

---

# Contraintes cosmologiques d'un Univers de Milne matière - antimatière

Aurélien Benoit-Lévy

25 juin 2007

dapnia  
SPP

cea

saclay



---

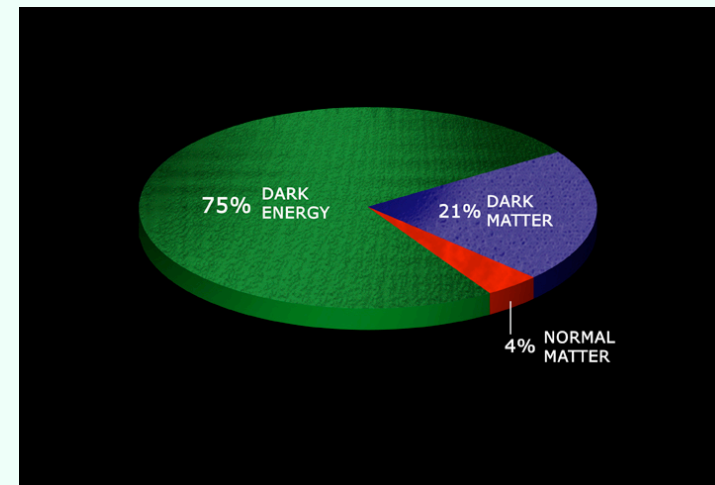
# Plan

- Introduction - Motivations
- Univers de Milne symétrique
- Supernovae de type Ia
- Nucléosynthèse primordiale
- Questions en suspens

## Modèle de concordance

$$\Omega_M \approx 0.3, \Omega_\Lambda \approx 0.7, \Omega_k = 0$$

95 % de l'Univers est inconnu



- Répond de manière satisfaisante à certains problèmes (âge de l'Univers, formation des structures) ...
- ... mais en pose d'autres : horizon, coïncidence, nature même de l'énergie noire.
- Proposition d'un modèle alternatif plus simple, sans DM ni DE, mais avec des masses négatives.

---

# Démarche

Deux problématiques :

- Justifications théoriques du modèle

- Confrontations aux observations

## Univers de Milne symétrique

- Présence d'une quantité d'antimatière égale à la quantité de matière
- Antimatière est dotée d'une masse négative
- Pas de composante d'énergie noire, ni de matière noire
- Espace-temps vide donc rigoureusement plat, caractérisé par un facteur d'expansion linéaire :  $a(t) \propto t$
- Mélange masses positive/négatives  $\longrightarrow$  ni décélération ni accélération

## Qu'apporte un facteur d'échelle linéaire ?

- Âge de l'Univers

$$t_0 = \frac{1}{H_0} = 13,9 \times 10^9 \text{ ans, avec } H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$$

- Problème de l'horizon

Coordonnée radiale d'un objet de redshift  $z$  :  $\chi(z) \xrightarrow{z \rightarrow +\infty} +\infty$

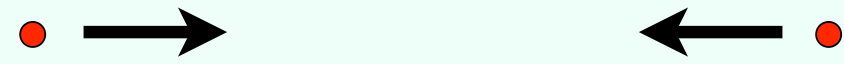
- Modèle plus simple, avec moins de paramètres (modulo l'introduction de masses négatives)

- Physique Newtonnienne : masses inertielle, gravitationnelles active et passive.

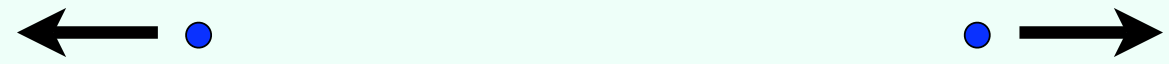
Parmi les 7 cas possibles ( $=2^3-1$ ) deux sont à retenir :

- Les trois masses sont négatives

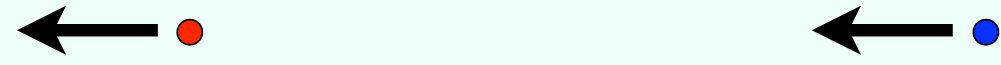
Les masses positives s'attirent



Les masses négatives se repoussent



Les particules restent à distance constante et s'accélèrent mutuellement (runaway)



- Particule de masse positive
- Particule de masse négative



- Physique Newtonnienne : masses inertielle, gravitationnelles active et passive.

Parmi les 7 cas possibles ( $=2^3-1$ ) deux sont à retenir :




- Les trois masses sont négatives
- Masse inertielle positive, masses gravitationnelles négatives

⇒ Violation du principe d'équivalence

Dynamique "anti-Coulombienne"

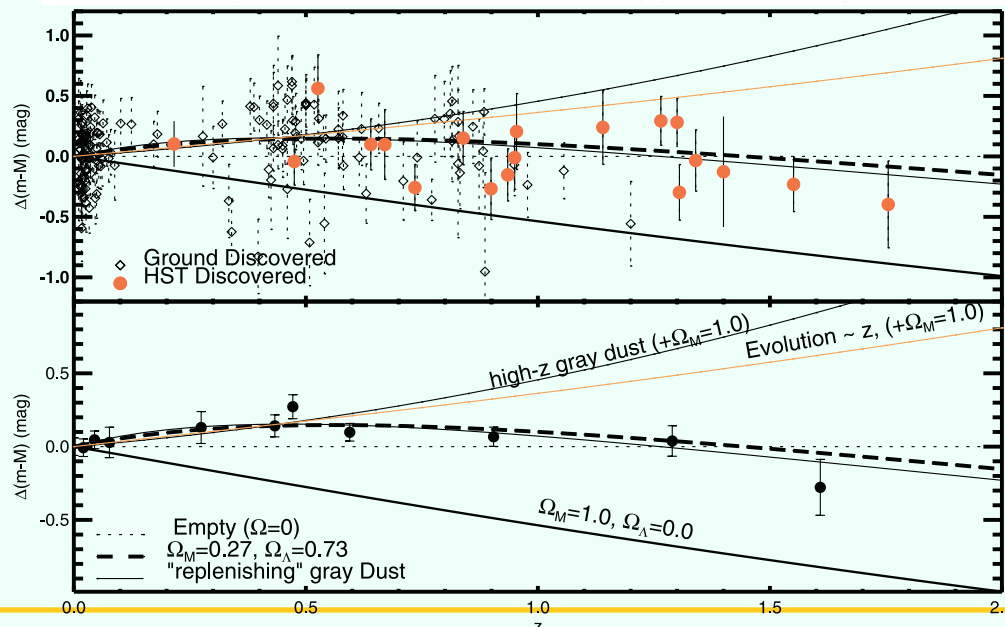
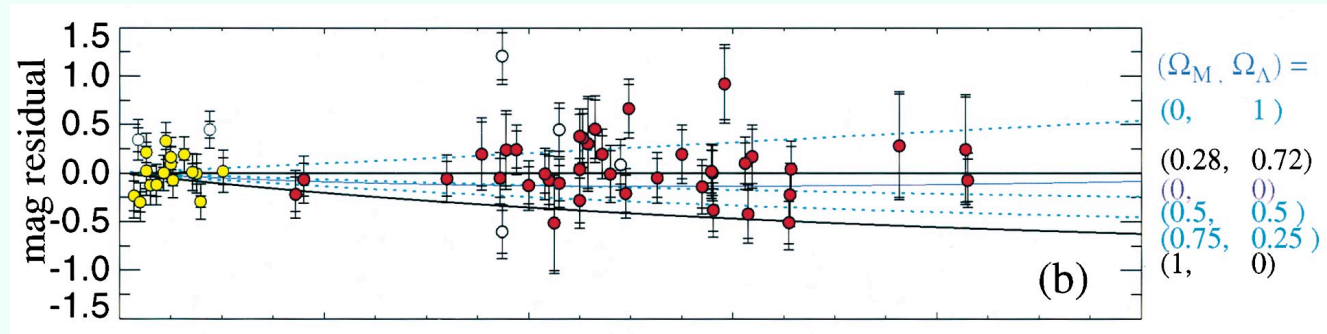
---

## Tests observationnels

- Supernovae de type Ia 
- Nucléosynthèse primordiale 
- Formation des structures 
- CMB
- BAO
- Gravitationnal lensing
- ...

# Supernovae de type Ia

- À "l'origine" du renouveau de la constante cosmologique (Riess et al. 98, Perlmutter et al. 99).

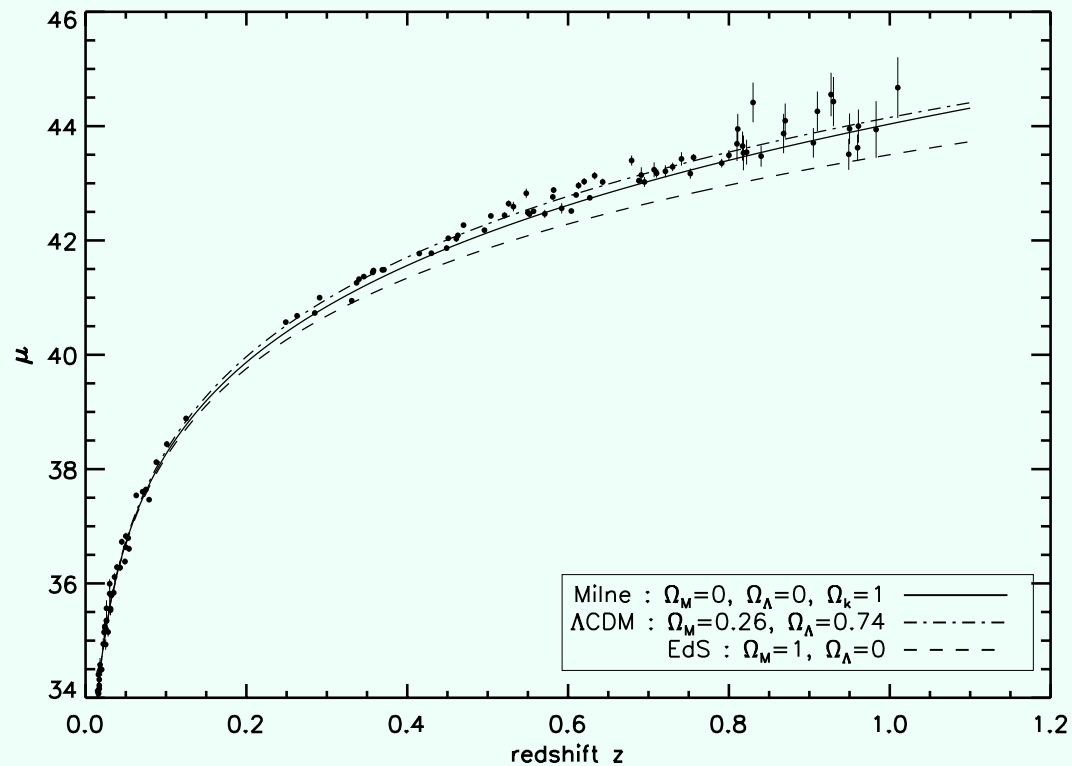


Perlmutter et al. 99

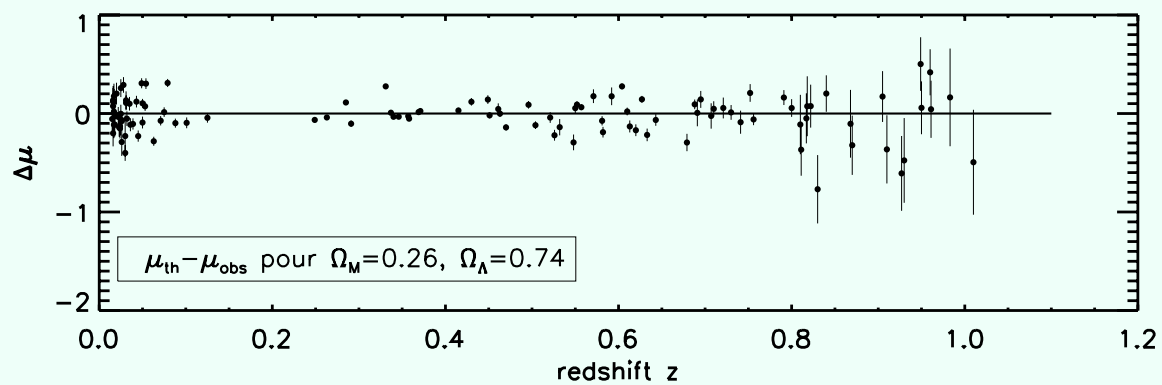
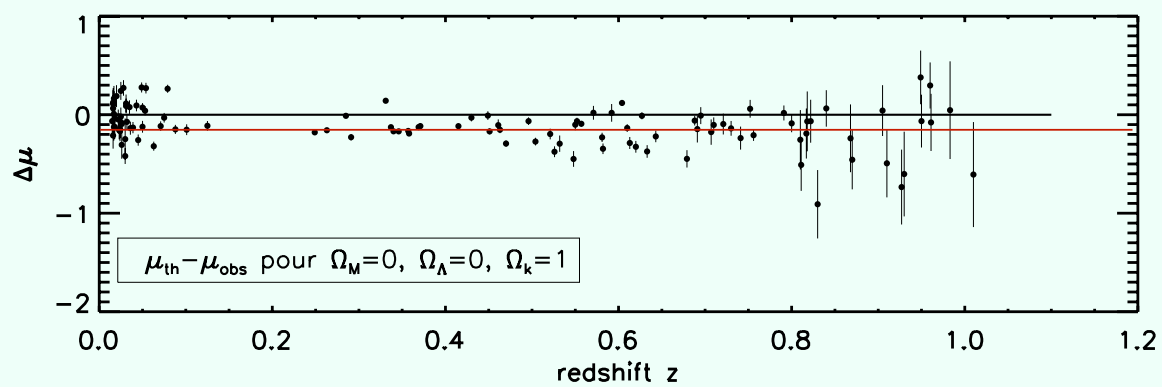
Riess et al. 04

## Diagramme de Hubble

- Module de distance en fonction du redshift :  $\mu = -5 + 5 \log \left( \frac{d_L(z)}{1 \text{ pc}} \right)$
- Données de SNLS (Astier et al. 05)



## Résidus du diagramme de Hubble



## Diagramme de Hubble

- (Astier et al. 05), définition du module de distance

$$\mu = m^* - M + \alpha(s - 1) - \beta c$$

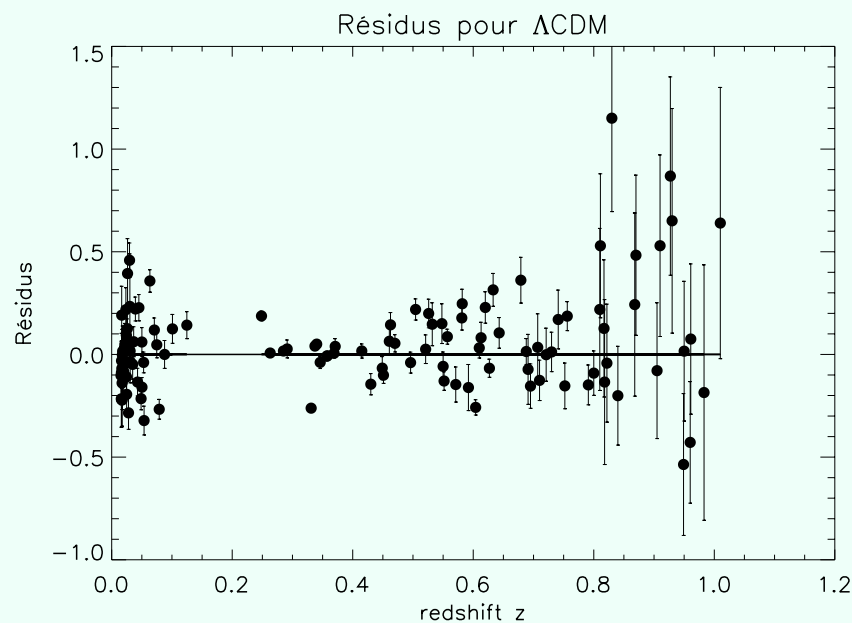
$m^*$ ,  $s$ ,  $c$  : paramètres liés propres à chaque SN

$M$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  : paramètres inconnus, à déterminer en même temps que les paramètres cosmologiques

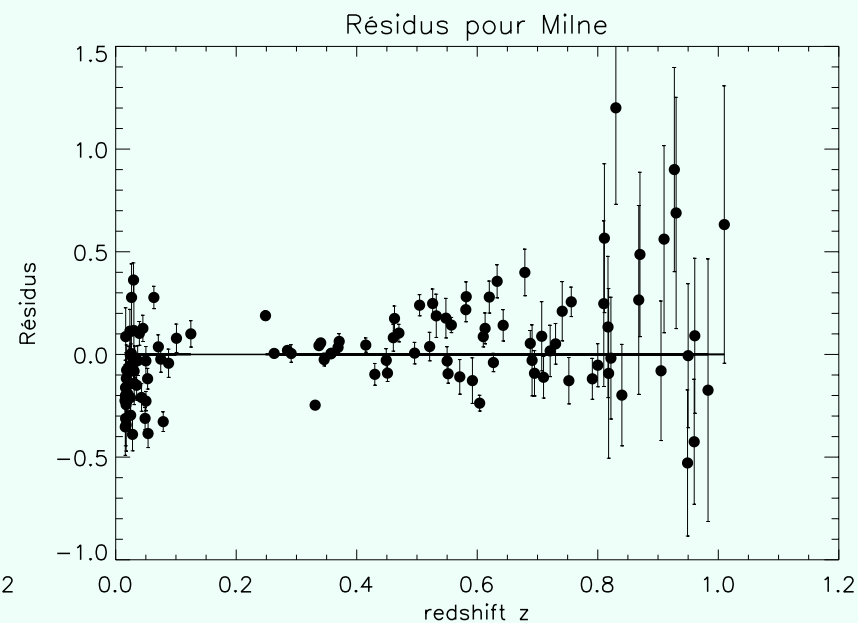
$$\chi^2 = \sum \frac{(m^* - M + \alpha(s - 1) - \beta c - \mu_{th})^2}{\sigma^2(\mu) + \sigma_{int}^2}$$

$\sigma_{int}^2$  : dispersion intrinsèque, calculée pour que  $\chi^2 / dof = 1$

# Diagramme de Hubble



$$\chi^2/dof = 7.29$$



$$\chi^2/dof = 7.83$$

Pour comparaison,  $\chi^2/dof = 13.46$  pour EdS

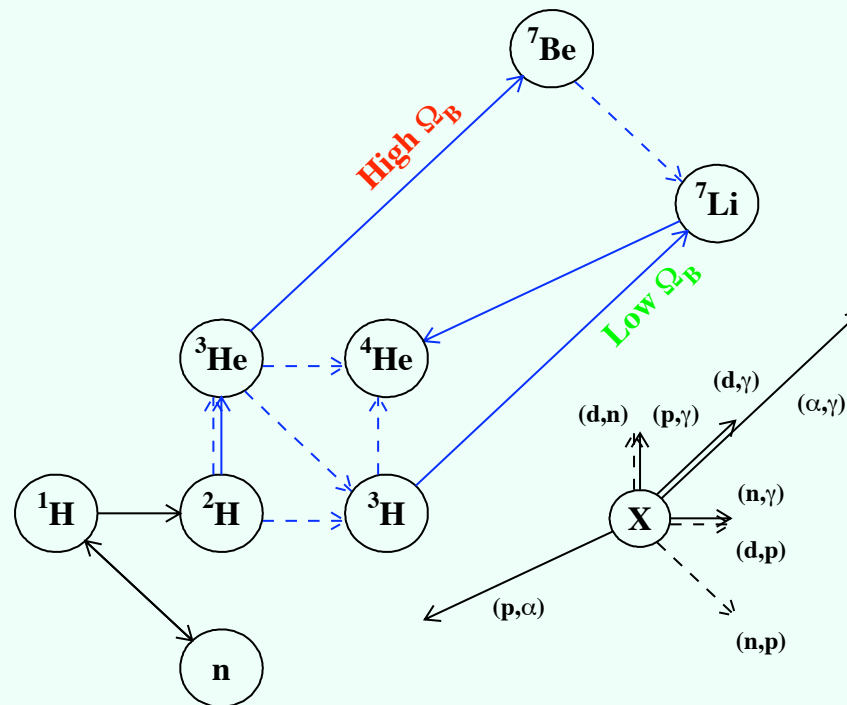
## Standard Big-Bang Nucleosynthesis

- Formation des éléments légers (jusqu'au  ${}^7\text{Li}$ ) pendant les premières minutes de l'Univers.
- Grand succès du modèle standard...
- ... mais non exempt de tensions entre observations et prédictions.



# Standard Big-Bang Nucleosynthesis

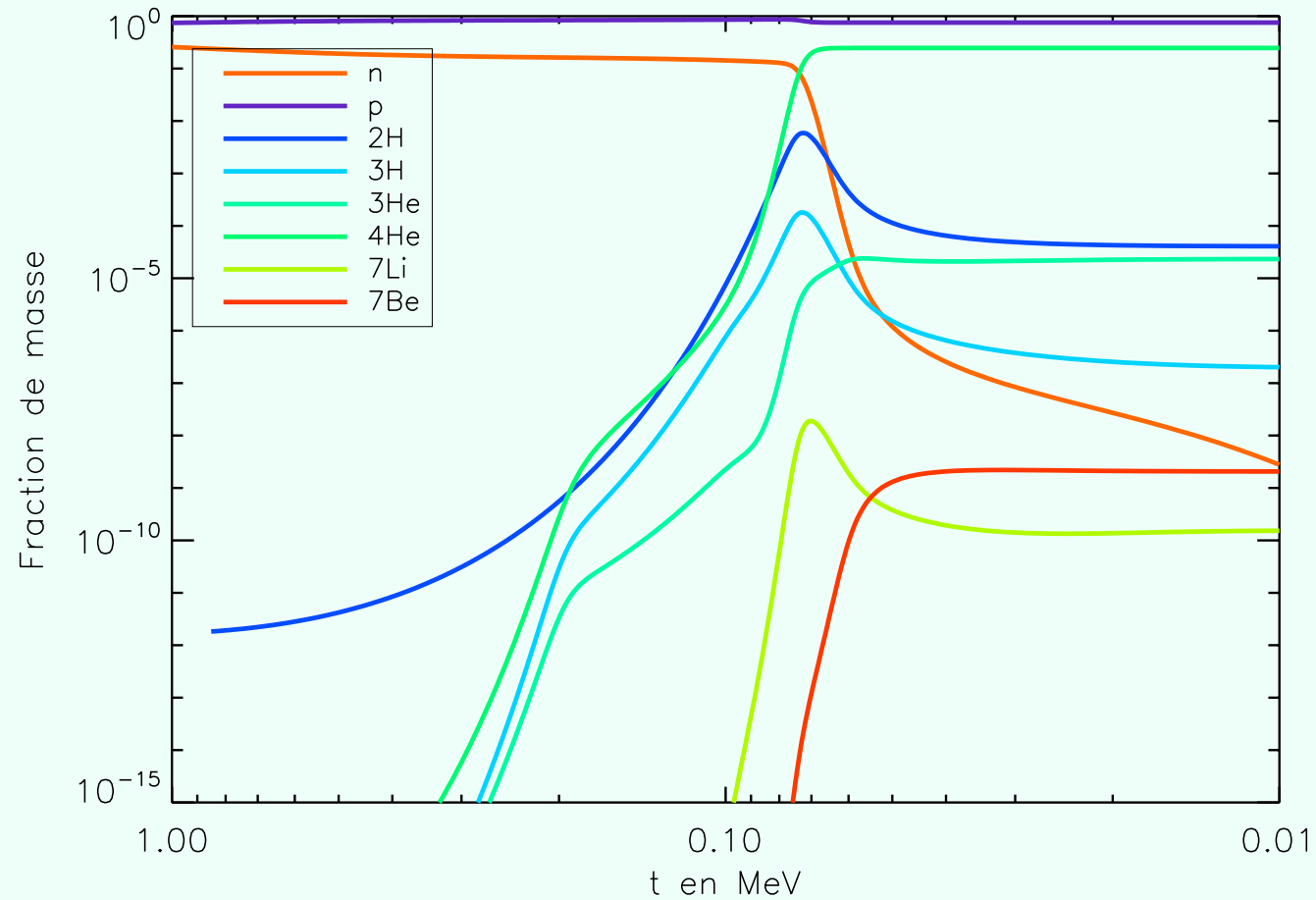
- $T \approx 800 \text{ KeV}$ ,  $t=1 \text{ s}$  : Gel des interactions faibles
- $T \approx 80 \text{ KeV}$ ,  $t=200 \text{ s}$  : Fin de la photodésintégration du deutérium. Début de la nucléosynthèse.



A. Coc, 2007

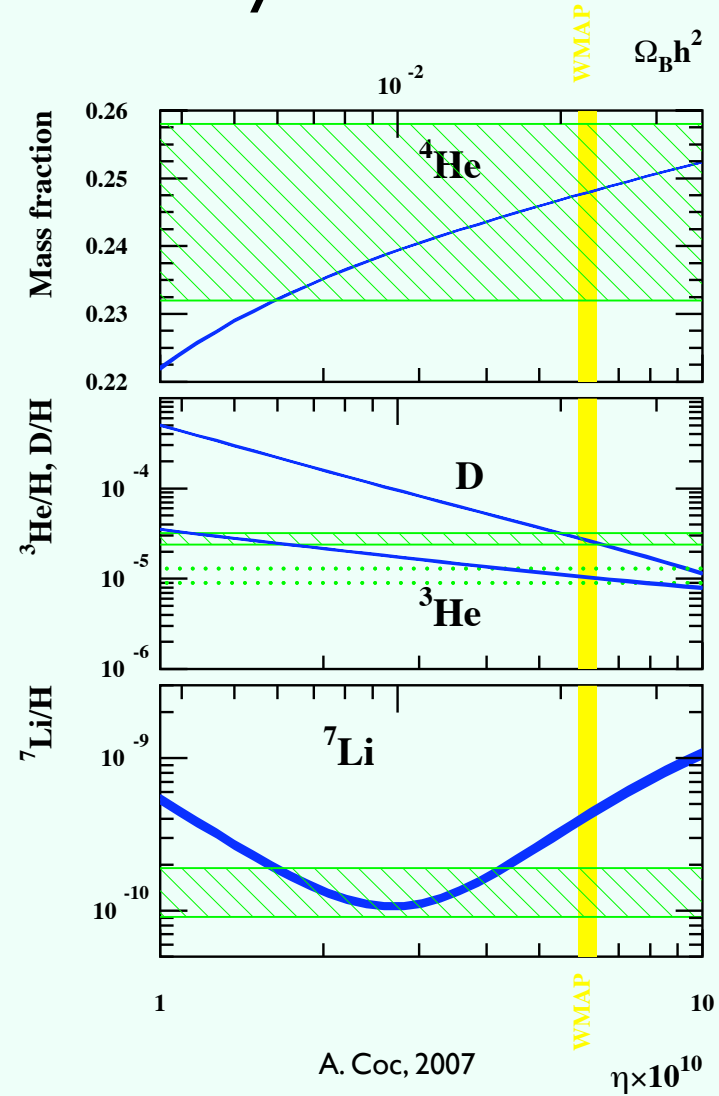
# Standard Big-Bang Nucleosynthesis

- $T \approx 30 \text{ KeV}$ ,  $t=25 \text{ min}$  : Gel des abondances. Fin de la nucléosynthèse



# Standard Big-Bang Nucleosynthesis

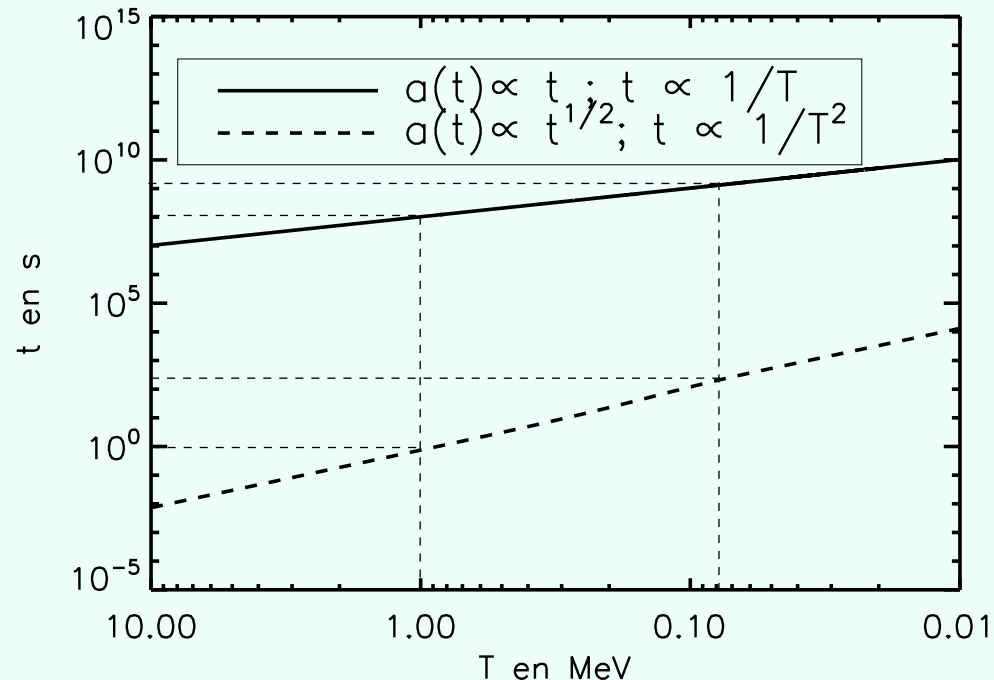
- Test très précis sur D,  $^4\text{He}$  et  $^3\text{He}$
- Tensions entre WMAP et SBBN sur  $^7\text{Li}$



Et dans Milne ?

## Nucléosynthèse dans l'Univers de Milne

- La dynamique est beaucoup plus lente.



À 1 MeV,  $t \approx 3$  ans (Milne), contre 1s dans SBBN

À 80 KeV,  $t \approx 30$  ans (Milne),  
contre  $\approx 200$  s dans SBBN

- Température de découplage des interactions faibles :  $\sim 10^9$  K ( $\sim 80$  keV), ie après annihilation  $e^-e^+$ .



Températures du CMB et du fond de neutrinos cosmologiques identiques !

## Nucléosynthèse dans l'Univers de Milne

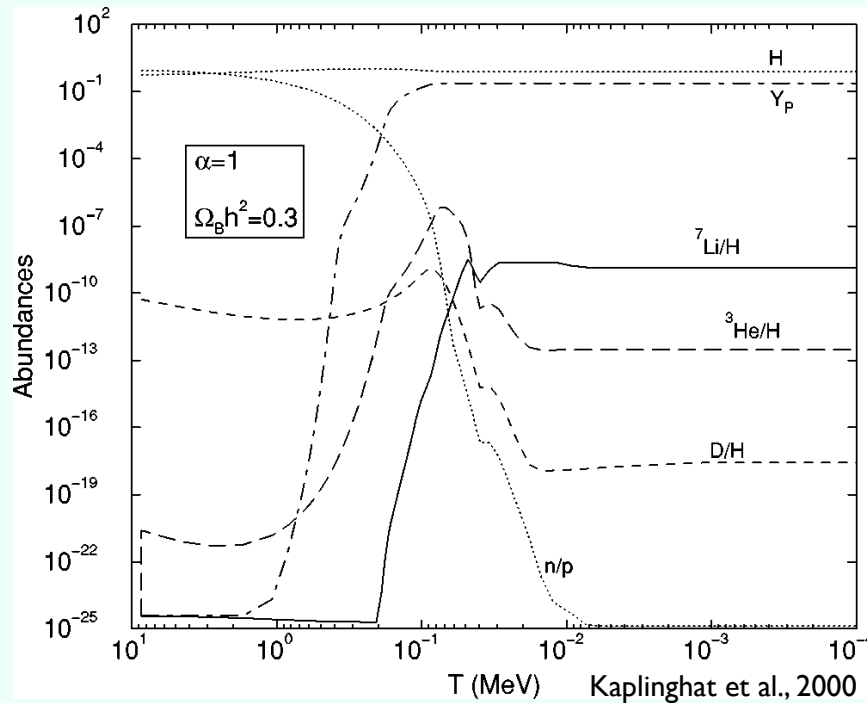
- Les neutrons régénérés permettent une nucléosynthèse
- Adéquation de l'abondance d'hélium si densité baryonique plus grande :

$$\eta \approx 8 \times 10^{-9} \quad \Omega_b h^2 = 0.3$$

Même ordre de grandeur que densité  
de matière noire : coïncidence ?

# Nucléosynthèse dans l'Univers de Milne

- Bon accord pour l'hélium, perte totale du deutérium



Nécessité de fabriquer du deutérium par un autre moyen :  
spallation, nucléodisruption.

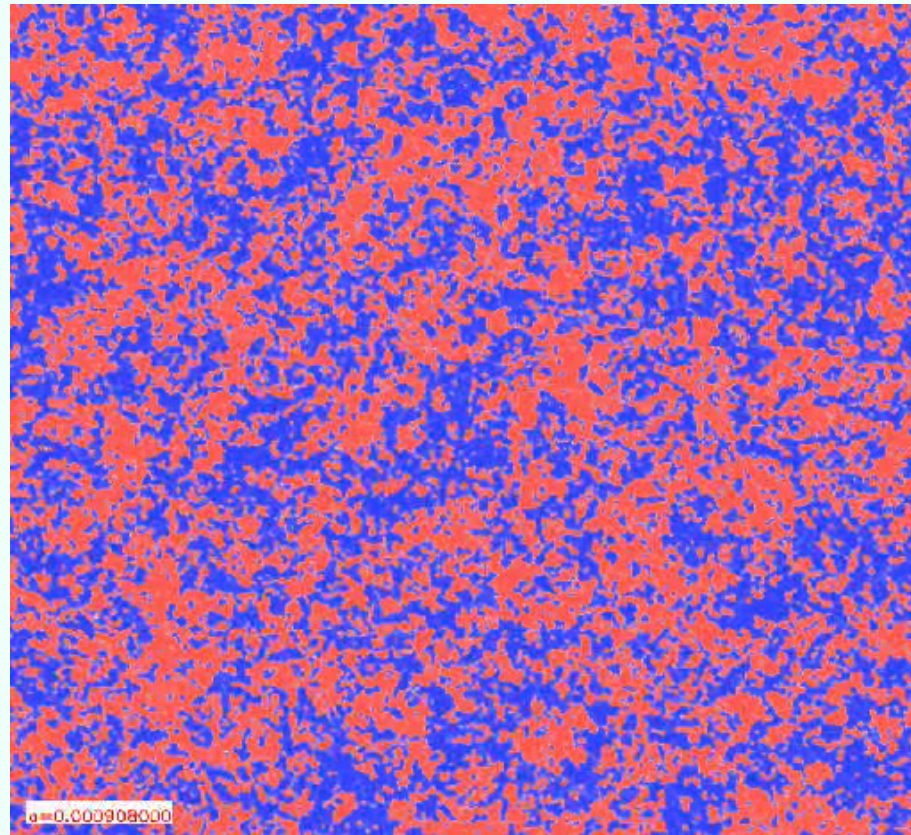
---

## Formation des structures

- Simulations numériques. RAMSES (R. Teyssier)
- Toutes les masses sont négatives
- But : déterminer l'existence d'un effondrement gravitationnel



# Formation des structures



## Prochaines étapes

- Nucléosynthèse
  - CMB
  - Nouvelles données SNLS
- 
- Comment justifier  $a(t) \propto t$  pendant la “période radiative” ?