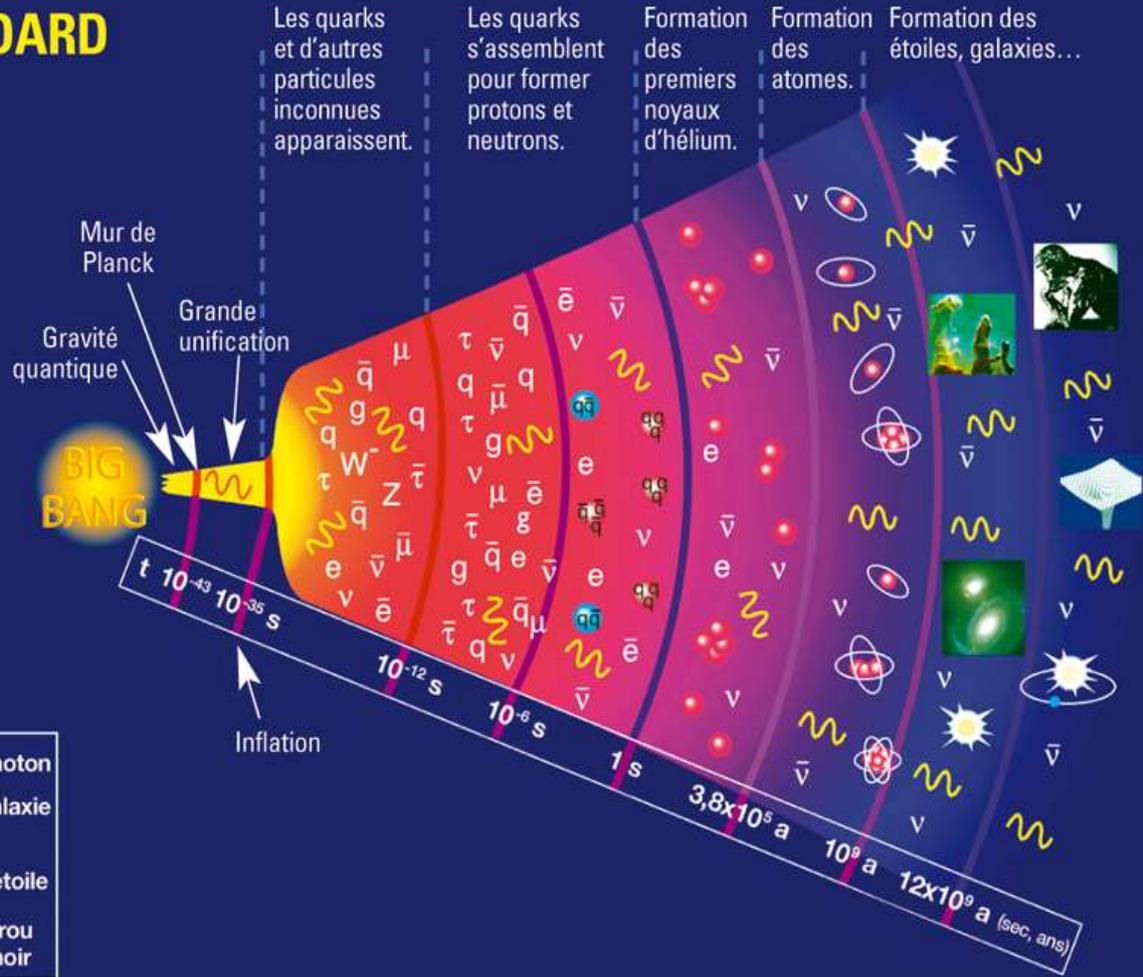


# L'évolution de L'univers

## 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.

L'Univers devient transparent.



Légendes		
W, Z bosons		photon
quark		meson
gluon		baryons
électron		ions
muon		atome
neutrino		trou noir
		galaxie
		étoile

© 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,  $10^{73} \text{ kg/m}^3$ . 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:

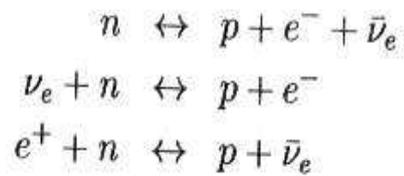
« Cosmology and Particle astrophysics » de Lars Bergström et Ariel Goodbar (ed Wiley-Praxis) que j'ai partiellement traduit et mis en ligne sur le lien :

[http://www-cosmosaf.iap.fr/Dynamique\\_Relativiste.pdf](http://www-cosmosaf.iap.fr/Dynamique_Relativiste.pdf)

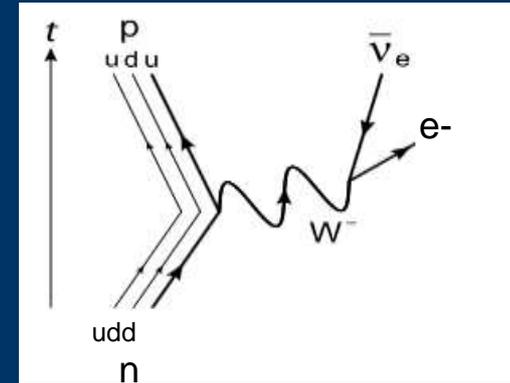
Par ailleurs une large partie de cette présentation reprend des éléments du cours de Ned Wright (avec son aimable consentement) dont la page d'accueil est::

<http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm>

# L'évolution de L'univers primordial



(8.15)



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

(8.16)

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

(8.17)

# L'évolution de l'univers primordial

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



# L'évolution de l'univers primordial

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

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.

# 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**



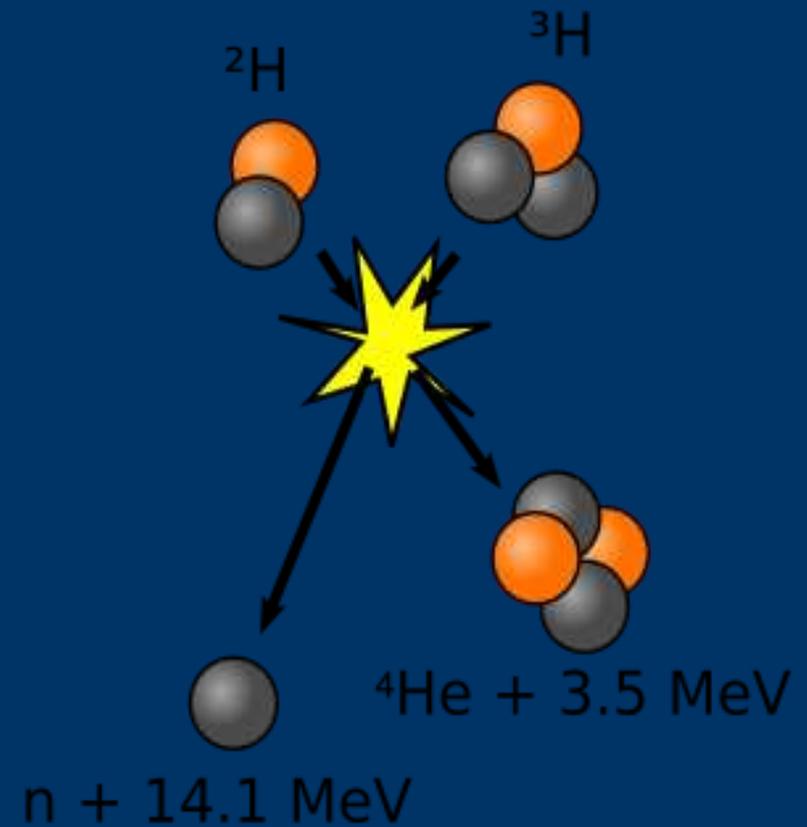
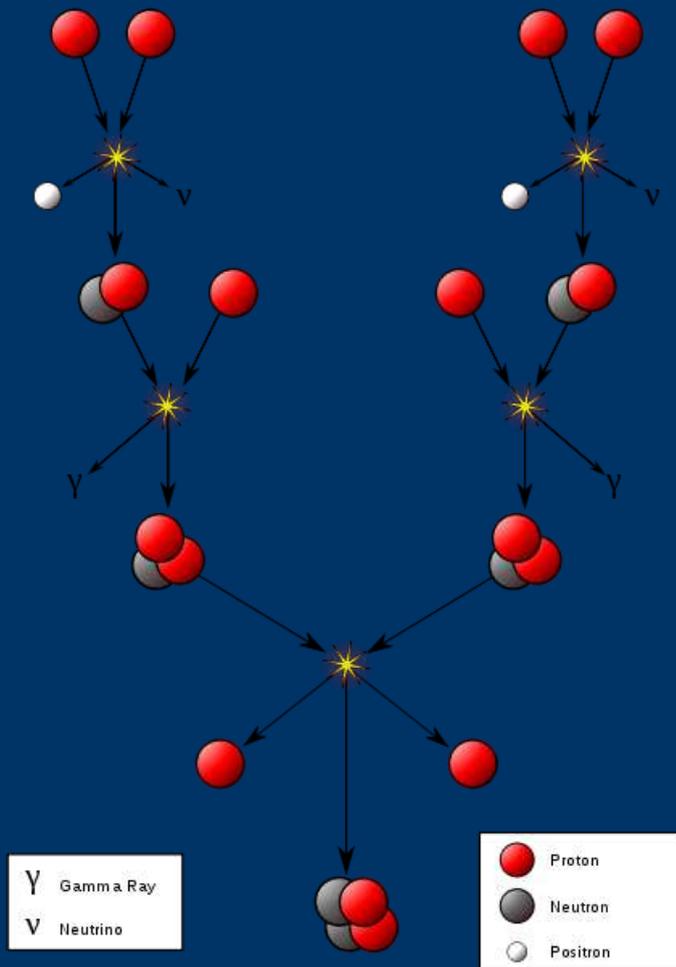
Une seconde plus tard, la température est tombée à  $10^{10} \text{ K}$ , et il ne reste plus qu'un seul neutron pour trois protons. La seule façon pour les neutrons restants de survivre serait de s'incorporer avec des protons dans des noyaux énergétiquement stables comme le deutérium (1 proton + 1 neutron)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

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

**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  $\beta$ ) 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).
- Et 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/m<sup>3</sup>

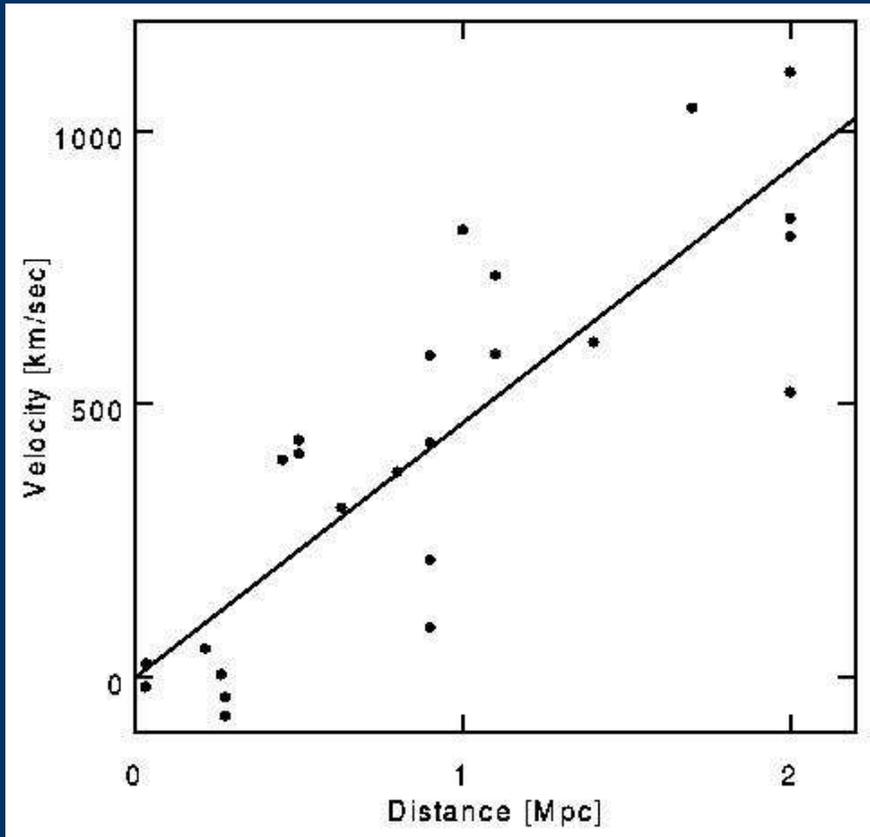
**L'hélium reste coincé:  
les noyaux lourds devront attendre**

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.

# 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  $464 \text{ km/sec/Mpc}$ , 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:

---

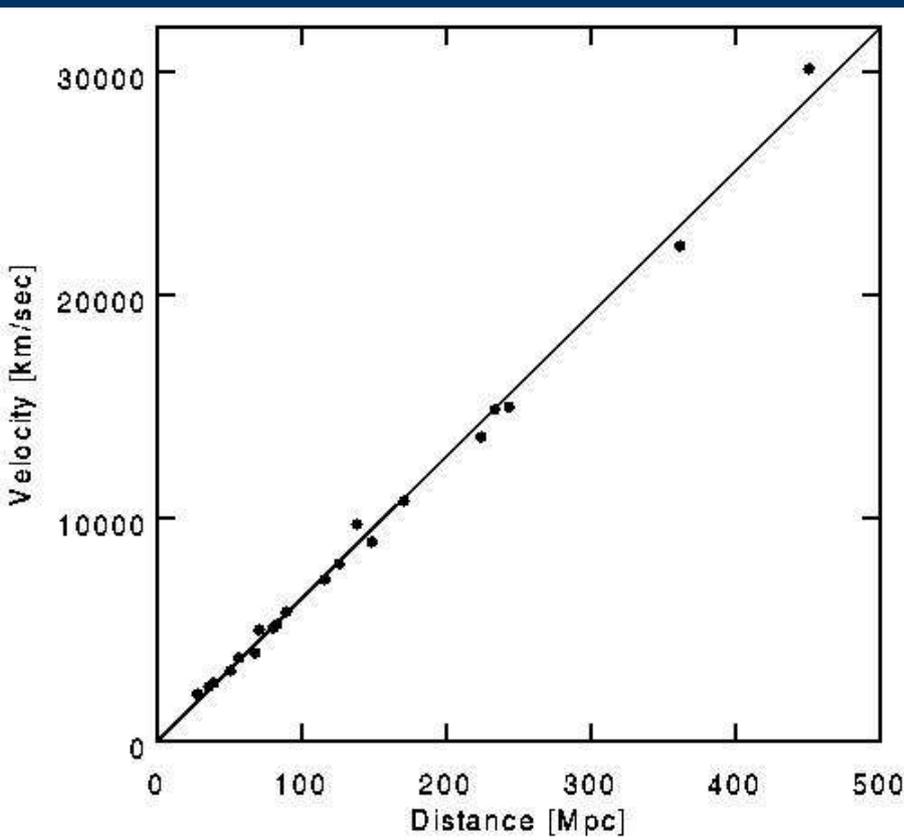
# Observations critiques

L'équipe ([HST Distance Scale Key Project](#)) (Freedman, Kennicutt, Mould et al) a obtenu  $72 \text{ km/sec/Mpc}$ , 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  $14 \text{ Ga}$ , alors que l'âge effectif déduit du modèle donne  $13,7 \pm 0,2 \text{ Ga}$ .

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  $\lambda$  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  $v = cz + \dots$

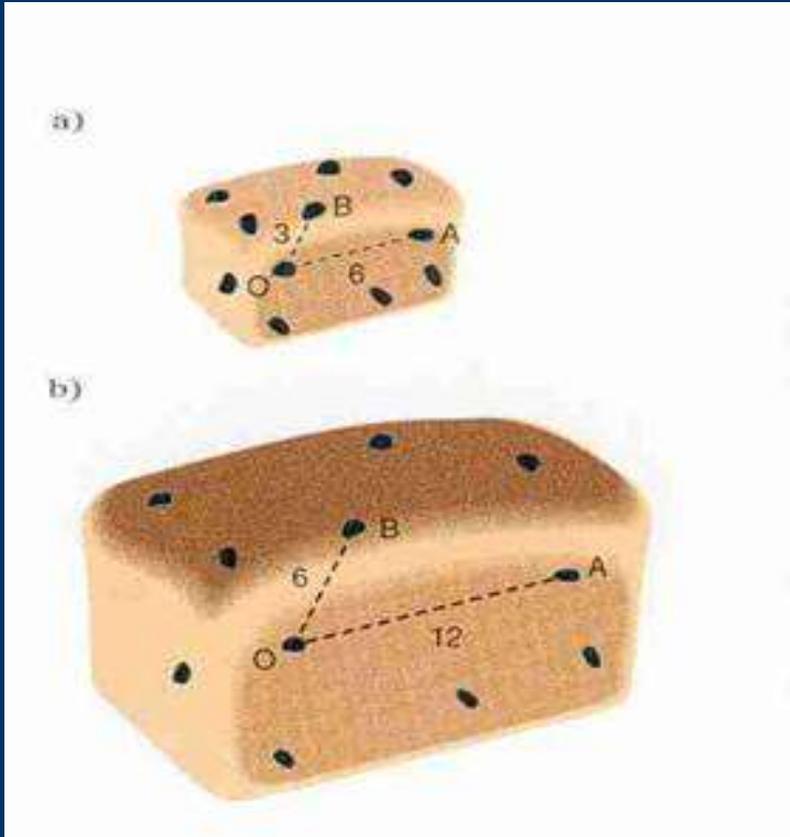
Mais les corrections d'ordre supérieur (les ..... ) dépendent de la relativité générale et du modèle particulier d'univers.

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.

---

---

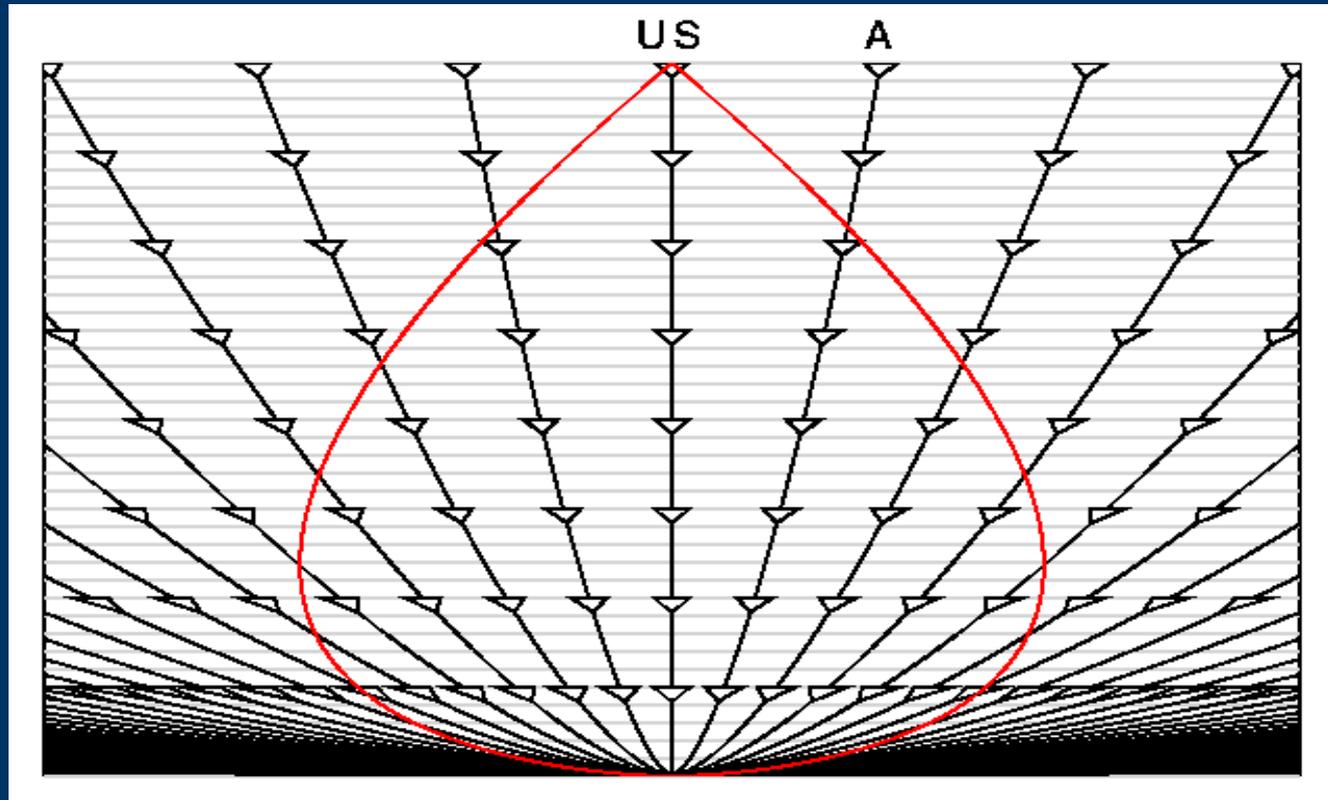
# Observations critiques



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).

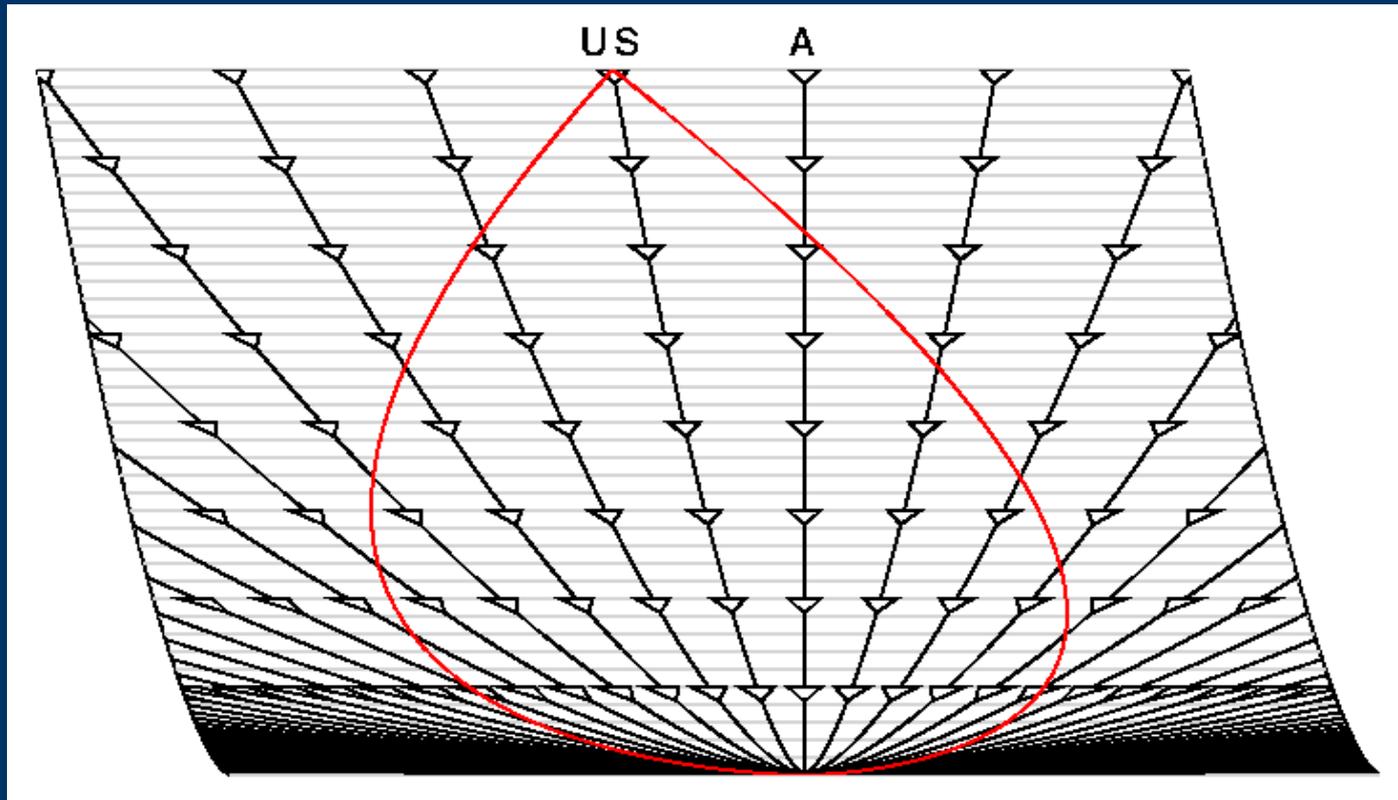
La vitesse de récession est symétrique: Si A voit B s'éloigner (observe un rayonnement émis par B décalé vers le rouge), alors B voit A s'éloigner (observe un rayonnement émis par A également décalé vers le rouge).

# Diagrammes d'espace temps



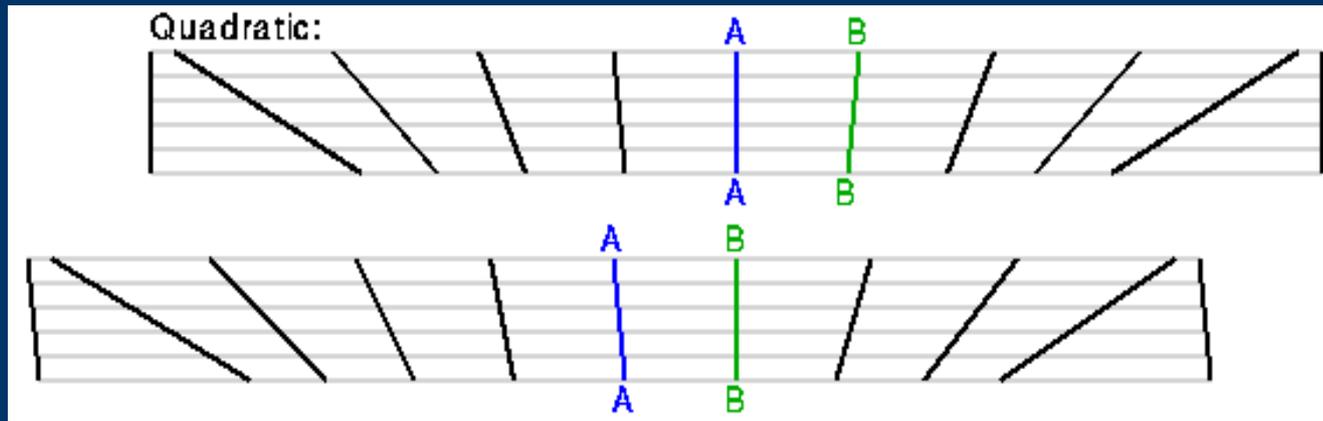
Le modèle correspondant à **une densité critique** est représenté ci dessus. Remarquons que les lignes d'univers sont maintenant courbées du fait de la gravitation qui provoque un ralentissement de l'expansion. En fait chaque ligne d'univers est proportionnelle à  $a(t)$ , qui vaut  $A.(t/t_0)^{2/3}$  pour  $\Omega_0 = 1$ , où  $A$  est une constante. La courbe rouge en forme de poire correspond à notre cône du passé (modélisé en poire par l'expansion).

# Diagrammes d'espace temps



Le diagramme précédent était tracé de **notre point de vue** ( notre galaxie est au "centre" du diagramme), mais comme l'Univers est homogène, ce diagramme est identique du point de vue de n'importe quel galaxie . Comme le montre le diagramme ci dessus, représenté du point de vue de la galaxie de ligne d'univers A. ( Si on assimile ceci à un "château de cartes" vu par la tranche, alors dans ce cas, le" château de cartes" est incliné!).

# Observations critiques

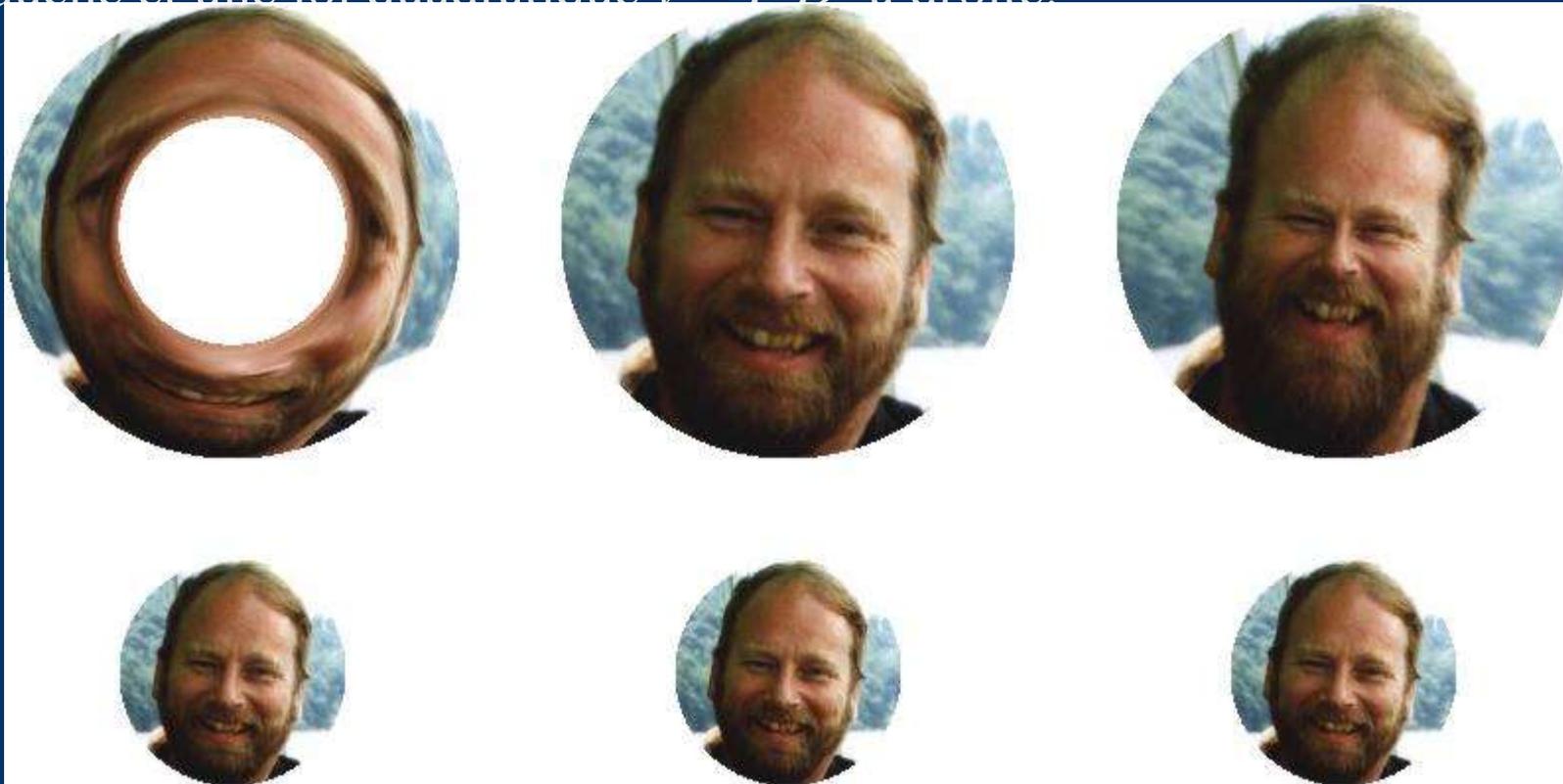


Une loi quadratique  $v(sq) = D^2$  par contre se transforme en une loi non quadratique anisotropique quand on change de point de vue comme montré ci dessus. Donc si nous supposons une loi quadratique vitesse/distance [par rapport à nous], un observateur dans une autre Galaxie va constater une loi différente 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  $370 \text{ km/sec}$  par rapport à l'univers observable.

Le groupe local de galaxies, dans lequel la voie lactée est incluse laisse apparaître un mouvement relatif de  $600 \text{ km/sec}$  par rapport à l'Univers observable.

---

# Observations critiques

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

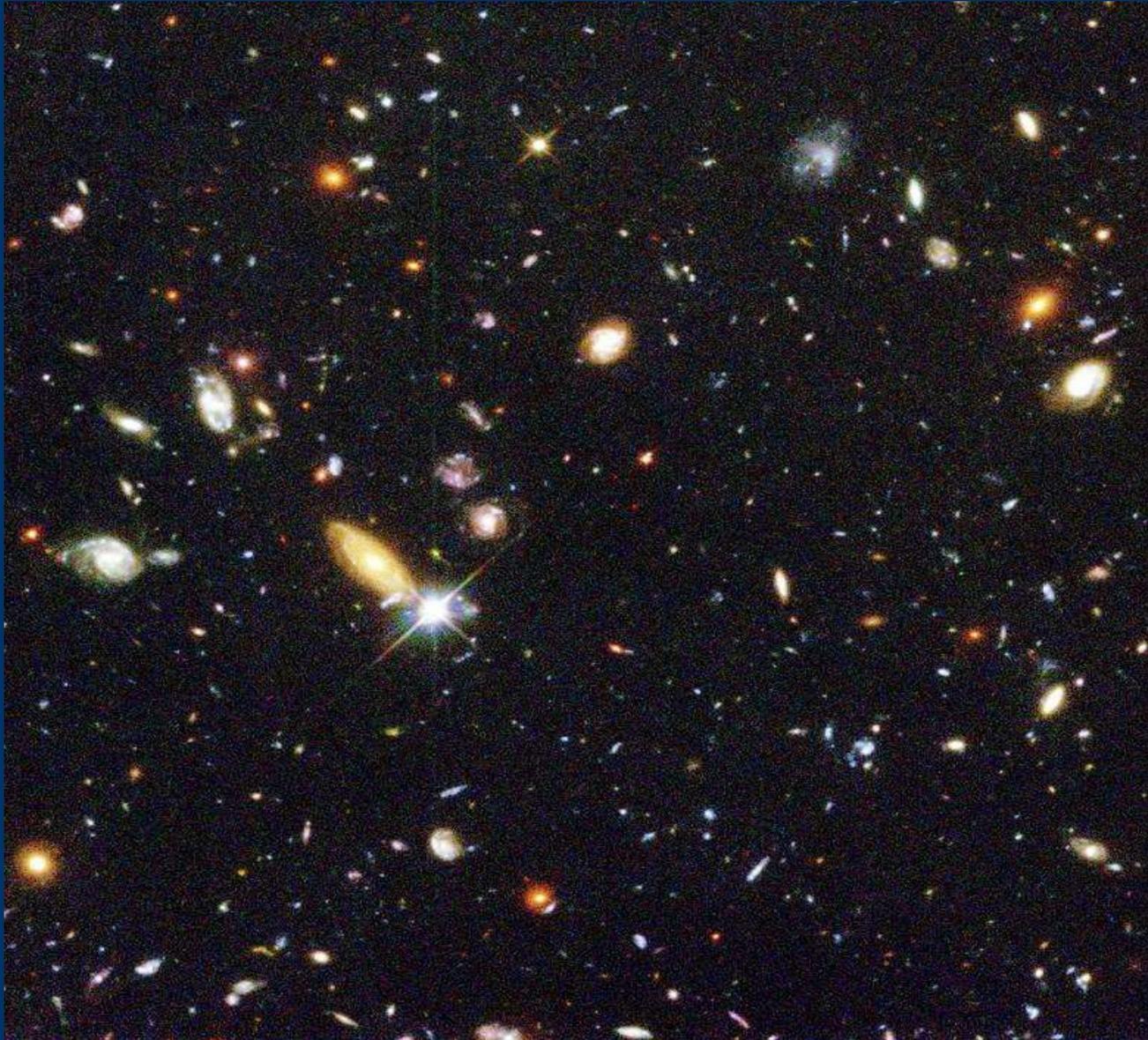
Il trouva environ le même nombre de galaxies peu brillantes dans toutes les directions , même s'il y a excès important de galaxies brillantes dans la partie nord du ciel.

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

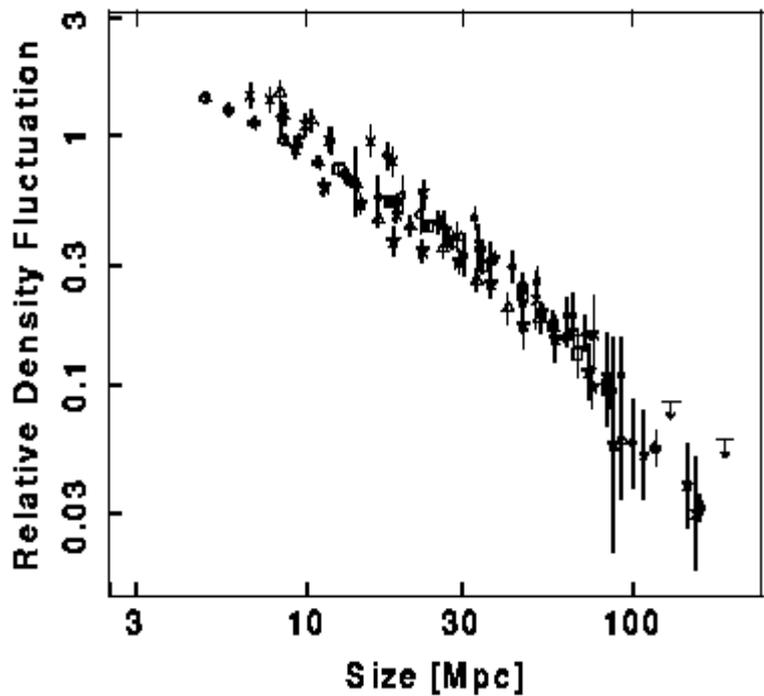
Ensuite il observa les galaxies de luminosité apparente supérieure à  $F/4$  , et il en compta 8 fois plus que de galaxies de luminosité apparente supérieure à  $F$ .

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.

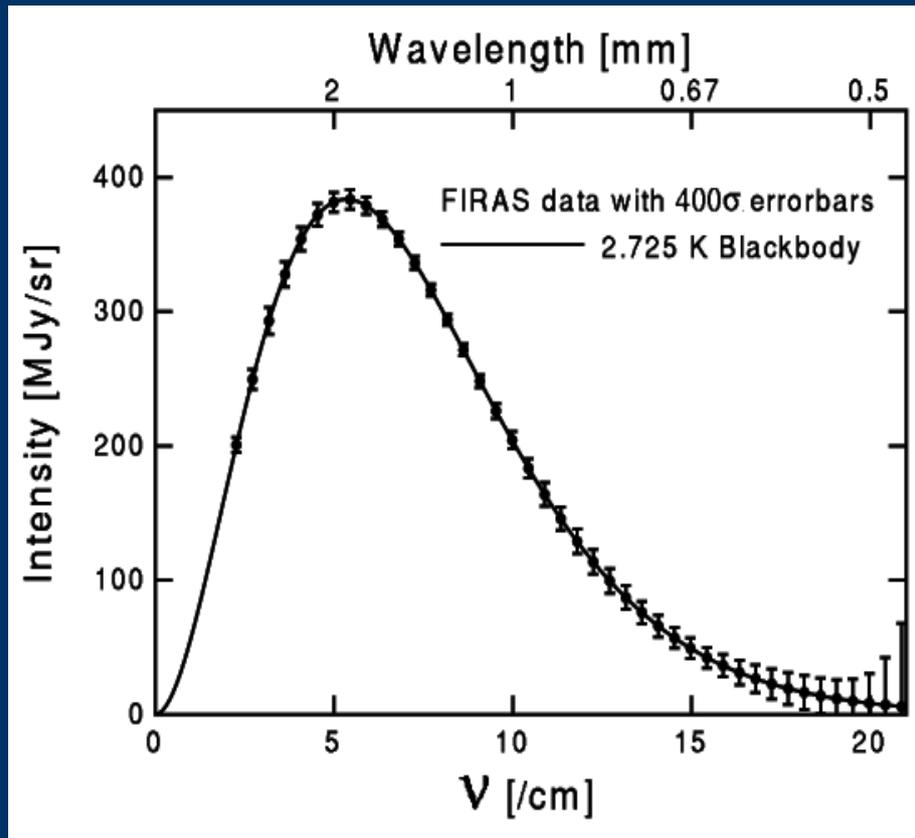
[Peacock and Dodds \(1994, MNRAS, 267, 1020\)](#)

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  $100 \text{ Mpc}$ , 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, ...).

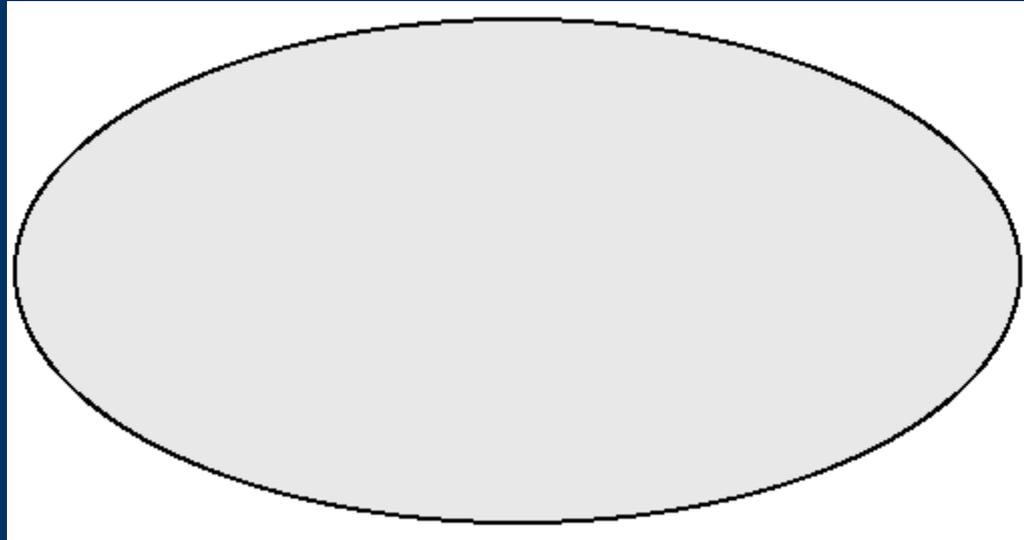
# Observations critiques



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  $7.35 \text{ cm}$  de longueur d'onde de type "corps noir" équivalent à une température de  $3.5 \pm 1$  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  $273.15 \text{ K}$ .]

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



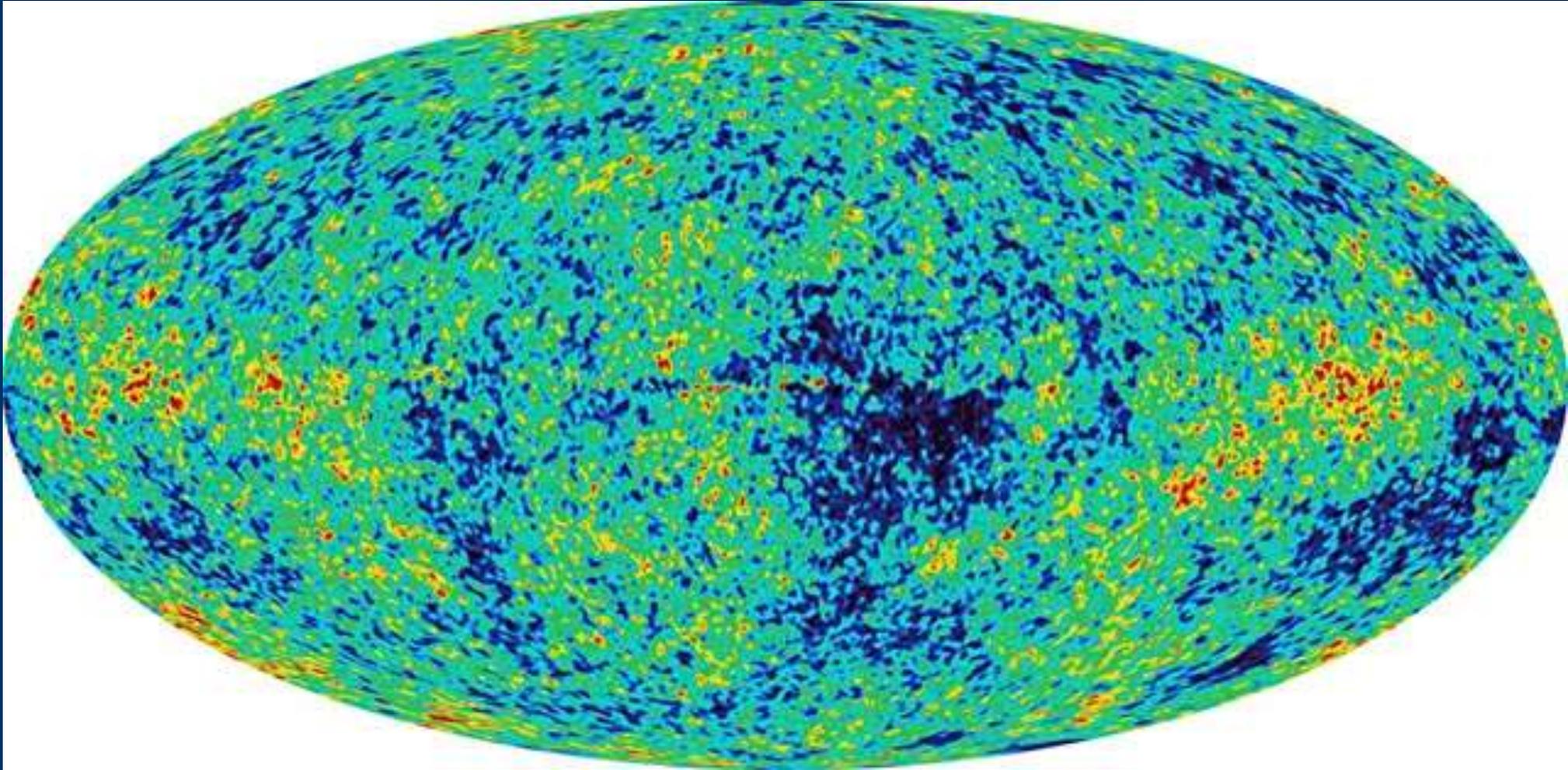
Sur l'axe des  $x$ , on représente l'inverse de la longueur d'onde en  $1/[longueur\ d'onde\ en\ cm]$ . Sur l'axe des  $y$ , on représente la puissance par unité de surface par unité de fréquence [ dans des bandes de largeur constante], par unité d'angle solide en Méga-Janskies par stéradian. 1 Jansky 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..

---

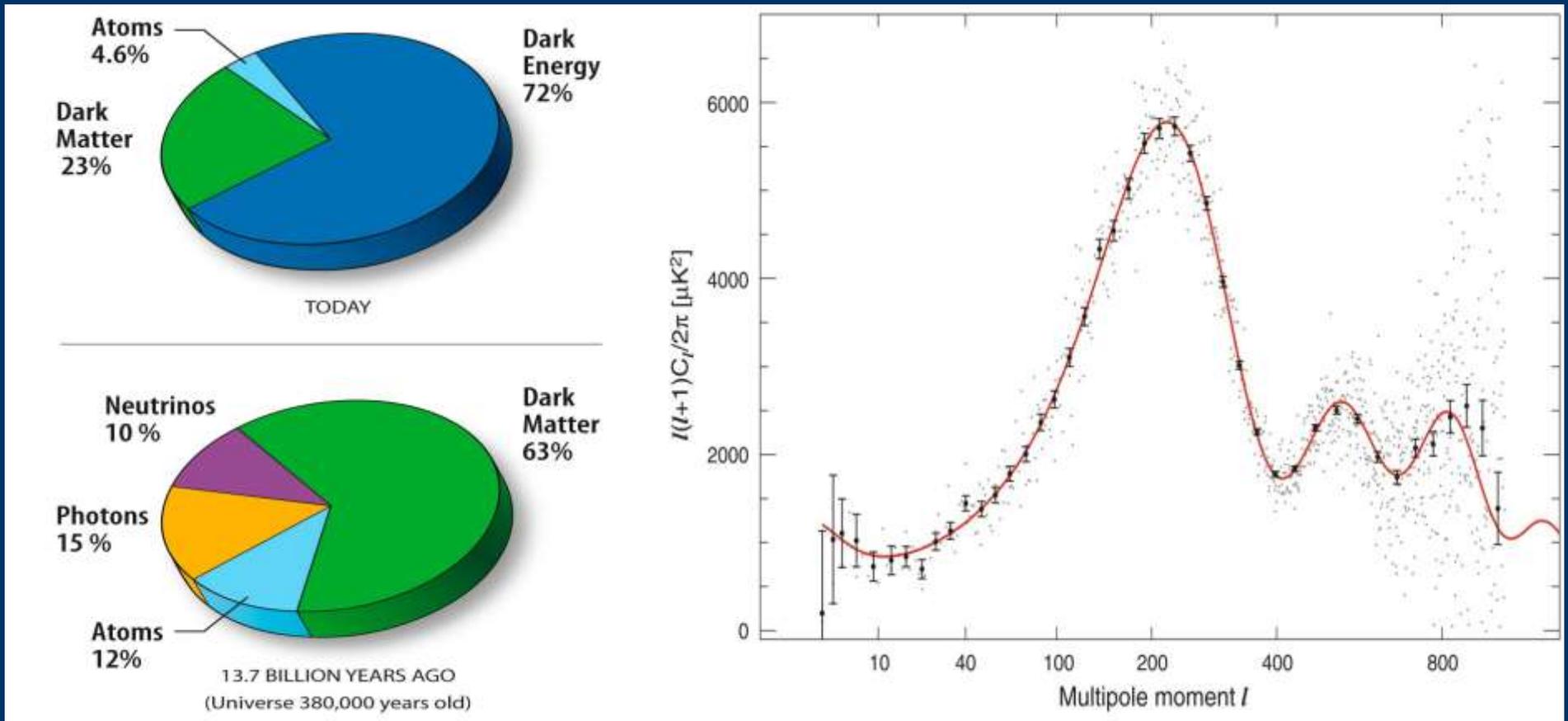
---

# Rayonnement fossile Cosmologique (WMAP)

Echelle de contraste  $10^{-5}$



# Compléments WMAP

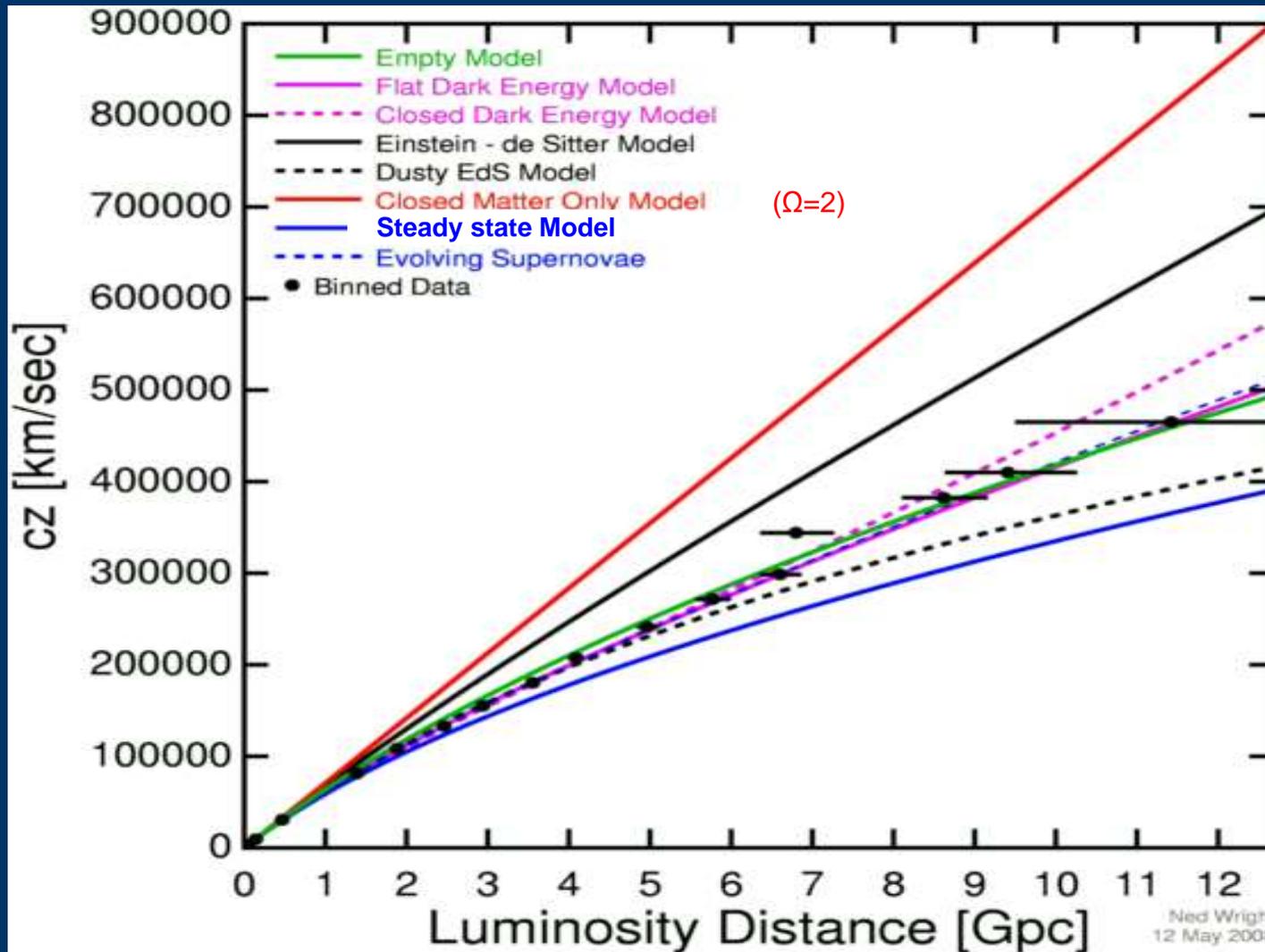


- A gauche décomposition du  $\Omega$  total en ses différentes composantes à deux époques de l'univers.
- A droite spectre de puissance en fonction de modes.

# Compléments résultats

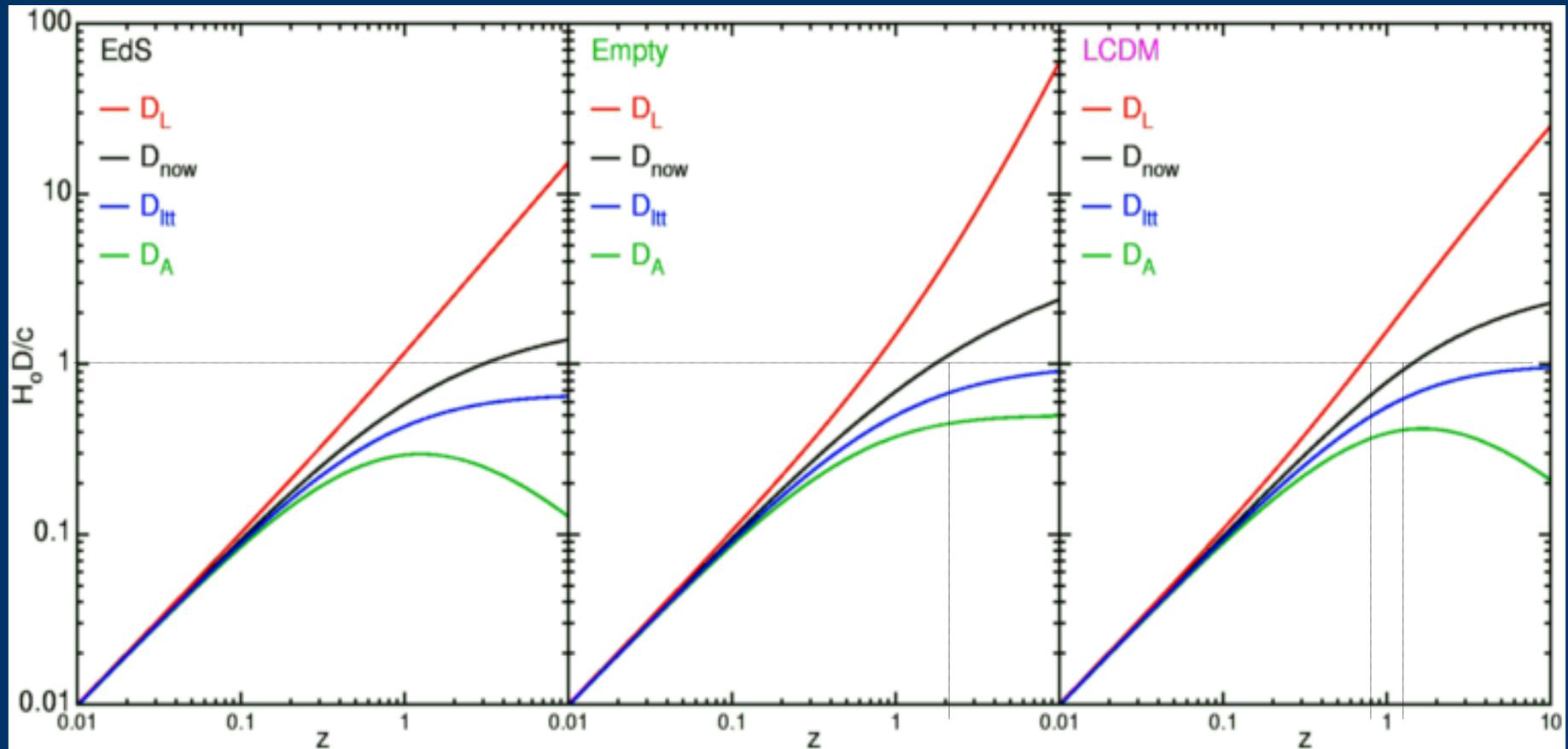
Best-fit <a href="#">cosmological parameters</a> from WMAP five-year results[5] <b>Parameter</b>	<b>Symb ol</b>	<b>Best fit (WMAP only)</b>	<b>Best fit (WMAP + SNe + BAO)</b>
<a href="#">Hubble's constant</a> ( $\text{km}/\text{Mpc}\cdot\text{s}$ )	$H_0$		$0.701 \pm 0.013$
<a href="#">Baryonic content</a>	$\Omega_b h^2$	$0.02273 \pm 0.00062$	$0.02265 \pm 0.00059$
Cold dark matter content	$\Omega_c h^2$	$0.1099 \pm 0.0062$	$0.1143 \pm 0.0034$
<a href="#">Dark energy</a> content	$\Omega_\Lambda$	$0.742 \pm 0.030$	$0.721 \pm 0.015$
<a href="#">Optical depth to reionization</a>	$\tau$	$0.087 \pm 0.017$	$0.084 \pm 0.016$
Scalar spectral index	$n_s$		
Running of spectral index	$dn_s / dk$	$-0.037 \pm 0.028$	
Fluctuation amplitude at $8h^{-1}$ Mpc	$\sigma_8$	$0.796 \pm 0.036$	$0.817 \pm 0.026$
<a href="#">Age of the universe</a> (Ga)	$t_0$	$13.69 \pm 0.13$	$13.73 \pm 0.12$
Total density of the universe	$\Omega_{tot}$		$1.0052 \pm 0.0064$
Tensor-to-scalar ration	$r$	$<0.20$	—

# Résultats du supernovae project



Vitesse de récession calculée à partir du décalage spectral en fonction de la distance de Luminosité: Dernières données disponibles : [Kowalski et al. \(2008\)](#).

# Distances = $f(z)$ pour 3 modèles



A gauche le modèle Einstein De Sitter dominé par la matière, au centre le modèle vide, à droite Lambda CDM en accélération qui est celui privilégié aujourd'hui. Notons que les distances sont similaires à faibles distances mais divergent et de façon dépendant du modèle à grandes distances ( $H_0 D/c = 1 \rightarrow D = 4,1 \text{ Gpc} = 13 \text{ Gal}$ ).

# Compléments: Diagrammes des $\Omega$

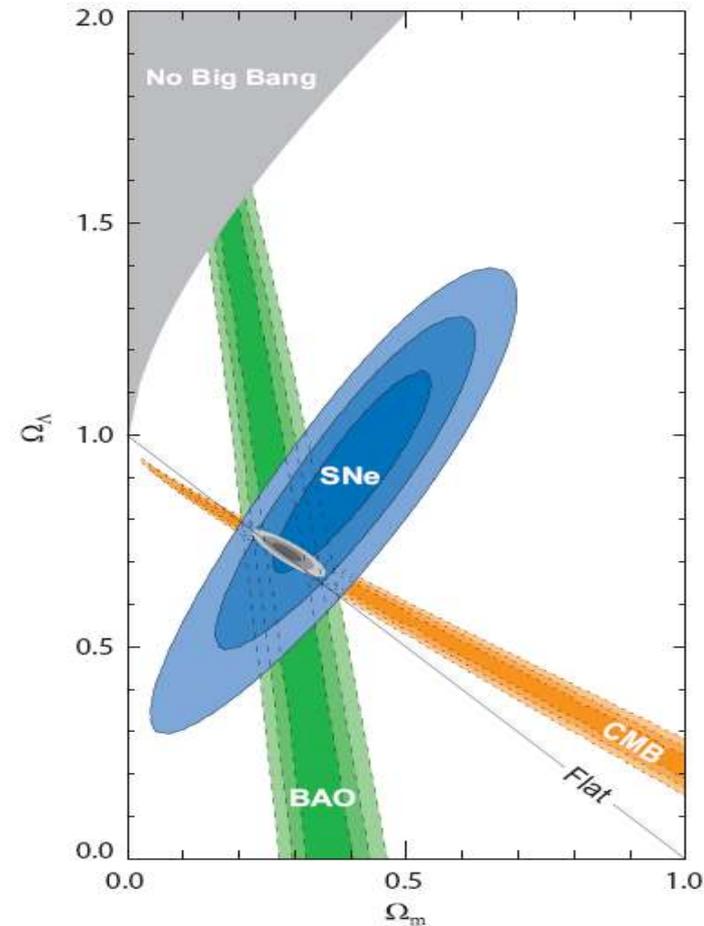
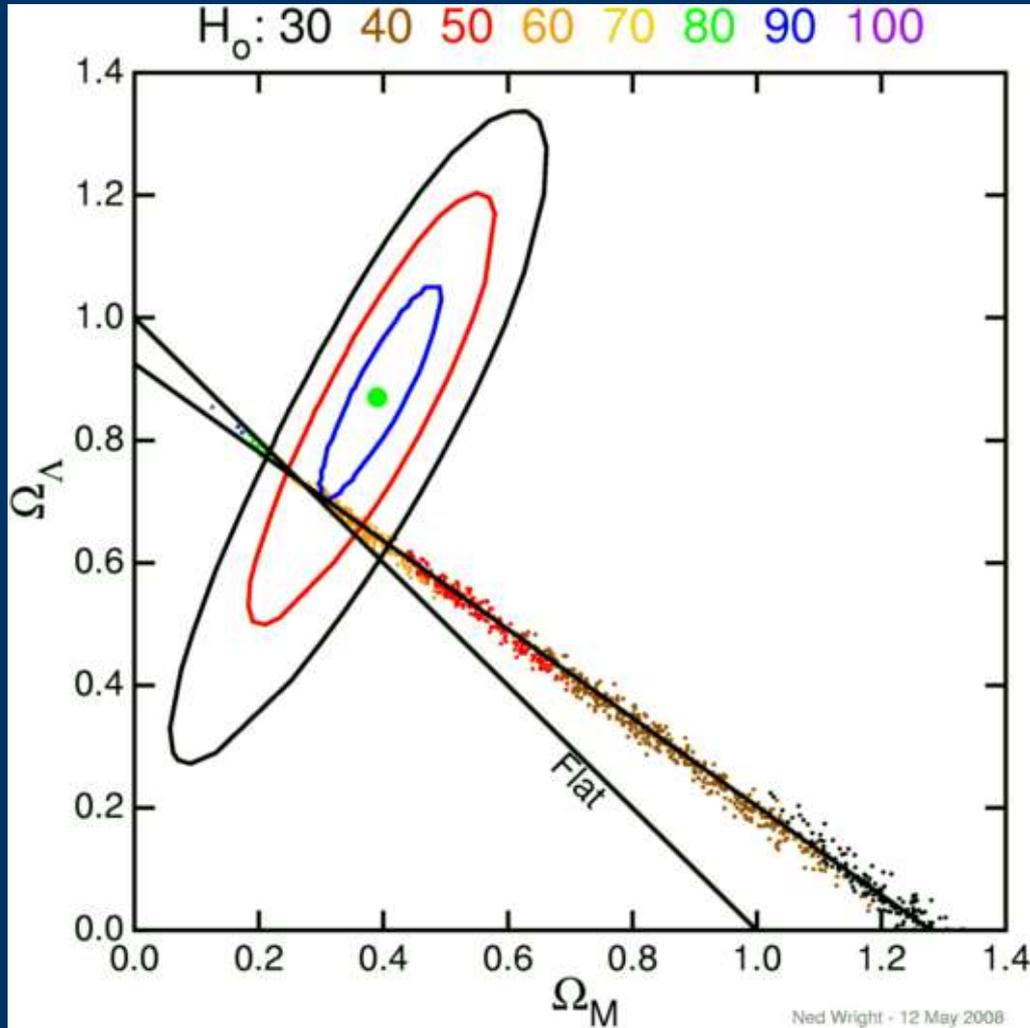
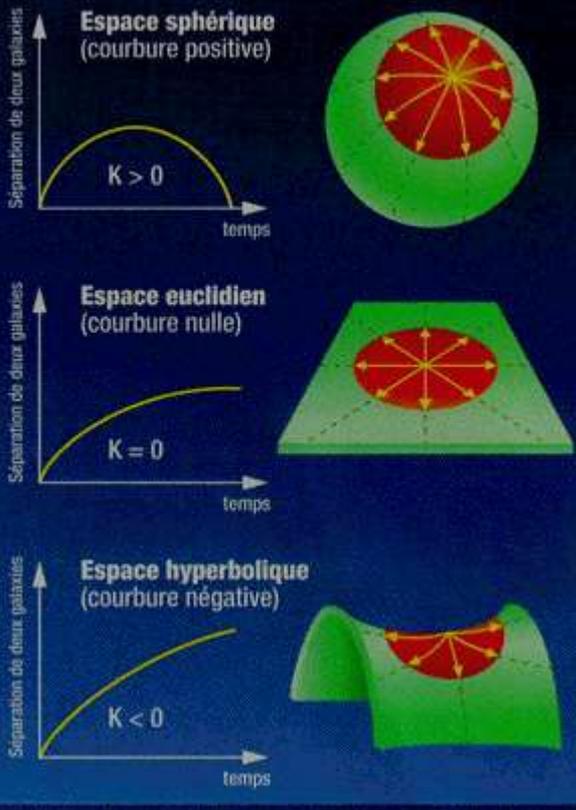


FIG. 15.— 68.3 %, 95.4 % and 99.7% confidence level contours on  $\Omega_\Lambda$  and  $\Omega_M$  obtained from CMB, BAO and the Union SN set, as well as their combination (assuming  $w = -1$ ).

A gauche diagramme schématique des  $\Omega$  où on a ajouté la représentation de  $H_0$  par un code de couleur, à droite c'est le diagramme général classique (2008).

# Courbure Spatiale



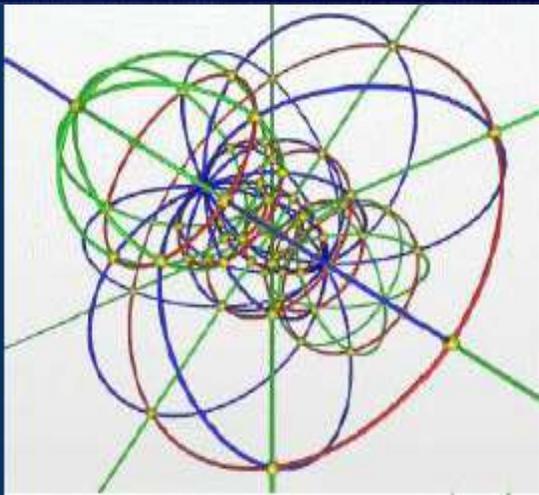
Une conséquence de la Relativité est que la courbure de l'espace dépend du rapport  $\rho/\rho_{crit} = \Omega$ . Rappelons que  $\rho$  peut être constitué de différentes composantes ayant des comportements différents vis à vis de l'expansion. La dilution peut être en  $a^{-3}$  (poussière),  $a^{-4}$  (lumière) ou  $a^0$  (pas de dilution: constante cosmologique). Dans le modèle  $\Lambda$ CDM au début l'univers a été dominé par la lumière puis la poussière a pris le relais au de 150 000 ans environ et enfin l'énergie noire est dominante (et le sera de plus en plus) depuis 4 milliards d'années environ.

Pour  $\Omega < 1$ , l'univers a une géométrie courbée négativement, une géométrie 3D (hyper)hyperbolique. Nous avons vu que le cas particulier de densité zéro correspond bien à une géométrie hyperbolique (de volume fini!) du fait que les strates temporelles [à temps constant] en coordonnées de la Relativité Restreinte sont des hyperboloïdes.

Pour  $\Omega = 1$ , l'univers a une géométrie 3D à courbure nulle, euclidienne.

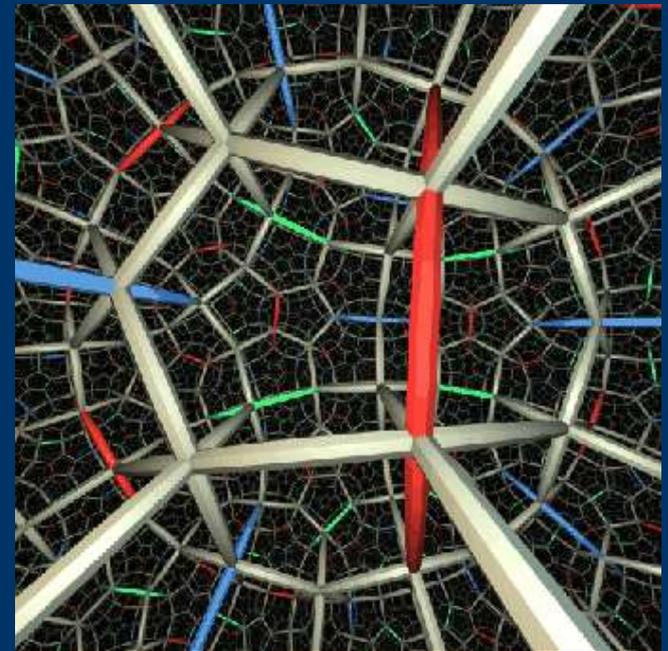
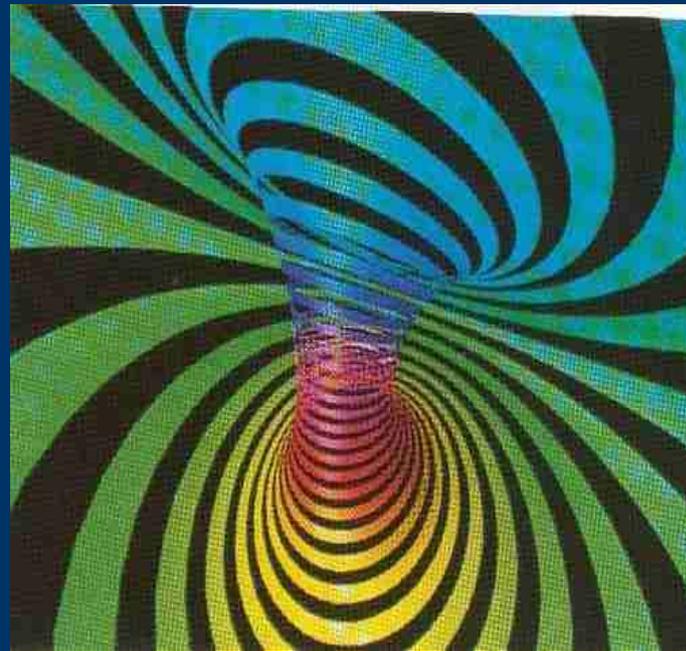
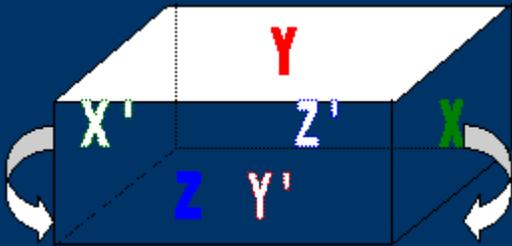
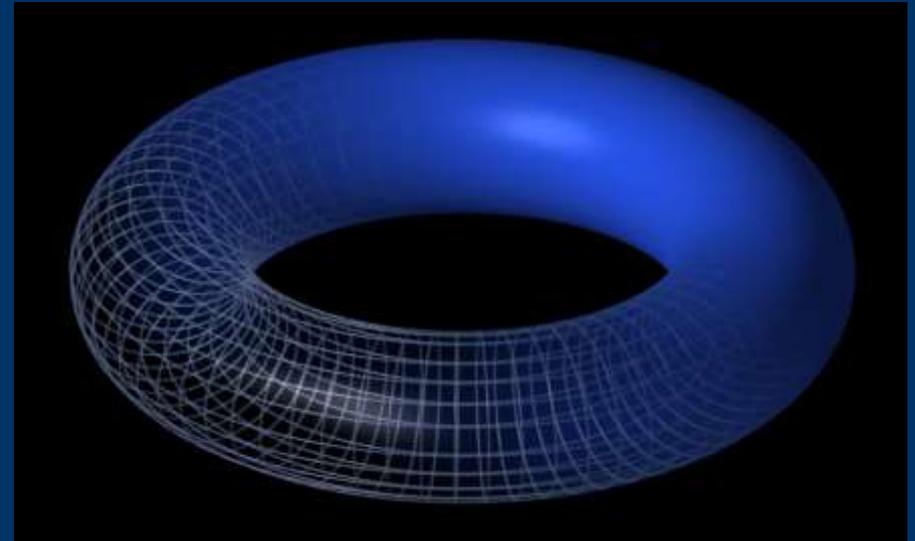
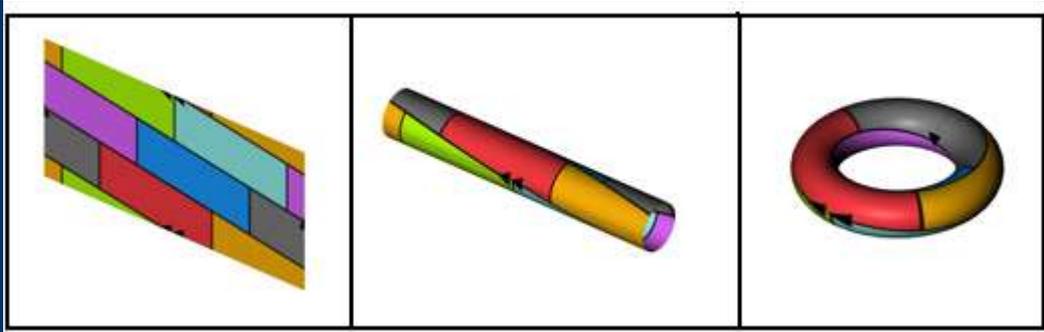
Pour  $\Omega > 1$ , l'univers a une géométrie 3D à courbure positive, une géométrie (hyper)sphérique: **Volume de l'hypersphère  $V = 2\pi^2 R^3$ .**

La figure en haut représente les trois cas de courbure (représentées en 2D) et leur courbes  $a(t)$  associées en supposant la constante cosmologique  $\lambda = 0$ , ce qui n'est pas le cas dans le modèle adopté aujourd'hui. Si  $\lambda \neq 0$ ,  $\Omega > 1$  correspond toujours à une hypersphère mais elle peut s'étendre indéfiniment du fait du caractère répulsif de  $\lambda$ .

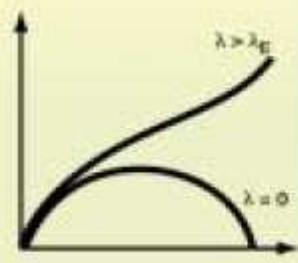
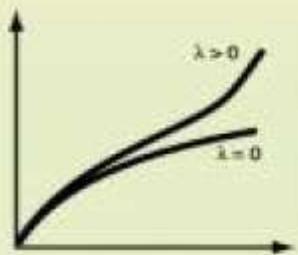
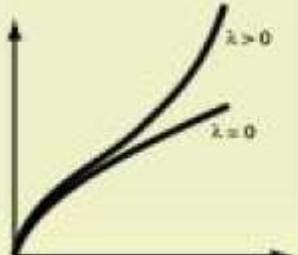


Hypersphère

# Tore - Hypertore-espaces compacts



# Types d'univers avec constante cosmologique $\Lambda$

courbure	topologie	dynamique	destin
$K > 0$  sphérique	fini		ouvert si $\lambda$ grand  fermé
$K = 0$  Euclidien	fini ou infini		ouvert
$K < 0$  hyperbolique	fini ou infini		ouvert

• Géométrie spatiale hypersphérique (courbure positive) avec expansion du rayon jusqu'à un maximum puis re-contraction pour  $\lambda < \lambda_{\text{crit}}$ , sinon expansion tendant vers une expansion exponentielle lorsque  $\lambda$  augmente.

• Géométrie spatiale euclidienne marginalement ouverte pour  $\lambda = 0$  tendant vers une expansion exponentielle lorsque  $\lambda$  augmente.

• Géométrie spatiale hyperbolique (courbure négative) ouverte pour  $\lambda = 0$  tendant vers une expansion exponentielle lorsque  $\lambda$  augmente.

• Figure empruntée à JP Luminet

# L'Univers est Homogène et Isotrope

Un autre élément favorable au big bang est l'abondance des éléments légers tels que l'hydrogène, le deutérium (hydrogène lourd) l'hélium et le lithium. Pendant l'expansion les photons du RFC perdent de l'énergie du fait du décalage vers le rouge et le RFC se refroidit.

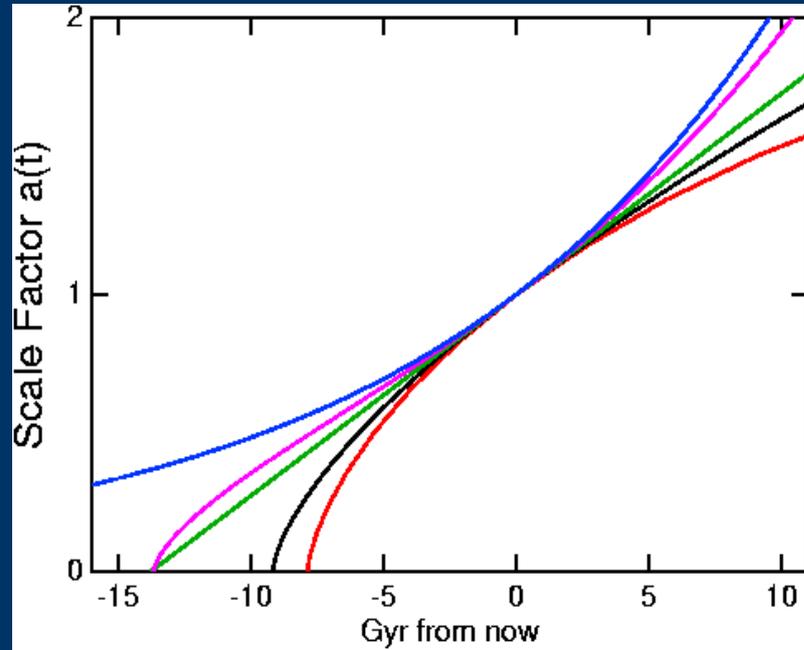
Vu à l'envers, ceci signifie que la température du RFC était très élevée dans le passé.

Quand il était âgé de seulement quelques minutes, la température était suffisamment élevée pour produire ces éléments légers par fusion nucléaire..

La théorie de la Nucléosynthèse du Big bang prédit qu'environ  $1/4$  de la masse de l'Univers doit être constituée d'hélium, ce qu'on observe approximativement.

L'abondance du deutérium est inversement proportionnelle à la densité de nucléons dans l'univers, et l'abondance observée de deutérium correspond à un nucléon pour 4 mètres cubes d'espace de l'Univers.

# Age de L'univers



L'âge de l'Univers dépend de  $\Omega_o$  et de  $H_o$ , (valeurs de  $\Omega$  et  $H$  mesurées « maintenant »), par exemple:

$\Omega_o = 1$ , densité critique, le facteur d'échelle vaut:  $a(t) = (t/t_o)^{2/3}$ , l'âge de l'Univers est  $t_o = (2/3)/H_o$

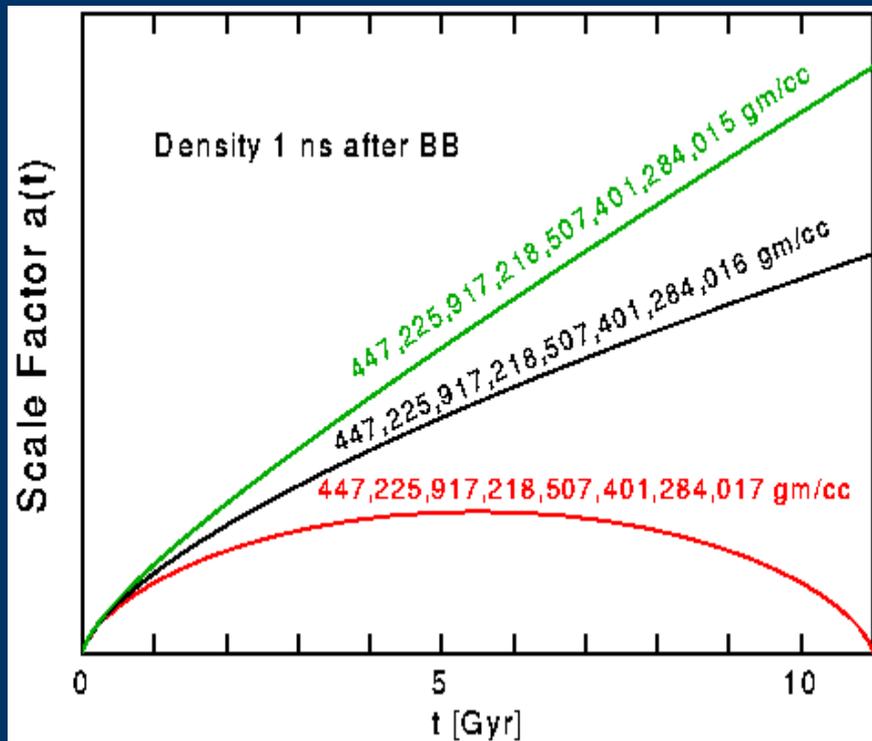
$\Omega_o = 0$ , univers vide,  $a(t) = t/t_o$  et  $t_o = 1/H_o$

$\Omega_o > 1$ , l'âge de l'Univers  $t_o < (2/3)/H_o$ .

La figure ci dessus montre le facteur d'échelle fonction du temps mesuré à partir de maintenant pour  $H_o = 71 \text{ km/sec/Mpc}$  et  $\Omega_o = 0$  (vert),  $\Omega_o = 1$  (noir), et  $\Omega_o = 2$  (rouge) avec  $\lambda = 0$ , le modèle WMAP avec  $\Omega_m = 0.27$  et  $\Omega_v = 0.73$  (magenta) et le modèle stationnaire avec  $\Omega_v = 1$  (bleu). L'âge de l'Univers (origine pour  $a(t) = 0$ ), est respectivement 13.8, 9.2, 7.9, 13.7 et  $\infty \text{ Ga}$  dans ces 5 modèles. Quel âge aura t'il dans 24 H? Il faudra remesurer  $\Omega_o, H_o$  et recalculer l'âge. Sera t'il supérieur de  $24H$ ? Cela dépend du rapport entre le temps cosmologique et notre temps propre (comme nous ne sommes pas co-mobiles ils ne sont pas égaux)!

Notons que la re-contraction du modèle avec  $\Omega_o = 2$  se produit quand l'Univers est 11 fois plus vieux qu'il n'est aujourd'hui, ce qui nous laisserait un peu de temps!

# Le Problème de la platitude et de la longévité de l'Univers



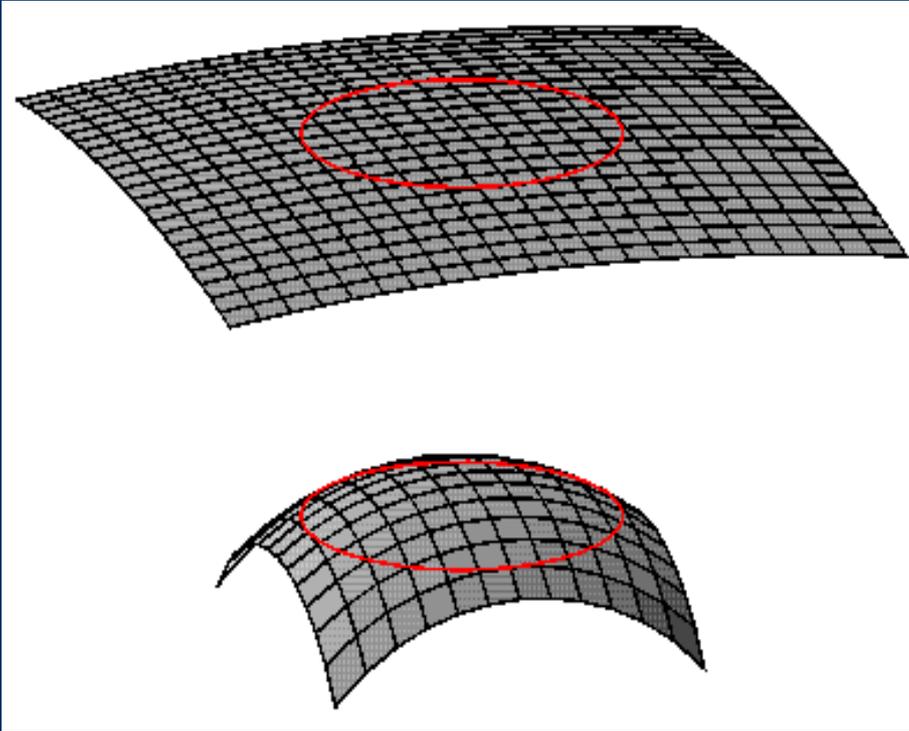
Si  $\Omega_0 > 1$ , l'expansion de l'Univers va s'arrêter et s'inverser, et alors  $\Omega$  va tendre vers l'infini.

Si  $\Omega_0 < 1$ , l'univers va s'étendre sans fin et la densité va décroître plus vite que la densité critique donc  $\Omega$  va devenir de plus en plus petit.

Donc  $\Omega = 1$  est une valeur limite instable dont le moindre écart a tendance à s'amplifier et il est étonnant qu'il soit si proche de 1 maintenant

La figure ci dessus montre  $a(t)$  pour trois modèles de densité différentes à  $t = 1$  nanoseconde, ( $\approx 30$  GeV), après le Big Bang. La courbe noire représente la densité critique = 447 225 917 218 507 401 284 016  $g/cm^3$ . Ajouter seulement 1  $g/cm^3$  à ces 447 sextillions  $g/cm^3$  ferait que le Big Crunch se produirait maintenant. Retirer 1  $g/cm^3$  donne un modèle avec un  $\Omega$  bien plus faible que ce que nous observons.

# Inflation et platitude

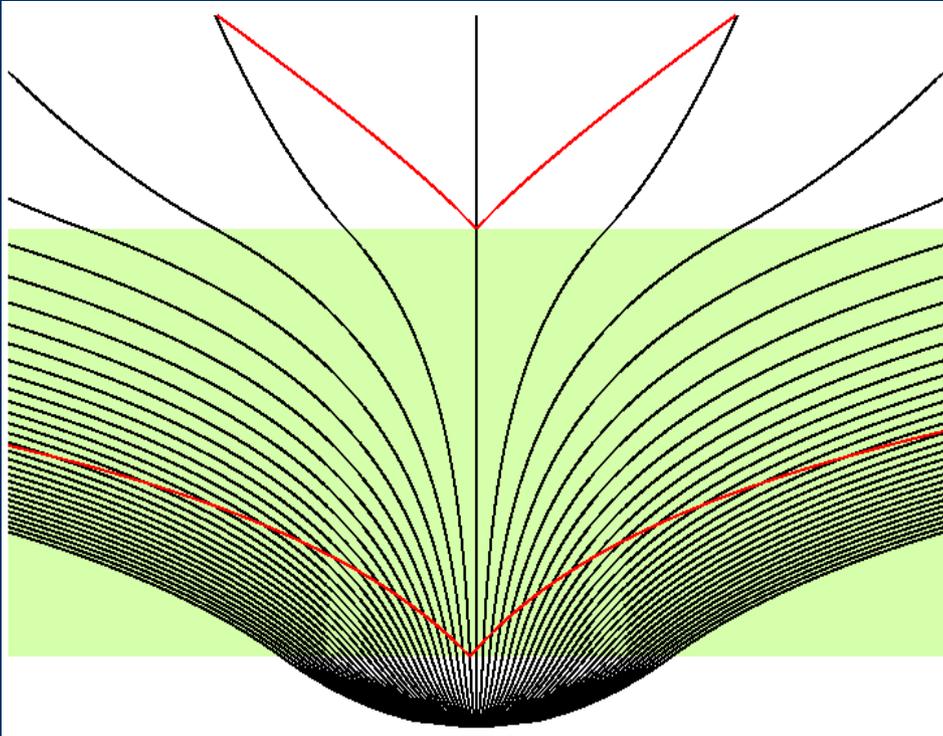


Le diagramme ci contre montre notre horizon représenté sur une sphère de grand rayon en haut et sur une plus petite sphère en bas.

Comme nous ne pouvons pas voir au delà de notre horizon, dans le cas inflationniste, sur cette sphère de grand rayon , l'univers nous paraît presque " plat".

Ceci résout le problème de platitude et de longévité sous condition que cette période d'expansion exponentielle dure au moins 100 fois plus longtemps que l'âge de l'Univers quand elle a commencé. Si avant l'inflation l'univers avait eu la taille d'un proton ( $10^{-15}\text{m}$ ) comme  $\exp(100) \approx 10^{43}$ , à la fin de l'inflation la taille était de  $10^{30}\text{ cm} \approx 1000\text{ Gigaparsecs} > 100$  fois la taille estimée aujourd'hui !!! Ceci montre qu'il était, en fait, incroyablement plus petit qu'un proton avant l'inflation !!!

# Inflation et Horizon

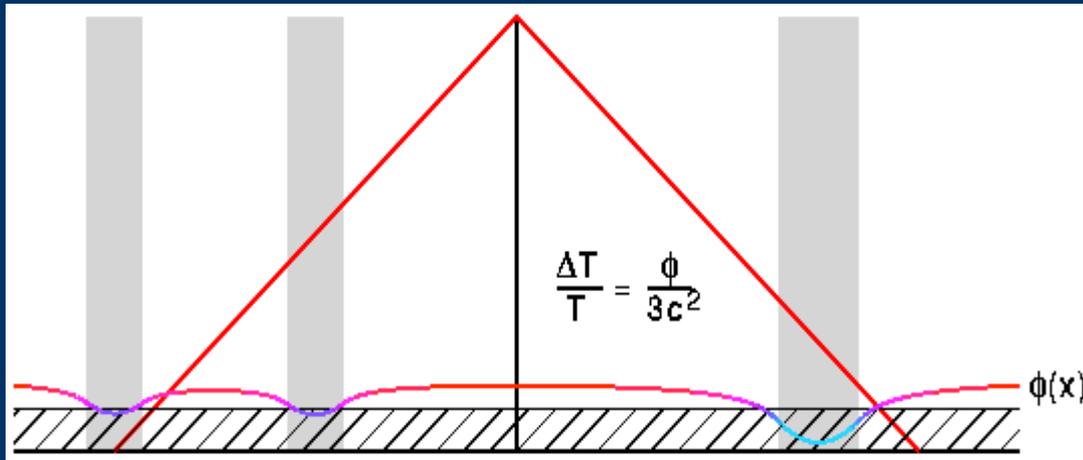


L'inflation résout aussi le problème de l'horizon, car le cône de lumière du futur d'un événement qui s'est produit avant l'inflation est énormément dilaté par le processus d'inflation couvrant ainsi après l'inflation, une région très étendue de l'Univers.

Ce diagramme d'espace temps montre l'époque inflationniste teintée en vert, et les cônes de lumière du futur issus de deux événements en rouge.

L'événement avant l'inflation couvre une région très importante qui peut recouvrir tout notre horizon, alors que l'autre plus tardif est plus "normal". Ceci peut expliquer pourquoi la température du RFC est si uniforme dans tout le ciel.

# Structure à grande échelle et Anisotropie



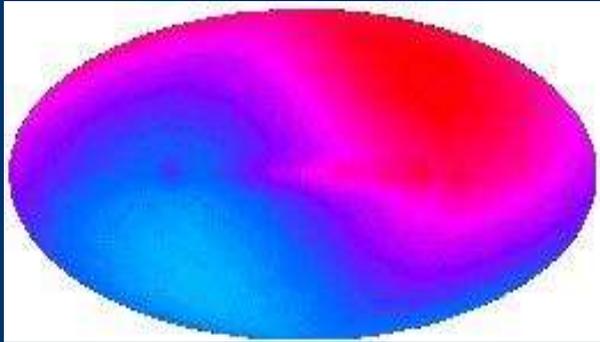
Bien sûr l'Univers n'est pas parfaitement homogène et isotrope car il contient des régions denses comme les galaxies et les humains. Ces régions denses devraient modifier la température du RFC.

Sachs et Wolfe (1967, ApJ, 147, 73) ont évalué l'effet des perturbations du potentiel gravitationnel sur le RFC. Le potentiel gravitationnel  $\Phi = -GM/r$ , va être négatif dans des grumeaux denses et positif dans les régions moins denses.

Les photons perdent de l'énergie pour émerger des puits de potentiel associés aux grumeaux. Le diagramme d'espace temps "conforme" ci dessus représente les grumeaux par des barres verticales grises, l'époque avant le découplage hachurée et le potentiel gravitationnel par une courbe codée par couleurs  $\Phi(x)$ .

Quand notre cône de lumière du passé coupe la surface de découplage nous voyons une température modulée telle que  $dT/T = \Phi/3c^2$ .

# Anisotropie dipolaire

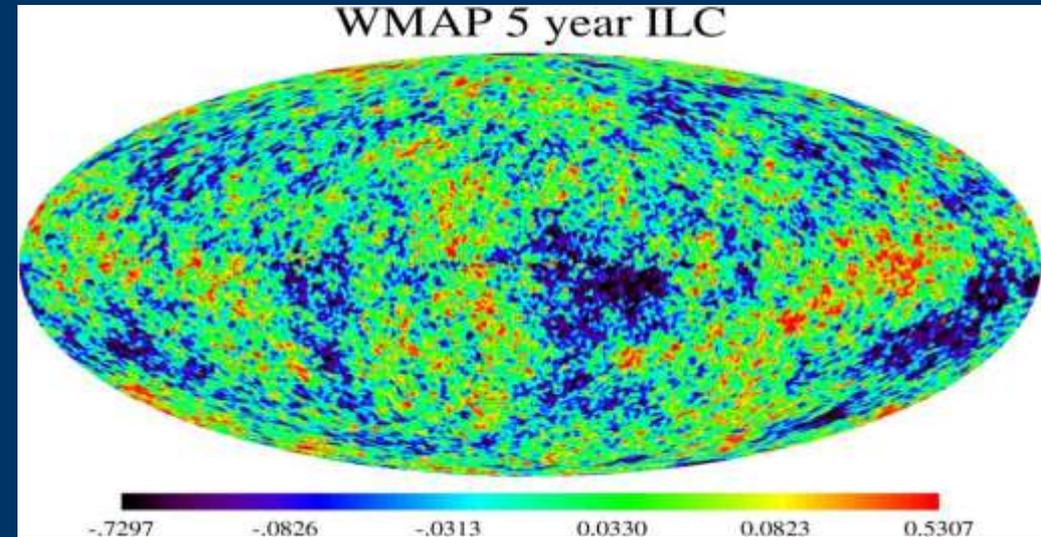
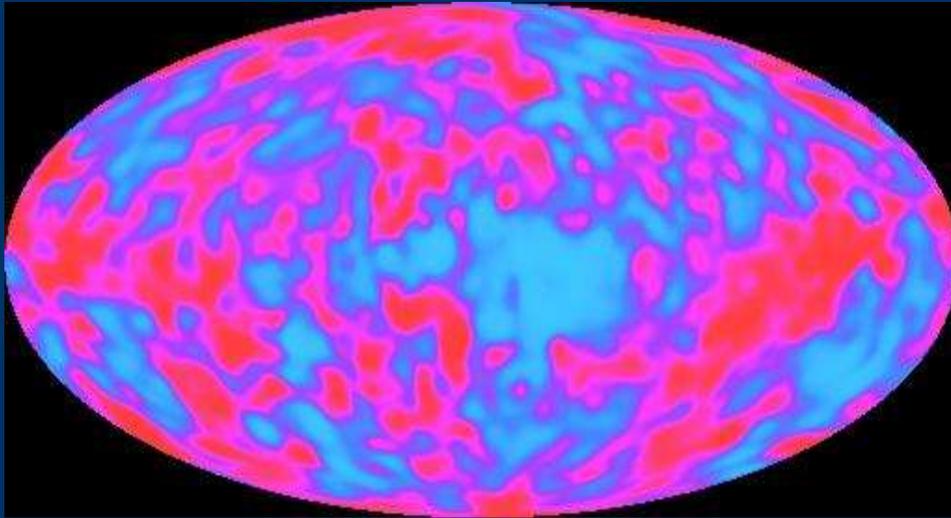


Sachs et Wolfe ont prédit des fluctuations  $dT/T$  allant jusqu'à **1%**, mais nous savons maintenant que l'Univers est bien plus homogène que Sachs et Wolfe le pensaient

Donc les observateurs travaillent depuis des années à améliorer la sensibilité pour détecter ces petites fluctuations. La première anisotropie détectée fut l'anisotropie dipolaire par Conklin en 1969: La représentation du RFC ci dessus est celle du satellite [COBE](#) et est bien meilleure que celle qu'avait détecté Conklin.

La partie rouge est plus chaude d'un facteur  $(v/c)*T_o$ , tandis que la partie bleue du ciel est plus froide du même facteur  $(v/c)*T_o$ , où la vitesse évoquée est  $v = 368 \text{ km/sec}$ . C'est ainsi que nous mesurons la vitesse du système solaire par rapport à l'Univers observable. Il s'est écoulé 23 ans avant que l'anisotropie prédite par Sachs et Wolfe soit détectée par Smoot *et al* en 1992. L'amplitude était de **1 pour 100,000** au lieu de **1%** mais est cohérente avec le  $\Lambda$ CDM model, [Wright *et al* 1992 *ApJL*, 396,13].

# Cartes du RFC



La carte à gauche (COBE) ci dessus montre l'anisotropie cosmique (et le bruit du détecteur) après soustraction du motif dipolaire et du rayonnement équatorial de la voie lactée. L'anisotropie de cette carte a un écart type  $30 \mu K$ , et si cela est converti en potentiel gravitationnel en utilisant les travaux de Sachs et Wolfe's et si on exprime ce potentiel par une hauteur dans un champ gravitationnel uniforme d'intensité égal au champ terrestre ( au sol), nous obtenons une hauteur qui est égale à **deux fois la distance Terre - Soleil**. Les montagnes et les vallées de l'Univers sont plutôt grandes. A droite dernière carte de WMAP (2008)

# 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 des 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 couplaient 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 RFC 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:

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

• 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:

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left[ \frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \right]$$

• 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 comobiles 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)

• On peut aussi utiliser l'équation

