

# Astrophysique

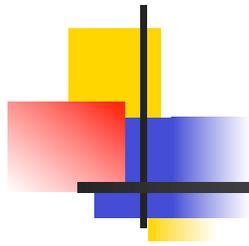
## 23 – Thermodynamique du big bang



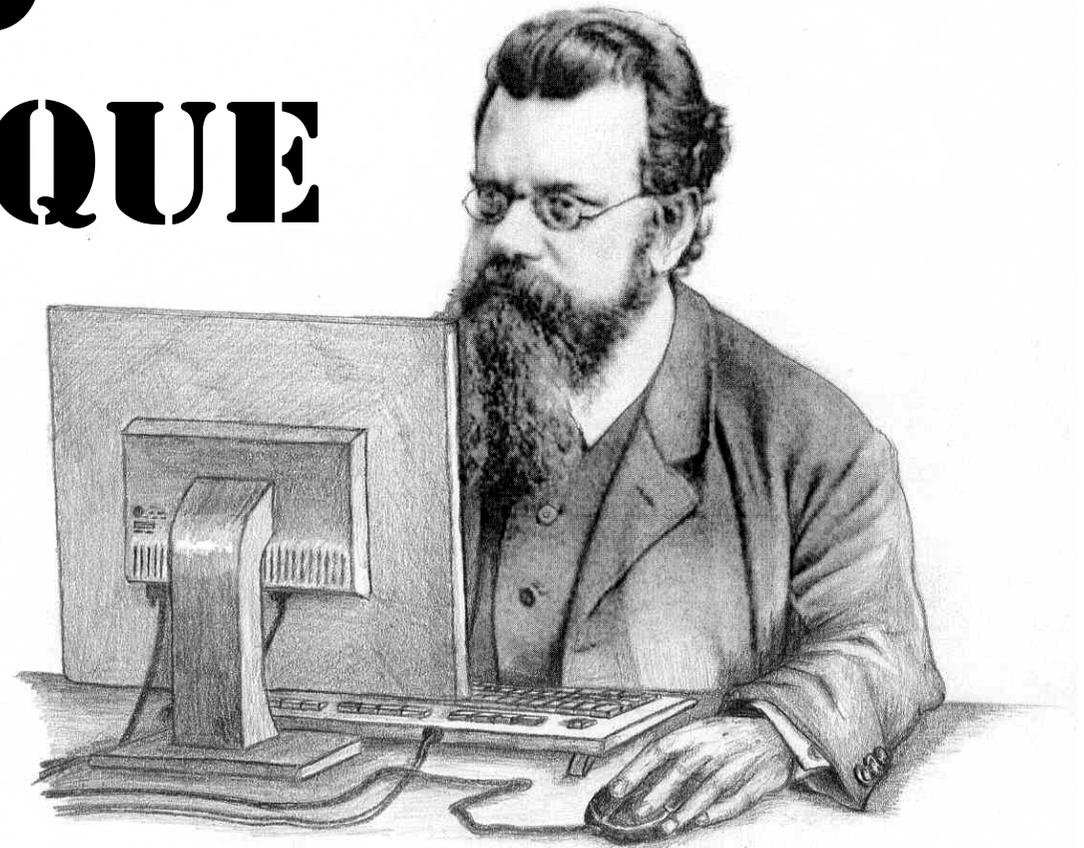
Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA



# THERMO DYNAMIQUE



# Particules, équilibre et température

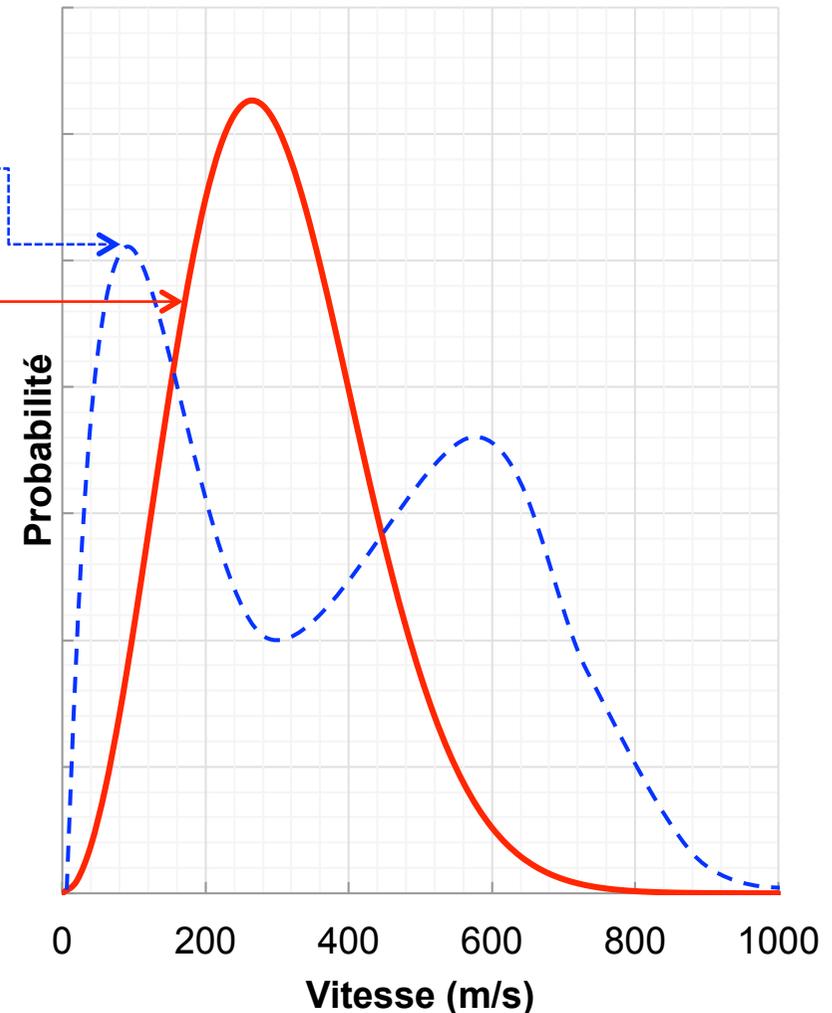
- Particules de masse  $m$
- Distribution **quelconque** des vitesses
- Collisions  $\Rightarrow$  évolution vers équilibre  
 $\Rightarrow$  distribution **maxwellienne**

$$f(v) \propto v^2 \exp\left\{-\frac{3}{2} \frac{v^2}{\langle v^2 \rangle}\right\}$$

- Plusieurs types de particules de masses  $m_1, m_2, m_3 \dots$   
 $\Rightarrow$  **équipartition de l'énergie**

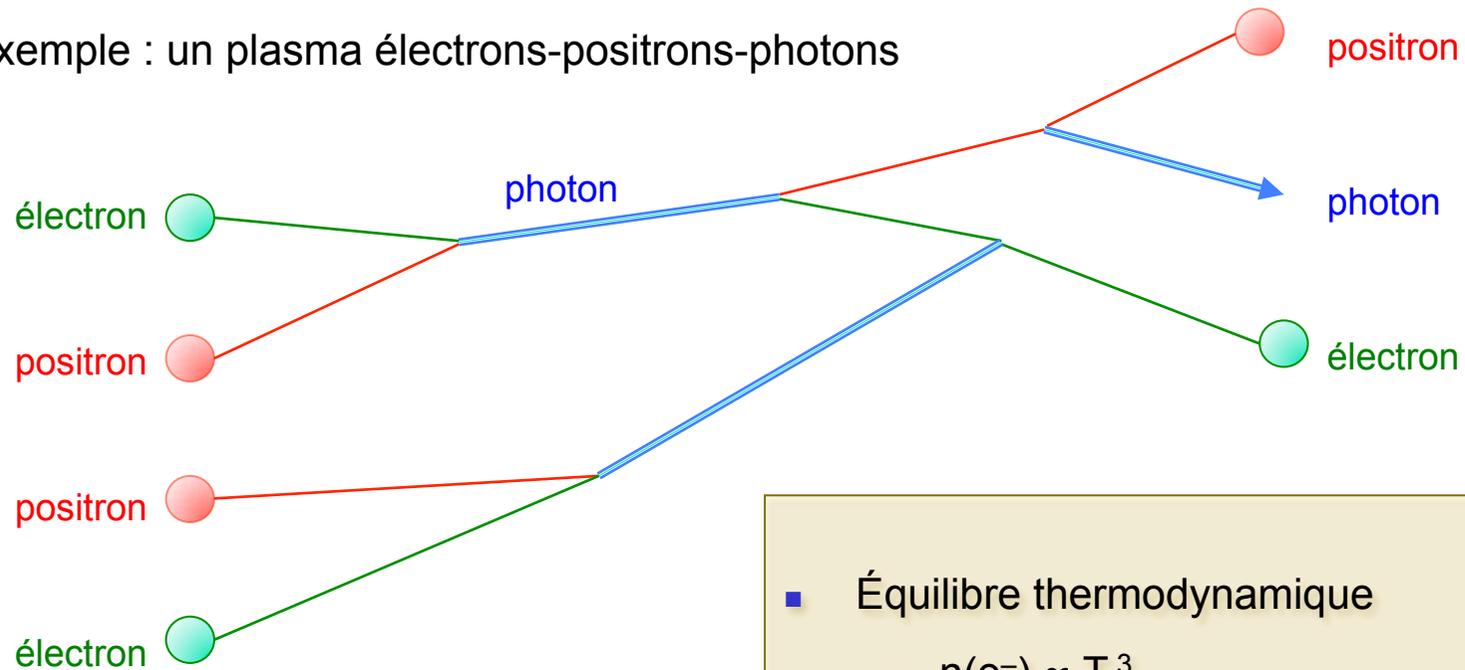
$$\frac{1}{2} m_1 \langle v_1^2 \rangle = \frac{1}{2} m_2 \langle v_2^2 \rangle = \frac{1}{2} m_3 \langle v_3^2 \rangle = \frac{3}{2} k T$$

- $\Rightarrow$  **température  $T$**



# Création et disparition de particules

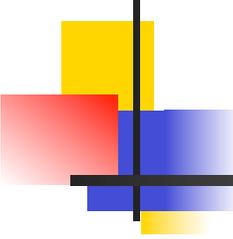
- Par exemple : un plasma électrons-positrons-photons



- 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

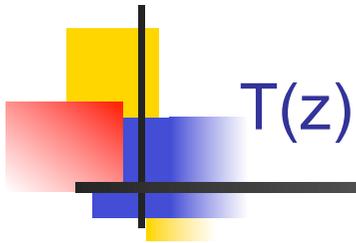
---

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

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

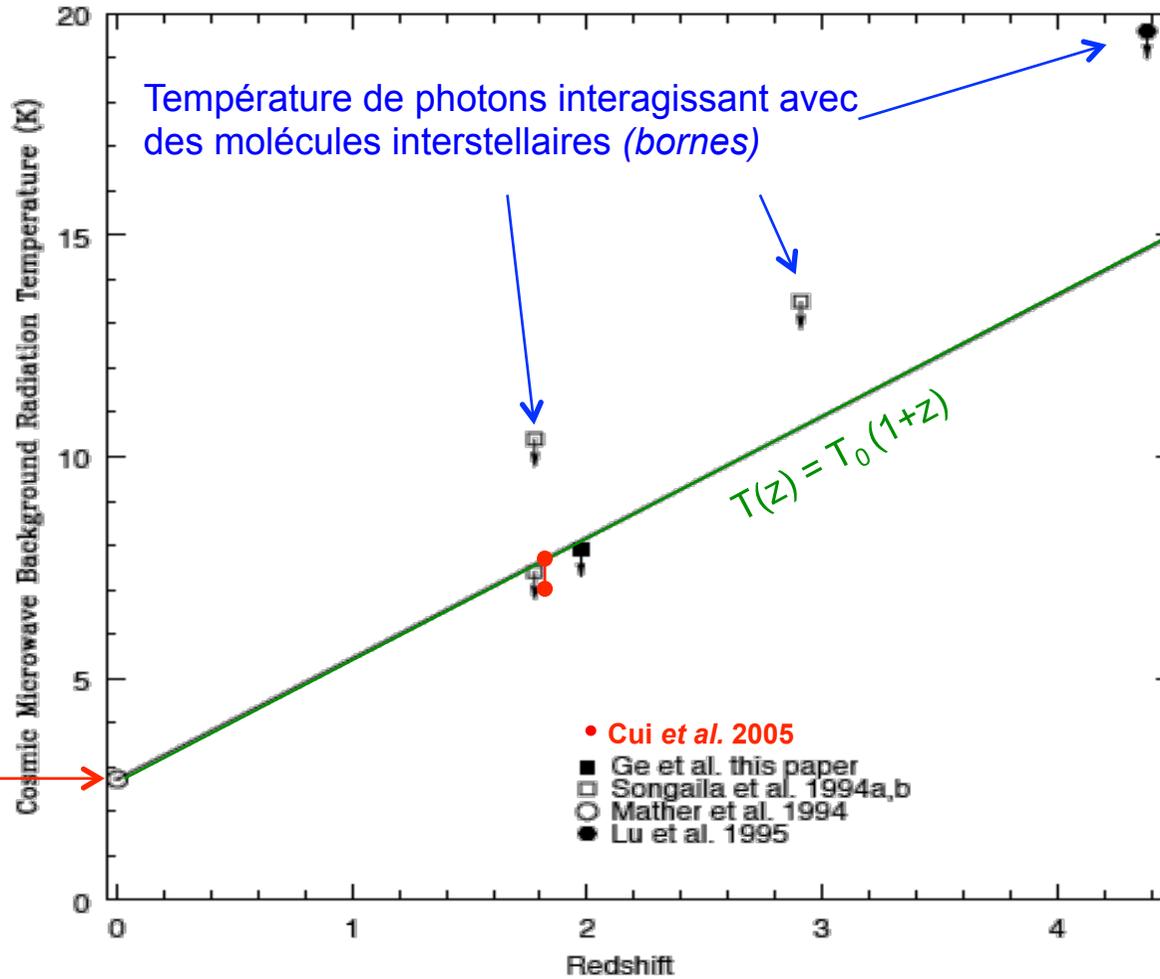
- Expansion  $\Rightarrow$  refroidissement :  $T(z) = T(0) [1 + z]$
- $\Rightarrow$  le passé était plus chaud

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

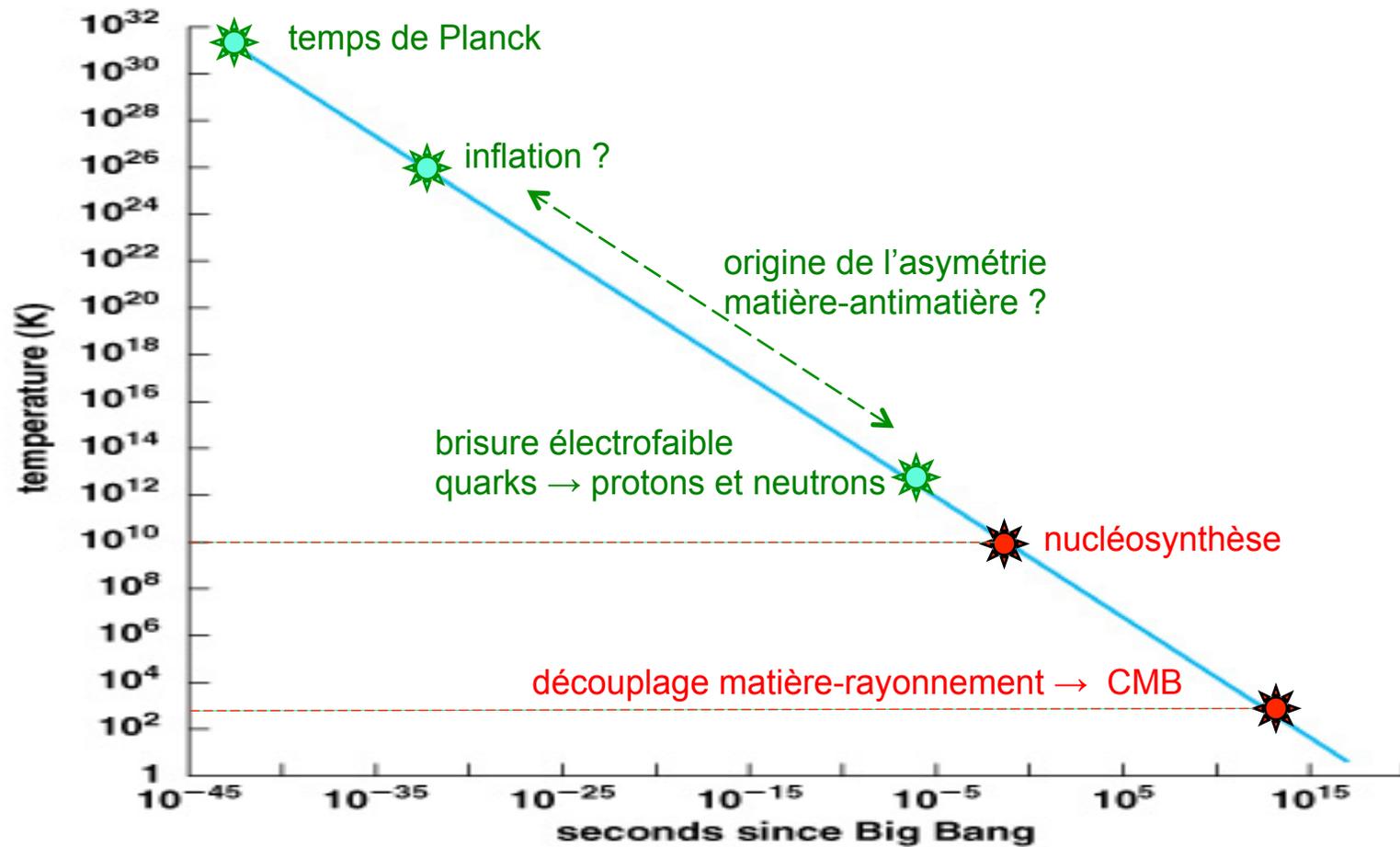


$T(z)$

Température actuelle  
du CMB :  $T_0 = 2.73$  K



# Histoire thermique de l'univers



Copyright © Addison Wesley.

## Un équilibre qui évolue

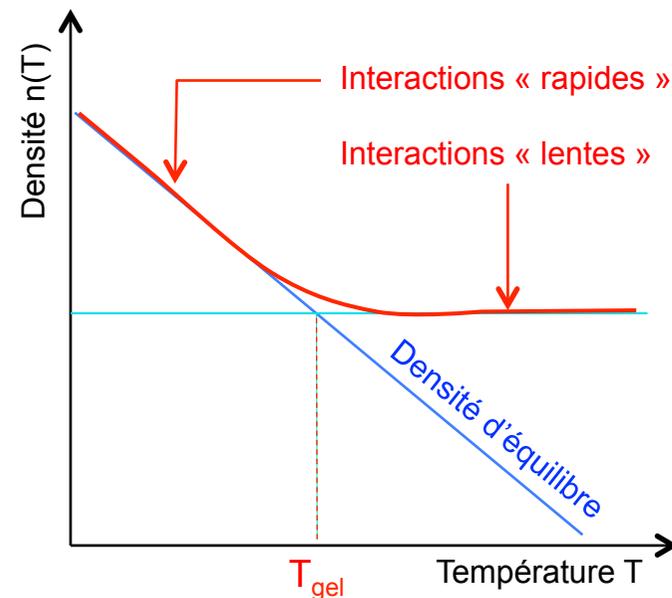
- Expansion  $\Rightarrow$  la température  $T$  diminue (à un « certain » rythme)
- $\Rightarrow$  la densité des particules diminue

$$n(e^-) \propto T^3 \searrow$$

$$n(e^+) \propto T^3 \searrow$$

$$n(\gamma) \propto T^3 \searrow$$

- **à condition** que les interactions entre particules « suivent » la diminution de la température
  - intensité de l'interaction suffisante
  - densité de particules suffisante
- **si** ce n'est plus le cas
  - $\rightarrow$  distributions « gelées »
- Elles conservent la forme qu'elles avaient à la température  $T_{\text{gel}}$  qui dépend
  - de l'interaction et de la densité
  - **et** de la vitesse de refroidissement



## Cas particulier des photons

- Équilibre hors d'équilibre !

- équilibre à température  $T_1$
- $\Rightarrow$  corps noir (spectre de Planck)
- expansion  $\Rightarrow$  décalage vers le rouge

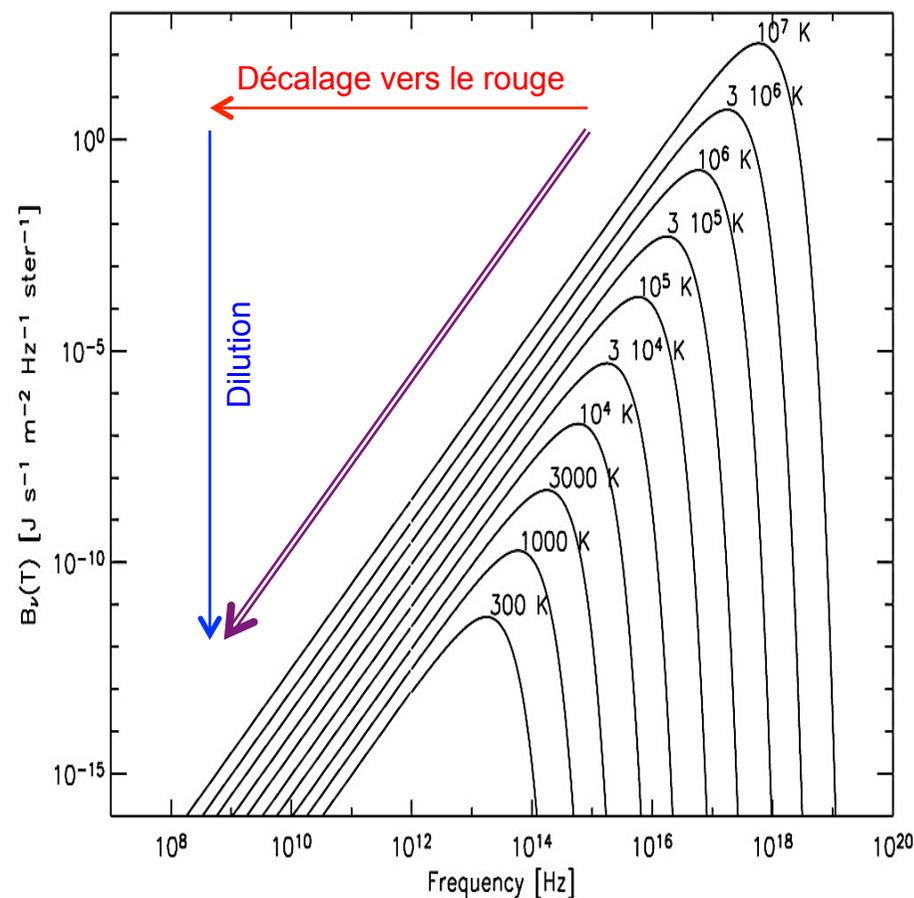
$$\lambda_1 \rightarrow \lambda_2 = \lambda_1 (1+z_1)/(1+z_2)$$

- $\Rightarrow$  spectre décalé de  $(1+z_1)/(1+z_2)$
- $\Rightarrow$  identique à un spectre de Planck à la température

$$T_2 = T_1 (1+z_2)/(1+z_1)$$

- $\Rightarrow$  la distribution des photons **reste** une distribution d'équilibre *même après que ces photons ne soient plus en équilibre thermique*

- Schématiquement



# Particules massives et densités reliques

## Asymétrie matière-antimatière

- Equilibre matière-antimatière inévitable à haute température (  $\gg 10^{13}$  K =  $m_{\text{proton}}$  )
- Annihilation matière-antimatière par interaction forte  $\Rightarrow$  très intense
- $\Rightarrow$  équilibre jusque très tard dans l'histoire de l'univers
- $\Rightarrow$  densité relique calculée

$$n_B/n_\gamma \sim 10^{-19}$$

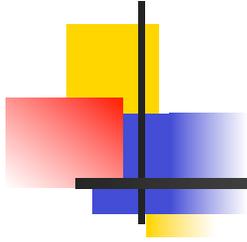
- Observation :  $n_B/n_\gamma \sim 10^{-10}$
- $\Rightarrow$  **Nécessité d'une asymétrie initiale**

## Neutrinos

$$\sum_{\text{saveurs}} m_\nu = 94 \text{ eV} \quad \Omega_\nu h^2$$

## Matière noire

$$\Rightarrow \Omega h^2 \approx \frac{10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}}{\sigma_{\text{annihil}} V} \Rightarrow \text{WIMP}$$



# NUCLÉOSYNTHÈSE *PRIMORDIALE*

# La nucléosynthèse primordiale



Herman, Gamow et Alpher



Fred Hoyle

# Situation de départ

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

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

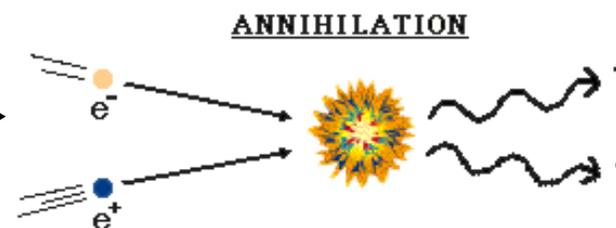
$$T(t) = (90/8\pi^3 G_N g_{\text{eff}})^{1/4} / \sqrt{t}$$

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

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

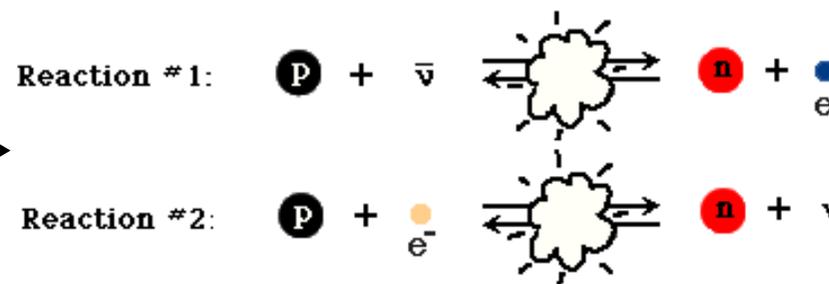
- Equilibre thermique entre photons, neutrinos, électrons et nucléons
  - assuré par des interactions électromagnétiques
  - et par interactions faibles comme la conversion neutron-proton
  - neutrons plus lourds de  $\sim 1 \text{ MeV}$  que les protons  $\rightarrow$  de moins en moins nombreux (faute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

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



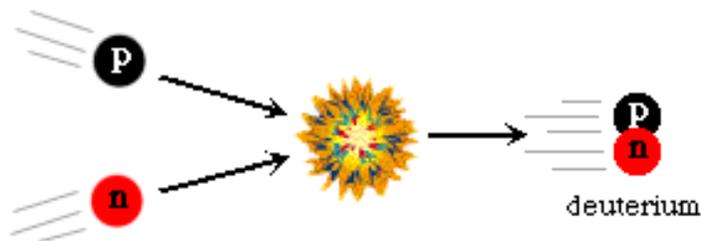
- Découplage des neutrinos vers  $1 \text{ MeV}$

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



# Réactions de fusion

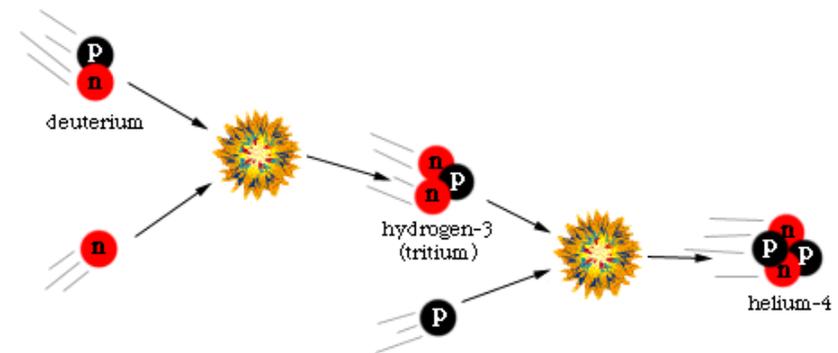
## ■ Fusion du deutérium



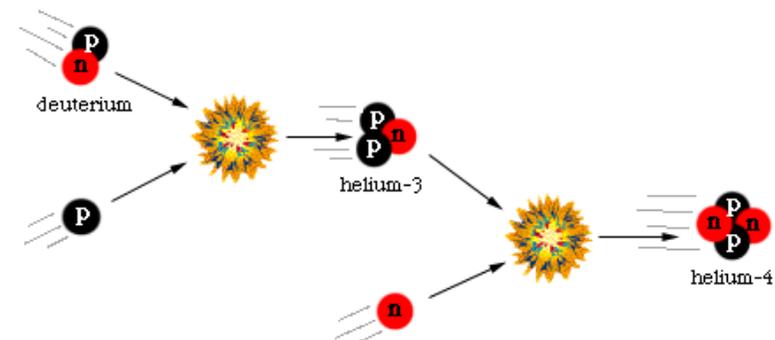
## ■ Le taux de réaction dépend

- 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  $n_B / n_\gamma$**

## ■ Vers l'hélium 4 via le tritium



## ■ Vers l'hélium 4 via l'hélium 3



## Prédiction majeure : l'abondance de l'hélium

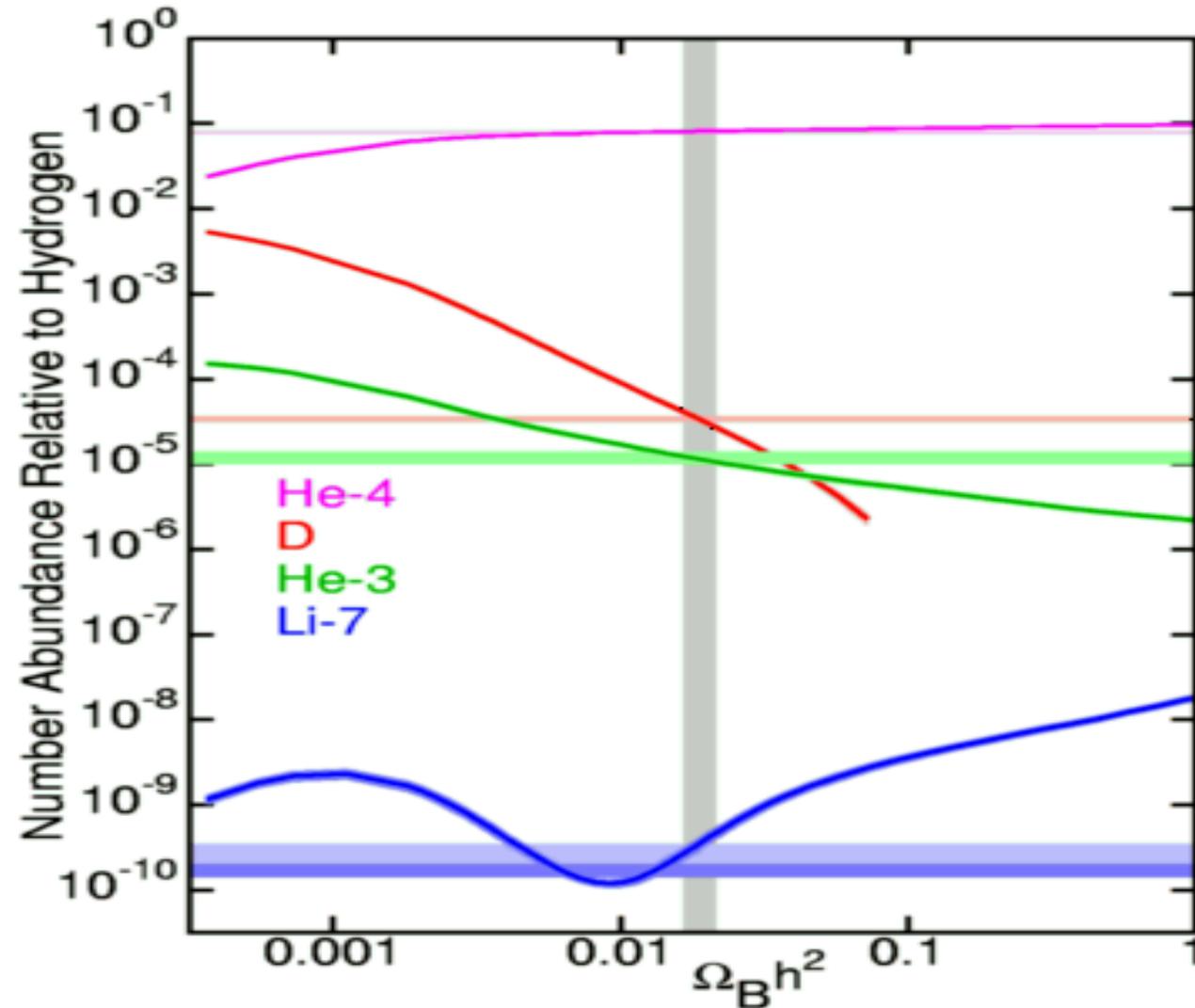
- Situation initiale : un bain de photons, protons, neutrons, électrons, neutrinos
- Un rapport  $p/n \sim 6$  entre protons et neutrons (12 protons pour 2 neutrons)
- Tous les neutrons finissent par se retrouver dans les noyaux d'hélium 4
  - 2 neutrons s'associent à 2 protons
  - sur 12 protons, il en reste 10 ( $\rightarrow$  noyau d'hydrogène) pour 1 noyau d'hélium 4
  - $\rightarrow$  abondances relatives
  - en nombre 10 : 1  $\rightarrow$  10% d'hélium
  - en masse 10 : 4  $\rightarrow$  25% d'hélium en masse
- Résultat dépendant de la quantité relative de photons % nucléons

calculable à partir du CMB

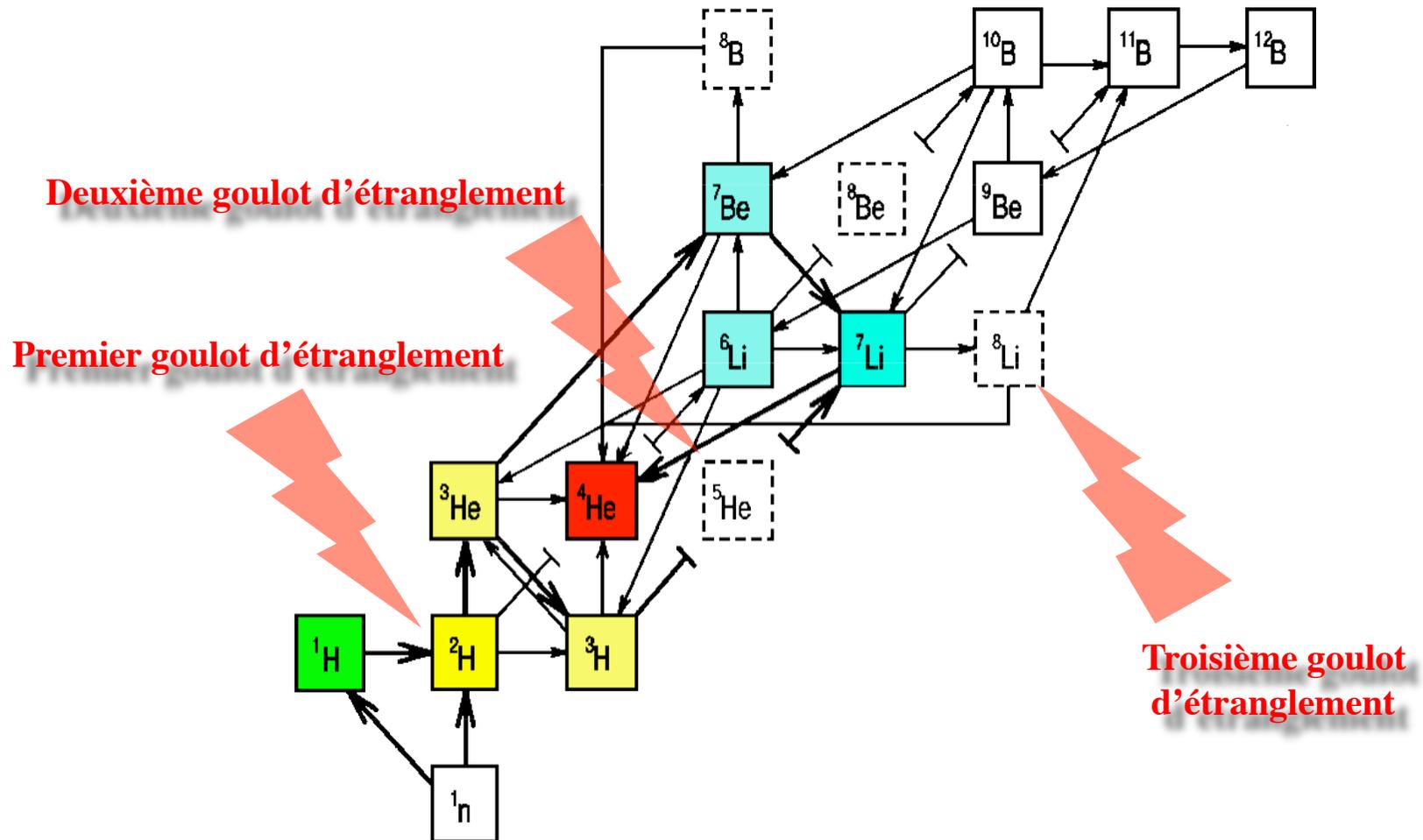
mesurable à partir des observations de gaz et d'étoiles

# Prédictions % observations

- Mesures
  - He 4
  - Deutérium
  - Hélium 3
  - Lithium 7
- $\rightarrow \Omega_{\text{Baryons}}$

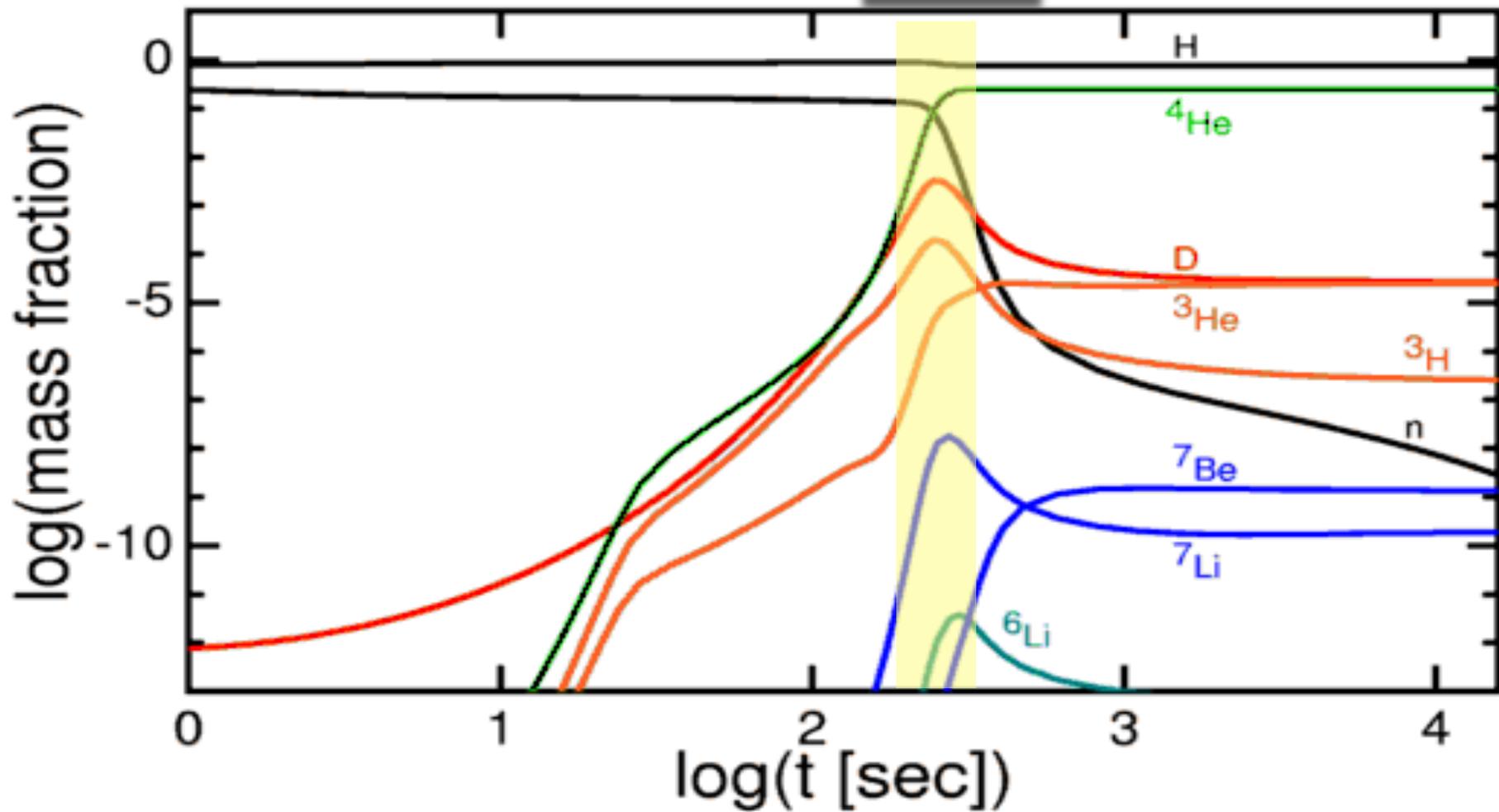


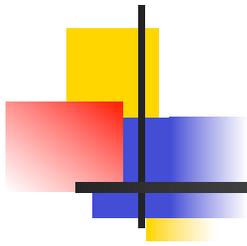
# Le réseau nucléaire : pourquoi s'arrêter au lithium ?



# Au fil du temps

$t \sim 200 \text{ s}$



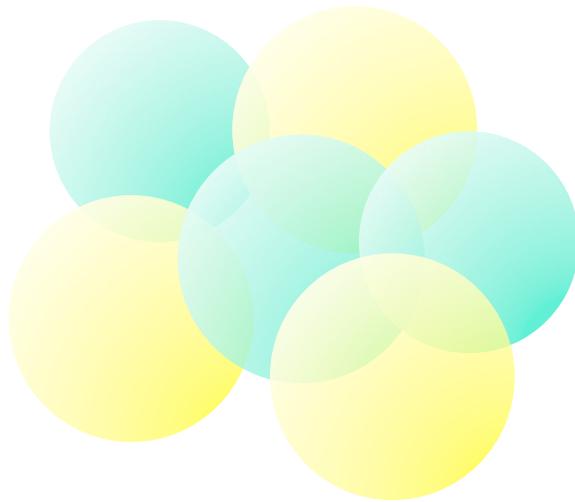


# **CMB**

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

## Équilibre photons $\leftrightarrow$ électrons + ions $\leftrightarrow$ atomes neutres

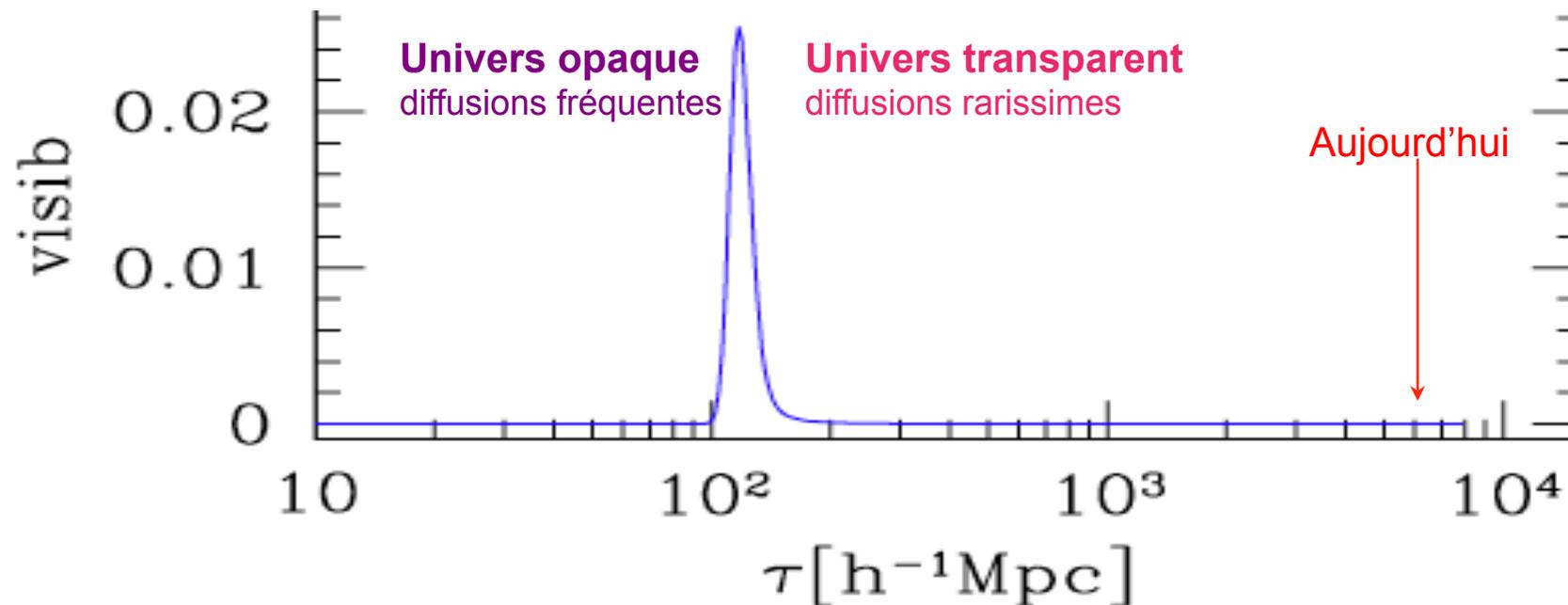
- Pour un photon, une particule électriquement chargée est une « cible » énorme
- Mais une particule neutre – ou un atome neutre – est une cible minuscule



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

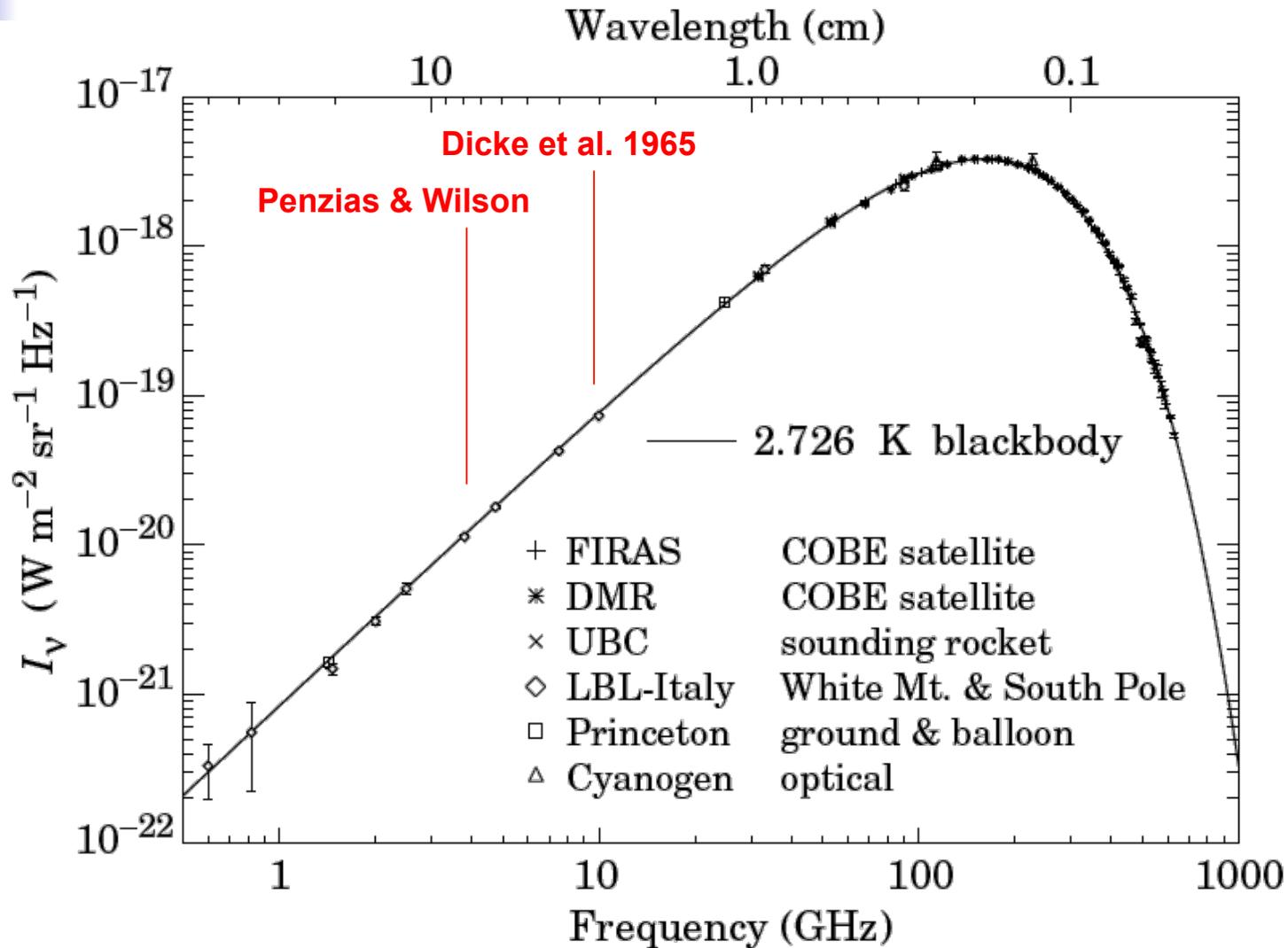
## Découplage ↔ recombinaison

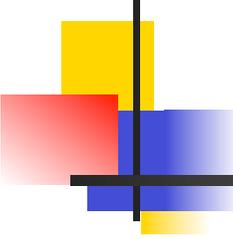
- Fonction de visibilité = probabilité qu'un photon donné ait été diffusé pour la dernière fois au temps (conforme)  $\tau$



- Tous les photons reçus du CMB viennent d'un intervalle très étroit en distance, d'une mince coquille, la surface de dernière diffusion ⇒ « instantané » de l'univers

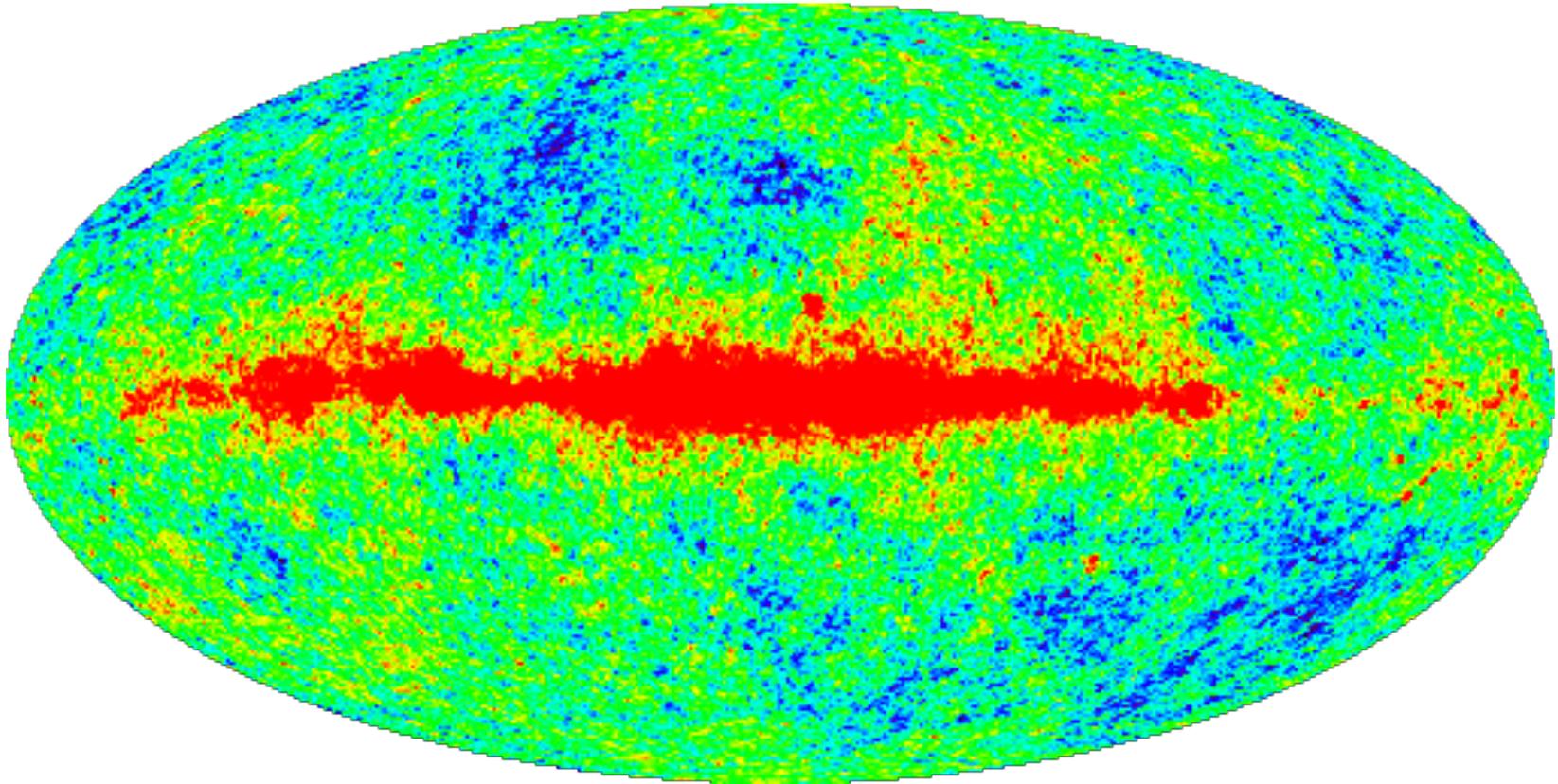
# Équilibre thermique → spectre de Planck d'un corps noir

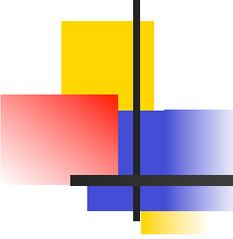




## Anisotropies & fluctuations

---

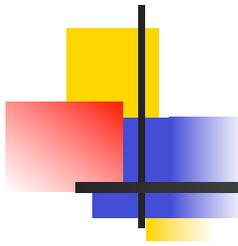




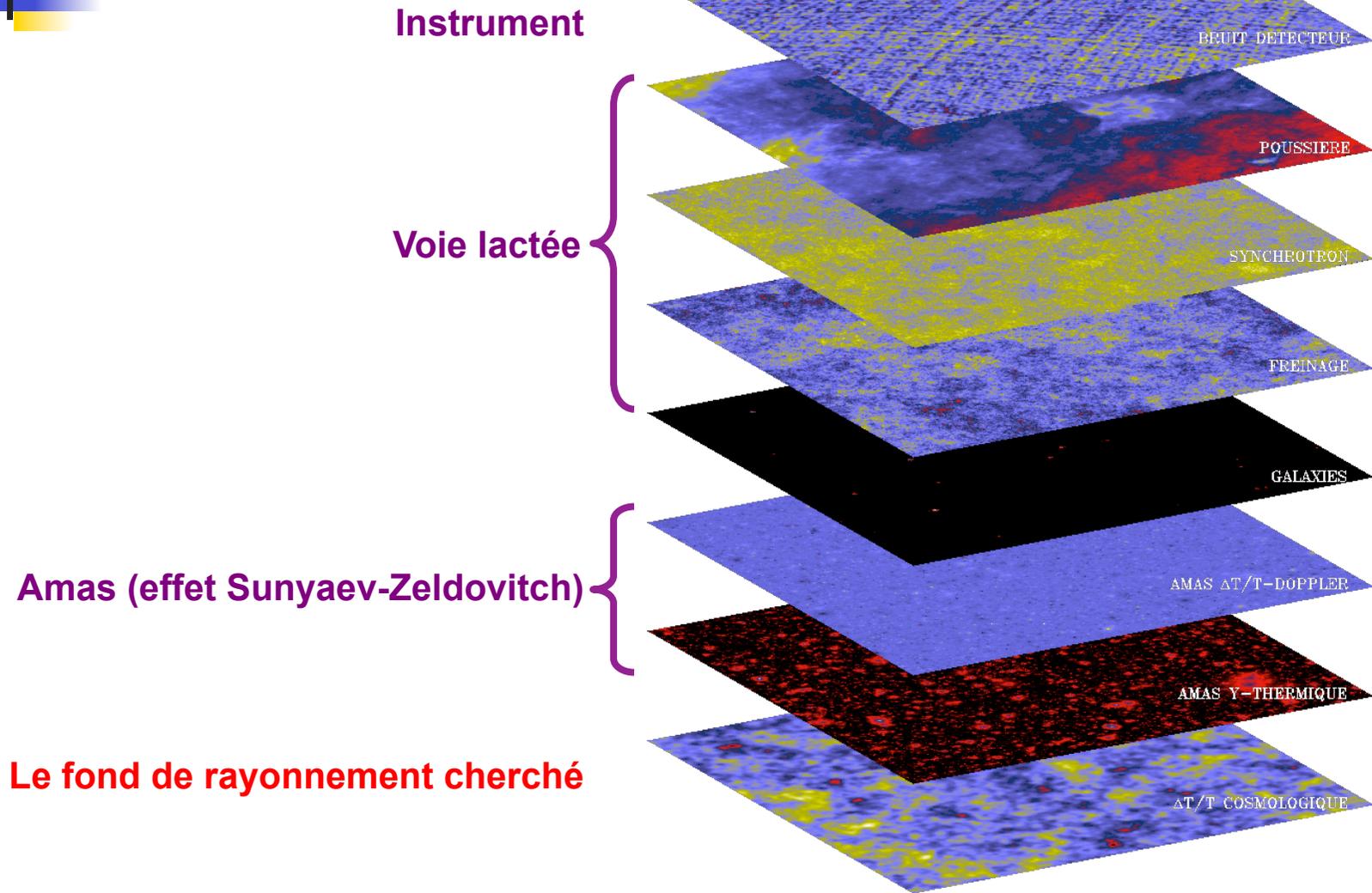
## Origines des fluctuations

---

- 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



# Les avant-plans



F.R. BOUCHET & R. GISPERT 1996

## La surface de dernière diffusion

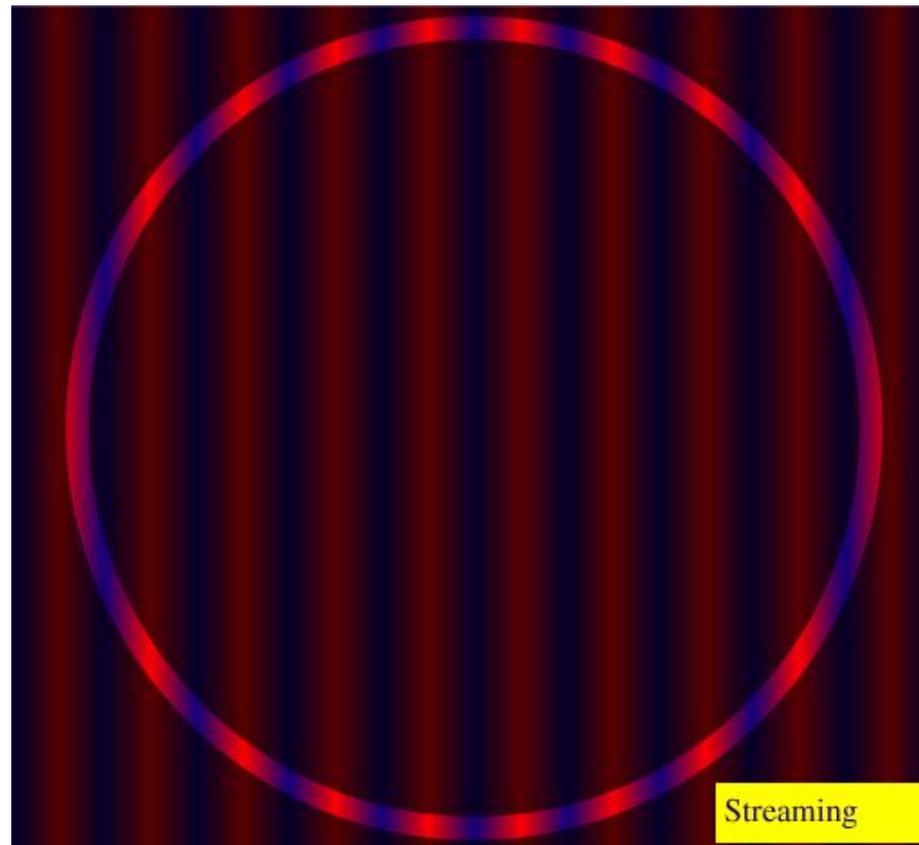
Fluctuations de température

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

Les photons se déplacent ensuite librement

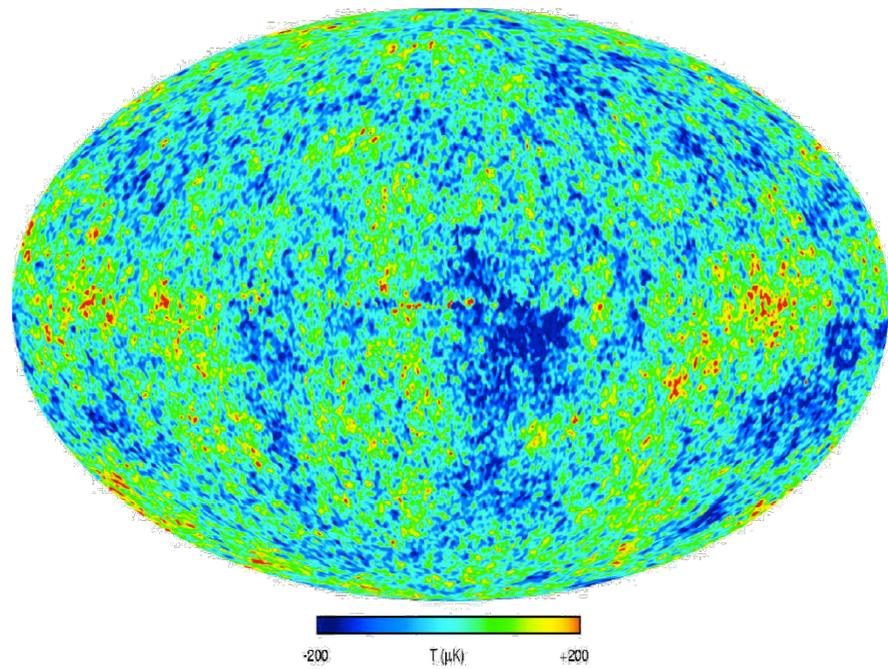
L'observateur (au centre) reçoit des photons venant de plus en plus loin

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

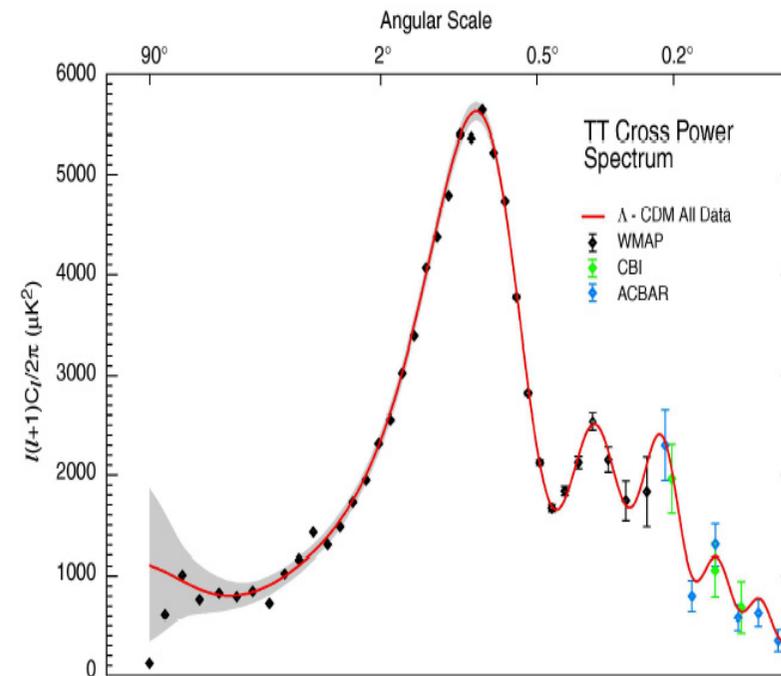


# Des fluctuations angulaires au spectre

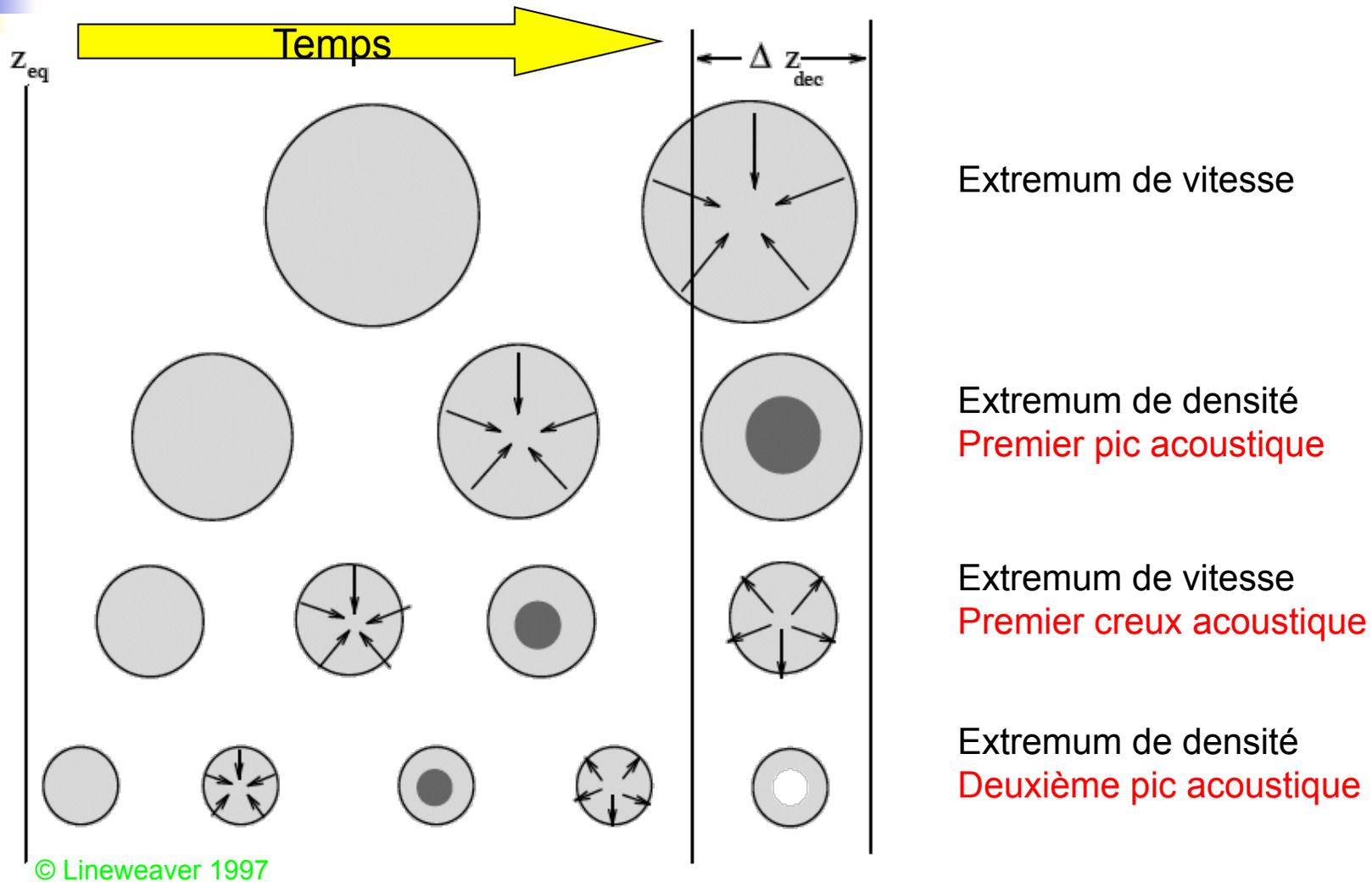
- Des anisotropies de température



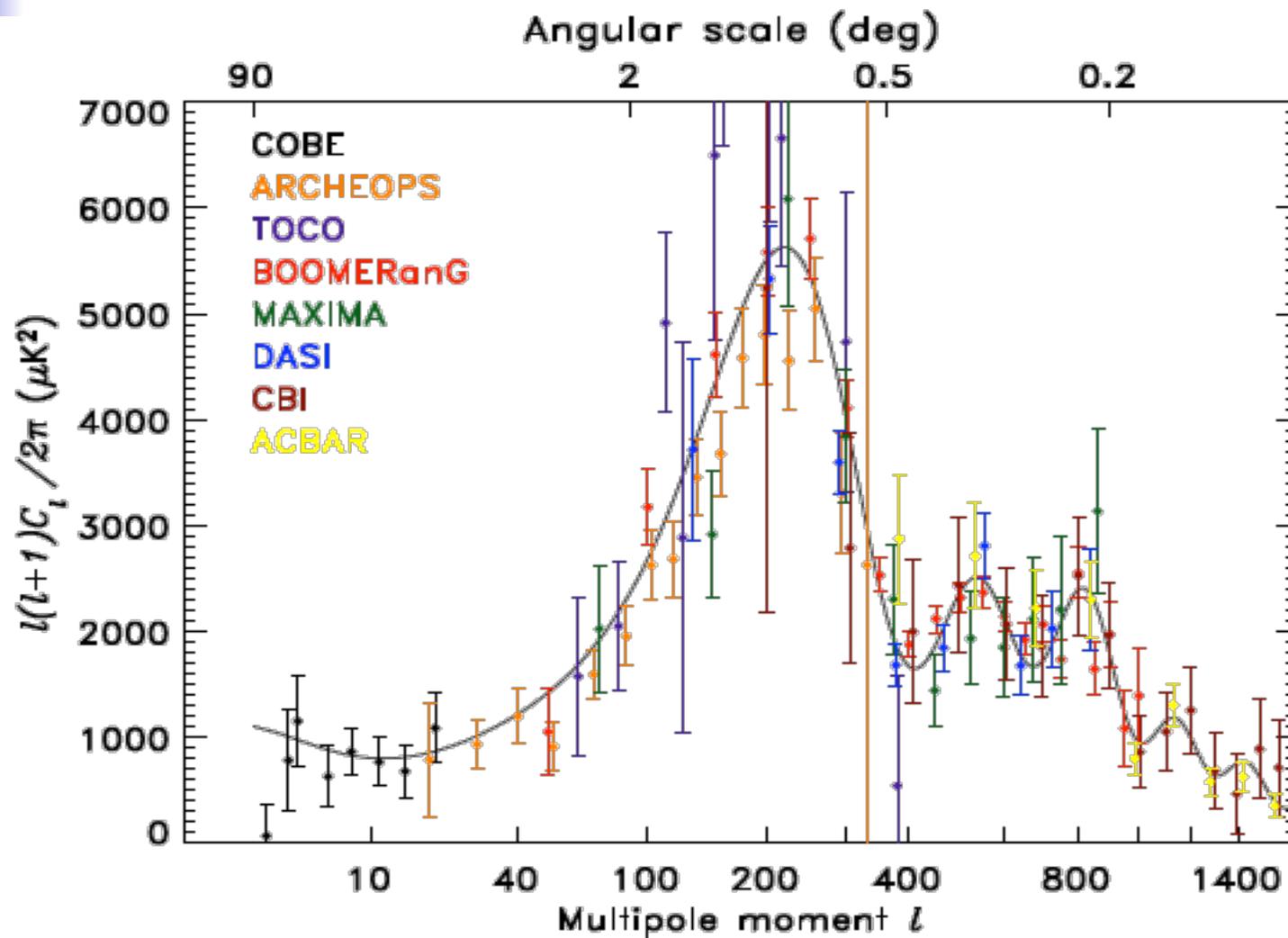
- on extrait le « spectre de puissance »



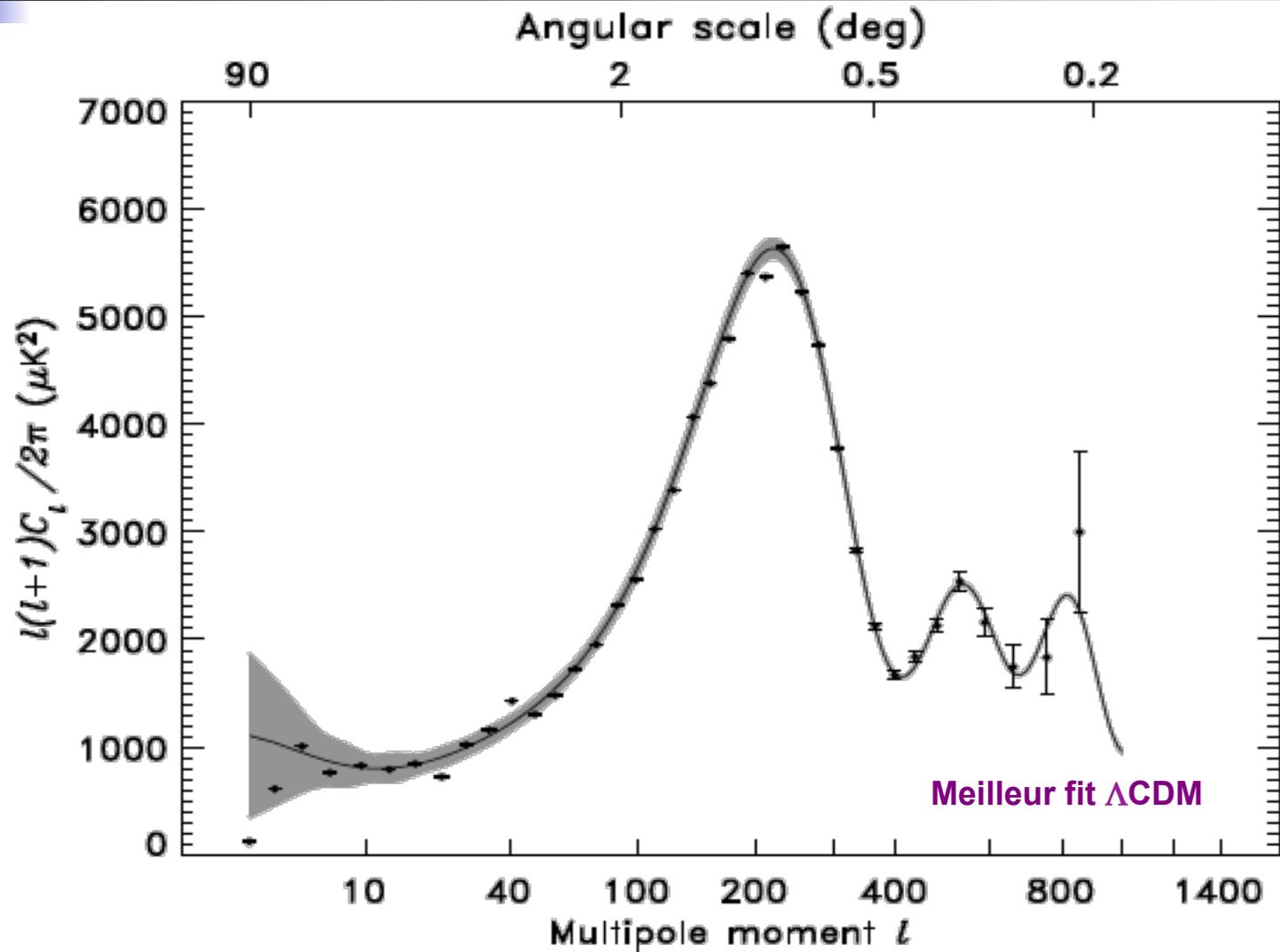
# L'origine des pics et des creux



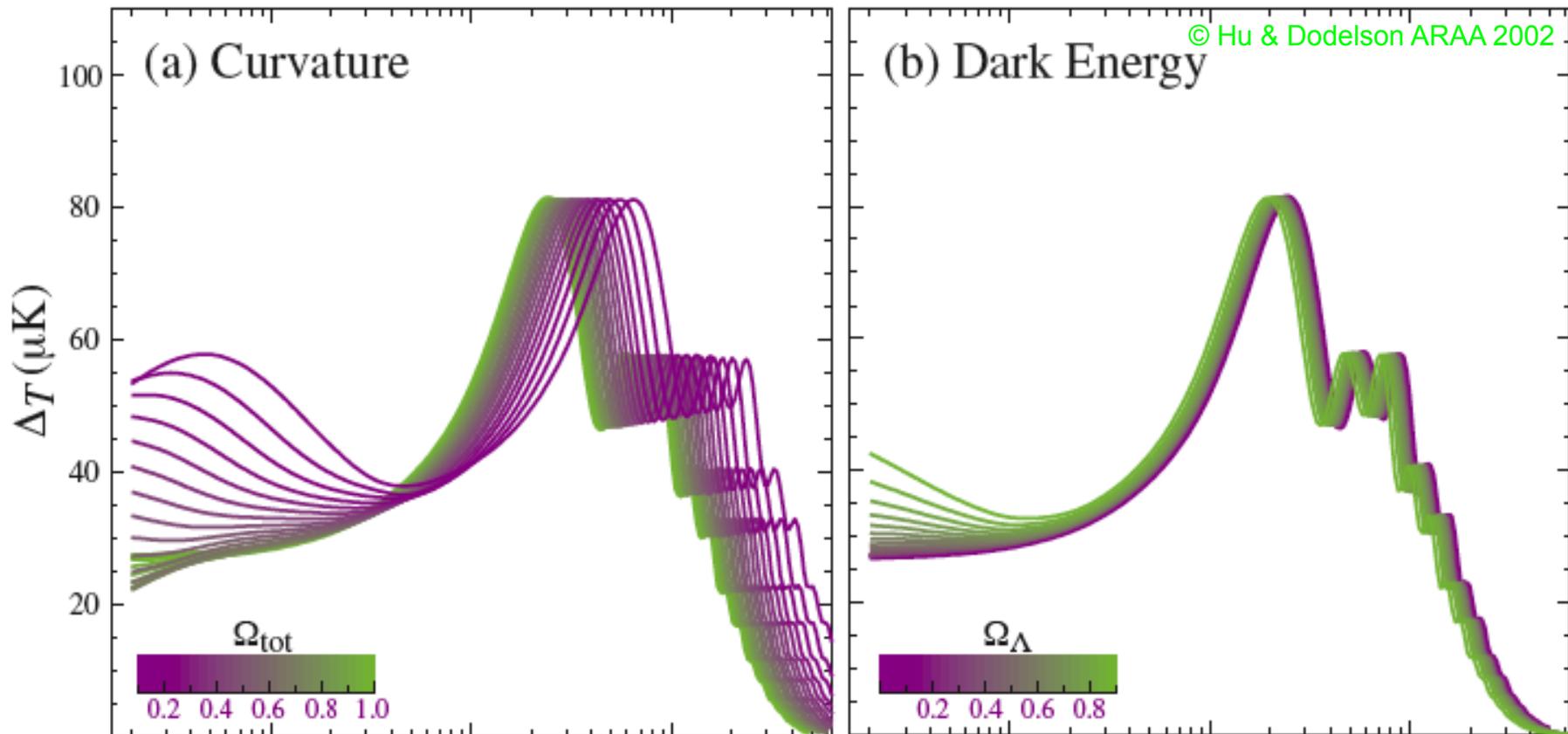
# Spectre de puissance (avant WMAP)



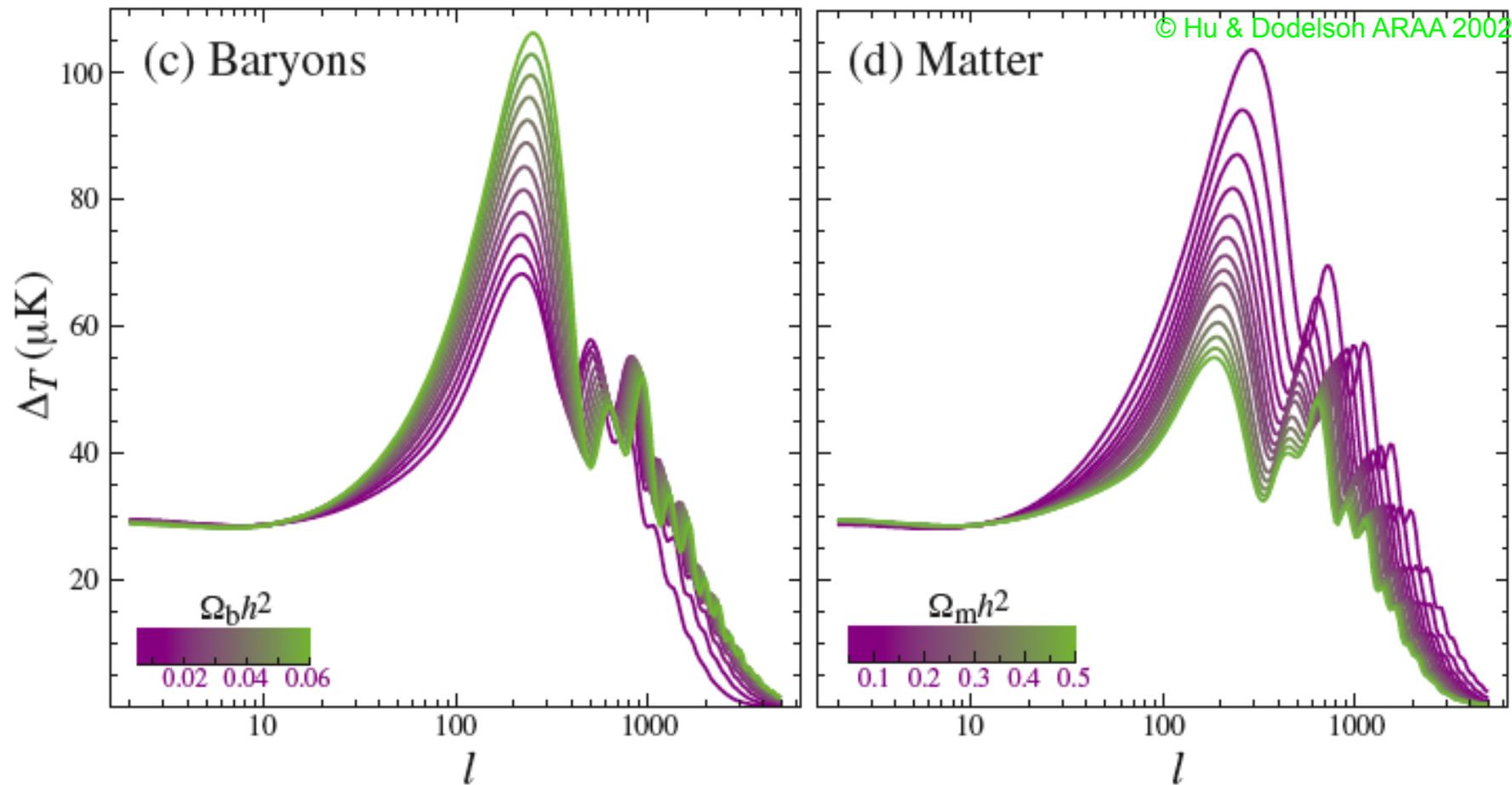
# Spectre de puissance (WMAP)



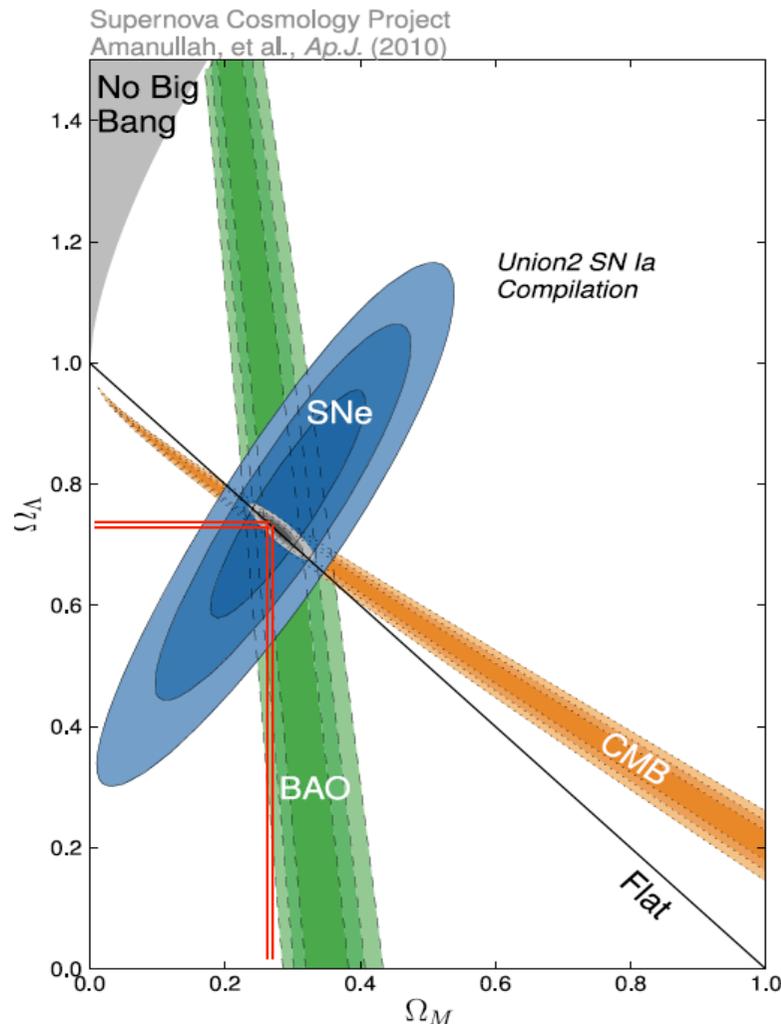
# Changer la courbure *spatiale* ou l'énergie noire $\Lambda$



# Changer la quantité de baryons ou de matière (noire)



# Matière noire... énergie noire...



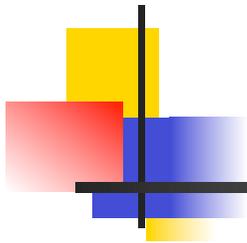
- La position du premier pic acoustique du CMB indique une courbure spatiale  $\Omega_k$  presque nulle

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

- 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 !

