

L'univers de Dirac-Milne : vers une nouvelle cosmologie concordante ?

Aurélien Benoit-Lévy
en collaboration avec Gabriel Chardin



Plan

- Modèle de concordance
- Motivations pour un autre scénario
- Présentation de l'univers de Dirac-Milne
- Tests cosmologiques
- Probables points de tension et difficultés à prévoir

- Principe cosmologique : l'Univers est homogène et isotrope
Métrique FRW : facteur d'expansion et courbure *spatiale*.

$$ds^2 = dt^2 - a(t)^2 \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\Omega^2 \right)$$

- Relativité générale : Lien entre géométrie et contenu de l'Univers : équations d'Einstein

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

- Hypothèse sur le contenu : fluide parfait d'équation d'état $p = \omega \rho$

- Équations de Friedmann

$$\left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = H_0^2 \left[\Omega_M \left(\frac{a_0}{a} \right)^3 + \Omega_R \left(\frac{a_0}{a} \right)^4 + \Omega_k \left(\frac{a_0}{a} \right)^2 + \Omega_\Lambda \right]$$

- Un des objectifs de la cosmologie moderne : préciser la nature et déterminer la valeur des paramètres cosmologiques

Contenu de l'Univers

- **Radiation**

Fond de photons

$$T_{CMB} = 2.725 \text{ K}$$

Fond de neutrinos

$$T_\nu = 1.94 \text{ K}$$

$$\Omega_R \sim 8 \times 10^{-5}$$

- **Matière**

Baryons

$$\Omega_B \sim 0.04$$

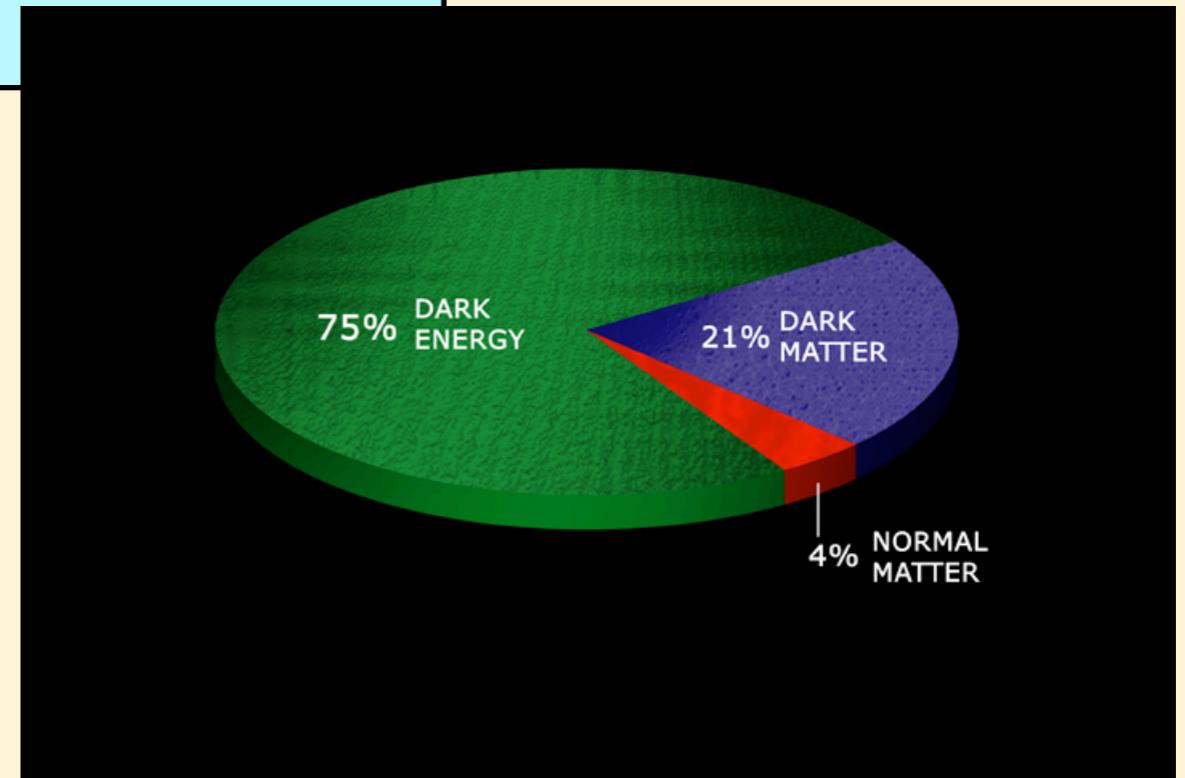
Matière Noire non-baryonique

$$\Omega_{DM} \sim 0.24$$

- **Énergie Noire**

?

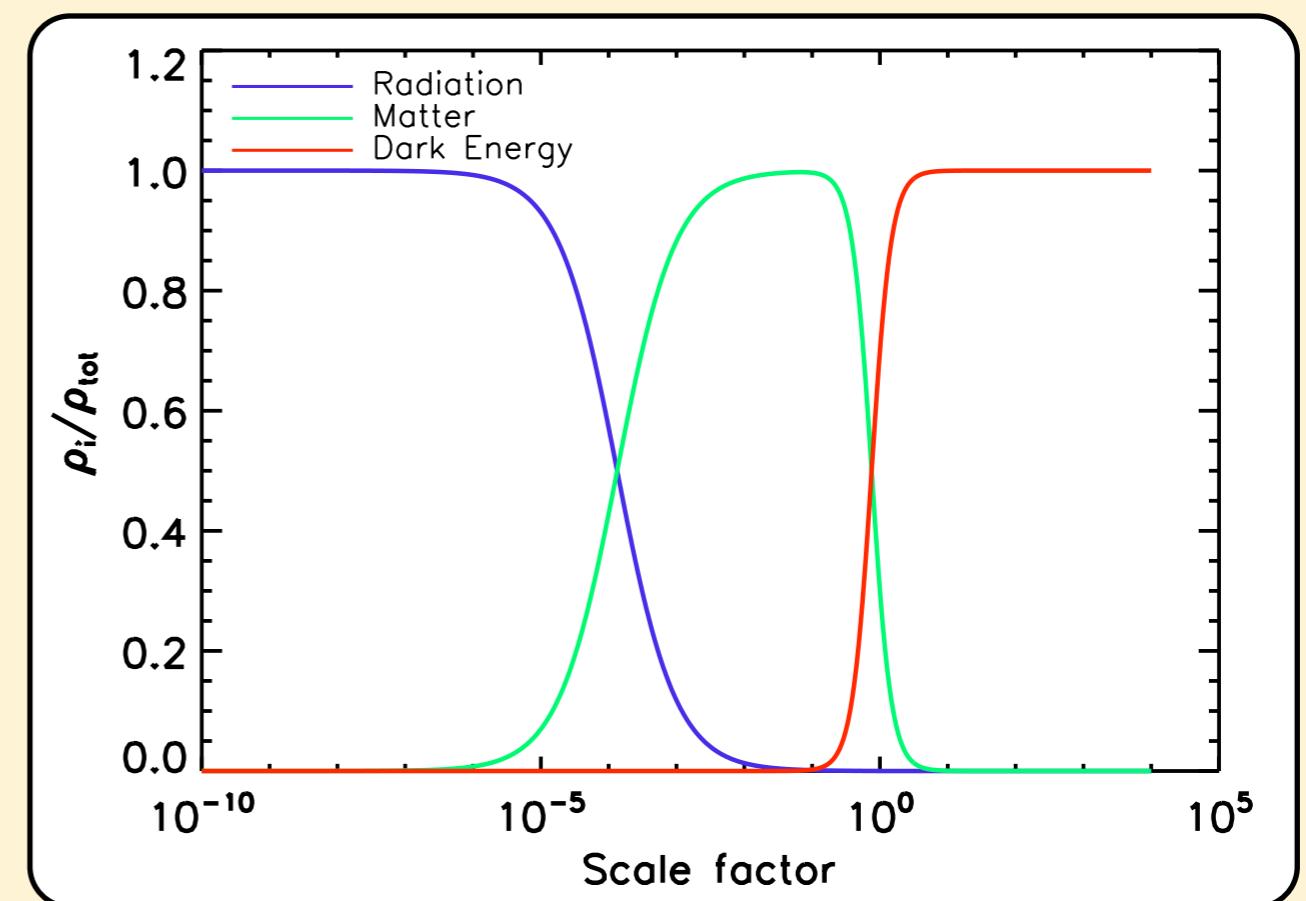
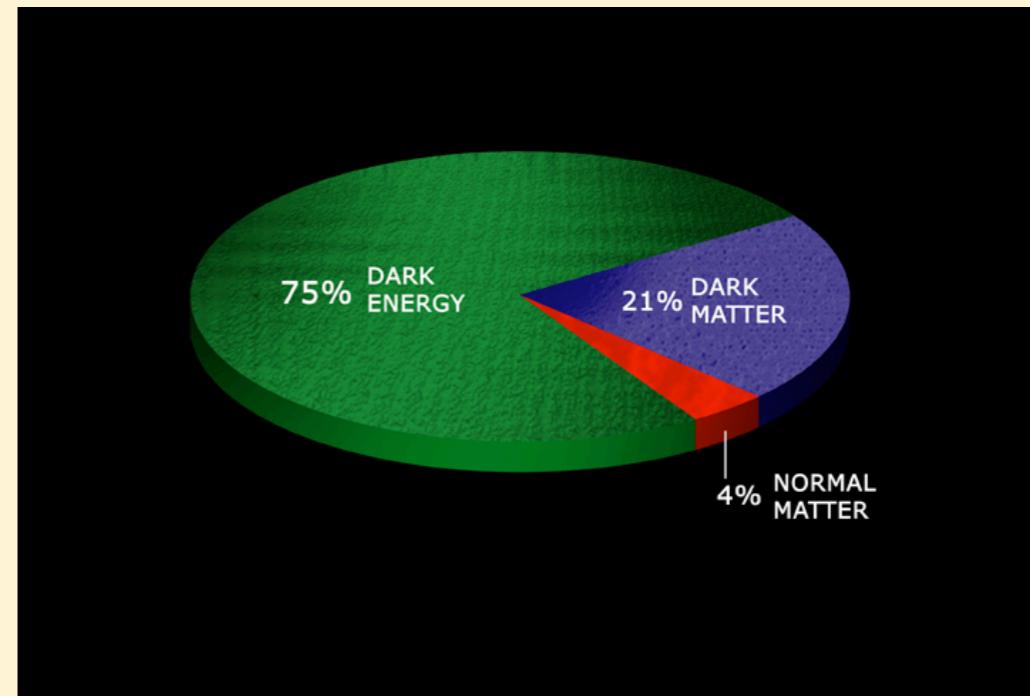
$$\Omega_\Lambda \sim 0.72$$



Pourquoi chercher autre chose ?

Quelques problèmes

- 95 % de l'Univers inconnu !
- Énergie Noire : Problème de fine tuning lié à l'énergie du vide
- Problème de la coïncidence : l'Univers est successivement dominé par différents types d'énergie. Peu naturel.
Pourquoi a-t-on $\Omega_M \sim \Omega_\Lambda$



Univers de Dirac-Milne

- À la place d'une phase de décélération puis d'accélération, une expansion linéaire $a(t) \propto t$
- Espace-temps plat (Milne), espace ouvert : $k = -1$
- Équation d'Einstein : Espace-temps plat équivaut à univers vide $\Omega_M = 0, \Omega_\Lambda = 0, \Omega_k = 1$
- Idée de considérer autant de masses positives que négatives : ni accélération ni décélération (à grandes distances).

$a(t) = t$ et $k = -1$ dans la métrique FRW implique un **espace-temps plat** et un **espace ouvert**. À comparer avec l'hypothèse habituelle d'un **espace plat**.



L'univers de Dirac-Milne est le deuxième univers “naturel”

Masses négatives : motivations

- SNe la suggèrent la présence d'une gravité répulsive $\rho + 3p < 0$
Besoin d'autre chose que simplement de la matière "normale".
- Gravité répulsive : masses négatives ?
- Relativité générale : métrique Kerr-Newmann, trou noir chargé en rotation (q, m, a)

Métrique Kerr-Newmann

Symétrique sous la transformation

$$(r, e, m) \leftrightarrow (-r, -e, -m)$$

Si $(q, m, a) = \left(-e, m_e, \frac{\hbar}{2}\right)$

deux \mathbb{R}^4 conjugués par l'anneau



Univers à expansion linéaire

Quelques propriétés

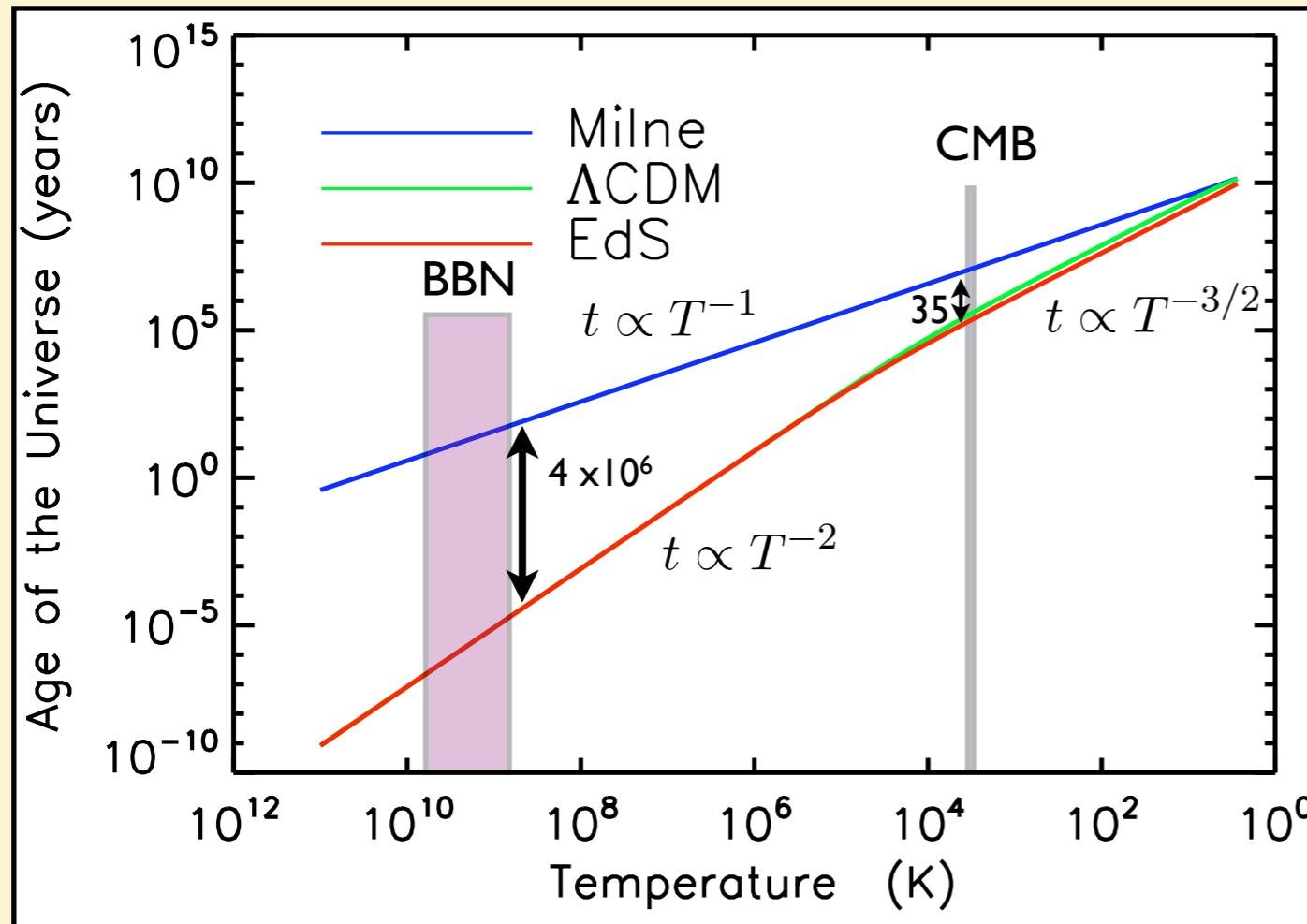
- **Âge :** $t_0 = \frac{1}{H_0} \sim 14 \times 10^9$ ans, avec $H_0 = 70$ km/s/Mpc

Problème de l'âge résolu naturellement

- **Pas de problème de l'horizon :** $d_h(t) = a(t) \int_0^t \frac{dt'}{a(t')}$.
- **Pas besoin d'inflation dans un tel univers**

Pas d'Énergie Noire, pas de Matière Noire, pas d'inflation

Relation temps-température

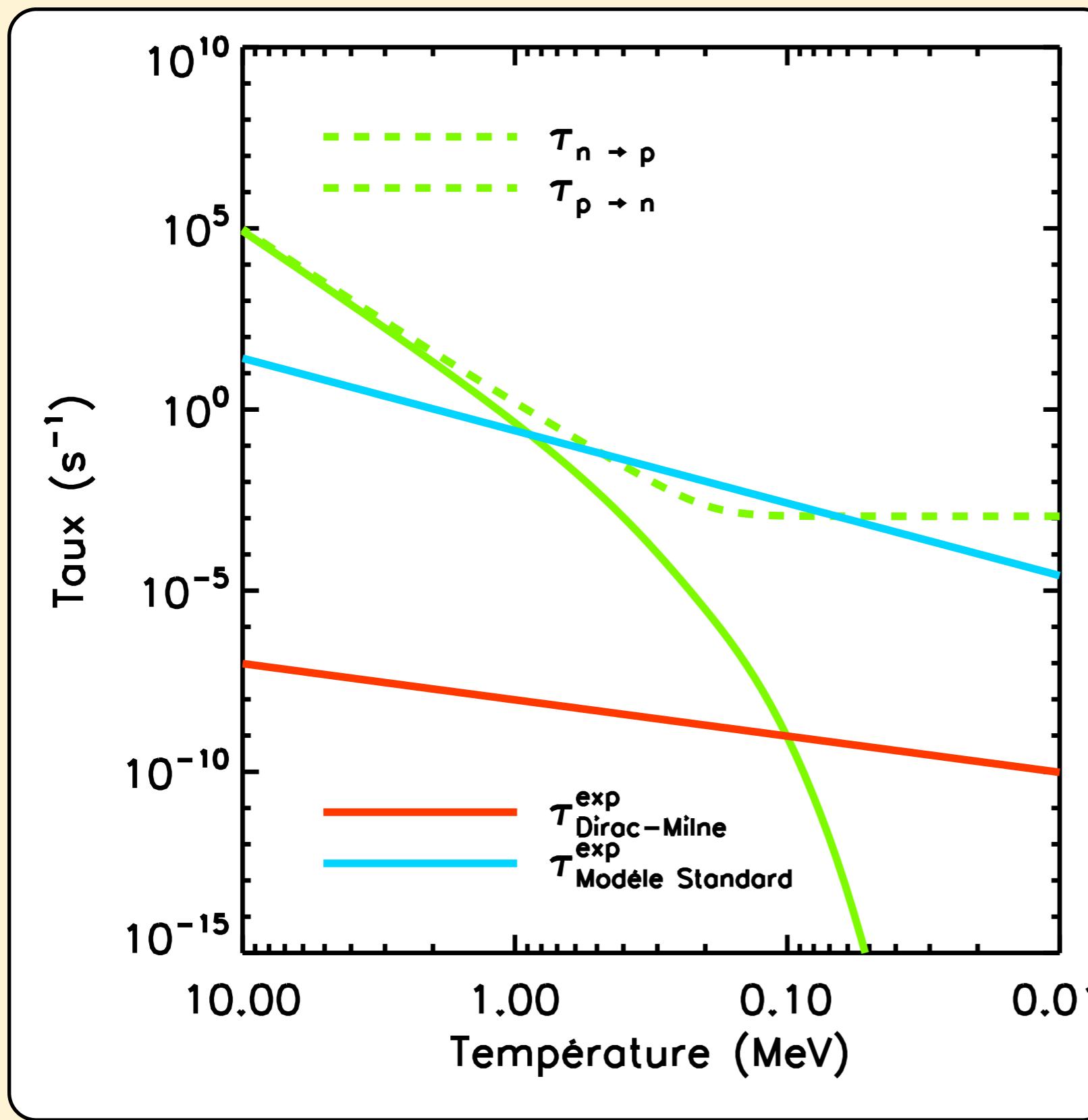


$$t = \frac{1}{H_0} \frac{T_0}{T}$$

- Transition QGP : ~ 170 MeV, 1 semaine (3×10^{-5} sec)
- BBN : 30 ans (3 min)
- CMB : 14×10^6 ans (380 000 ans)

Évolution beaucoup plus lente
Découplages beaucoup plus tardifs

Interactions faibles



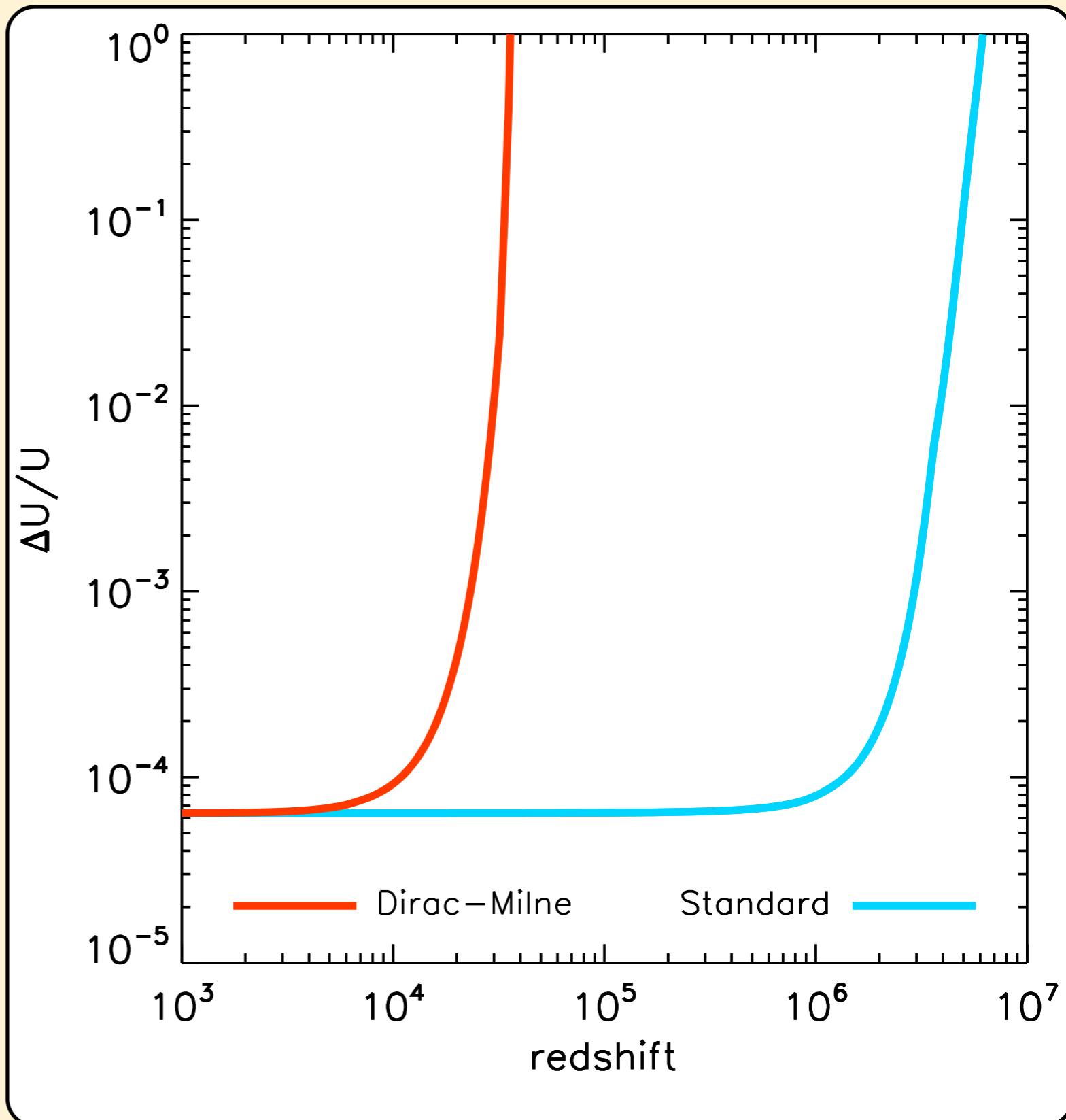
- Assurent équilibre entre neutrons et protons
- Modèle standard : découplage vers 1 MeV (~ 1 sec)
- Dirac-Milne : découplage vers 80 keV (~ 40 ans)...
- ... après disparition des paires e^+e^- .

$$T_\nu = T_{CMB} = 2.725 \text{ K}$$

Influence sur la BBN ...

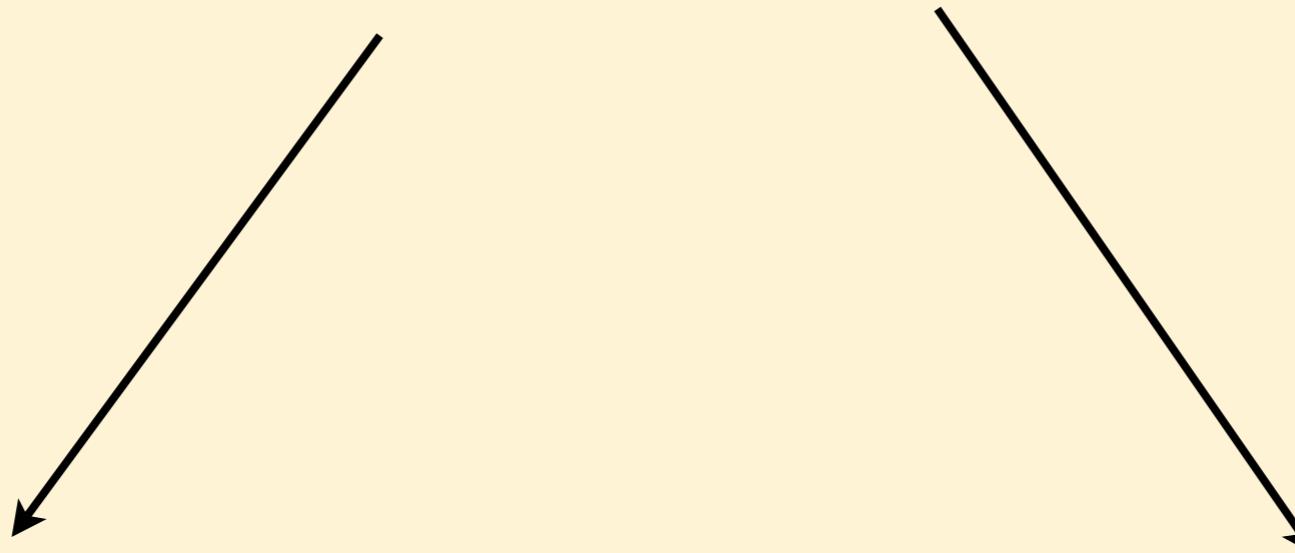
Distorsions spectrales du CMB

- Le spectre du CMB est un corps noir (COBE).
- Injections d'énergie très contraintes : $1.4 \Delta U/U < 9 \cdot 10^{-5}$
Fixsen et al. 96
- Thermalisation assurée par
 - $e + \gamma \leftrightarrow e + \gamma$
 - $e + \gamma \leftrightarrow e + \gamma + \gamma$
 - $e + N \leftrightarrow e + N + \gamma$
- Dirac-Milne : réactions efficaces plus longtemps + densité baryonique plus importante



Approche

Univers de Dirac-Milne : modèle cosmologique alternatif avec quelques (petites !) hypothèses en plus et d'autre en moins.



Confrontation aux tests cosmologiques classiques

- BBN
- CMB
- Supernovae

Justification du modèle et des hypothèses

- Univers symétrique
- Antimatière de masse négative (terme source répulsif)
- Séparation entre matière et antimatière (émulsion)

Nucléosynthèse primordiale

- Nucléosynthèse standard
- Dirac-Milne : production thermique homogène d' hélium-4 et de lithium-7
- Production inhomogène de deutérium

Nucléosynthèse Primordiale standard

- $T > 1 \text{ MeV}$, neutrons et protons en équilibre thermique maintenu par interactions faibles.

$$\frac{n}{p} = e^{-Q/T}$$

- $T \approx 1 \text{ MeV}, t=1s$: Gel des interactions faibles, perte de neutrons par désintégration.

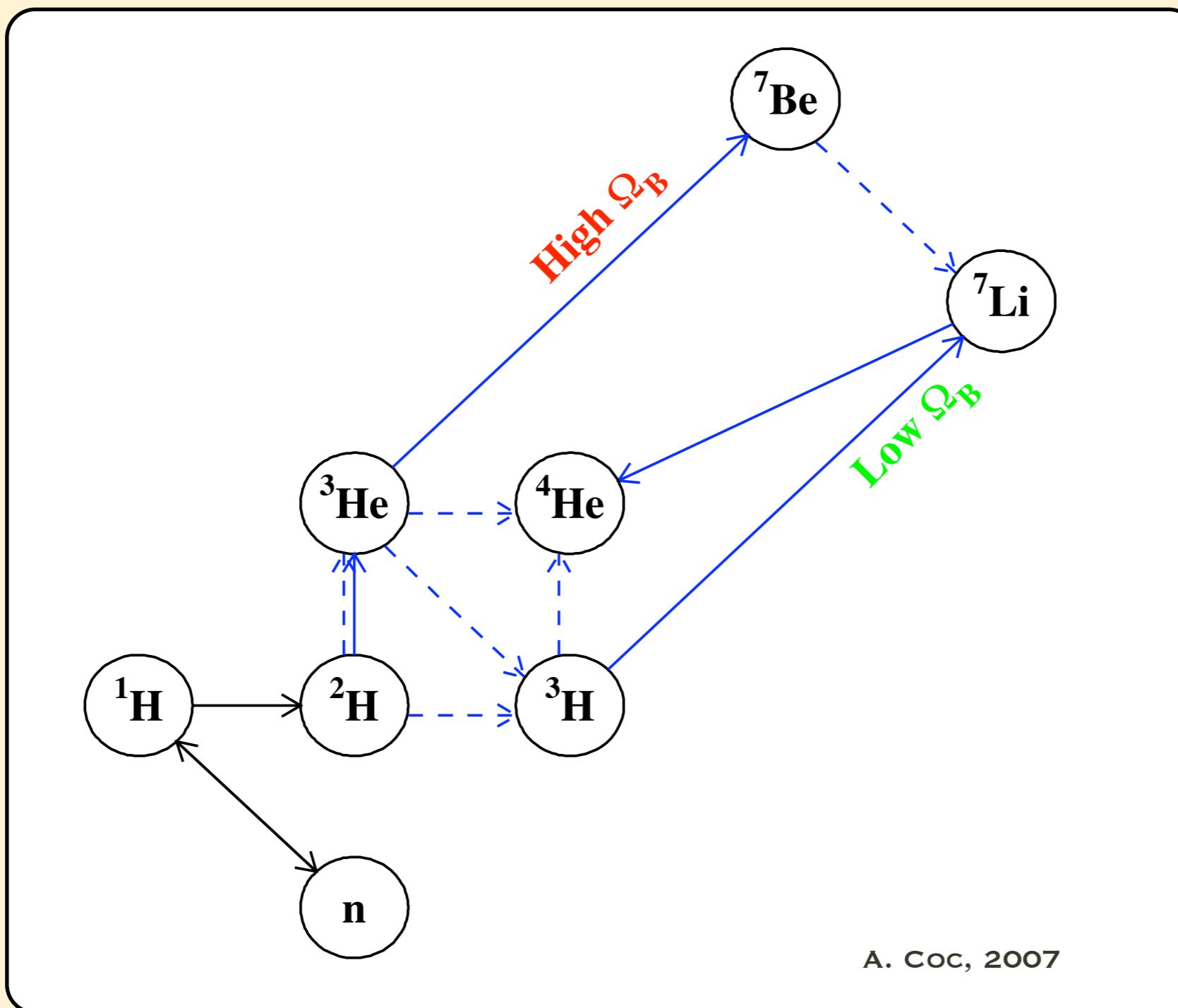
$$\frac{n}{p} \approx \frac{1}{6}$$

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

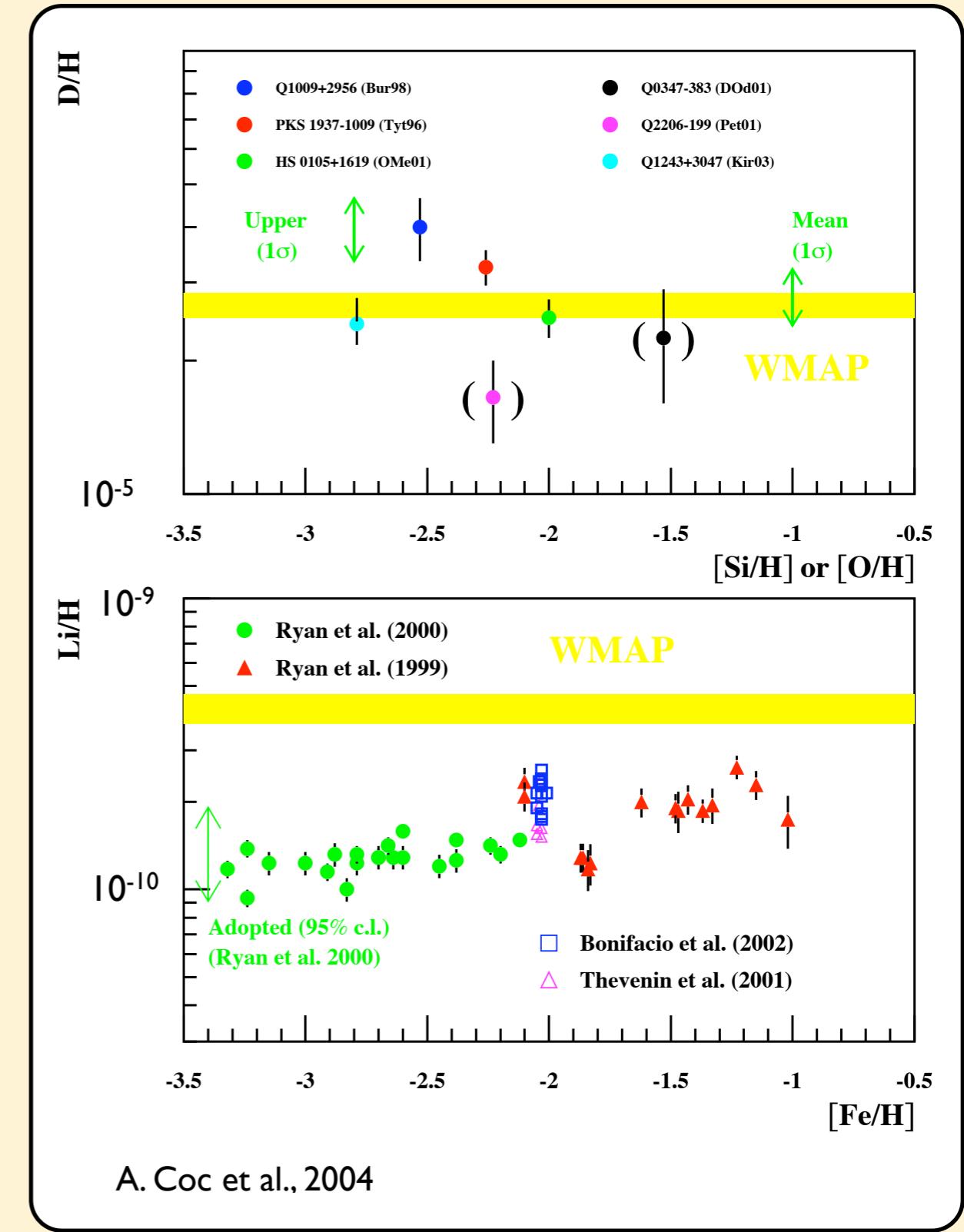
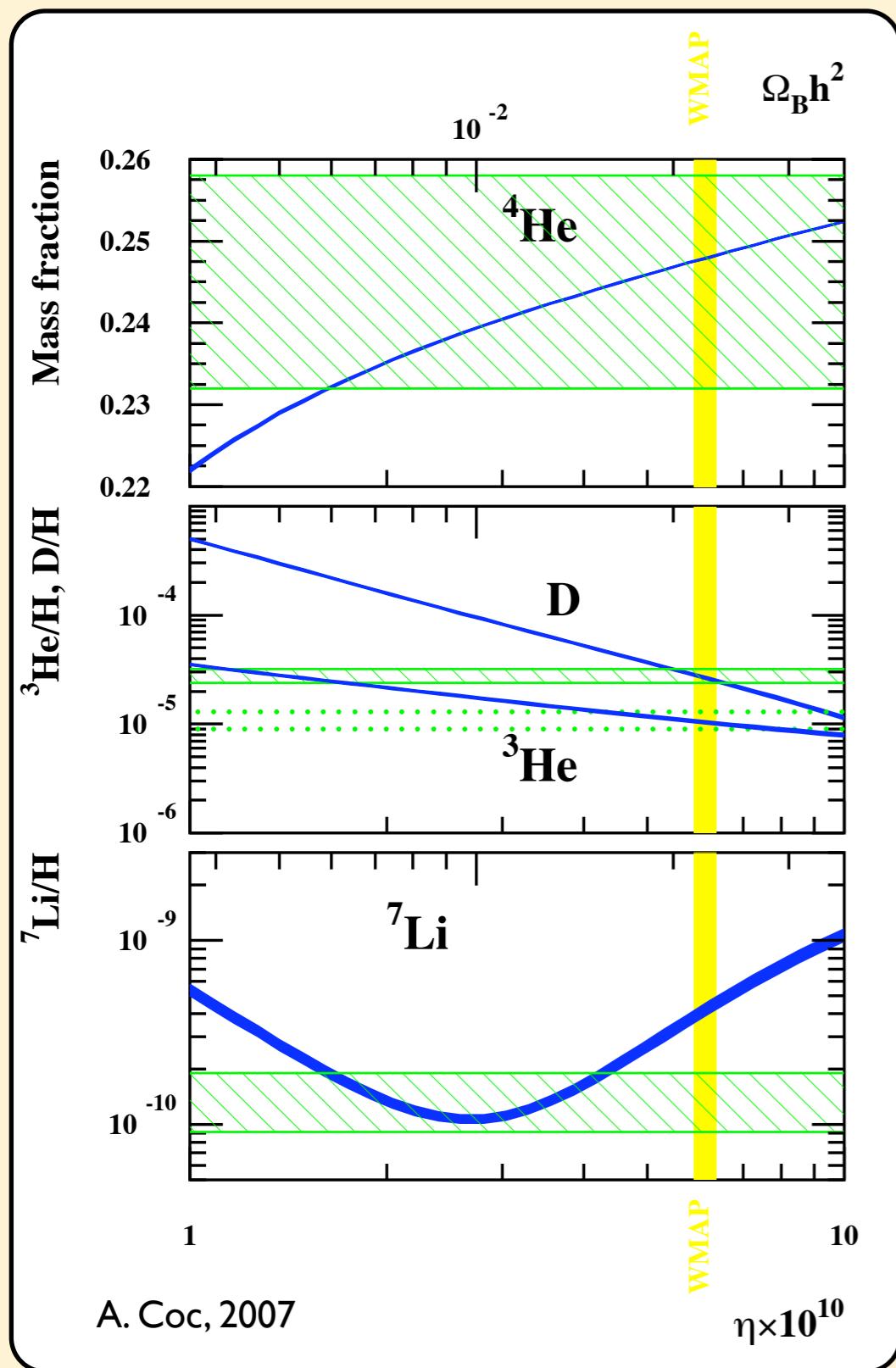
$$\frac{n}{p} \approx \frac{1}{7}$$

$$Y_p = \frac{2(n/p)}{1 + (n/p)} \approx 0.25$$

Réseau de réactions nucléaires

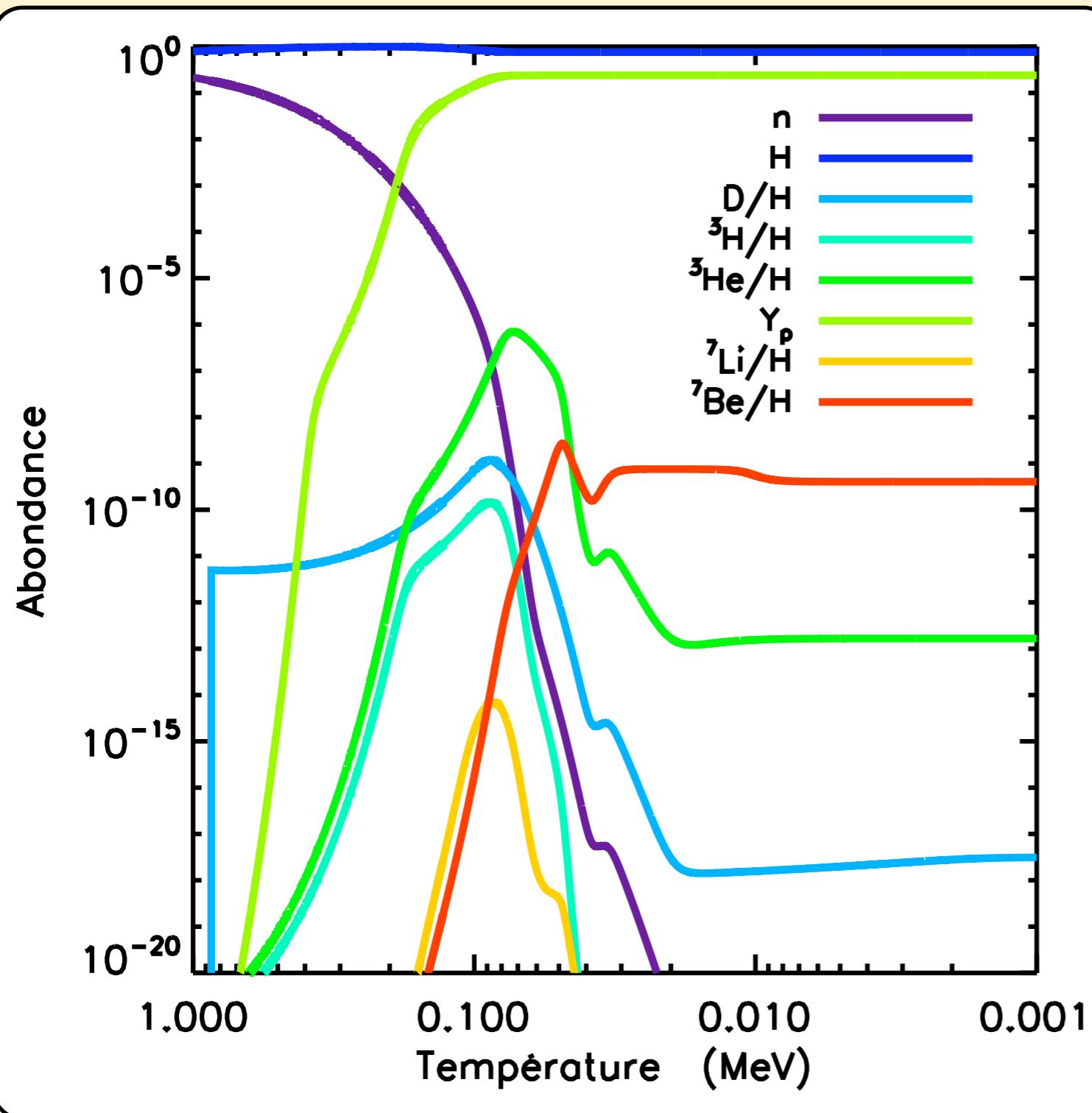


Nucléosynthèse Primordiale standard



BBN dans l'univers de Dirac-Milne

- Étudiée dans le cadre des cosmologies “power-law”, Lohiya (98), Kaplinghat (99,00)
- Beaucoup plus de temps disponible, ~ 30 ans contre 3 min
- A priori, plus de neutrons et donc pas de nucléosynthèse
- Découplage des interactions faibles vers 80 keV, donc maintien de densité de neutrons et protons à l'équilibre $\frac{n}{p} = e^{-Q/T}$
- Production lente de deutérium (car peu de neutrons), mais beaucoup de temps
- Neutrons régénérés par beta inverse pour restaurer l'équilibre
- Comme beaucoup plus de temps, autres réactions rentrent en jeu



^4He et ^7Li produits au “bon” niveau, si densité baryonique

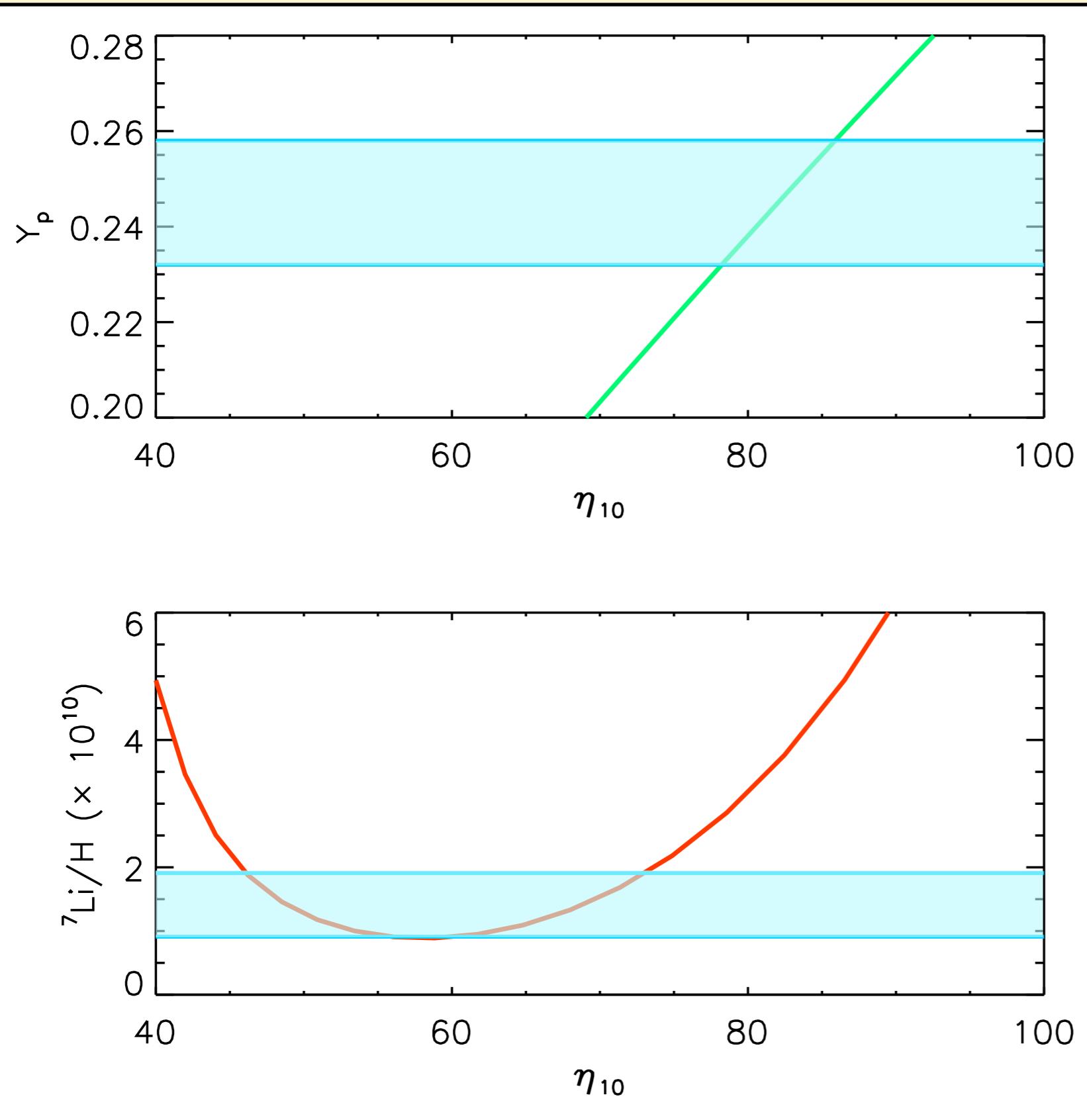
$$\eta \sim 8 \times 10^{-9}$$

Pas de production D et ^3He

$$\eta \sim 8 \times 10^{-9}$$

→ Suppression de la nécessité d'une matière noire non-baryonique !

Densité baryonique



Pas d'overlap de domaines

Problème du ^7Li moins prononcé que dans SBBN

Cohérence du modèle

Nucléosynthèse “inhomogène”

Production de deutérium par nucléodisruption de ${}^4\text{He}$:

P_n	P_p	P_D	P_T	$P_{{}^3\text{He}}$
0.51	0.28	0.13	0.43	0.21

Balestra et al. 88

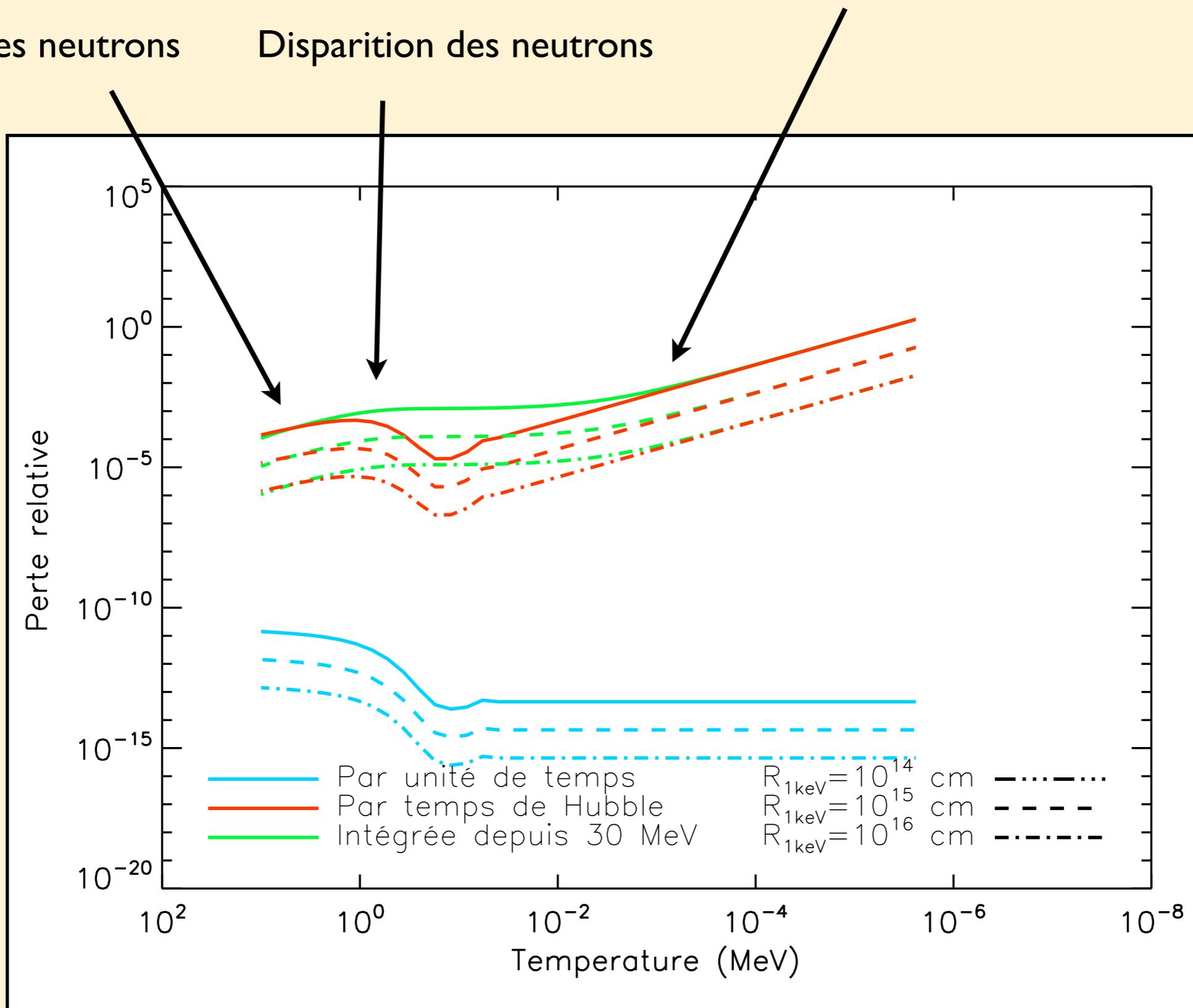
- Mécanismes de la nucléosynthèse avec antimatière étudiée fin 90 (Jedamzik & Rehm 00, Kurki-Suonio & Sihvola 00) avec beaucoup plus de temps
- Transport des nucléons vers la frontière M/AM par diffusion

Différents régimes de diffusion

Diffusion des protons
limitée par Thomson drag
des photons sur électrons

Diffusion des neutrons

Disparition des neutrons



Nucléosynthèse “inhomogène”

Production de deutérium par nucléodisruption de ${}^4\text{He}$:

P_n	P_p	P_D	P_T	$P_{{}^3\text{He}}$
0.51	0.28	0.13	0.43	0.21

Balestra et al. 88

- Mécanismes de la nucléosynthèse avec antimatière étudiée fin 90 (Jedamzik & Rehm 00, Kurki-Suonio & Sihvola 00) avec beaucoup plus de temps
- Transport des nucléons vers la frontière M/AM par diffusion

Nucléosynthèse “inhomogène”

Production de deutérium par nucléodisruption de ${}^4\text{He}$:

P_n	P_p	P_D	P_T	$P_{{}^3\text{He}}$
0.51	0.28	0.13	0.43	0.21

Balestra et al. 88

- Mécanismes de la nucléosynthèse avec antimatière étudiée fin 90 (Jedamzik & Rehm 00, Kurki-Suonio & Sihvola 00) avec beaucoup plus de temps
- Transport des nucléons vers la frontière M/AM par diffusion
- Abondance de deutérium en fonction de la taille des domaines

Nécessite de bien connaître le mécanisme de séparation M/AM, la loi de croissance des domaines et le comportement gravitationnel des domaines de masses positives et négatives

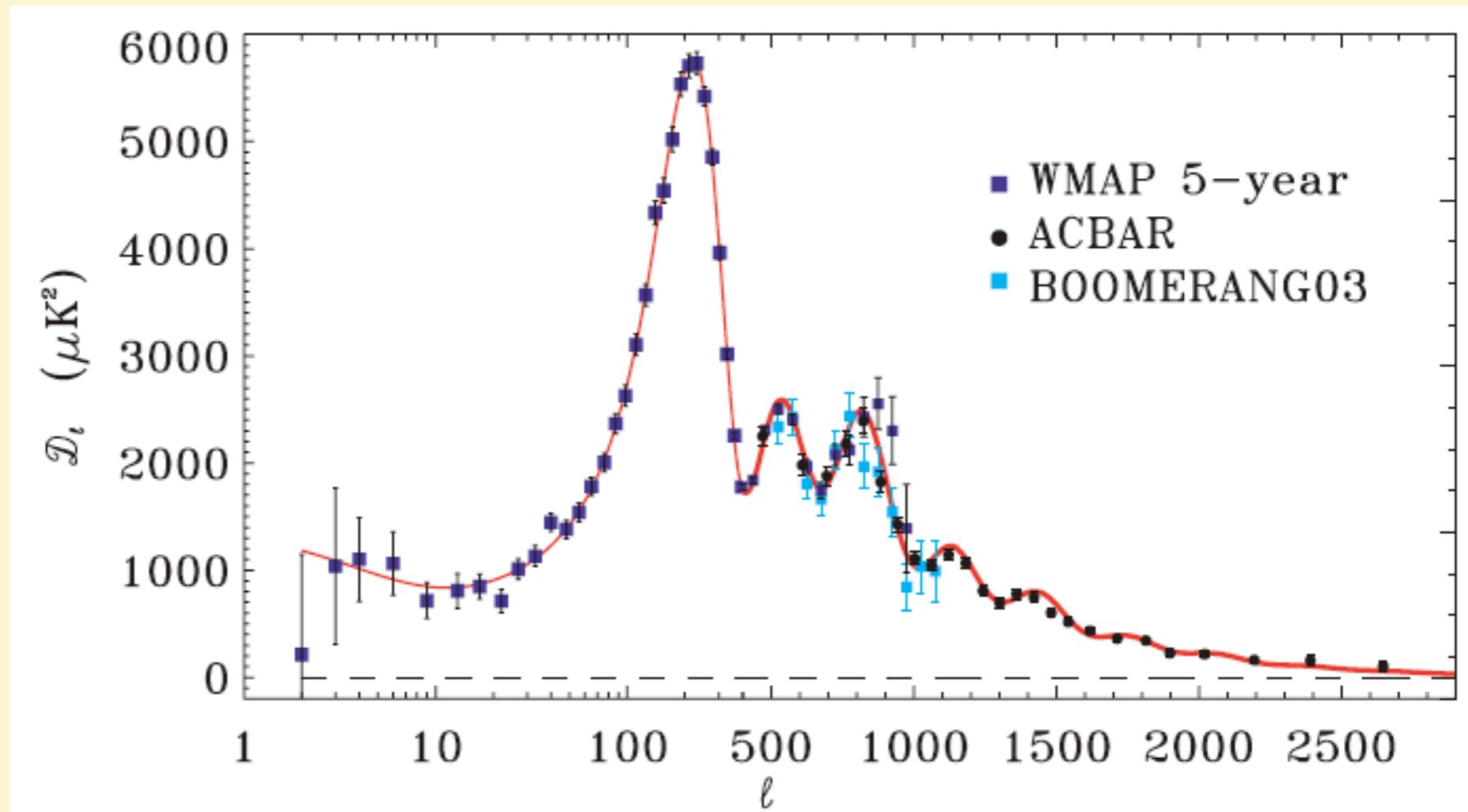
En pratique, la fin de l'annihilation et la taille des domaines contraintes par abondance de deutérium et distorsion du CMB

$L \sim 10^{17} \text{ m}$ @ $z = 3 \cdot 10^4$
pour avoir $D/H = 3 \cdot 10^{-5}$

CMB

CMB

But : faire aussi bien que

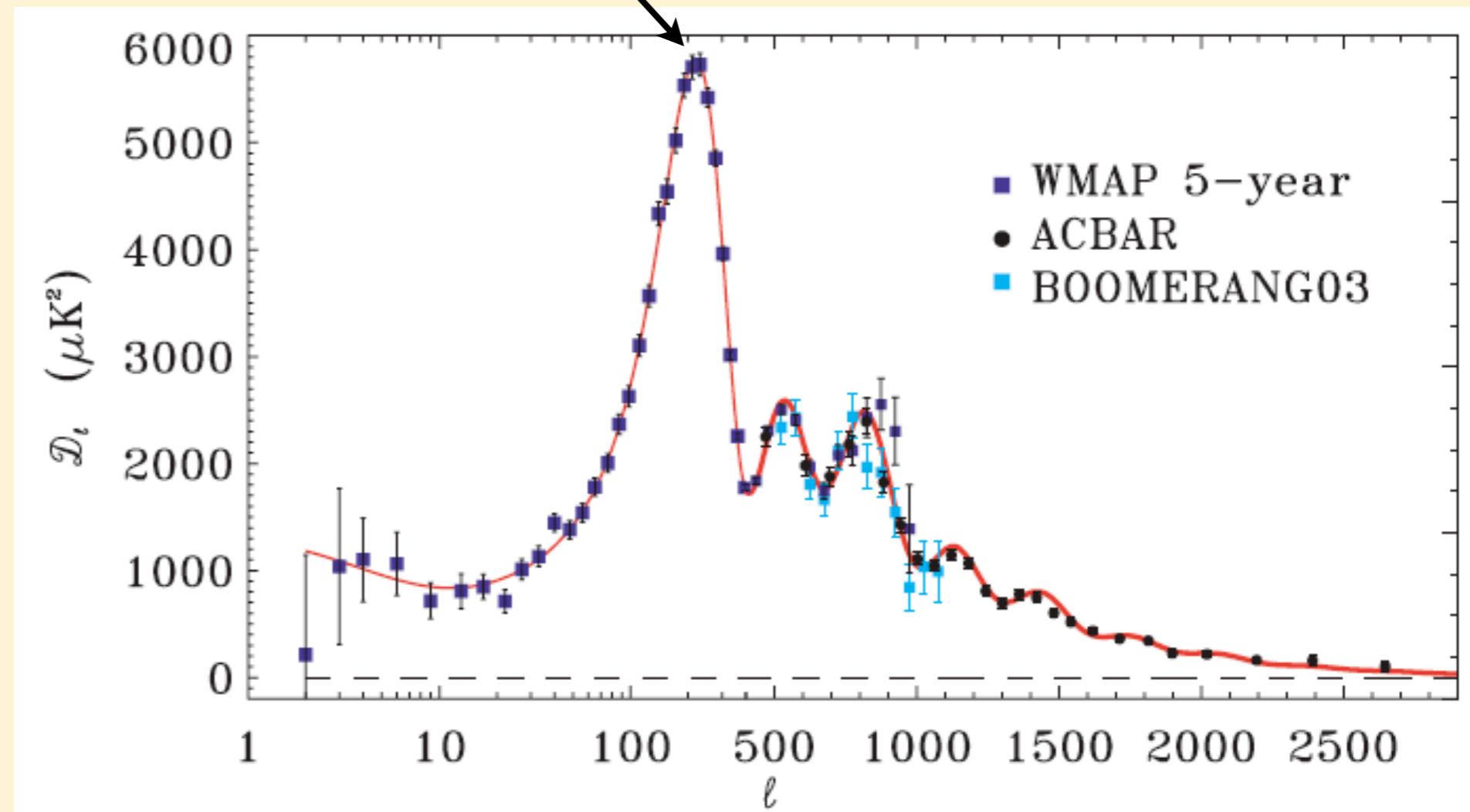


... Pas gagné !

CMB

Physique du CMB très différente : pas d'inflation, univers très homogène jusqu'à séparation M/AM (~ 40 MeV ?), expansion différente, ...

Λ CDM : position du 1er pic vers 1° , implique espace plat



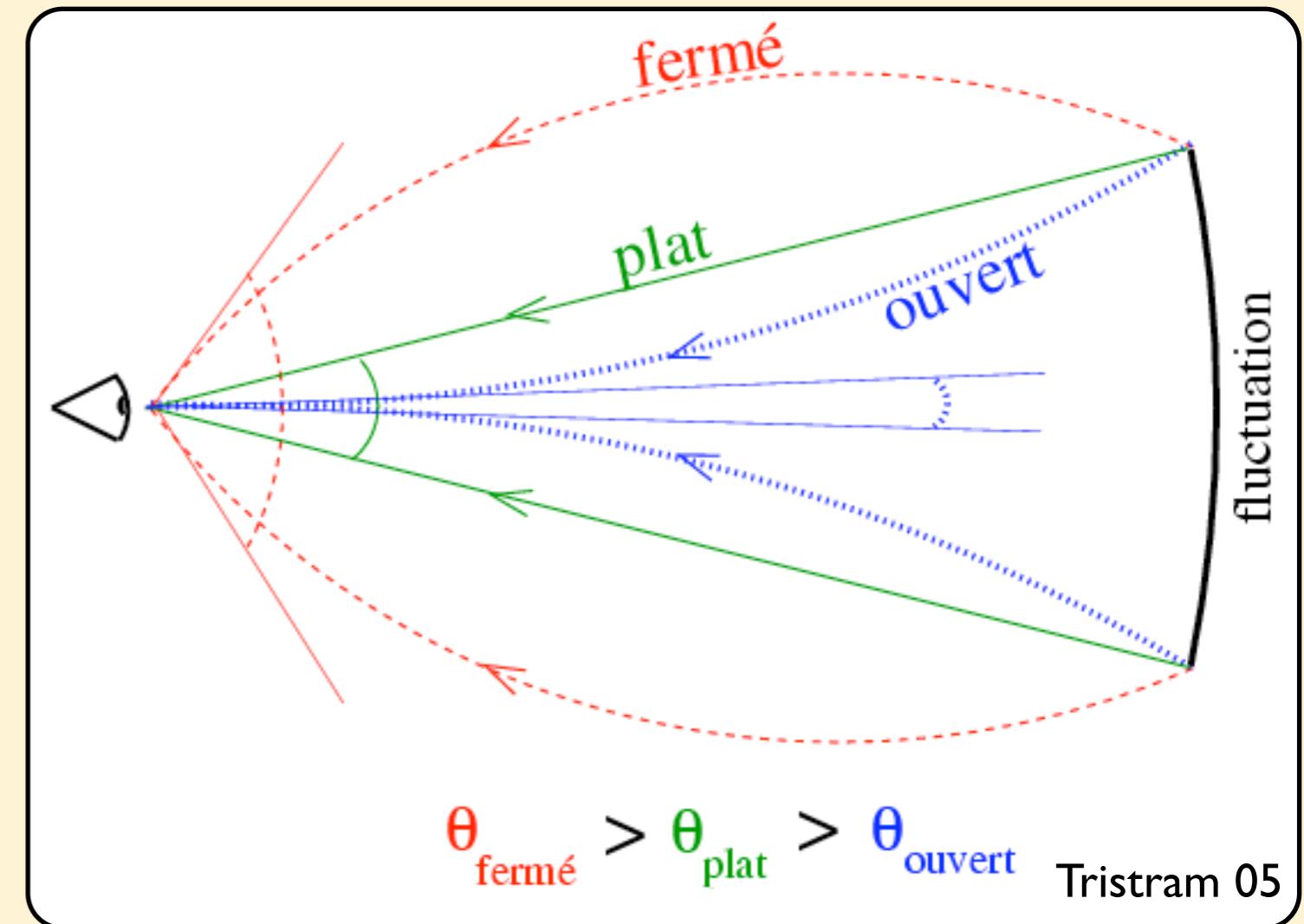
Position du 1er pic : angle sous lequel est vu l'horizon sonore à la recombinaison

Effet géométrique

Modèle standard : Espace-temps courbe et espace plat

Dirac-Milne : Espace-temps plat et espace ouvert

Pour le même objet



$$\frac{\theta_{\Lambda CDM}}{\theta_{\text{Milne}}} = \frac{d_A^{\text{Milne}}(z)}{d_A^{\Lambda CDM}(z)} = \stackrel{z=1100}{\sharp} 173$$

Horizon sonore : distance parcourue par une onde se propageant dans le plasma primordiale à la vitesse du son

$$r_s = \int c_s \frac{dt}{a(t)}$$

- Modèle Standard : intégration entre sortie de l'inflation et recombinaison
- Dirac-Milne : génération des ondes à la fin de l'annihilation jusqu'au découplage gravitationnel

Au final : position du premier pic acoustique autour de 1°

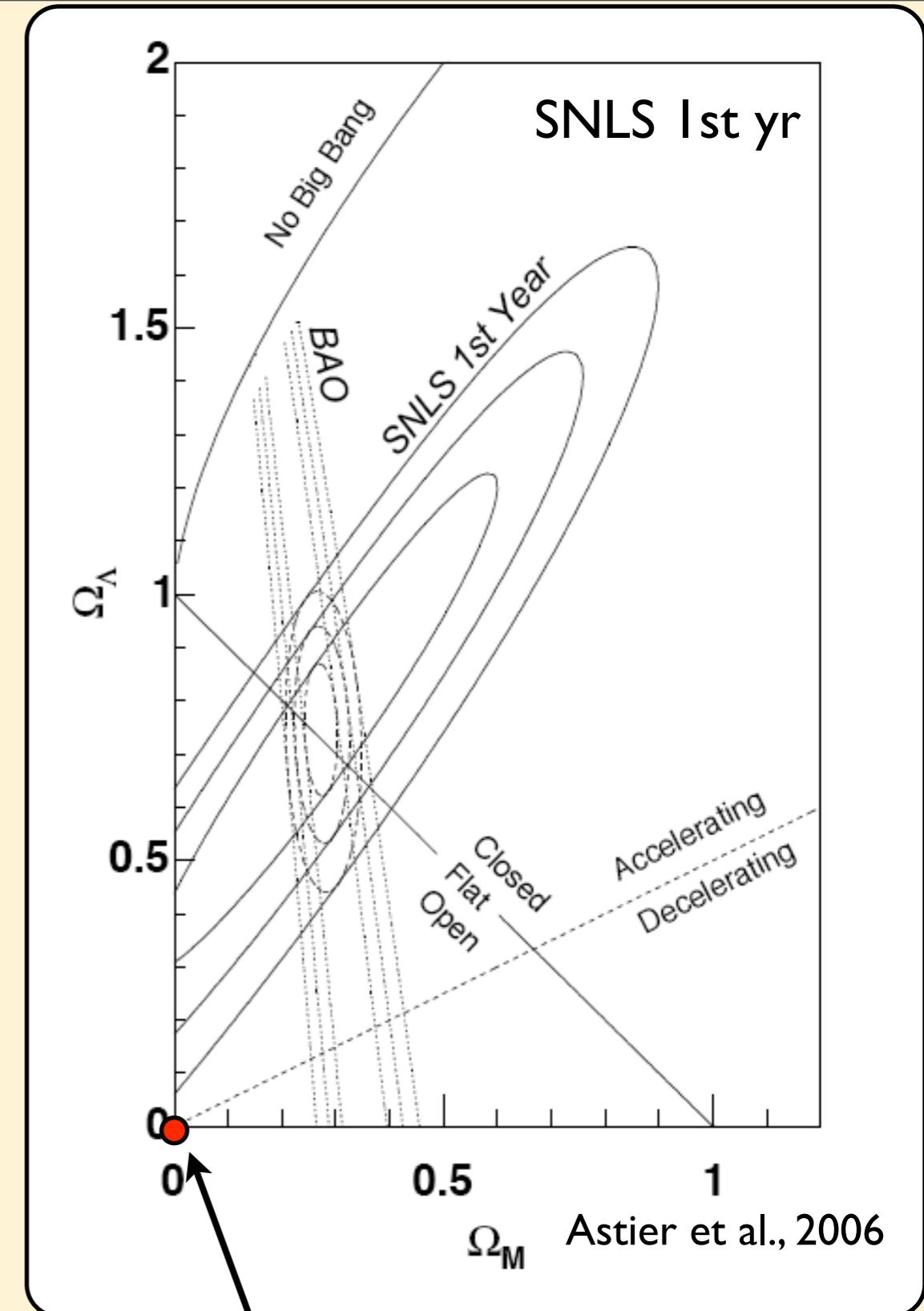
L'argument simpliste : Dirac-Milne impossible car espace ouvert ne tient pas *a priori* !

Reste la suite à prédire ...

Supernovae de type Ia

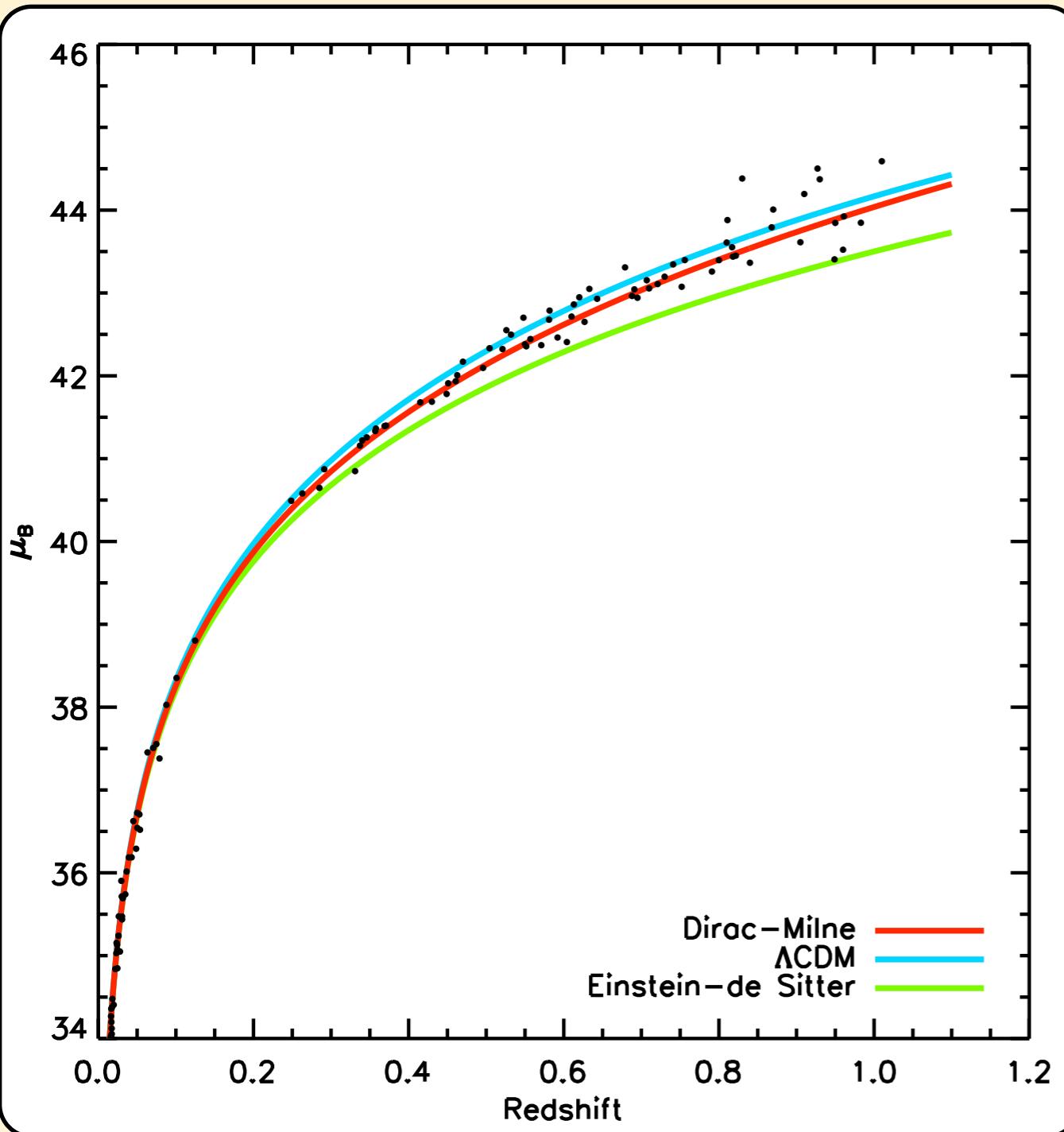
SNe Ia

- 1998, mesures de distance de SNe Ia indique que notre Univers est incompatible avec un modèle Einstein-de Sitter
- Interprétation comme existence d'une Énergie Noire, responsable de l'accélération de l'expansion



Dirac-Milne exclus à plus de 3σ , mais ...

SNLS 1st year



Paramètres déterminés à partir de la courbe de lumière de la SN

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

Paramètres inconnu !

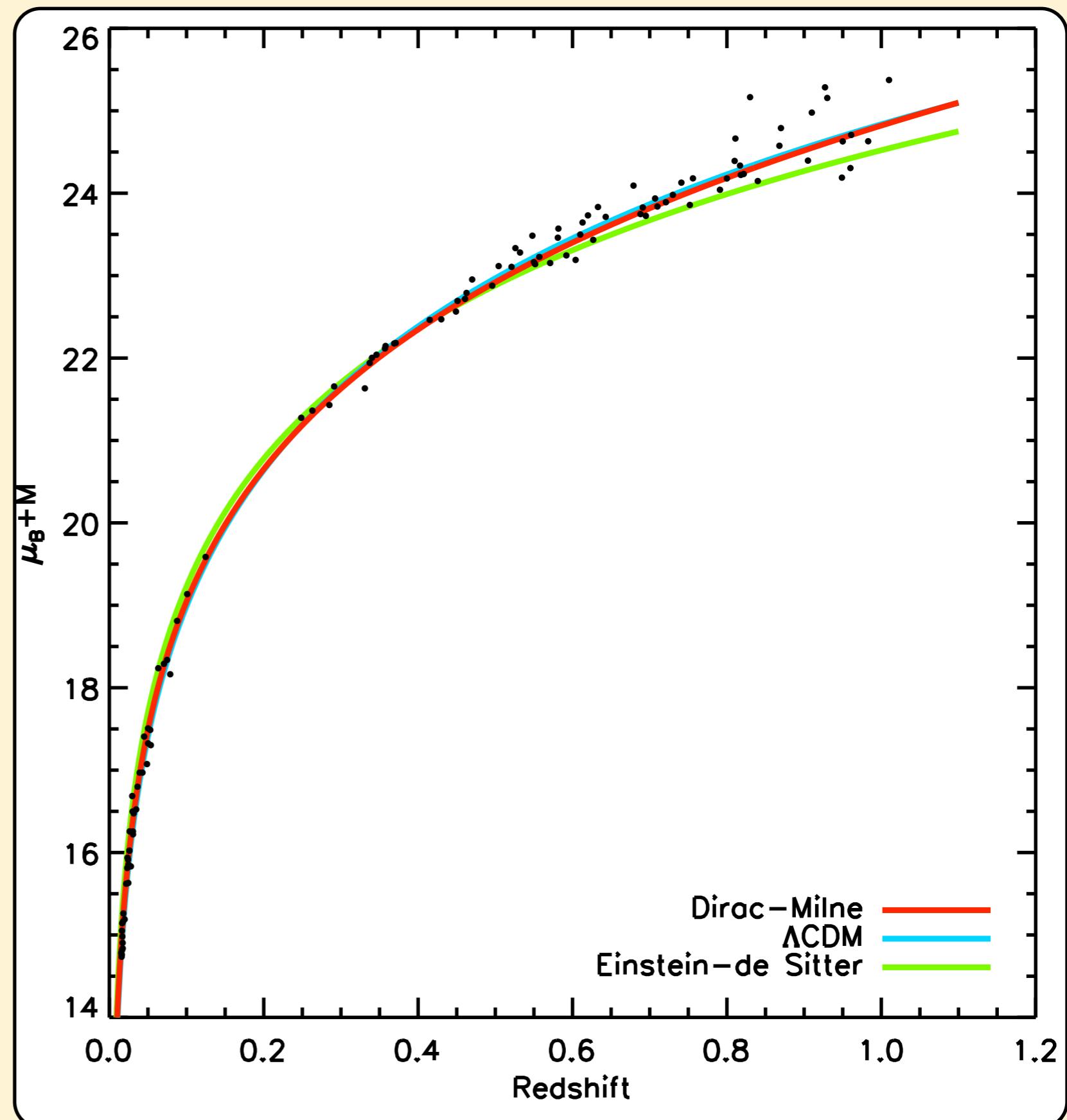
$$\mu = 5 \log \left(\frac{d_L(z)}{10 \text{ pc}} \right)$$

Diagramme de Hubble ...

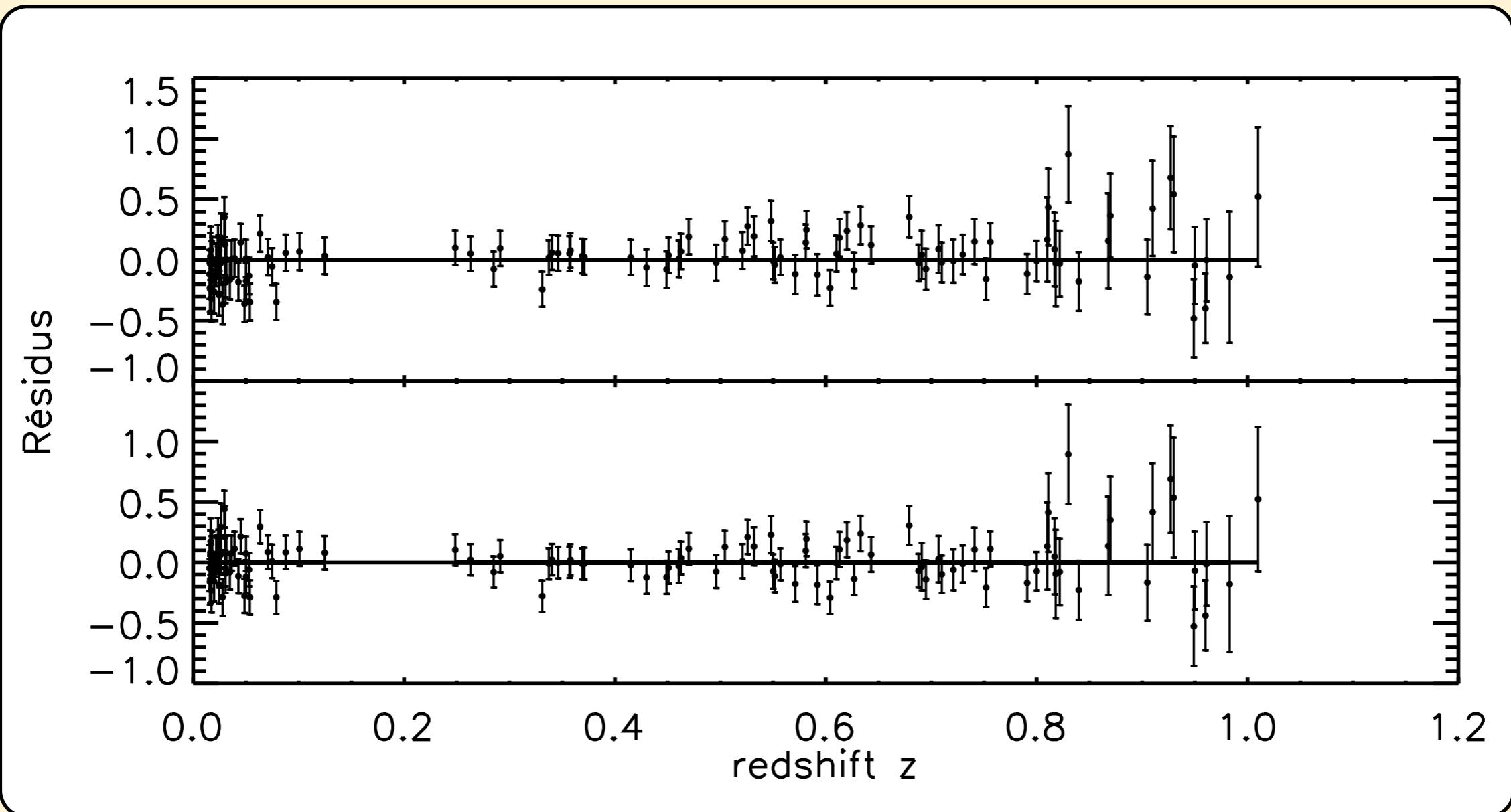
En réalité

Einstein-de Sitter exclu

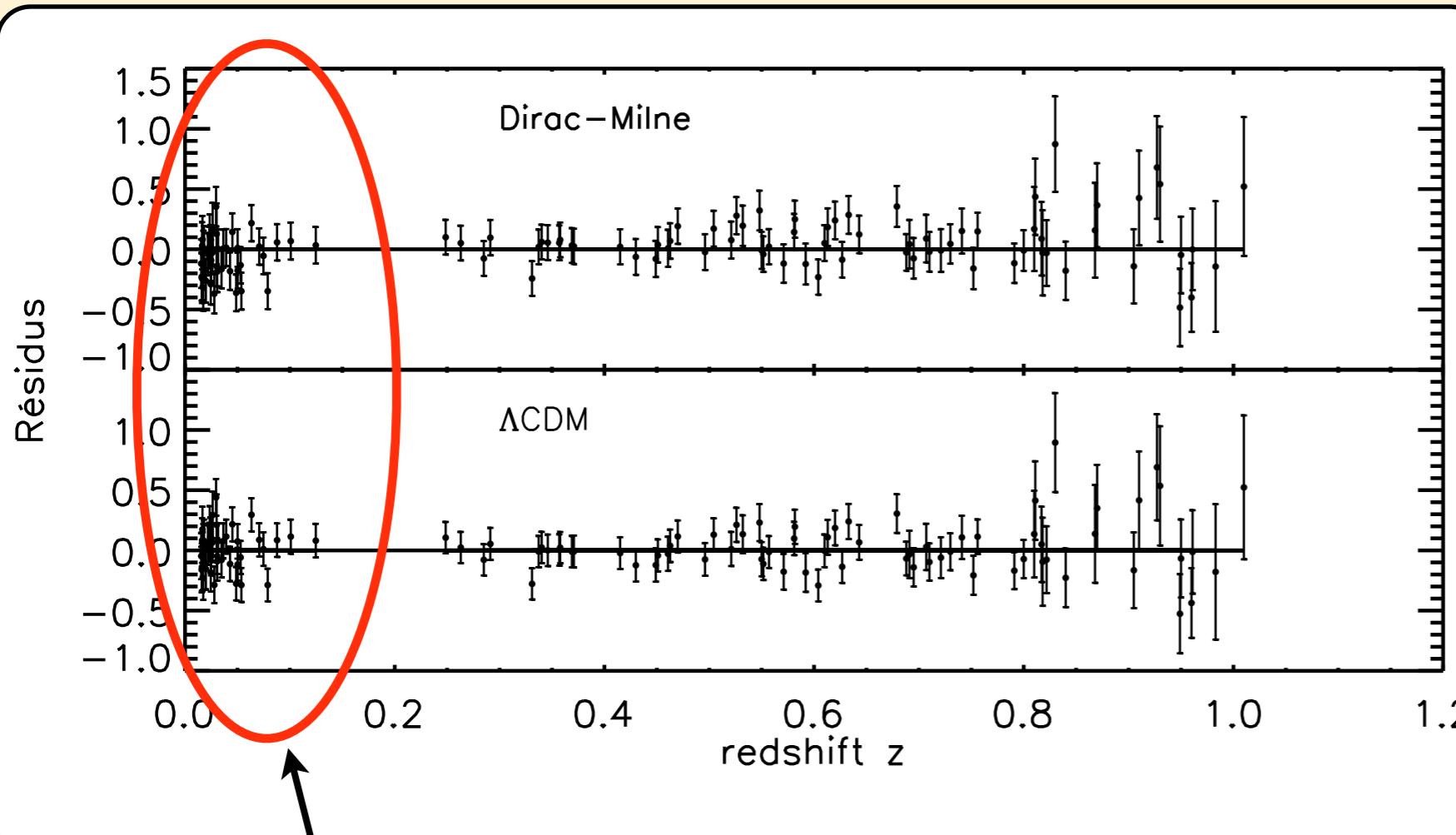
Différence entre Dirac-Milne et
 Λ CDM beaucoup plus fine



Résidus Dirac-Milne vs Λ CDM



Résidus Dirac-Milne vs Λ CDM



$$\chi^2 = \sum \frac{(\mu_{\text{obs}} - \mu_{\text{th}})^2}{\sigma^2(\mu) + \sigma_{\text{int}}^2}$$

Dispersion intrinsèque
telle que $\chi^2/\text{dof} = 1$

Légèrement plus grande
pour Dirac-Milne

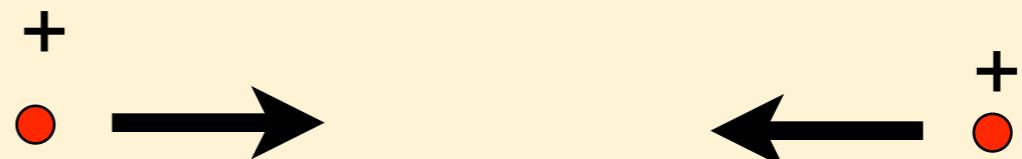
Supernovae à bas-redshift, pas du
SNLS, possibles systématiques

S'il y a des systématiques sur les
SNe la à bas redshift, $\Delta m \sim 0.06$
Alors Dirac-Milne exactement
aussi bien que Λ CDM

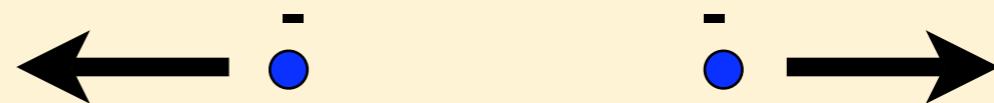
Masses négatives

Relativité générale : masses de Bondi (1957)

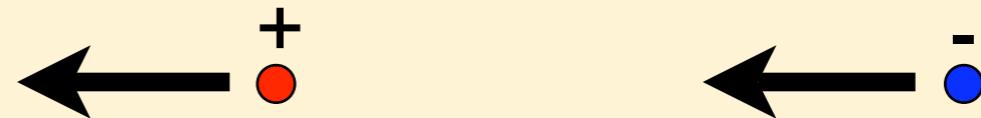
Les masses positives s'attirent



Les masses négatives se repoussent

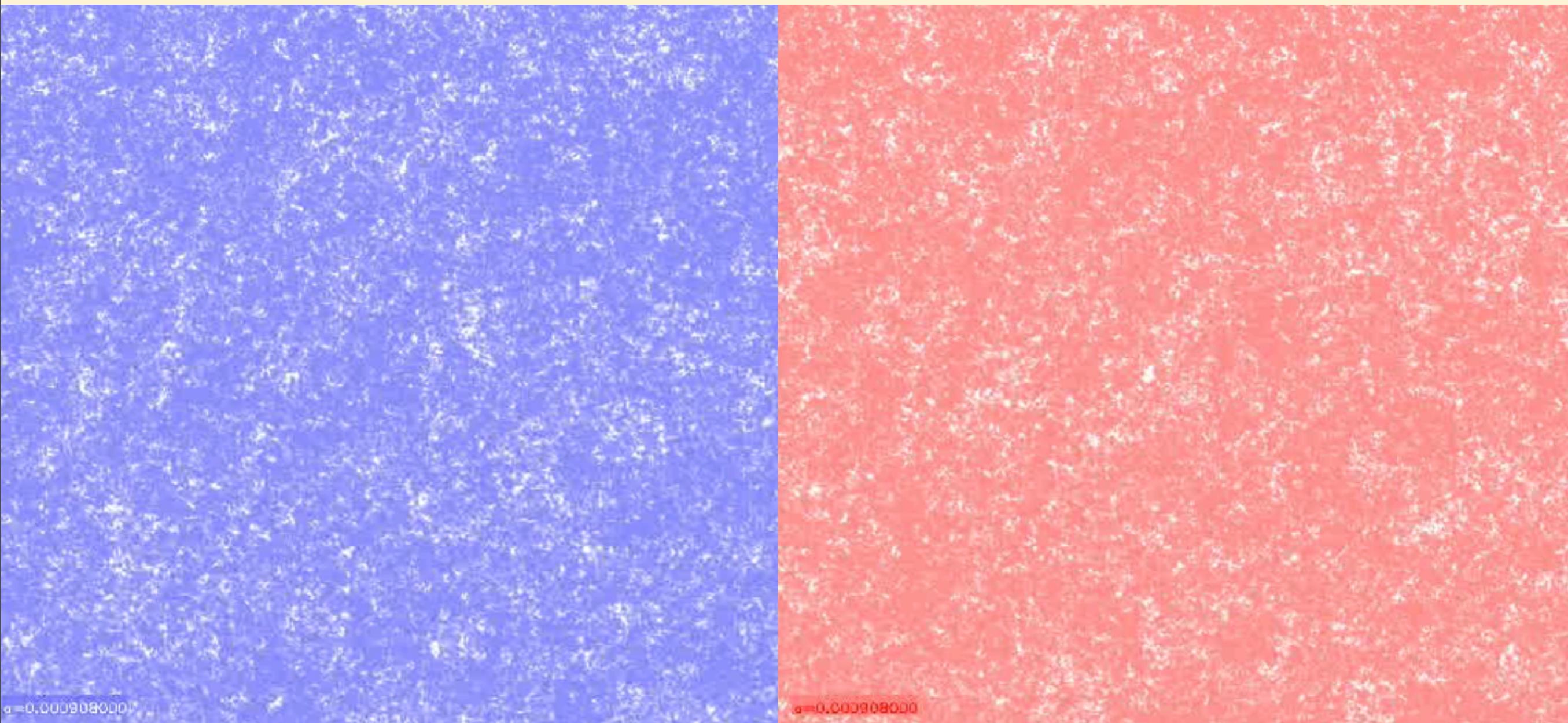


Les particules restent à distance constante et s'accélèrent mutuellement (runaway)



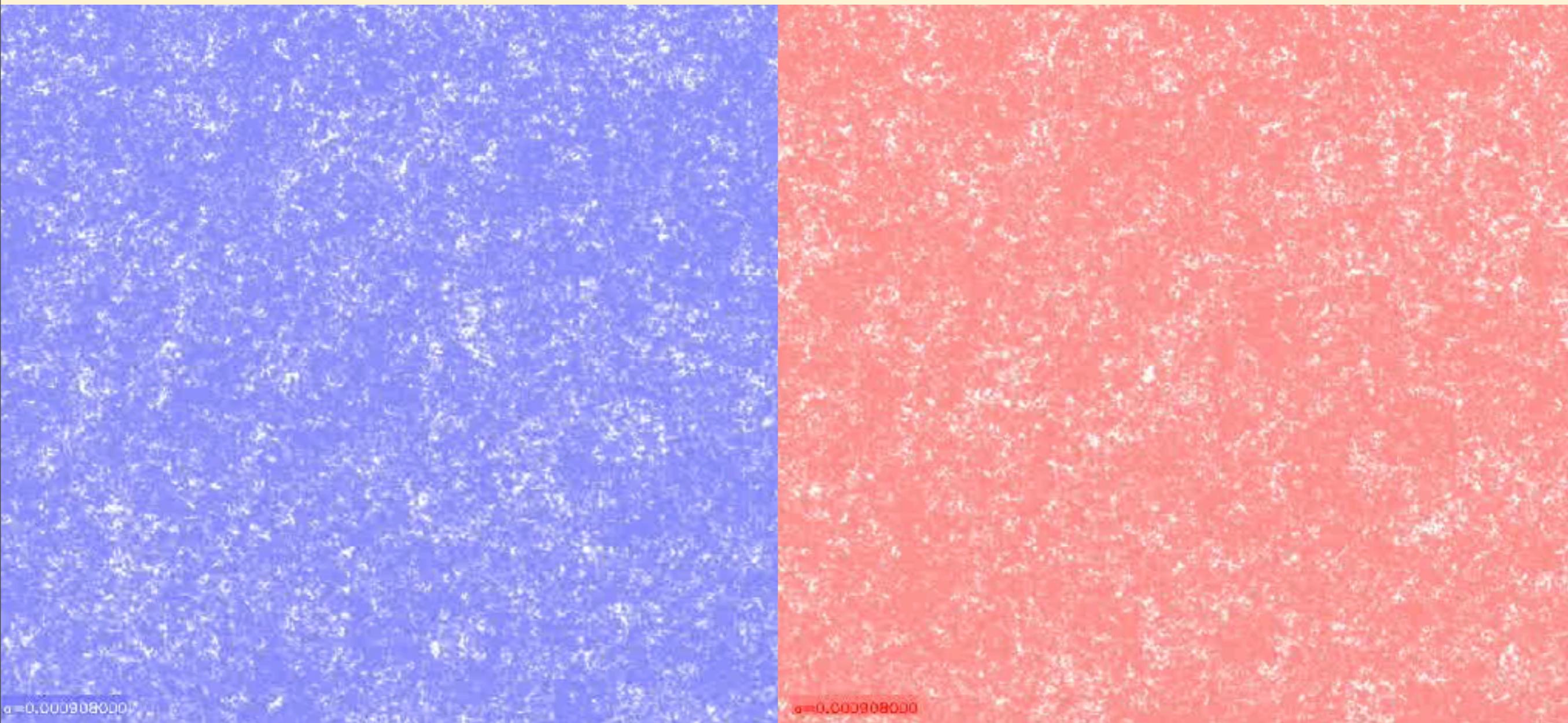
Si antimatière a une masse négative et si elle se comportent ainsi, alors expériences de pesée de l'antimatière ne devraient rien détecter d'inattendu

Formation des structures avec ces masses négatives



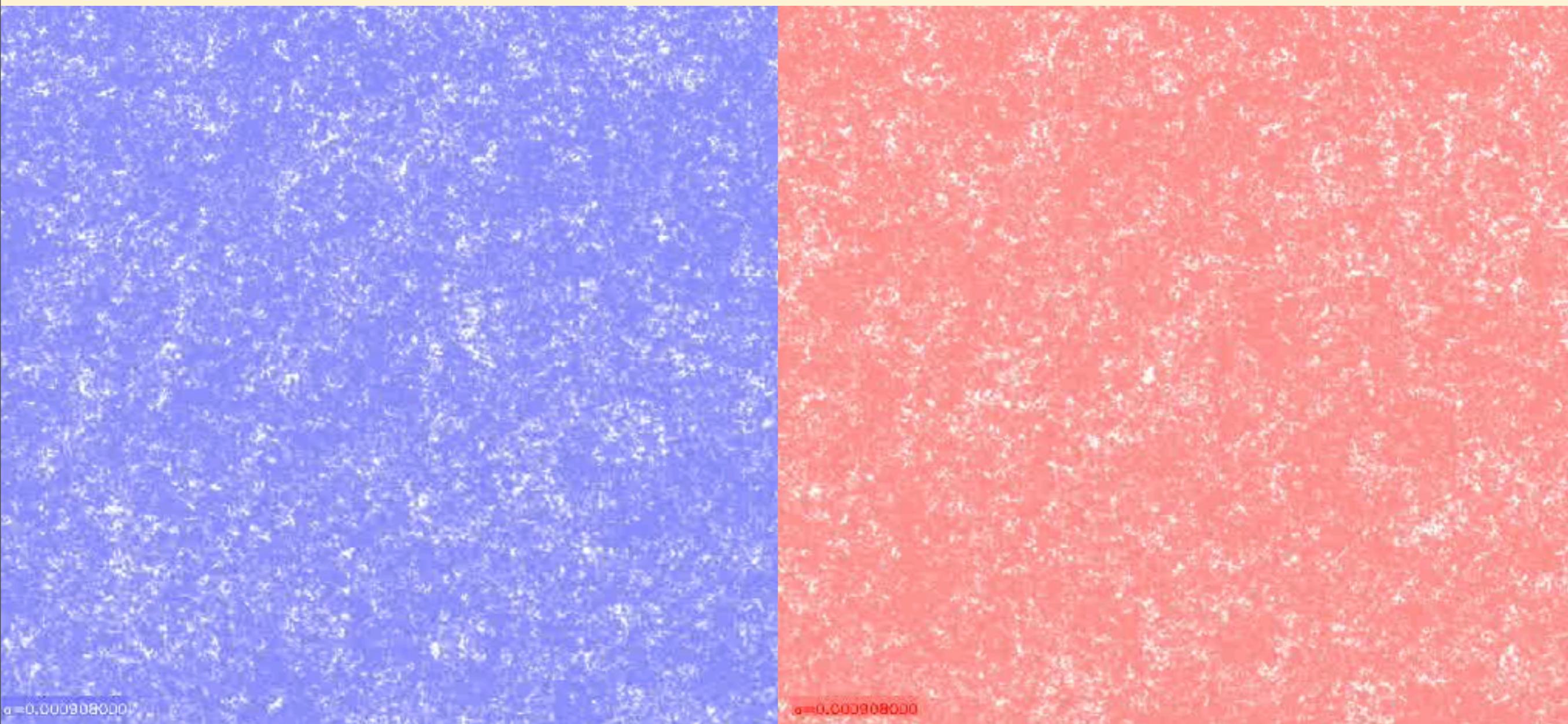
2d, 2048^2 particules, 500 Mpc

Formation des structures avec ces masses négatives



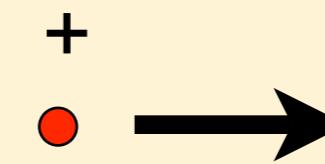
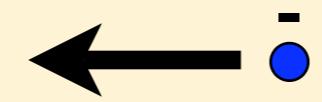
2d, 2048^2 particules, 500 Mpc

Formation des structures avec ces masses négatives



Difficilement envisageable !

On voudrait plutôt :



Un tel système existe-t-il ?

Quelques pistes :

Grandes structures : zones sur-denses s'effondrent, zones sous-denses s'étendent

Électron-bulle dans hélium superfluide remonte avec une accélération égale à $-2g$

Analogie électron-trou, antimatière comme vide

Probables points de tension

- CMB !
- Pas de matière noire (car pas besoin) mais baryons cachés. Comment les cacher ?
- BAO : pas du tout à la même échelle. Là encore, a priori, rien d'attendu vers 150 Mpc. Faible signification statistique des mesures actuelles. Si confirmation par SDSS III BOSS ...
- Symétrie matière/antimatière et séparation ?

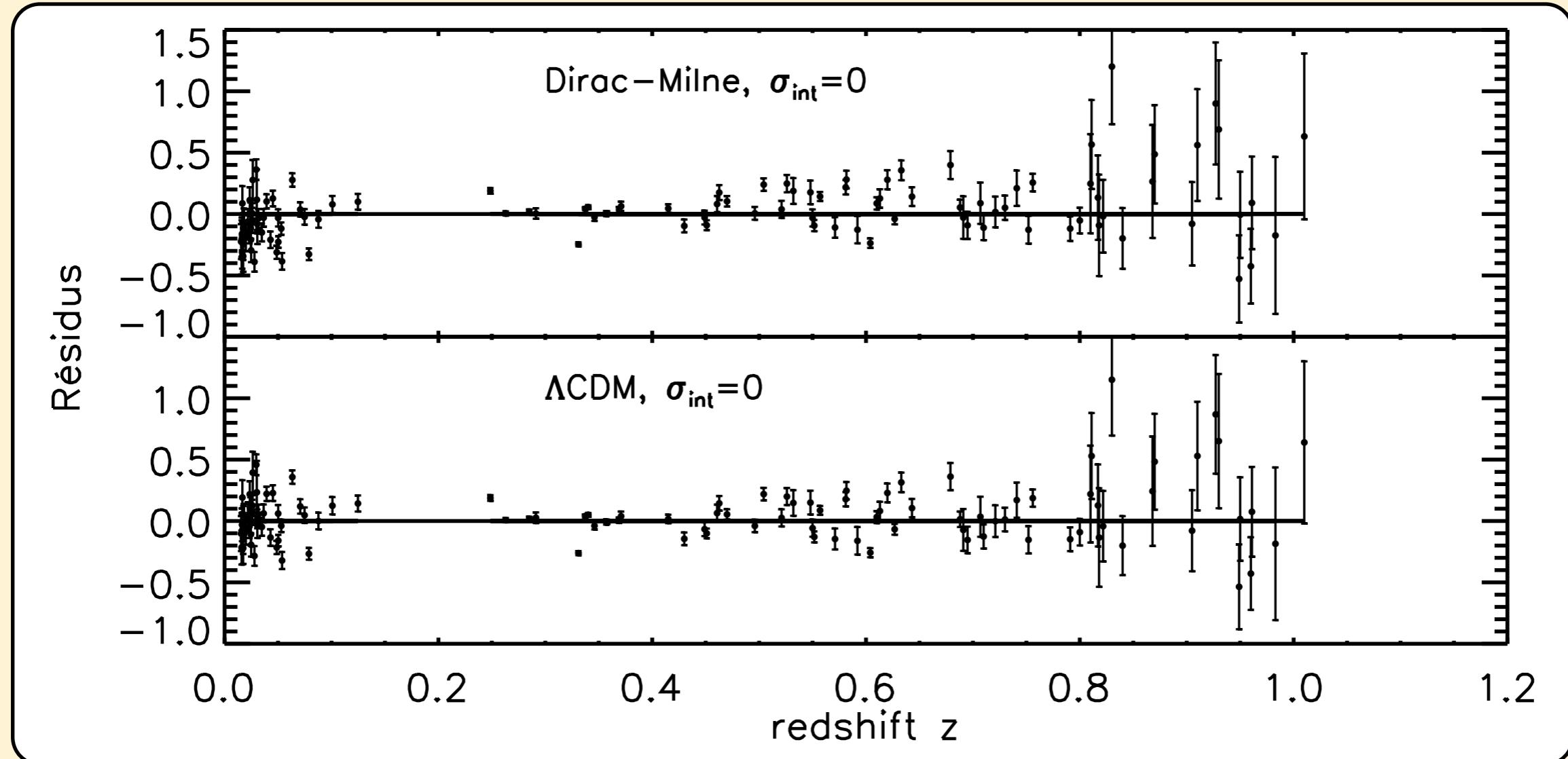
Conclusion

- Univers symétrique matière-antimatière sans Énergie Noire, ni Matière Noire, ni inflation
- Antimatière de masse négative
- Semble marcher de manière satisfaisante avec BBN, SNe Ia, (CMB)
- Beaucoup de questions en suspens : spectre du CMB, baryons cachés, accord avec autres tests (weak lensing ?), formation des structures, ...

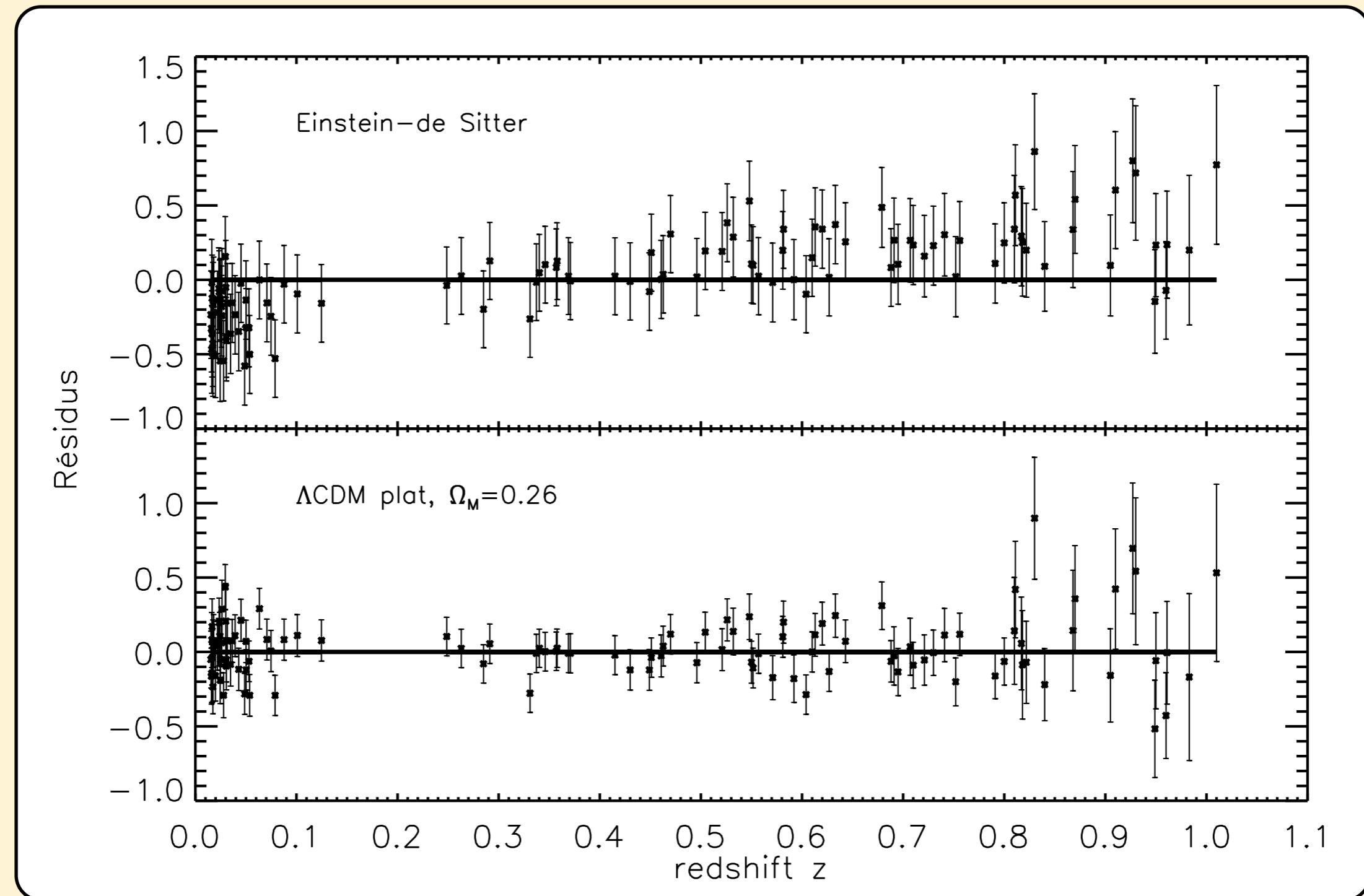
Merci !

BACKUP SLIDES

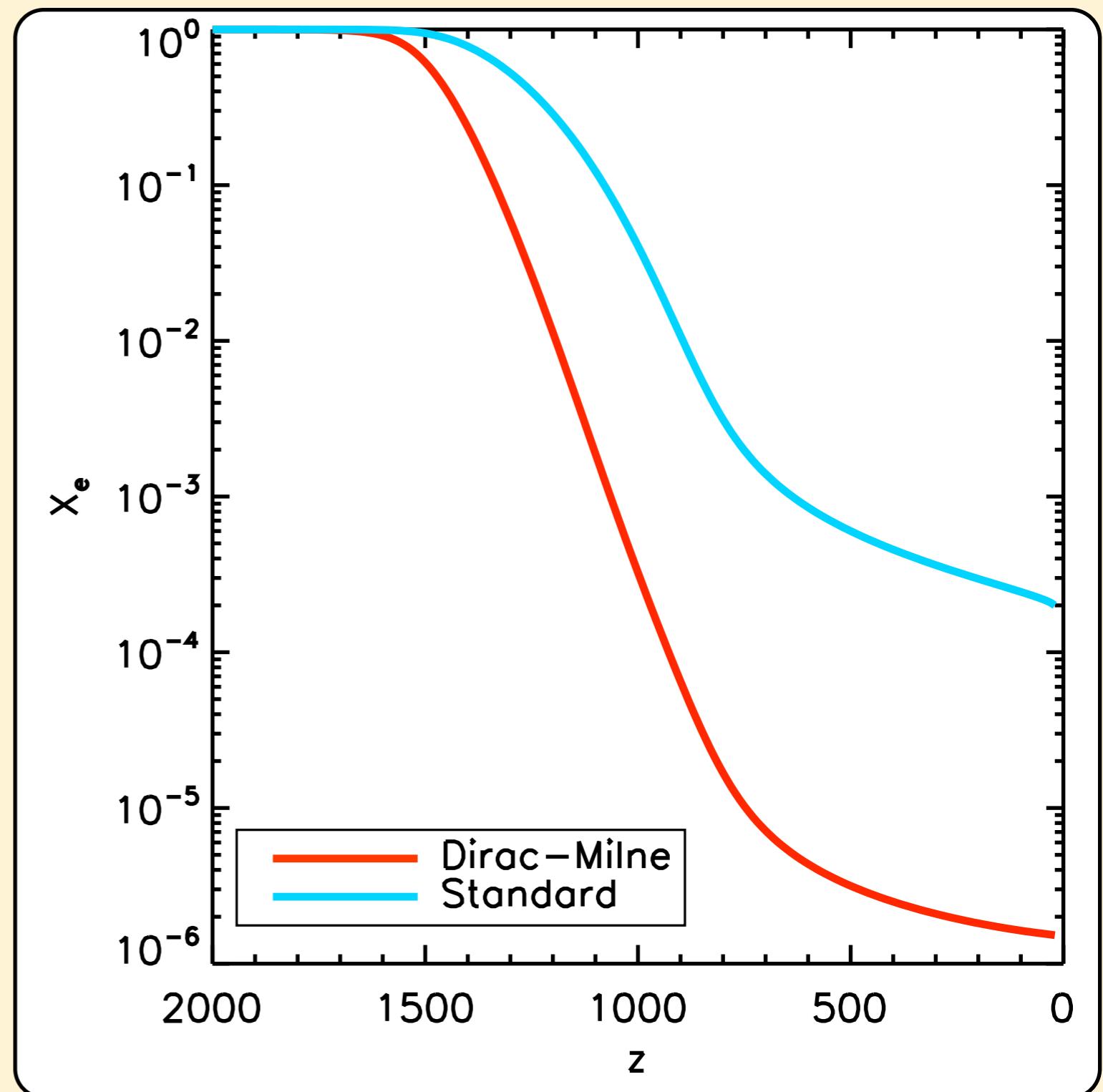
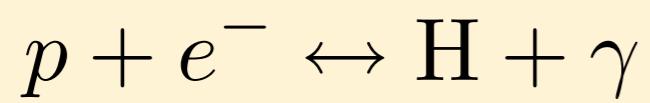
Résidus Dirac-Milne vs Λ CDM

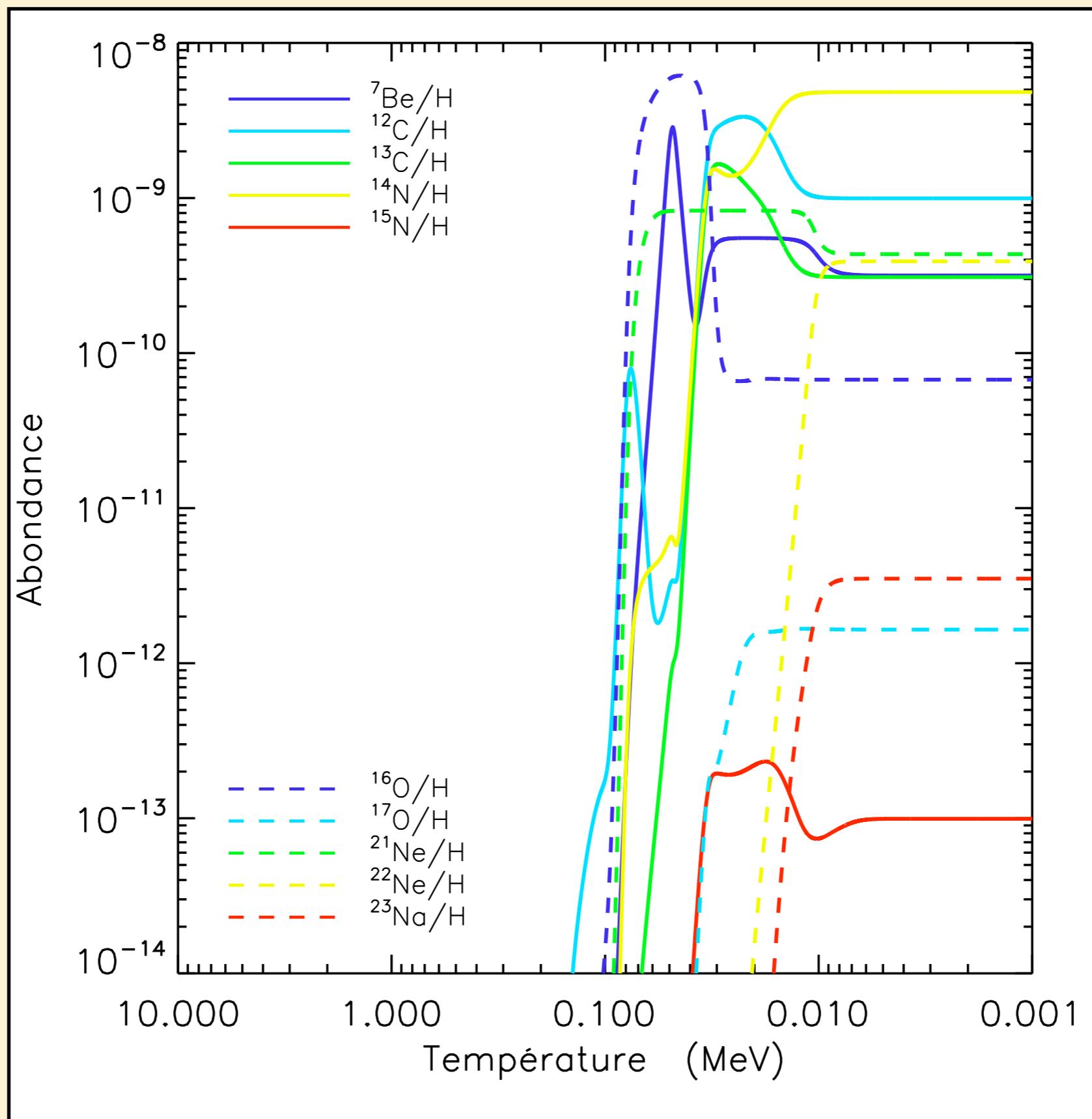


Résidus Einstein-de Sitter vs Λ CDM

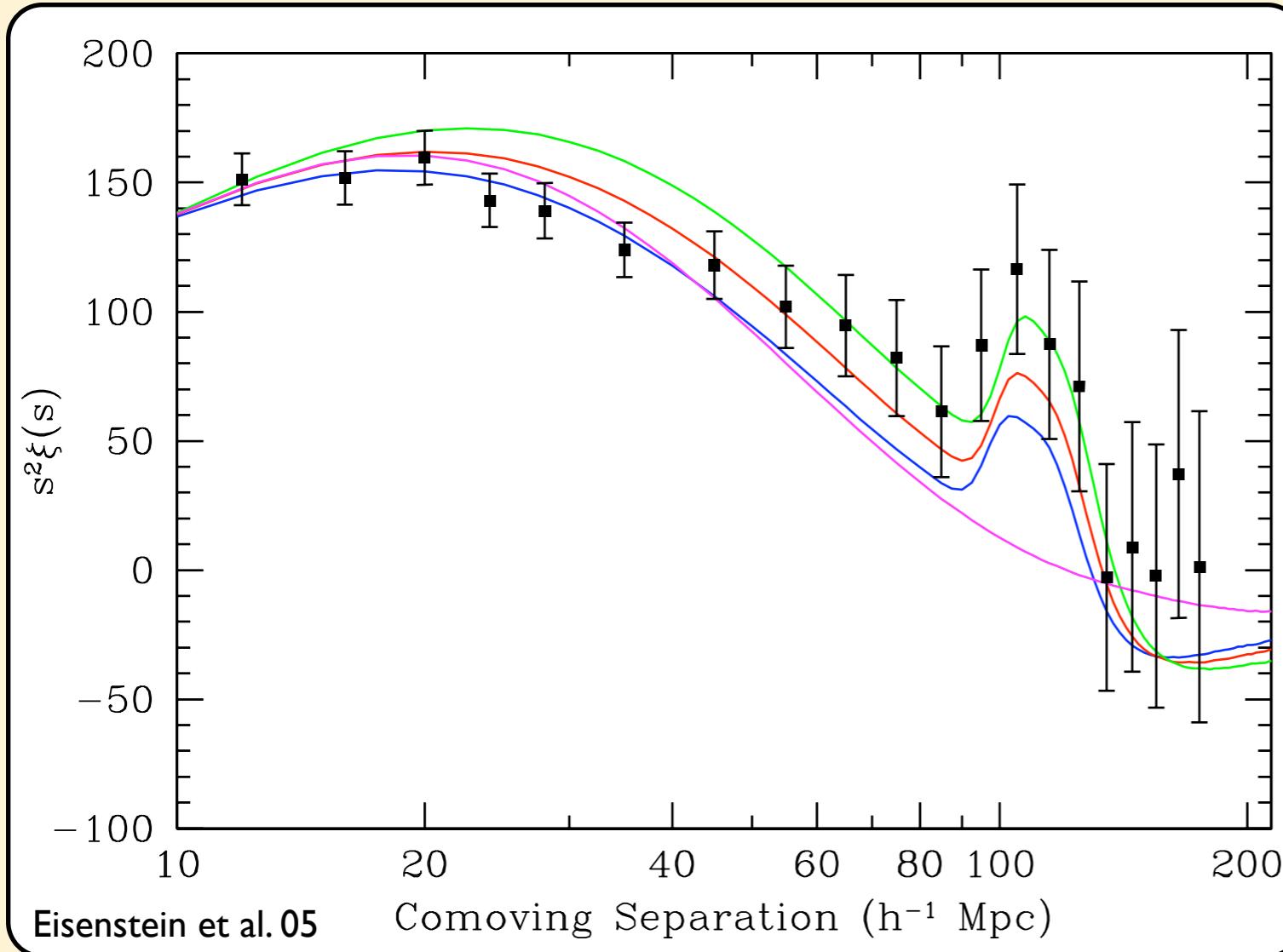


Recombinaison





BAO



Même échelle physique que
celle du 1er pic du CMB,
mais vu dans les structures à
 $z \sim 0.3$