

# ***ASTROPHYSIQUE***

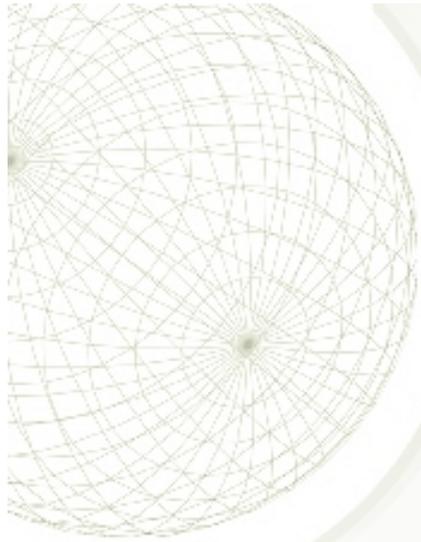
## **18 – LA THÉORIE DU BIG BANG (2)**



Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie  
Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA





# PARAMÈTRE D'ÉCHELLE

# LA MÉTRIQUE DE ROBERTSON ET WALKER

- Espace homogène

$$\Rightarrow ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) \{ dx^2 + S^2(\chi) [ d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2 ] \}$$

Paramètre d'échelle

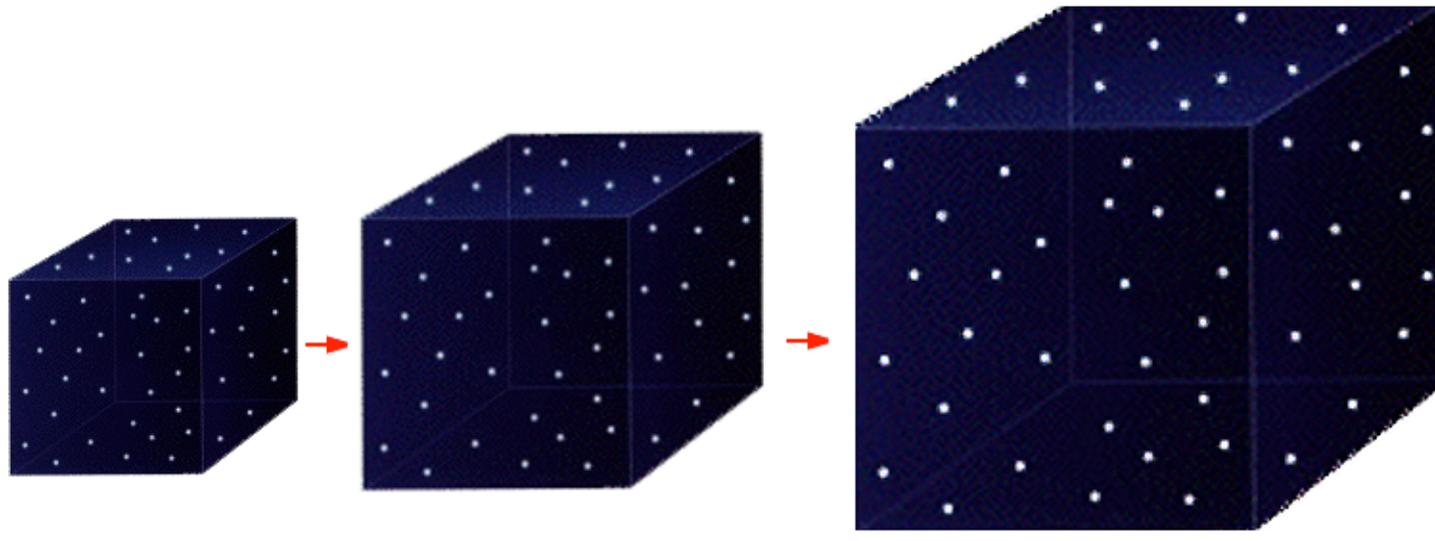
Selon la courbure spatiale  
 $S(\chi) = \chi$  courbure nulle  
 $S(\chi) = \sin\chi$  courbure positive  
 $S(\chi) = \text{sh}\chi$  courbure négative

Métrie habituelle de l'espace 3D  
(en coordonnées sphériques)

Coordonnées **comobiles**

## LE PARAMÈTRE D'ÉCHELLE

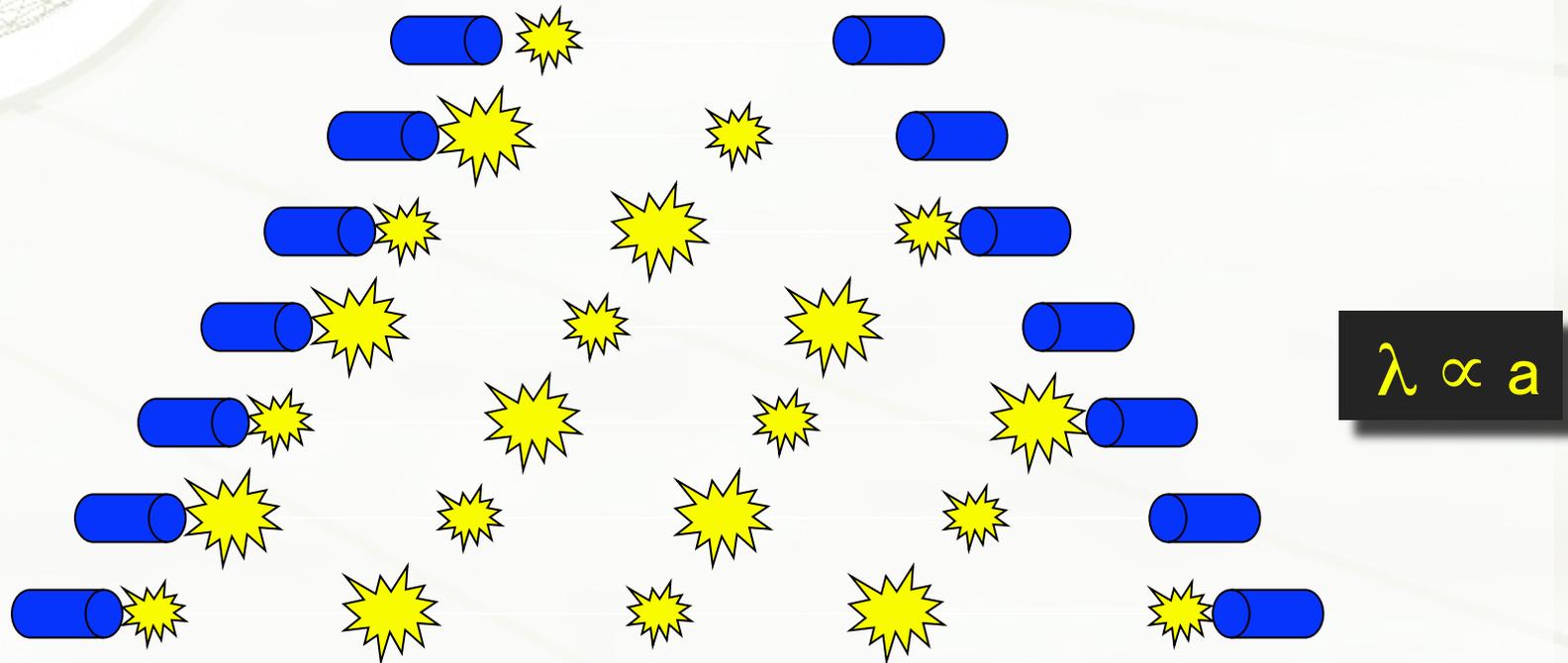
- Une distance physique  $D = a(t) \Delta\chi$  augmente avec le temps
- Cette dilatation de l'espace est identique pour tous les points



- Les coordonnées comobiles  $\chi$ ,  $\theta$  et  $\phi$  ne changent pas avec le temps
- On retrouve automatiquement la loi de Hubble

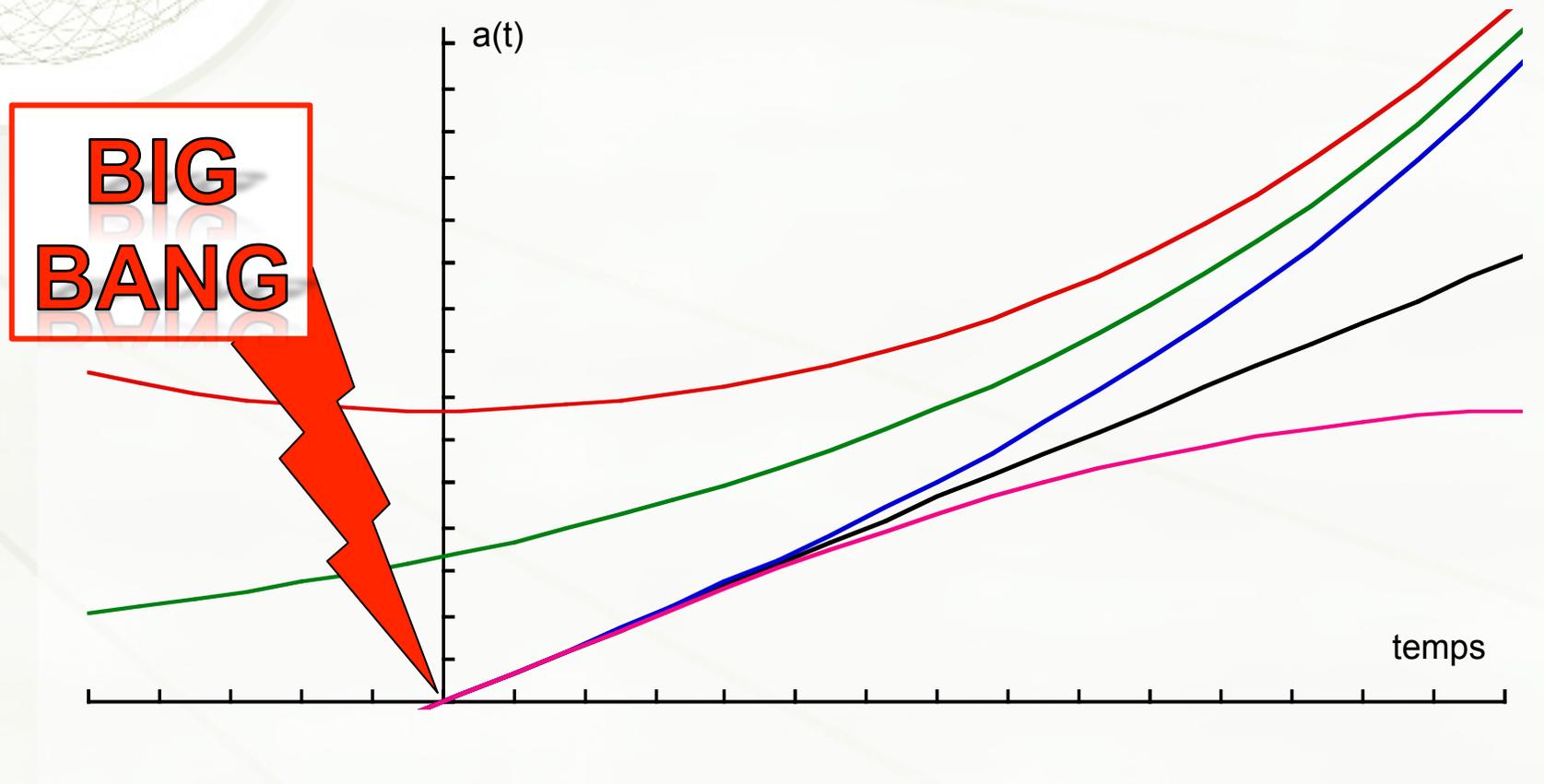
## LE DÉCALAGE VERS LE ROUGE

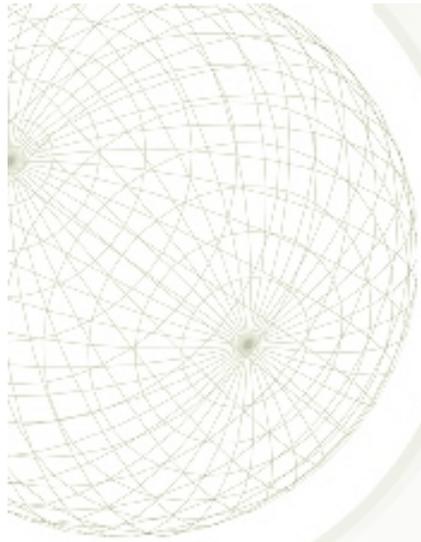
L'expansion de l'espace augmente la longueur d'onde d'un rayonnement et diminue sa fréquence



# ÉVOLUTION AU COURS DU TEMPS

- Le paramètre d'échelle  $a(t)$  varie au cours du temps selon une loi qui dépend du **contenu** de l'univers (matière, rayonnement, énergie noire...)





# DYNAMIQUE

# ÉQUATION D'EINSTEIN

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} (R - \Lambda) = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Tenseur de courbure  
(Ricci)

Construit à partir du tenseur  
métrique  $g_{\mu\nu}$  et de ses dérivées

Constante cosmologique Tenseur énergie-impulsion

<i>densité d'énergie</i>	<i>flux d'énergie</i>	<i>flux d'énergie</i>	<i>flux d'énergie</i>
<i>flux d'énergie</i>	<i>pression</i>	<i>cisaillement</i>	<i>cisaillement</i>
<i>flux d'énergie</i>	<i>cisaillement</i>	<i>pression</i>	<i>cisaillement</i>
<i>flux d'énergie</i>	<i>cisaillement</i>	<i>cisaillement</i>	<i>pression</i>

# L'ÉQUATION DE FRIEDMANN-LEMAÎTRE

$$\left[ \frac{\dot{a}}{a} \right]^2 = \frac{8\pi G \rho}{3} - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

Expansion de l'espace =  
« constante » de Hubble

Contenu matériel de l'espace-temps

- Matière ordinaire
- Matière noire
- Neutrinos
- Rayonnement électromagnétique
- Particules de tout type...

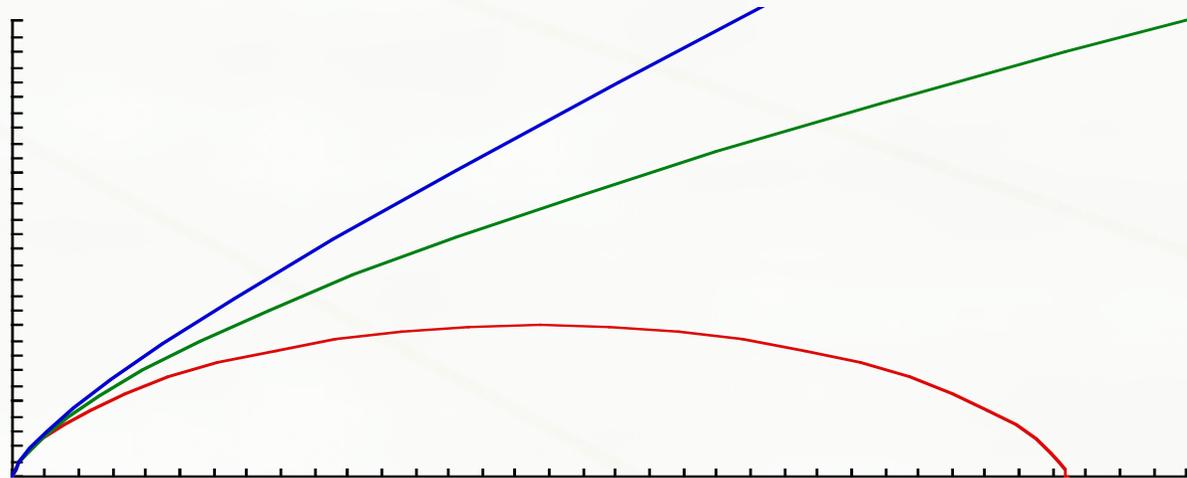
Courbure de l'espace

Constante cosmologique /  
Énergie noire, énergie du vide

⇒ équation différentielle à résoudre pour calculer  $a(t)$

# L'ÉQUATION DE FRIEDMANN-LEMAÎTRE

- Solutions simples quand un seul terme domine dans le terme de droite
  - matière non relativiste  $a(t) \sim t^{2/3}$
  - rayonnement  $a(t) \sim t^{1/2}$
  - courbure  $a(t) \sim t$
  - constante cosmologique  $a(t) \sim e^{Ht}$  ( $H = \sqrt{\Lambda/3}$ )
  - si la courbure de l'espace est positive ( $k = +1$ ) et si  $\Lambda = 0$ , l'expansion s'arrête quand  $\dot{a} = 0$  et devient une contraction



## OMEGAS

- Partons (encore!) de l'équation de Friedmann-Lemaître

$$H^2 = \left[ \frac{\dot{a}}{a} \right]^2 = \frac{8\pi G}{3} (\rho_{\text{matière}} + \rho_{\text{rayonnement}}) - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

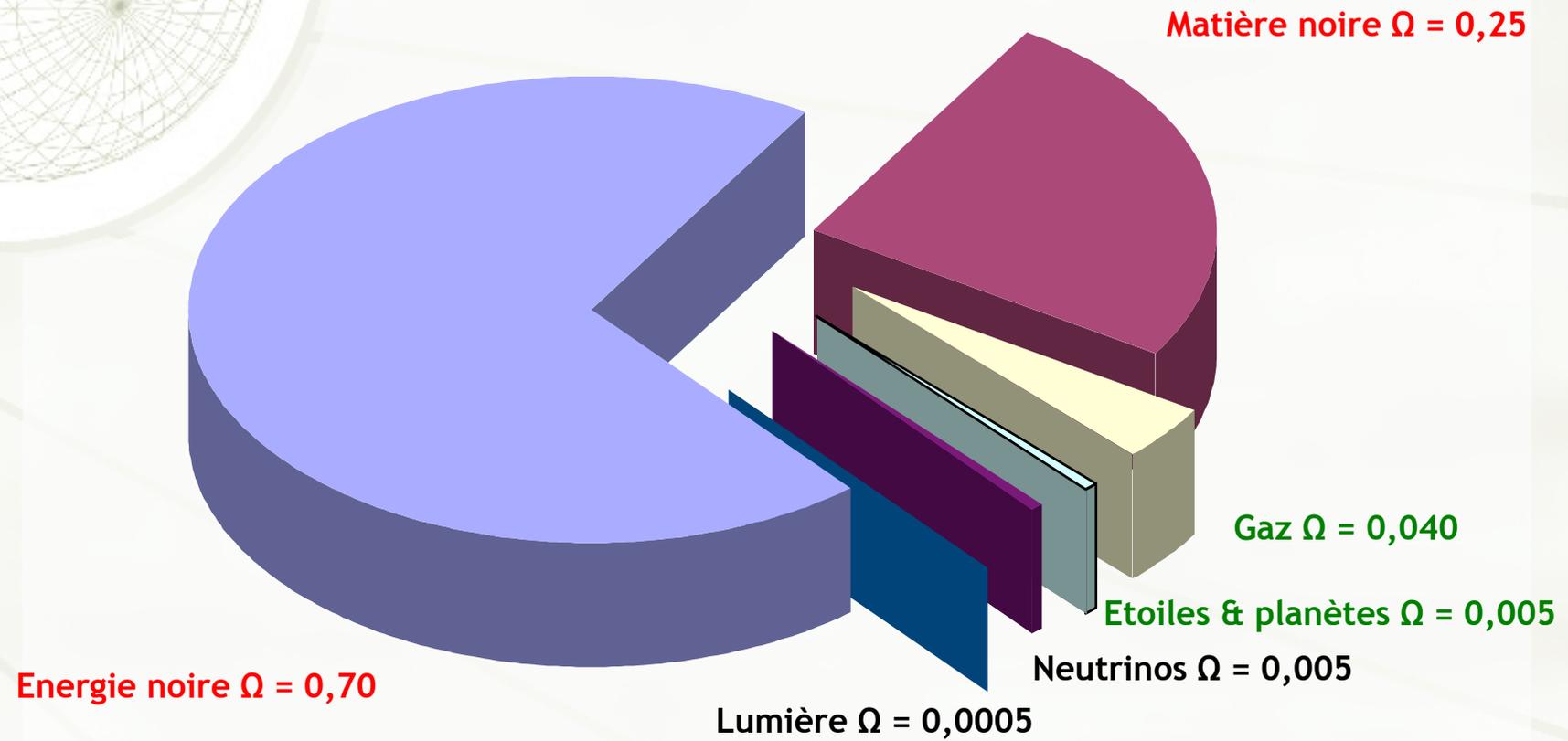
et divisons chaque côté par  $H^2$ . Cela devient simplissime:

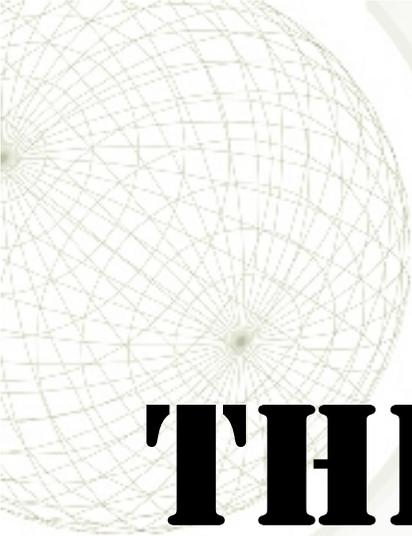
$$1 = \Omega_{\text{matière}} + \Omega_{\text{rayonnement}} + \Omega_k + \Omega_\Lambda$$

en définissant

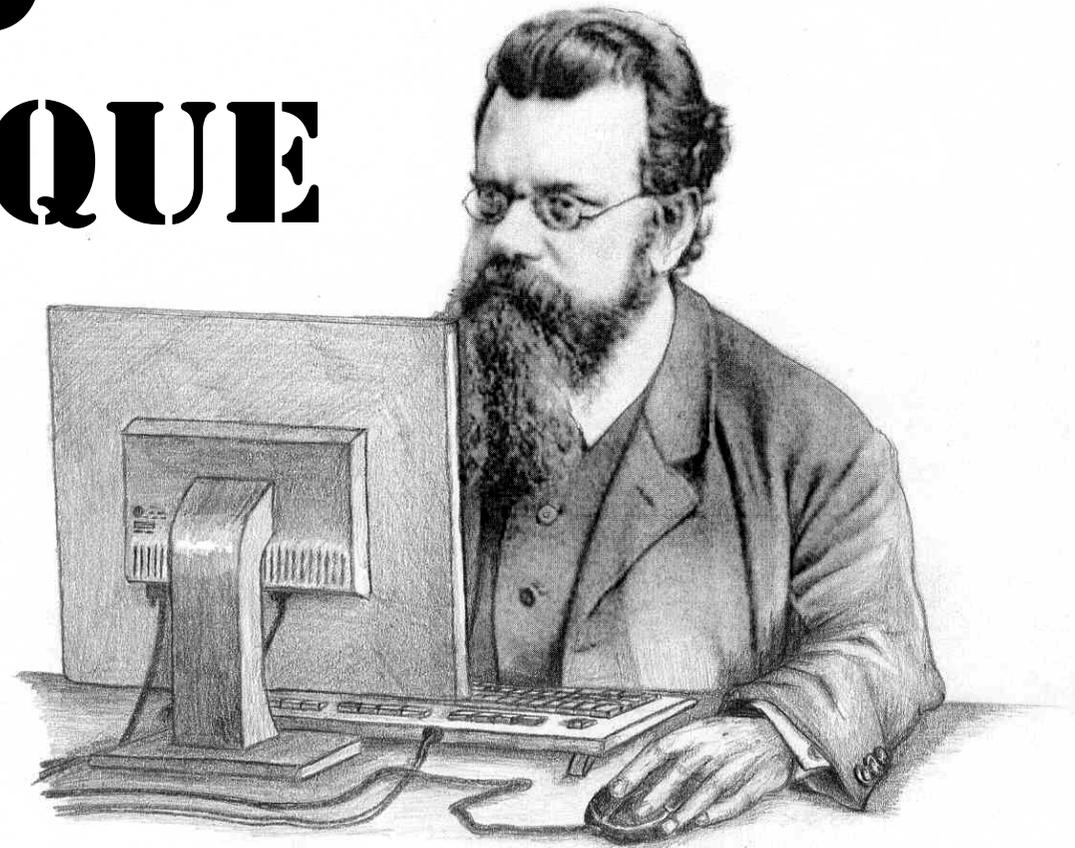
- $\Omega_{\text{matière}} = 8\pi G \rho_{\text{matière}} / 3H^2$
  - $\Omega_{\text{rayonnement}} = 8\pi G \rho_{\text{rayonnement}} / 3H^2$
  - $\Omega_k = -k / a^2 H^2$
  - $\Omega_\Lambda = \Lambda / 3H^2$
- Observations :
- $\Omega_m \sim 0,30$
  - $\Omega_r \ll 1$
  - $\Omega_k \ll 1$
  - $\Omega_\Lambda \sim 0,70$

## LE « MODÈLE DE CONCORDANCE »



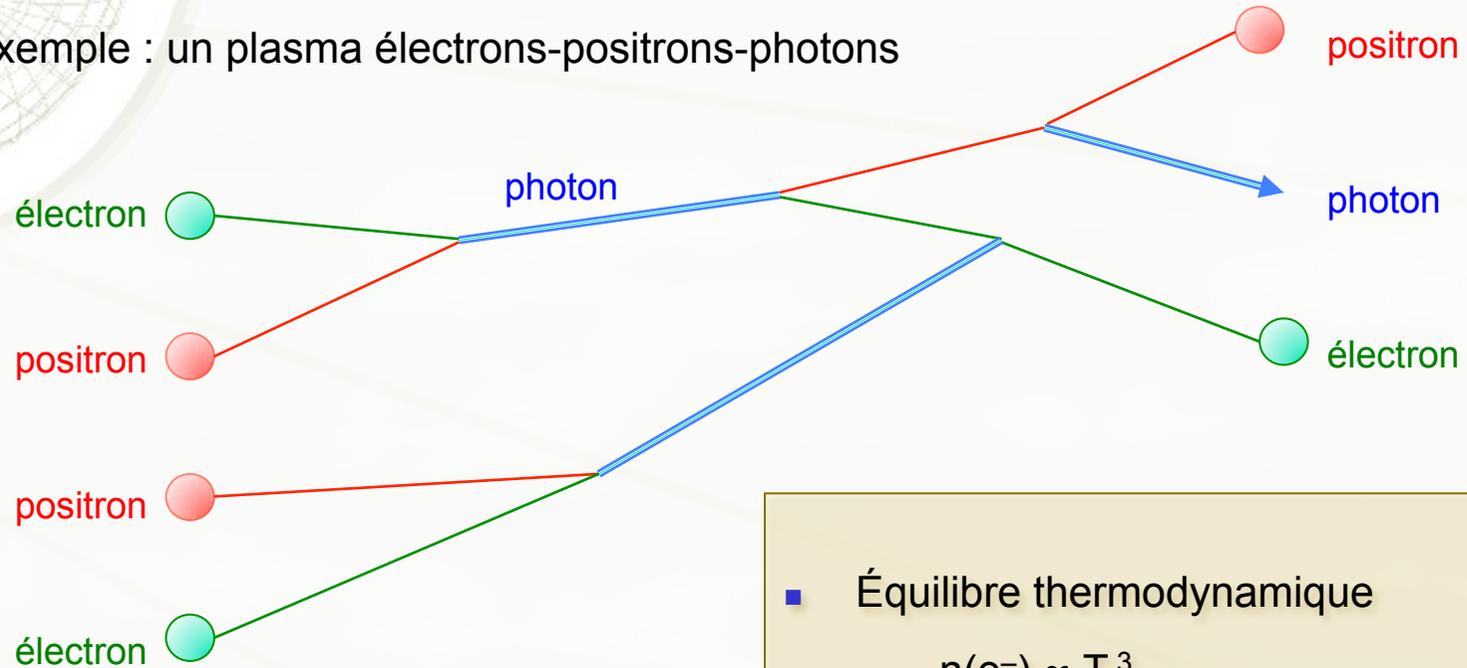


# THERMO DYNAMIQUE



# CRÉATION ET ANNIHILATION DE PARTICULES

- Par exemple : un plasma électrons-positrons-photons



- Le nombre de particules n'est pas conservé

- Équilibre thermodynamique

- $n(e^-) \propto T^3$
- $n(e^+) \propto T^3$
- $n(\gamma) \propto T^3$

# EXPANSION ET TEMPÉRATURE

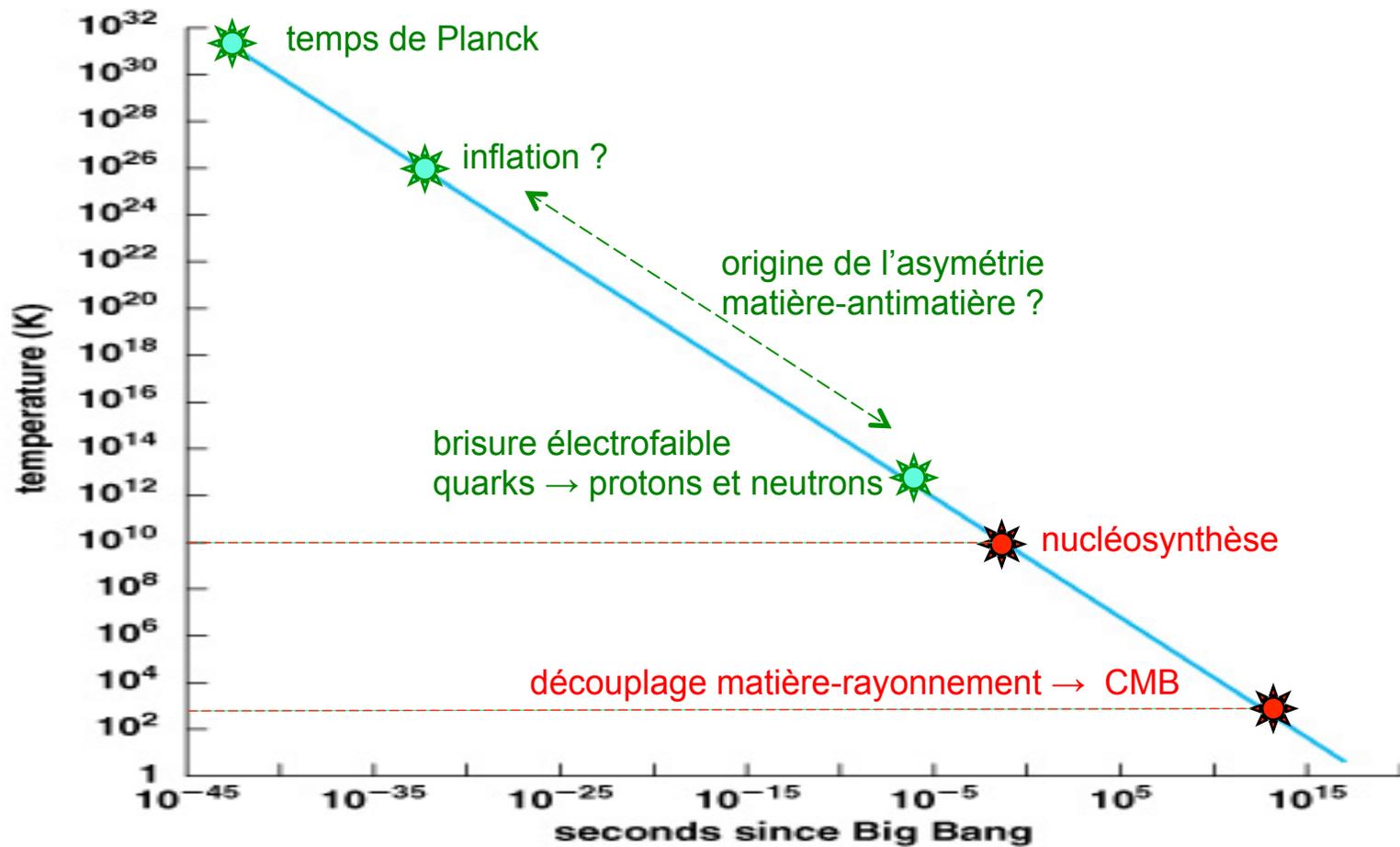
- Équilibre thermodynamique  $\Rightarrow$  densité  $n \propto T^3$
- Expansion de l'univers  $\Rightarrow$  dimensions  $\propto$  paramètre d'échelle  $a$   
 $\Rightarrow$  densité  $n \propto 1/a^3$

$$T \propto \frac{1}{a}$$

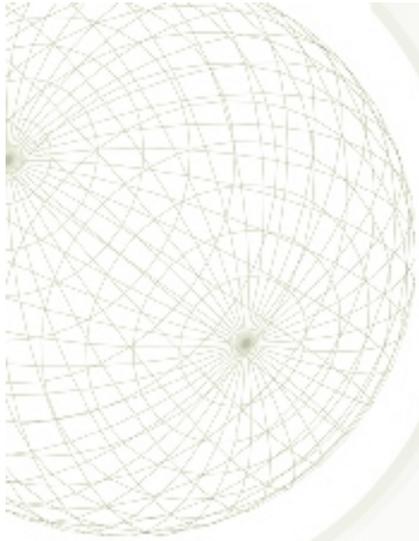
- Expansion  $\Rightarrow$  refroidissement :  $T(z) = T(0) [1 + z]$
- $\Rightarrow$  le passé était plus chaud

$$t = 1 \text{ seconde} \quad \Leftrightarrow \quad T = 10^{10} \text{ K} = 1 \text{ MeV}$$

# HISTOIRE THERMIQUE DE L'UNIVERS



Copyright © Addison Wesley.



# **NUCLÉOSYNTHÈSE *PRIMORDIALE***

# SITUATION DE DÉPART

- Univers très largement dominé par le rayonnement **au sens large**

$$\rho = (\pi^2/30) g_{\text{eff}} T^4$$

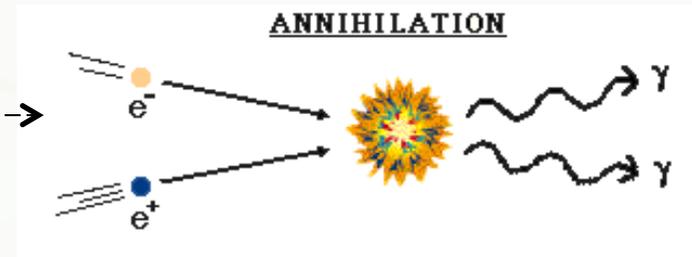
$$T(t) = (90/8\pi^3 G_N g_{\text{eff}})^{1/4} / \sqrt{t}$$

$$T(t) \sim 1.55 \text{ MeV } g_{\text{eff}}^{-1/4} / \sqrt{t}$$

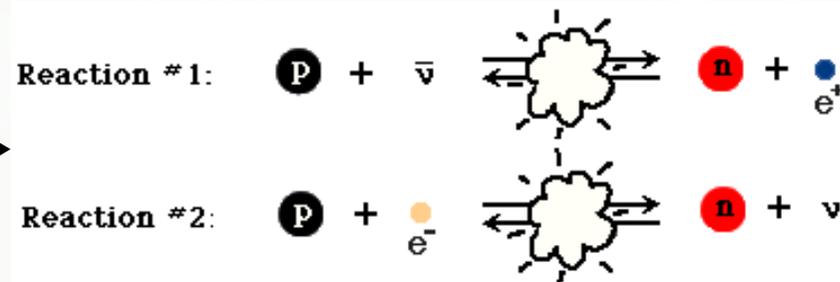
$$g_{\text{eff}} = 2 + 7/2 + 7 N_\nu/4$$

- Equilibre thermique entre photons, neutrinos, électrons et nucléons
  - assuré par des interactions électromagnétiques
  - et par interactions faibles comme la conversion neutron-proton
  - neutrons plus lourds de  $\sim 1 \text{ MeV}$  que les protons  $\rightarrow$  de moins en moins nombreux (faute d'énergie)

- Annihilation électron-positron à  $T = 0,5 \text{ MeV}$

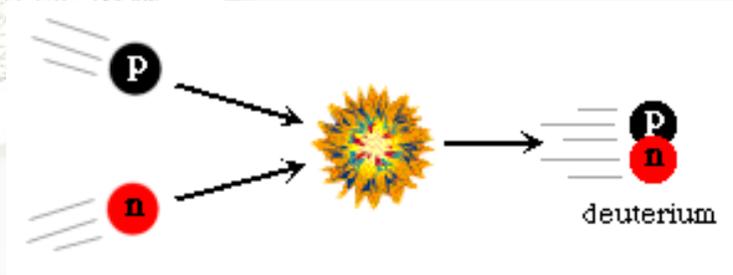


- Découplage des neutrinos vers 1 MeV
- Equilibre proton-neutron « gelé » à  $T \sim 0,7 \text{ MeV}$  à la valeur  $p/n \sim 6$

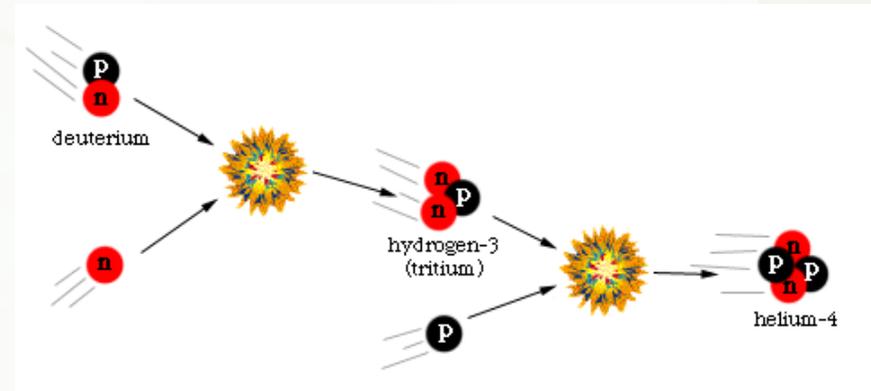


# RÉACTIONS DE FUSION

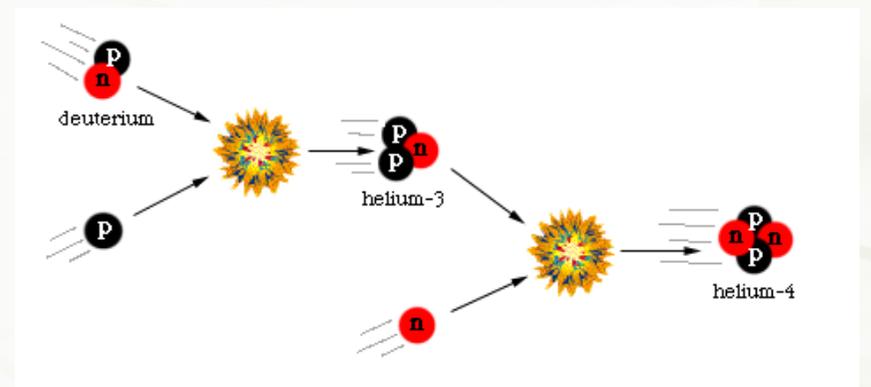
- Fusion du deutérium



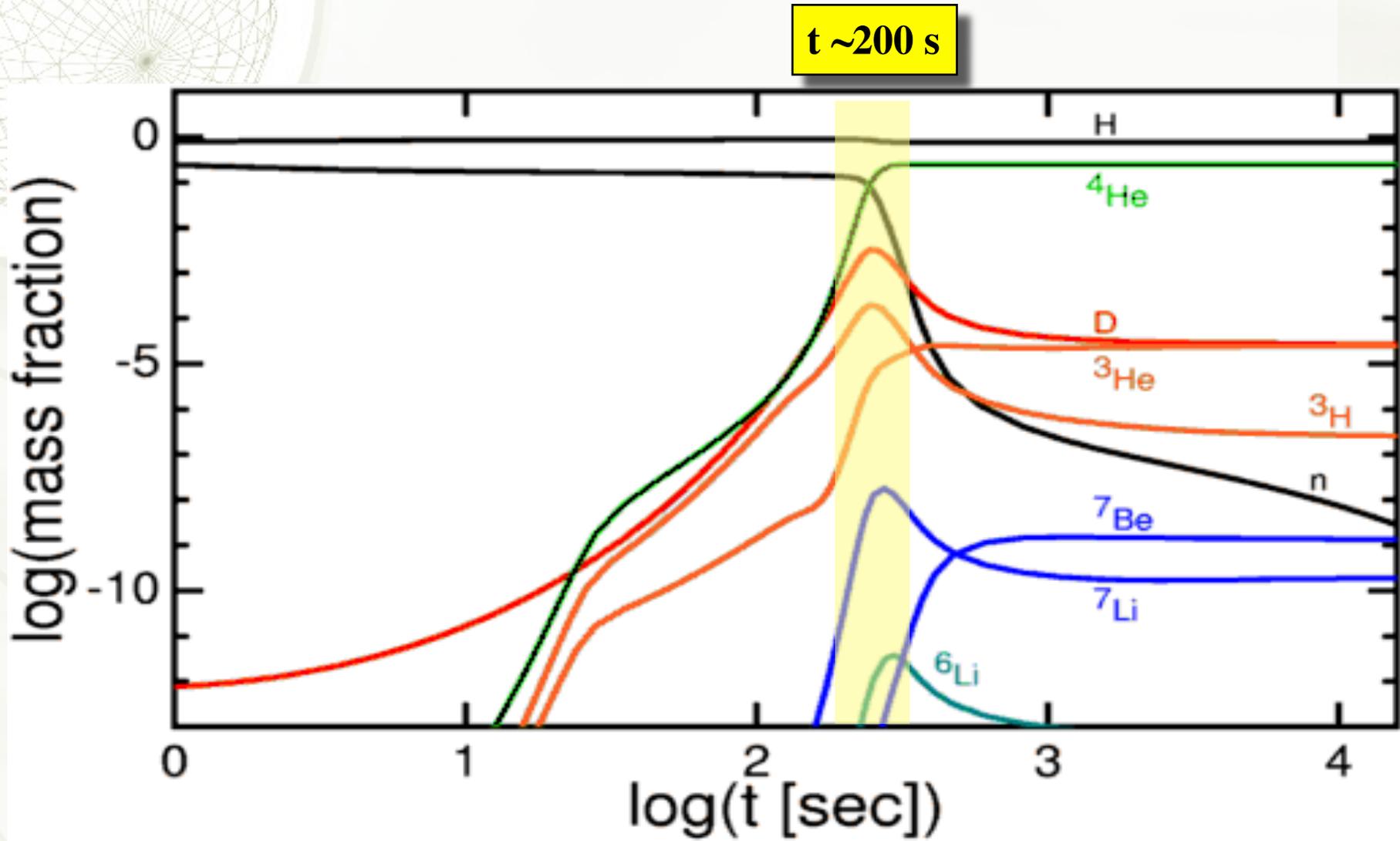
- Vers l'hélium 4 via le tritium



- Le taux de réaction dépend
  - de la densité  $n_B$  de baryons (protons et neutrons)
  - de la densité  $n_\gamma$  de photons (capables de photo-dissocier le deutérium)
  - donc du rapport  $n_B / n_\gamma$

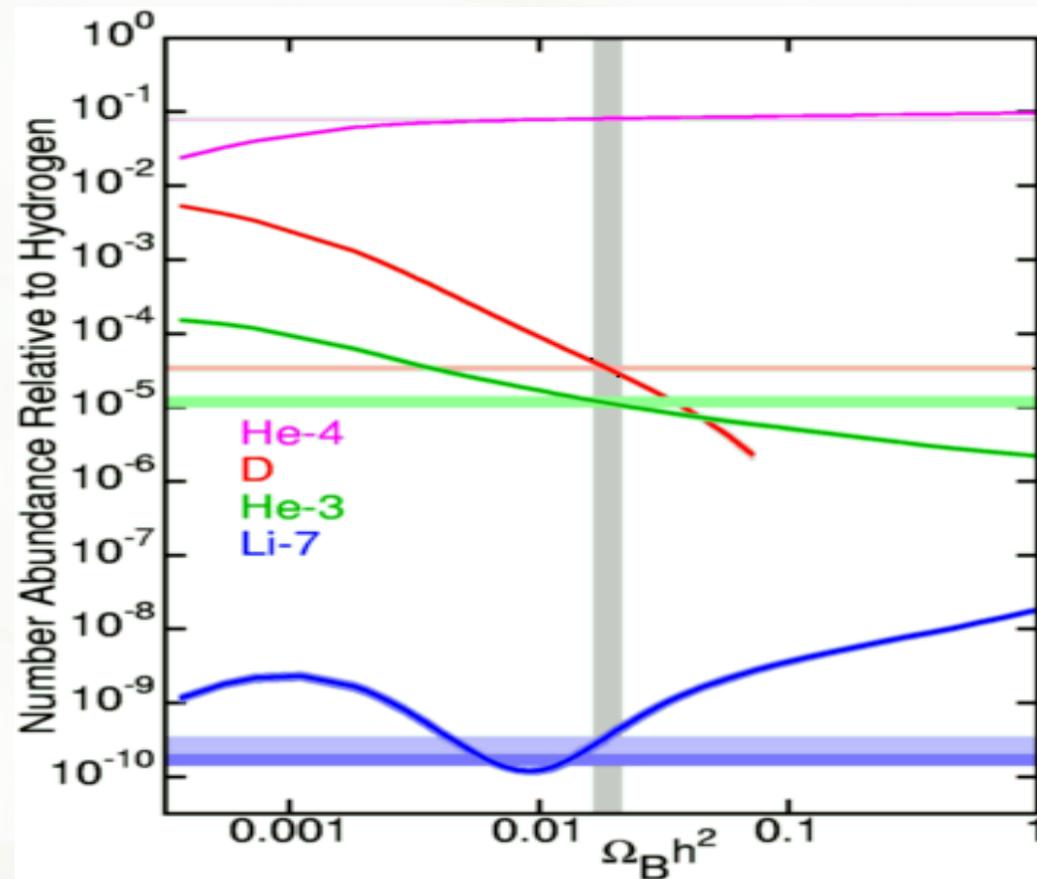


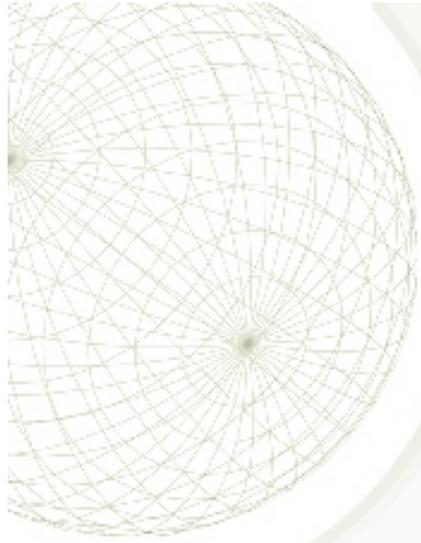
# AU FIL DU TEMPS



# PRÉDICTIONS % OBSERVATIONS

- Théorie : abondances dépendant de la quantité relative de photons et de nucléons
- Mesures
  - He 4
  - Deutérium
  - Hélium 3
  - Lithium 7
- $\rightarrow \Omega_{\text{Baryons}}$





# **CMB**

## **LE FOND COSMOLOGIQUE DE RAYONNEMENT MICRO-ONDES**

# ÉQUILIBRE PHOTONS ↔ ÉLECTRONS + IONS ↔ ATOMES NEUTRES

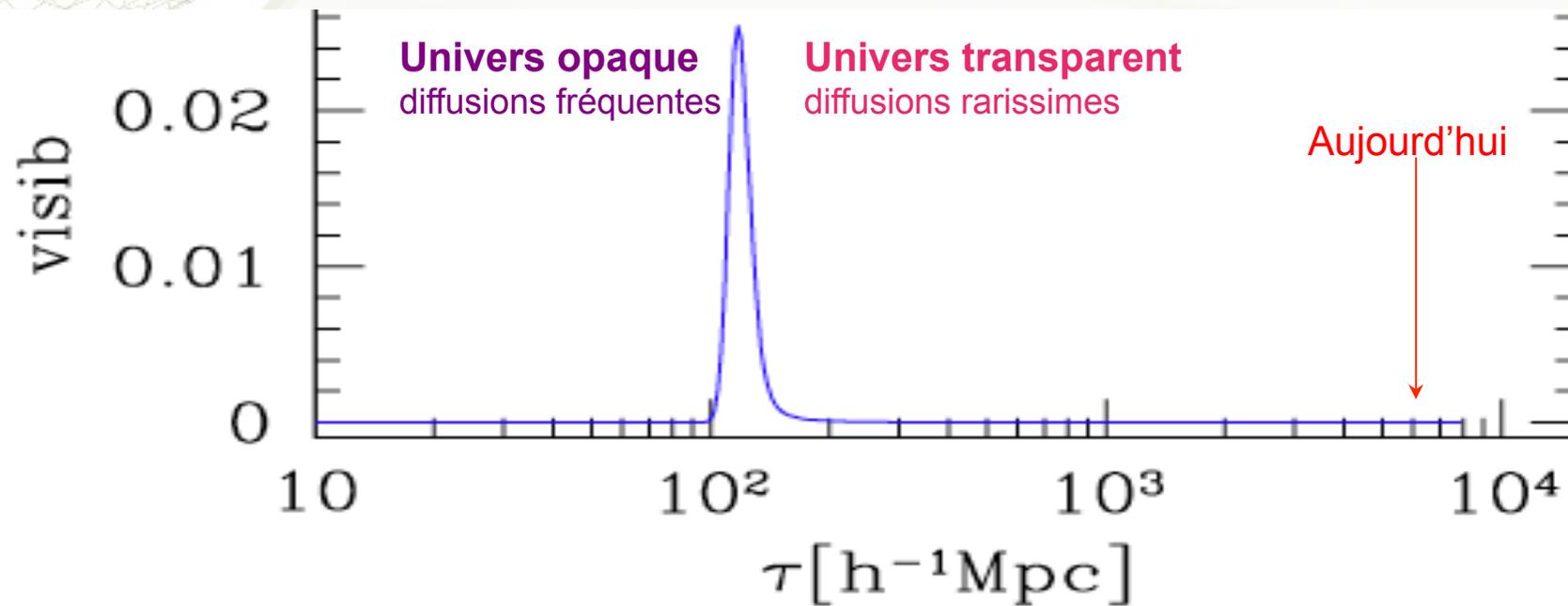
- Pour un photon, une particule électriquement chargée est une « cible » énorme
- Une particule neutre – ou un atome neutre – est une cible minuscule



- À une température  $> 10^5$  K, tous les atomes sont ionisés → les photons sont absorbés sitôt émis **et ne se propagent pas**
- À une température  $< 3\ 000$  K, le nombre d'atomes ionisés devient négligeable → les photons ne sont plus absorbés et **se propagent pratiquement sans aucune interaction**

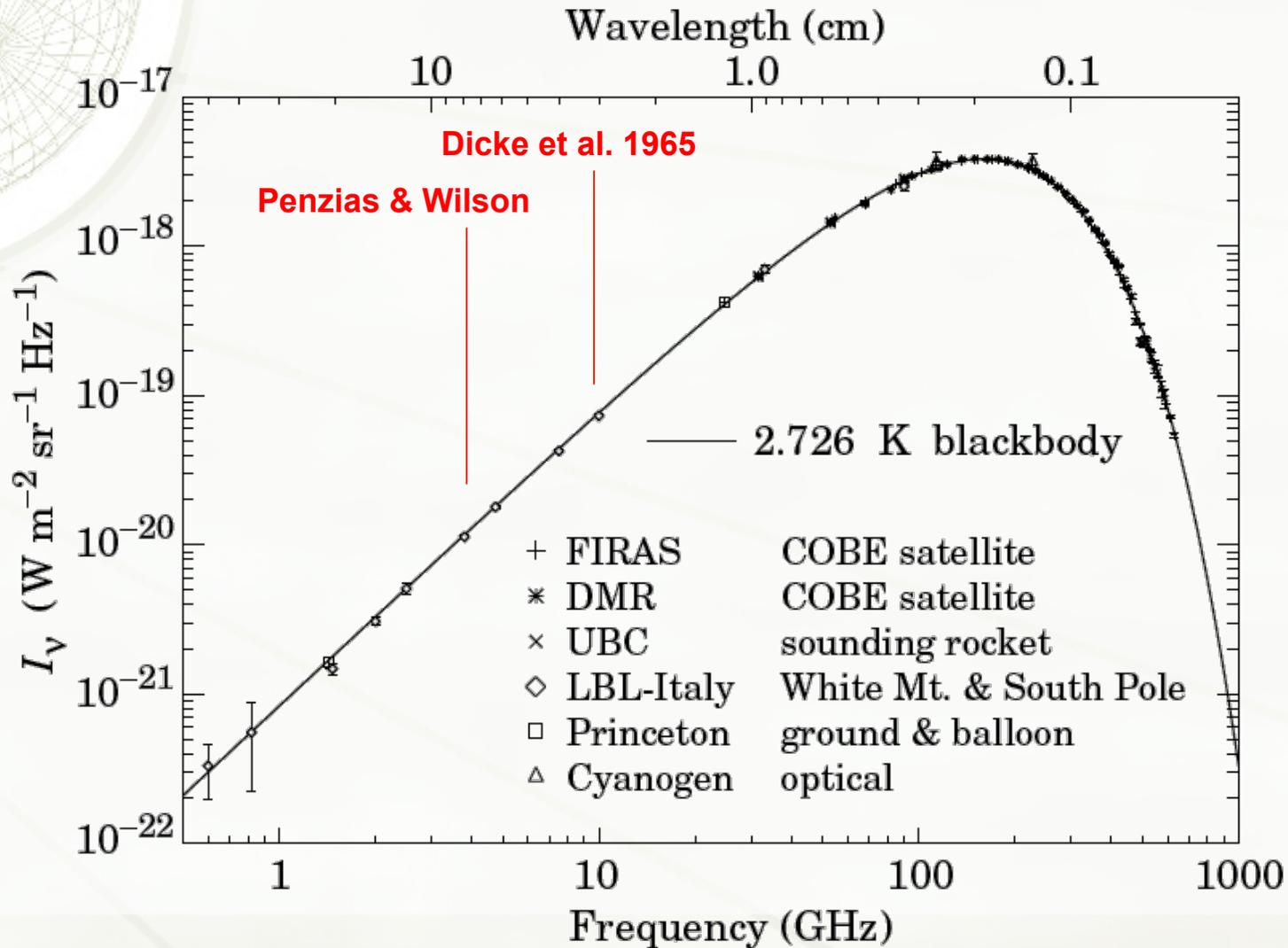
## DÉCOUPLAGE ⇔ RECOMBINAISON

- Probabilité que la dernière diffusion d'un photon ait été au temps (conforme)  $\tau$

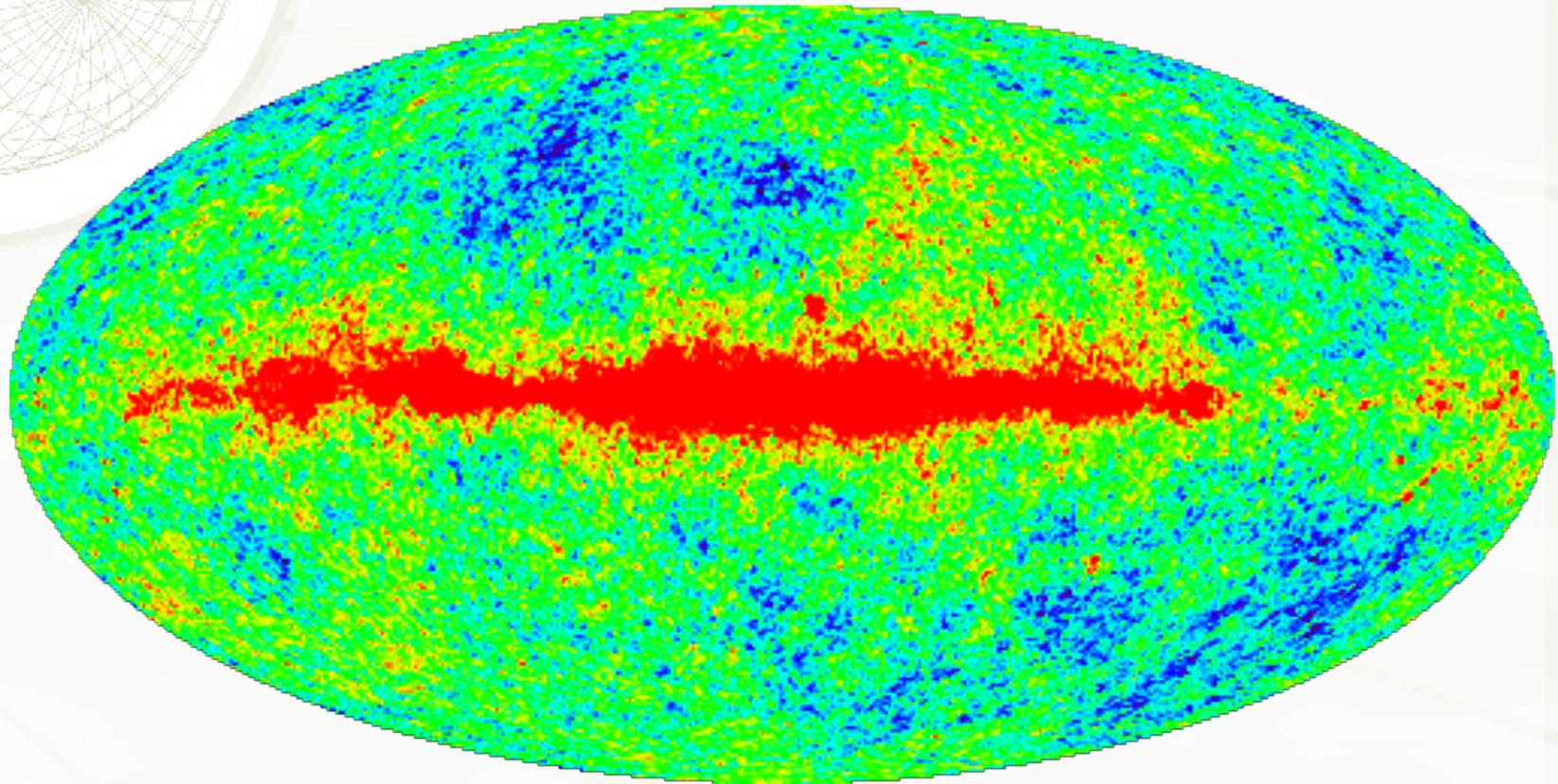


$$d\tau = dt/a(t)$$

# ÉQUILIBRE THERMIQUE → SPECTRE DE PLANCK (CORPS NOIR)



# ANISOTROPIES & FLUCTUATIONS



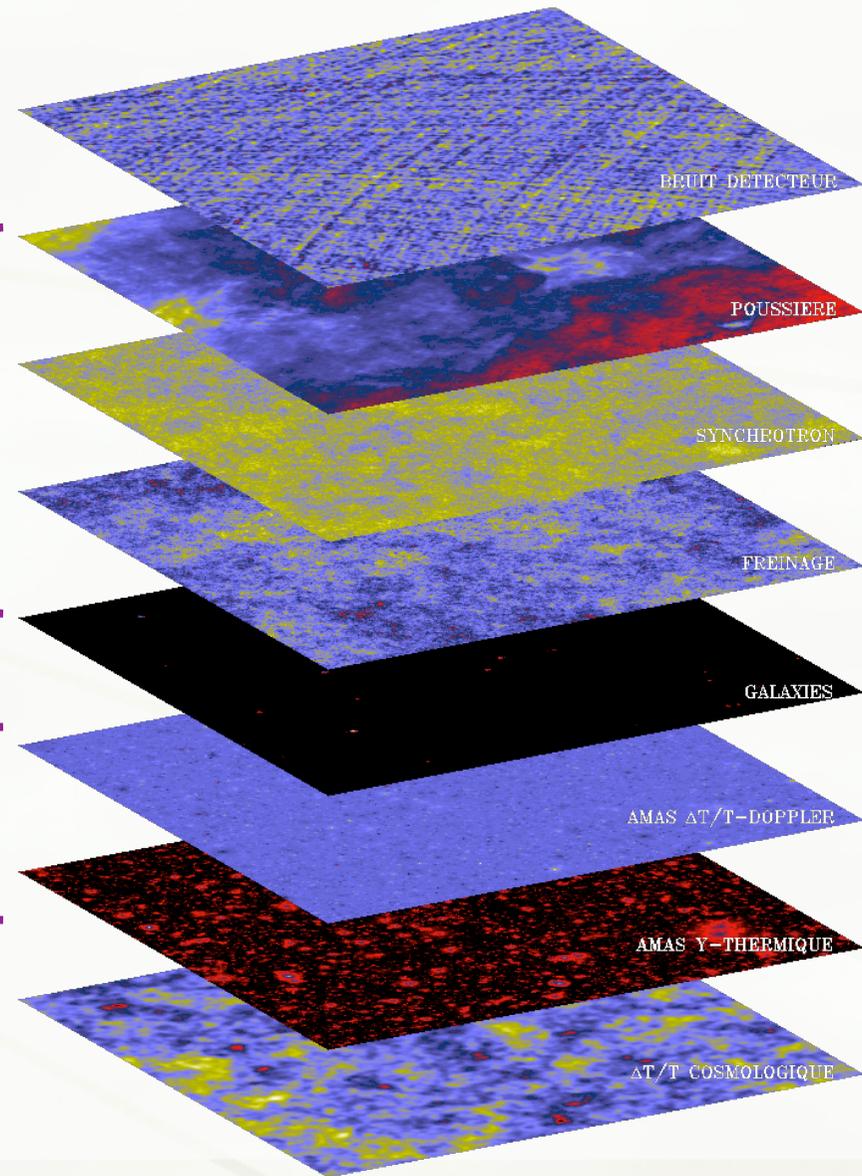
# LES AVANT-PLANS

Instrument

Voie lactée

Amas (effet Sunyaev-Zeldovitch)

Le fond de rayonnement cherché



F.R. BOUCHET & R. GISPERT 1996

## ORIGINES DES FLUCTUATIONS

- Dans un univers homogène et isotrope, un rayonnement de corps noir est partout à la même température  $T$
- Une perturbation de cet univers entraîne trois types de décalage de cette température (qui se superposent)
  - un **changement intrinsèque** de température (compression  $\rightarrow$  réchauffement), dû par exemple à des fluctuations de densité
  - un **décalage Doppler** si la source se déplace % observateur (perturbation de densité  $\rightarrow$  perturbation de vitesse)
  - un **décalage gravitationnel** si la source n'est pas au même potentiel que l'observateur (effet Sachs-Wolfe) ou si la lumière traverse des potentiels variables au cours du temps (effet Sachs-Wolfe intégré)
- A quoi s'ajoutent s'ajoutent les avant-plans

# LA SURFACE DE DERNIÈRE DIFFUSION

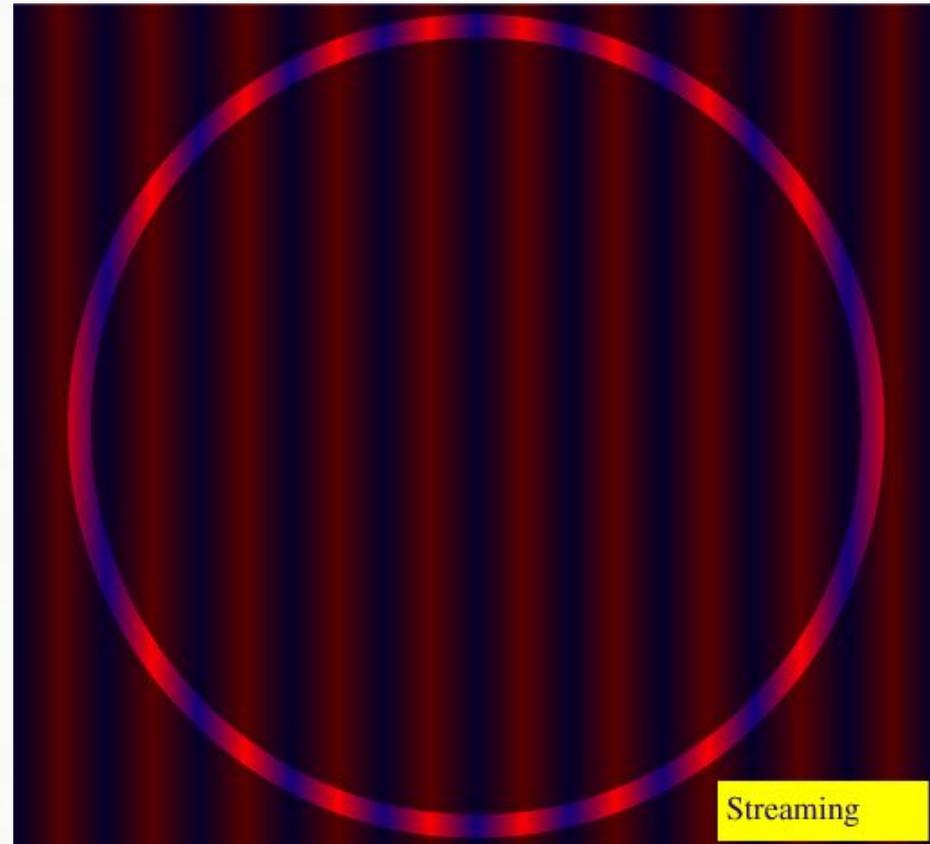
Fluctuations de température

La répartition des points chauds et froids est figée à la recombinaison

Les photons se déplacent ensuite librement

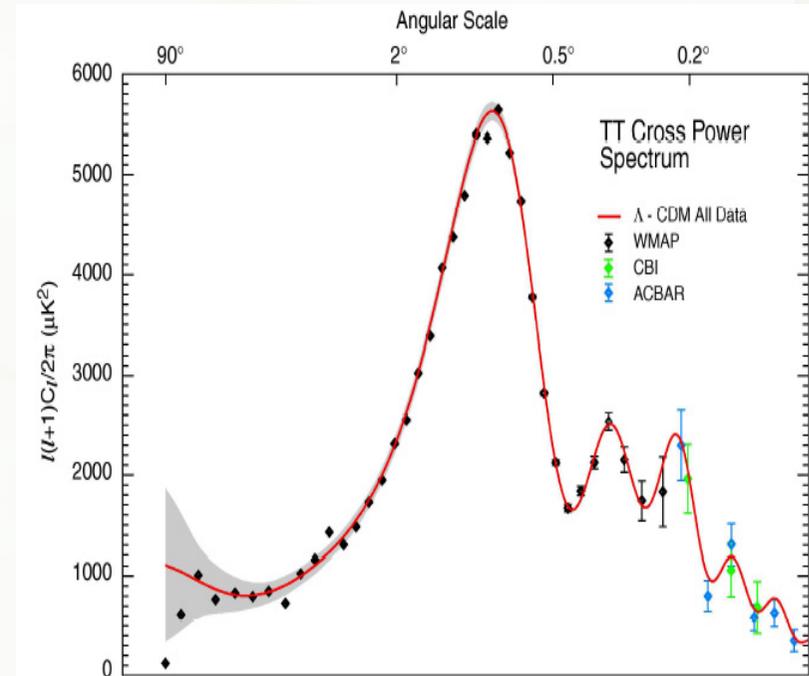
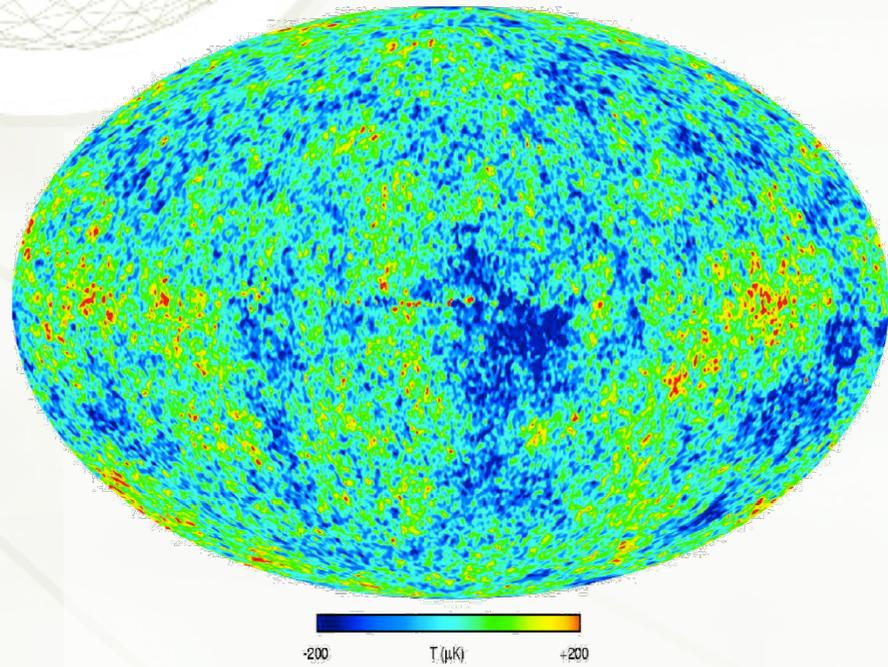
L'observateur (au centre) reçoit des photons venant de plus en plus loin

La répartition *spatiale* des pics et des creux induit une répartition *angulaire* de fluctuations de température sur la *surface de dernière diffusion*



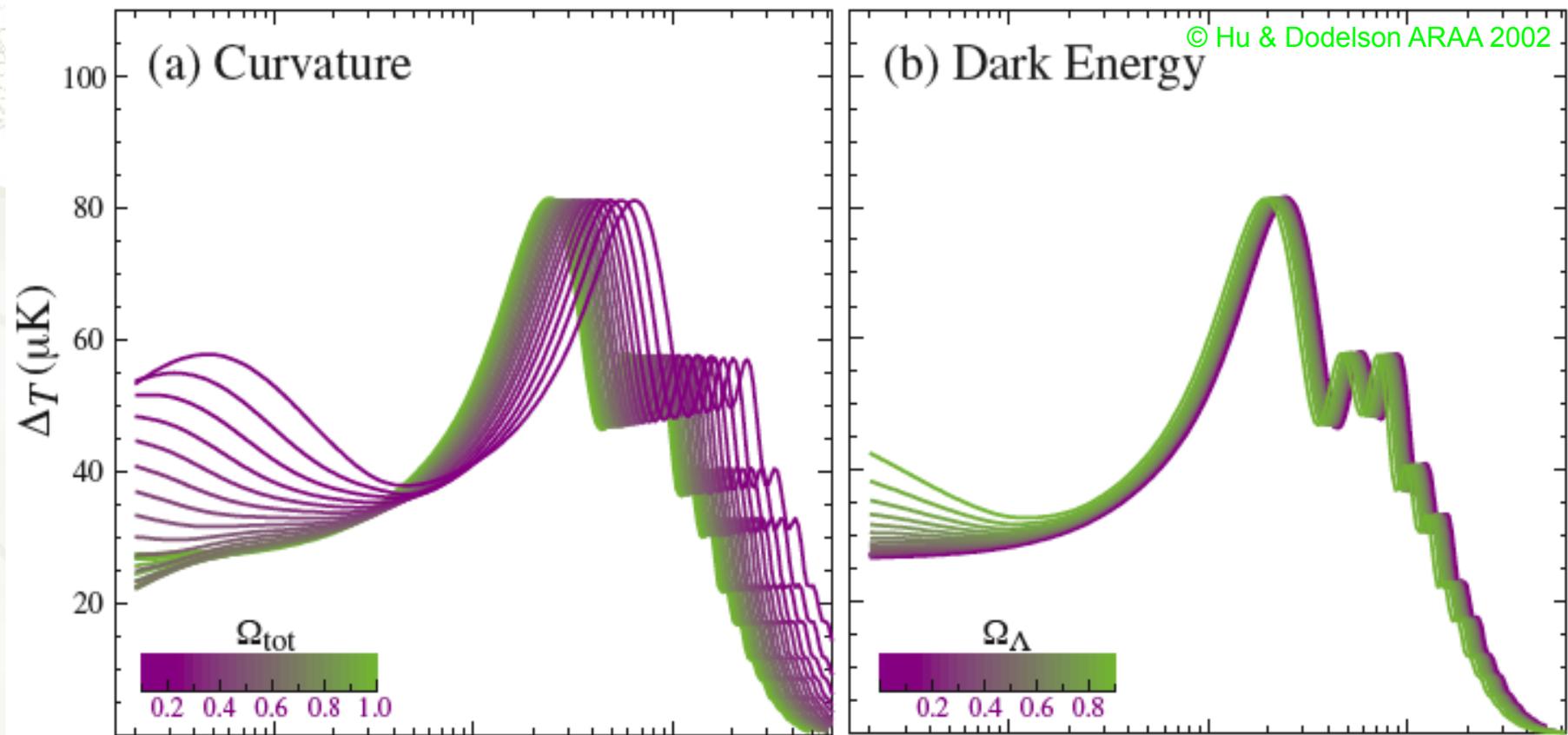
# DES FLUCTUATIONS ANGULAIRES AU SPECTRE

- Des anisotropies de température
- on extrait le « spectre de puissance »



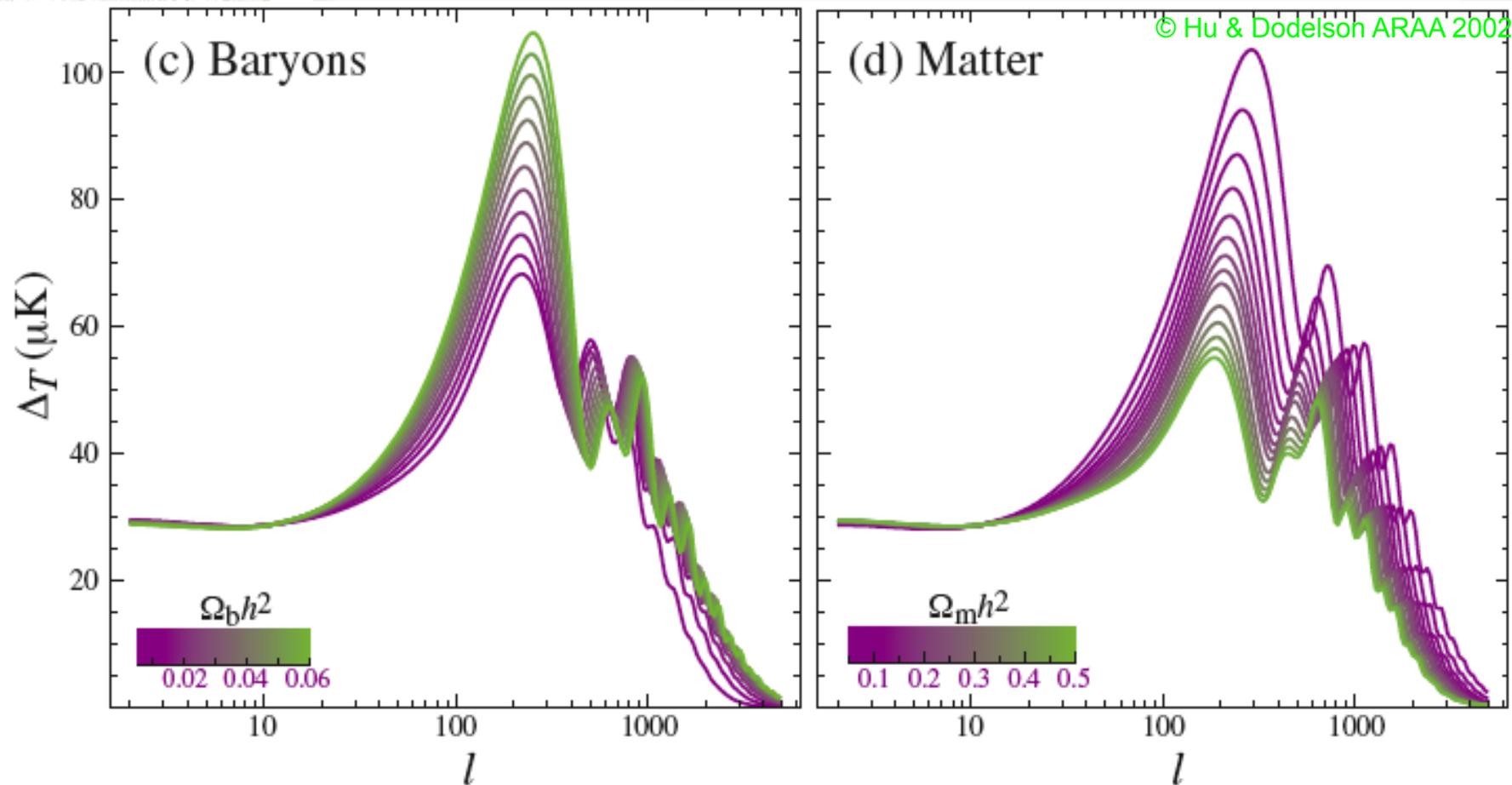
# CONTRAINTES SUR LE MODÈLE COSMOLOGIQUE (1)

- La position des pics dépend de la courbure spatiale et de la constante cosmologique :

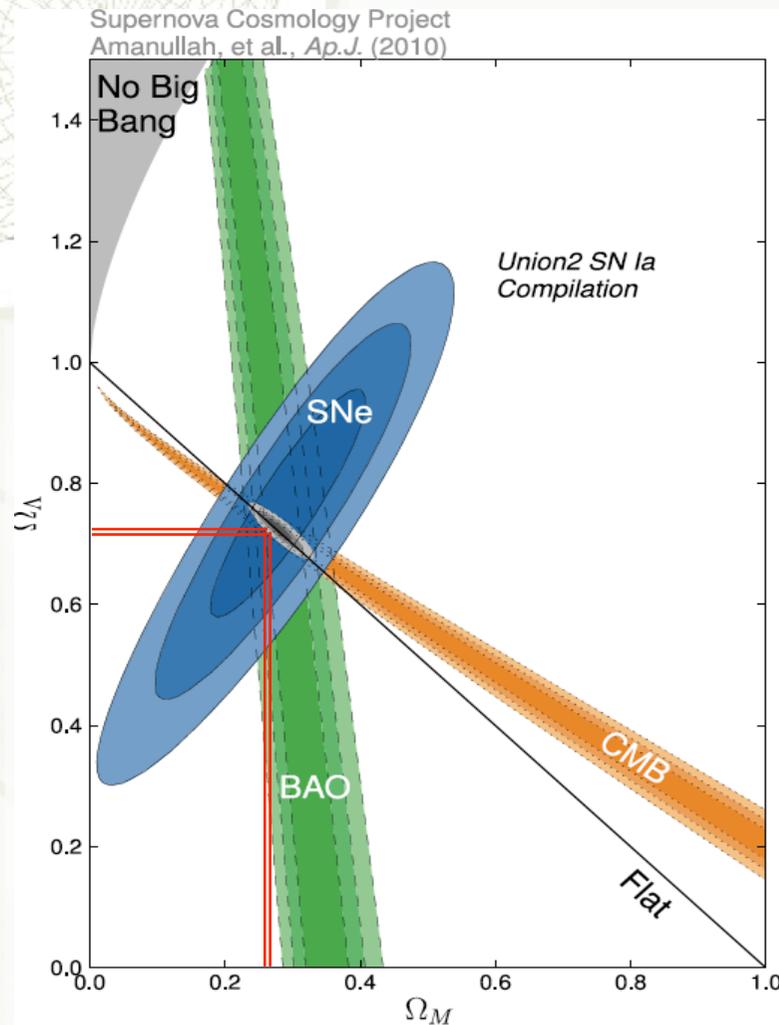


## CONTRAINTES SUR LE MODÈLE COSMOLOGIQUE (2)

- La hauteur des pics dépend de la quantité de baryons et de quantité de matière noire :



# MATIÈRE NOIRE... ÉNERGIE NOIRE...



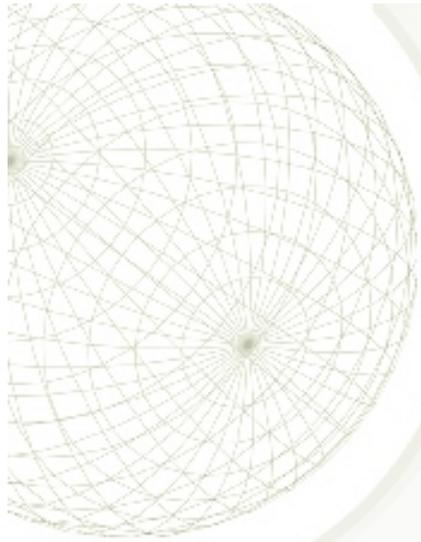
- La position du premier pic acoustique du CMB indique une courbure spatiale  $\Omega_k$  presque nulle

$$\rightarrow \Omega_\Lambda + \Omega_{mat} \sim 1$$

- L'accélération de l'expansion, indiquée par les supernovae, donne une autre combinaison

$$\frac{1}{2} \Omega_{mat} - \Omega_\Lambda \sim -0.6$$

- D'où  $\Omega_{mat} \sim 0.27 \rightarrow$  matière noire  
et  $\Omega_\Lambda \sim 0.73 \rightarrow$  énergie noire



Merci de votre attention !

