
CONTRAINTES OBSERVATIONNELLES D'UN UNIVERS DE MILNE MATIÈRE - ANTIMATIÈRE

AURÉLIEN BENOIT-LÉVY

JRJC 2007
DINARD 9-15 DÉCEMBRE

dapnia
SPP

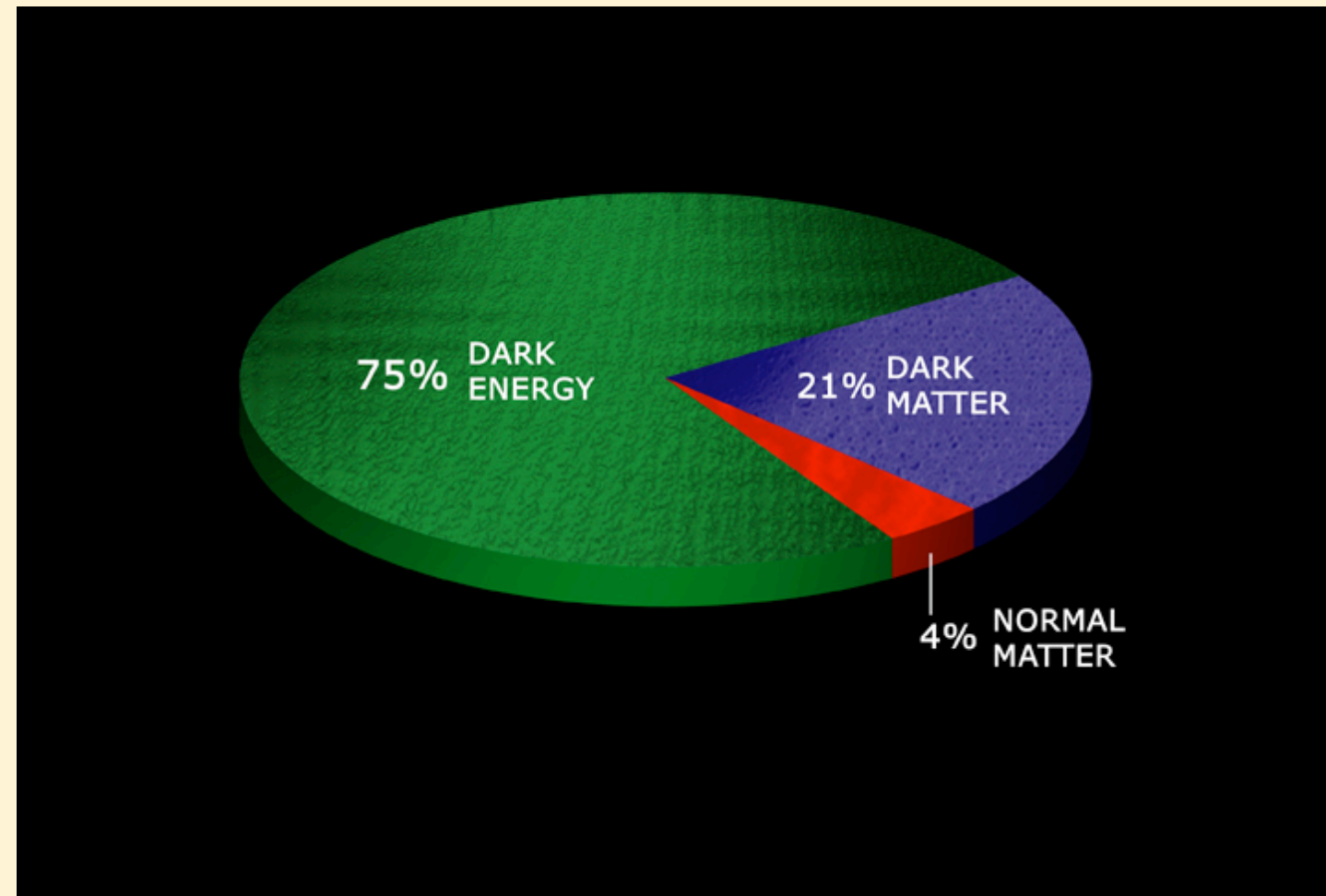
cea

saclay

The logo for CSNSM (Centre de Saclay pour les Neutrons et les Spinelles) features the text "CSNSM" in a bold, black, sans-serif font. A thick, blue diagonal line cuts across the text from the bottom-left to the top-right, creating a dynamic, stylized effect.

CSNSM

UN CONSTAT



95 % DE L'UNIVERS EST INCONNU !

PLAN

- **RAPPELS DE COSMOLOGIE**
- **UNIVERS DE MILNE SYMÉTRIQUE**
- **TESTS COSMOLOGIQUES**

MODÈLE STANDARD DE LA COSMOLOGIE

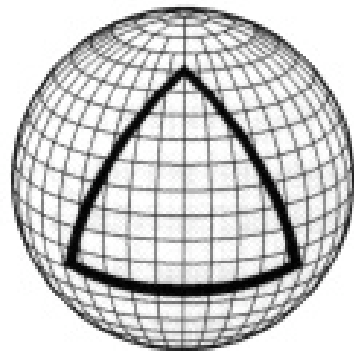
PRINCIPE COSMOLOGIQUE : À GRANDE ÉCHELLE, L'UNIVERS EST HOMOGÈNE ET ISOTROPE.

MÉTRIQUE FRLW : COMMENT SE DÉPLACENT LES PHOTONS DANS L'ESPACE-TEMPS

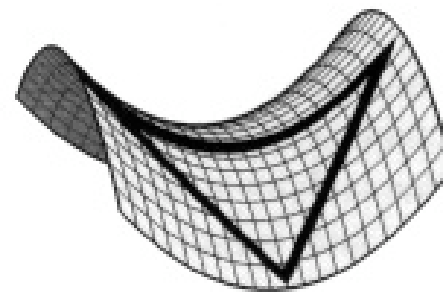
$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right]$$

FACTEUR D'ÉCHELLE

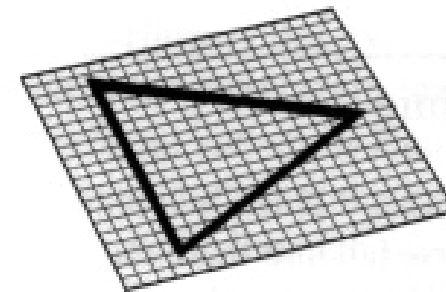
PARAMÈTRE DE COURBURE
SPATIALE



Closed Geometry



Open Geometry



Flat Geometry

MODÈLE STANDARD DE LA COSMOLOGIE

MÉTRIQUE FRLW + ÉQUATION D'EINSTEIN
=
ÉQUATION DE FRIEDMANN (ÉVOLUTION DE L'EXPANSION)

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

MODÈLE DE CONCORDANCE
(STANDARD)

$$\Omega_M \approx 0.3, \quad \Omega_\Lambda \approx 0.7, \quad \Omega_R \approx 8.5 \cdot 10^{-5}, \quad \Omega_k = 0$$

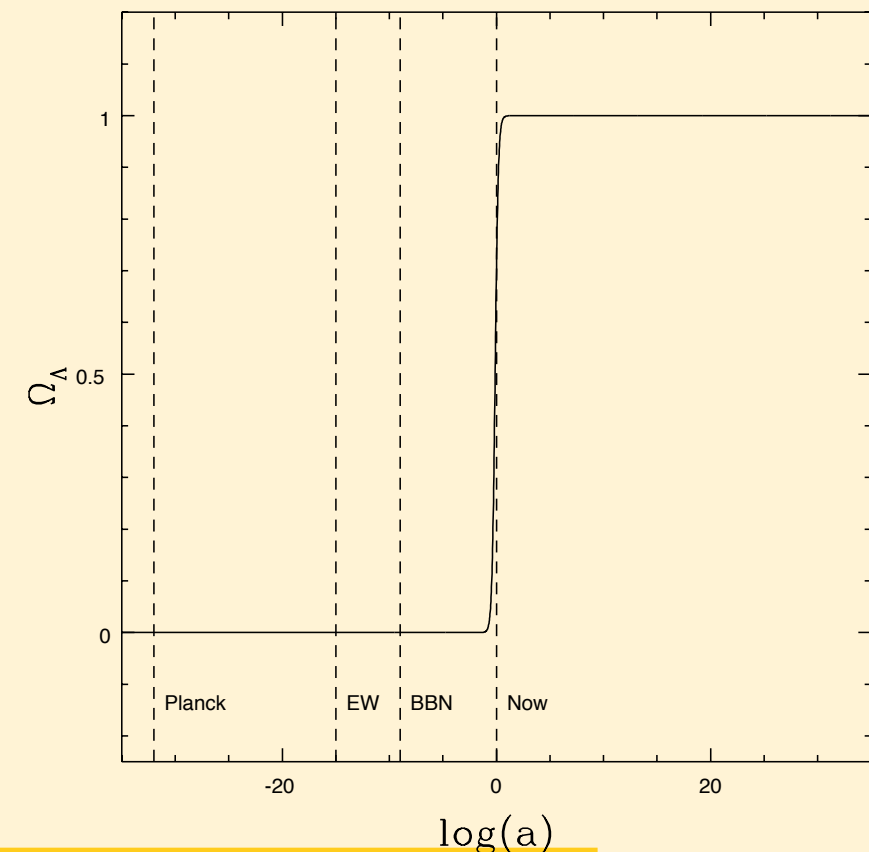
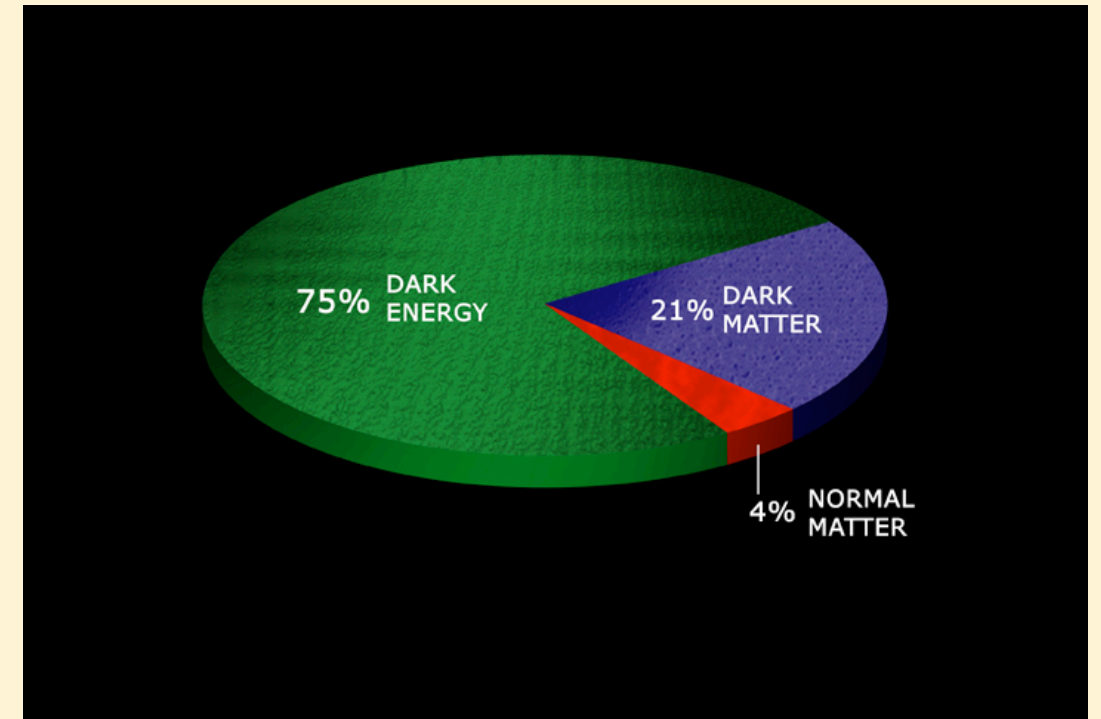
MODÈLE STANDARD DE LA COSMOLOGIE

CHRONOLOGIE

- “ $T=0$ SEC, $T=\infty$ ” **BIG-BANG**
- $T=1$ SEC, $T=1$ MEV **GEL DES INTERACTIONS FAIBLES**
- $T \approx 200$ SEC, $T=80$ KEV **FIN DE LA NUCLÉOSYNTHÈSE**
- $T=380\ 000$ ANS, $T=3000$ K **CMB, L’UNIVERS DEVIENT TRANSPARENT**
- $T=14$ MILLIARDS D’ANNÉES, $T=2.725$ K **AUJOURD’HUI**

PROBLÈMES DU MODÈLE STANDARD

- 95 % DE L'UNIVERS EST INCONNU !
- PROBLÈME DE L'HORIZON (CAUSALITÉ), NÉCESSITÉ D'UN SCÉNARIO D'INFLATION
- PROBLÈME DE LA CONSTANTE COSMOLOGIQUE



UNIVERS DE MILNE SYMÉTRIQUE

- PRÉSENCE D'UNE QUANTITÉ D'ANTIMATIÈRE ÉGALE À LA QUANTITÉ DE MATIÈRE
- MATIÈRE ET ANTIMATIÈRE SÉPARÉES DANS DES DOMAINES
- ANTIMATIÈRE EST DOTÉE D'UNE MASSE NÉGATIVE
- LE TERME DE RAYONNEMENT EST NUL ($\Omega_r = 0$)
- PAS DE COMPOSANTE D'ÉNERGIE NOIRE, NI DE MATIÈRE NOIRE, DONC UN ESPACE-TEMPS VIDE DONC RIGOREUSEMENT PLAT, CARACTÉRISÉ PAR UN FACTEUR D'EXPANSION LINÉAIRE :

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H_0^2 \left(\frac{a_0}{a}\right)^2 \Rightarrow a(t) \propto t$$

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 :

$$\chi(z) \xrightarrow{z \rightarrow +\infty} +\infty \quad \longrightarrow \quad \text{PLUS BESOIN D'INFLATION}$$

■ MODÈLE PLUS SIMPLE, AVEC MOINS DE PARAMÈTRES (MODULO L'INTRODUCTION DE MASSES NÉGATIVES)

PHYSIQUE NEWTONNIENNE : MASSES INERTIELLE, GRAVITATIONELLES ACTIVE ET PASSIVE.

PARMI LES 7 CAS POSSIBLES ($=2^3-1$) DEUX SONT À RETENIR :

LES TROIS MASSES SONT NÉGATIVES

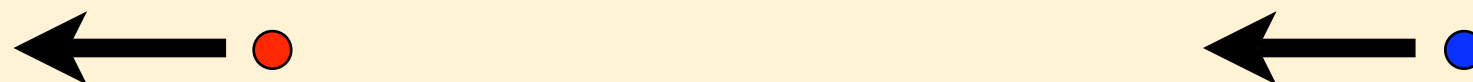
LES MASSES POSITIVES S'ATTIRENT



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,
GRAVITATIONELLES ACTIVE ET PASSIVE.

PARMI LES 7 CAS POSSIBLES ($=2^3-1$) DEUX SONT À
RETENIR :

LES TROIS MASSES SONT
NÉGATIVES.

MASSES GRAVITATIONNELLES NÉGATIVES, MASSE
INERTIELLE POSITIVE,

 VIOLATION DU PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE

DYNAMIQUE "ANTI-COULOMBIENNE".

DÉMARCHE

DEUX PROBLÉMATIQUES :

- **JUSTIFICATIONS THÉORIQUES DU MODÈLE**
- **CONFRONTATIONS AUX OBSERVATIONS**

DÉMARCHE

DEUX PROBLÉMATIQUES :

■ JUSTIFICATIONS THÉORIQUES DU MODÈLE

■ CONFRONTATIONS AUX OBSERVATIONS



TESTS OBSERVATIONNELS

- SUPERNOVAE DE TYPE IA
- NUCLÉOSYNTHÈSE PRIMORDIALE
- CMB

SUPERNOVAE DE TYPE IA

UTILISATION COMME CHANDELLE STANDARD

MAGNITUDE ABSOLUE M IDENTIQUE POUR TOUTES LES SNIA

MAGNITUDE RELATIVE (OBSERVÉE)

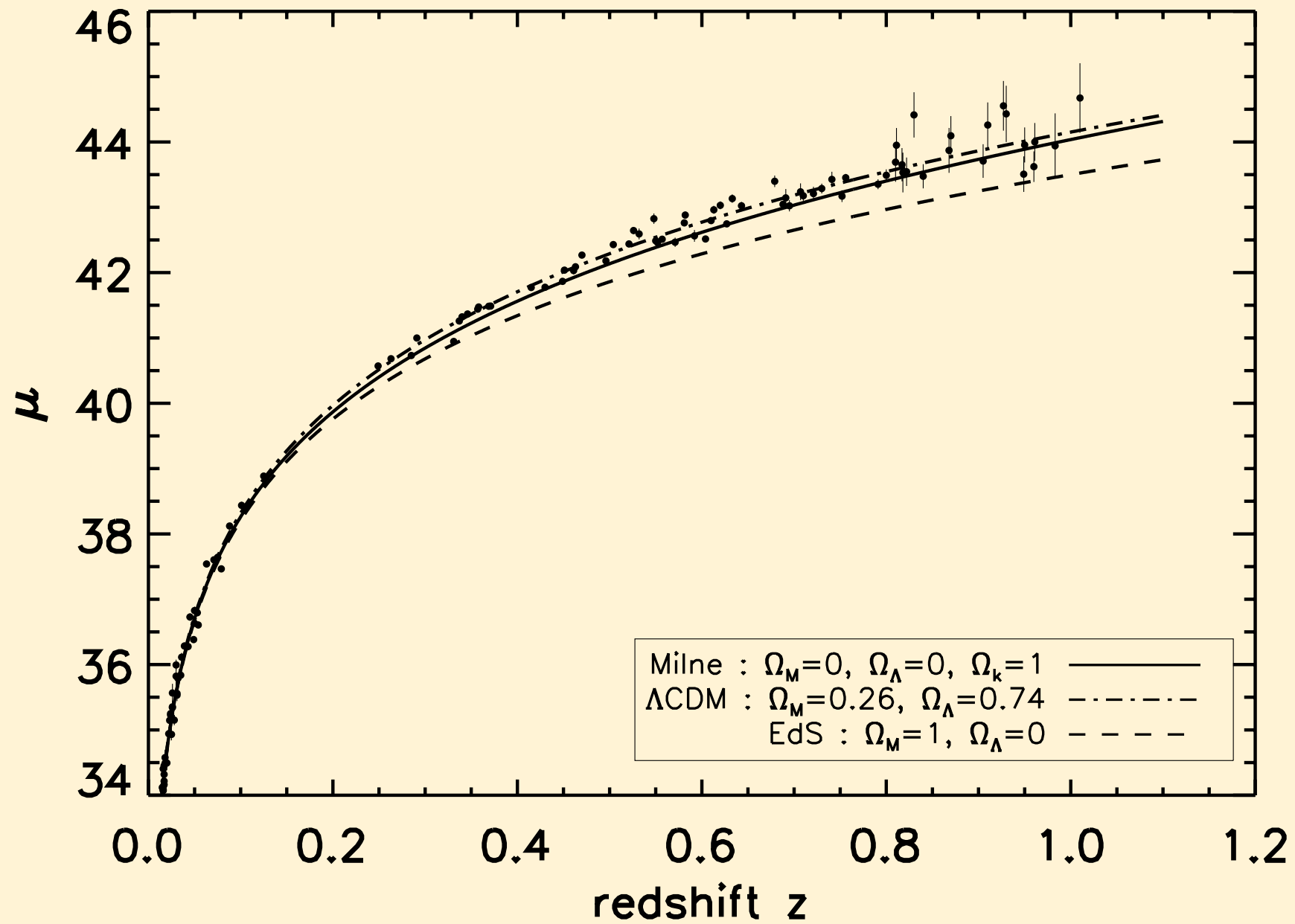
DISTANCE DE LUMINOSITÉ

$$\mu = m - M = -5 + 5 \log \left(\frac{d_L(z)}{1 \text{pc}} \right)$$

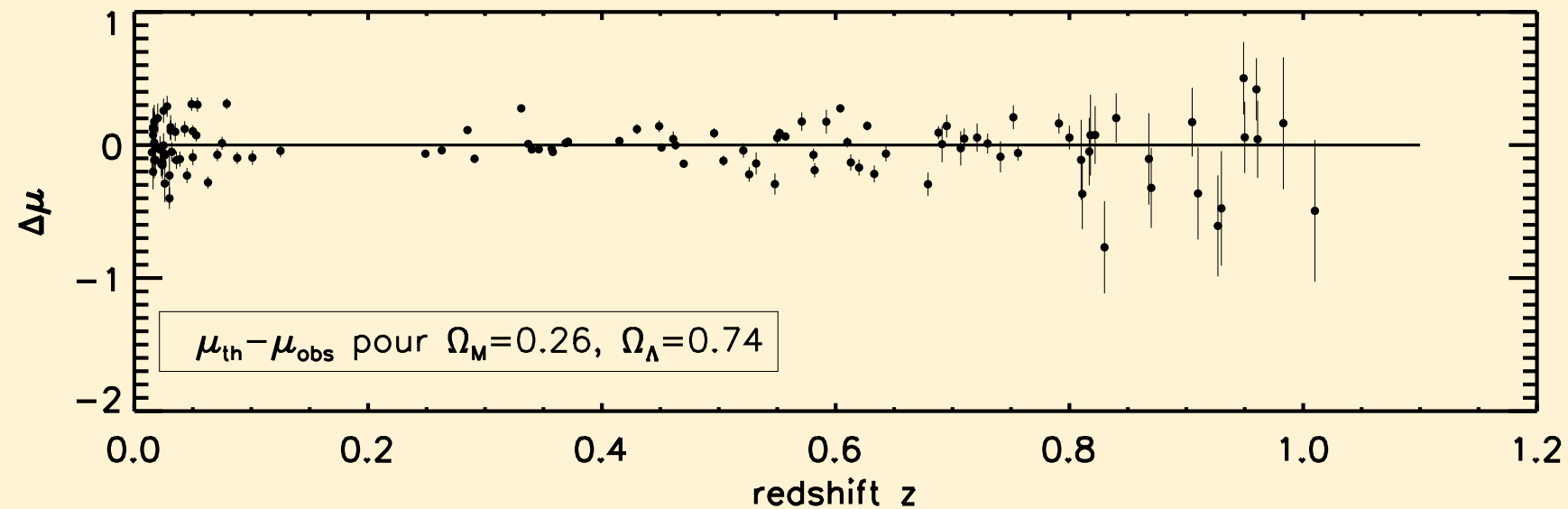
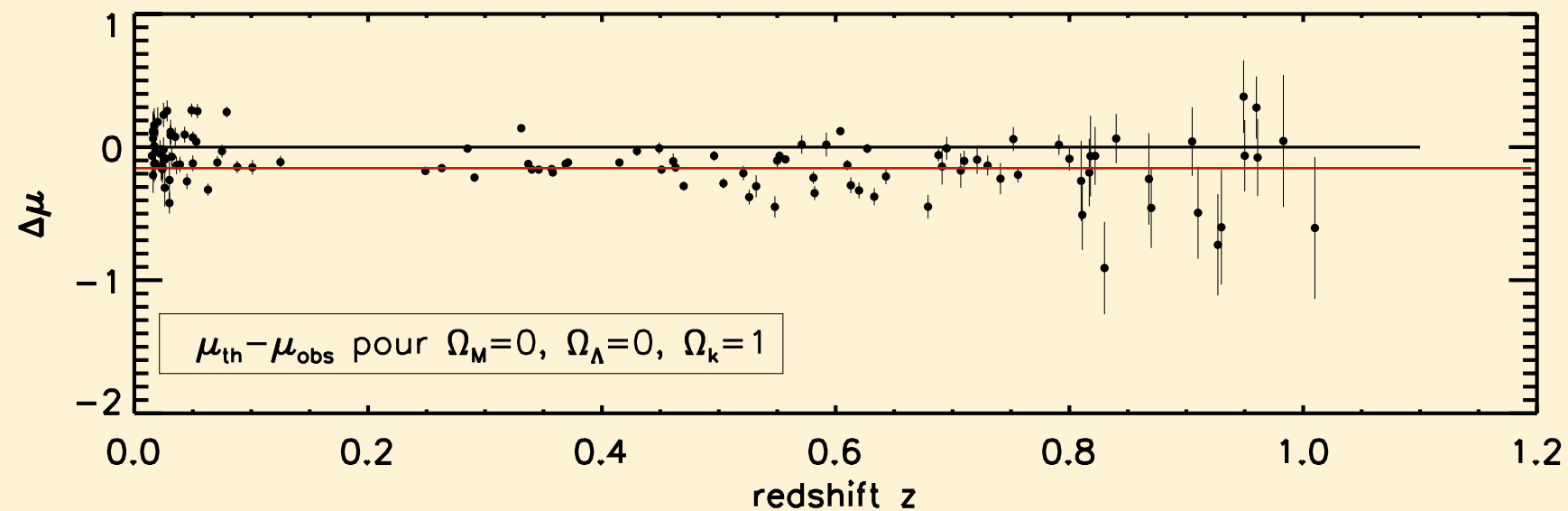
MAGNITUDE ABSOLUE

LA DISTANCE DE LUMINOSITÉ EST UNE FONCTION ANALYTIQUE DES PARAMÈTRES COSMOLOGIQUES.

DONNÉES SNLS (ASTIER ET AL. 05)

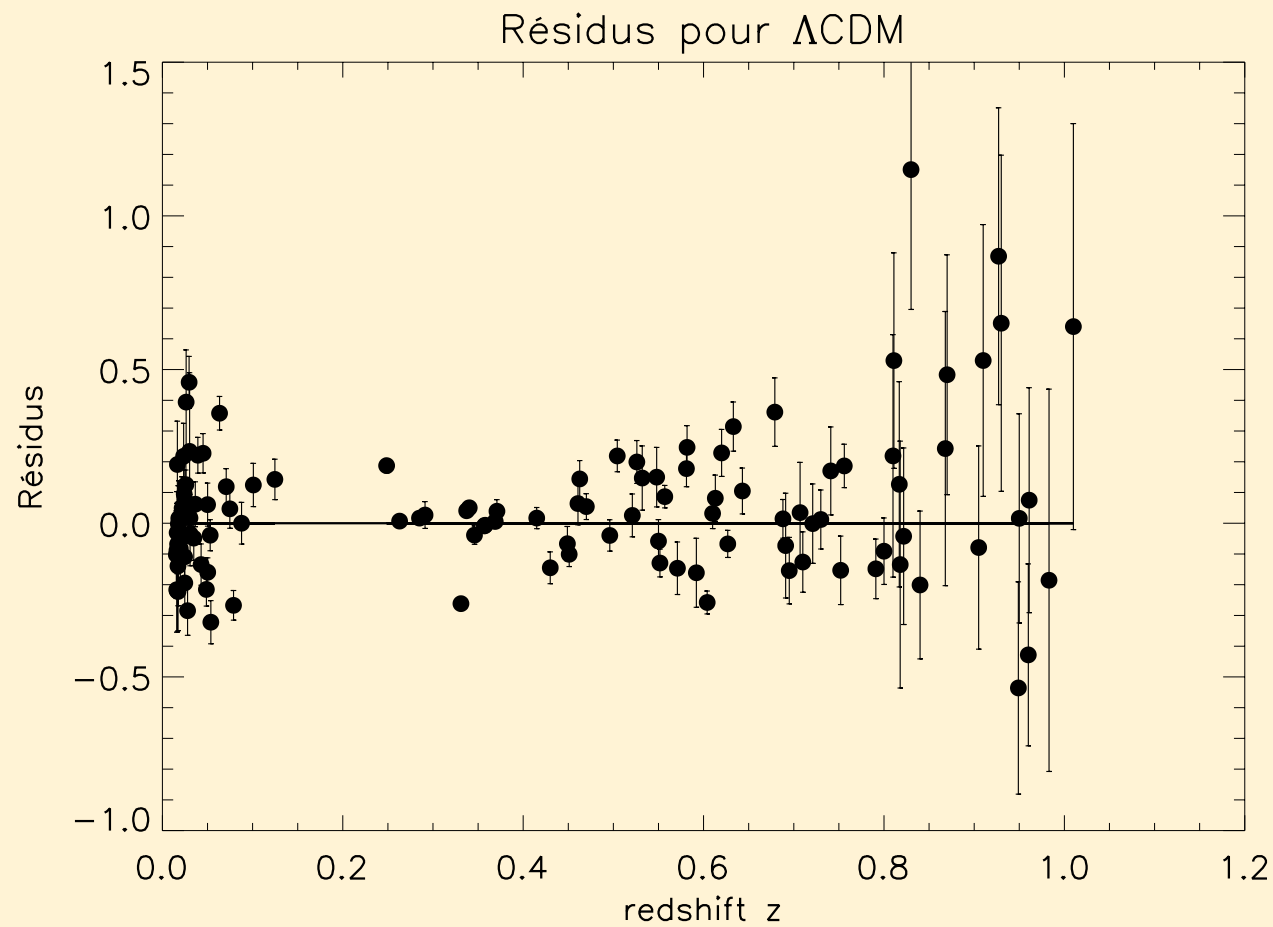


RÉSIDUS DU DIAGRAMME DE HUBBLE

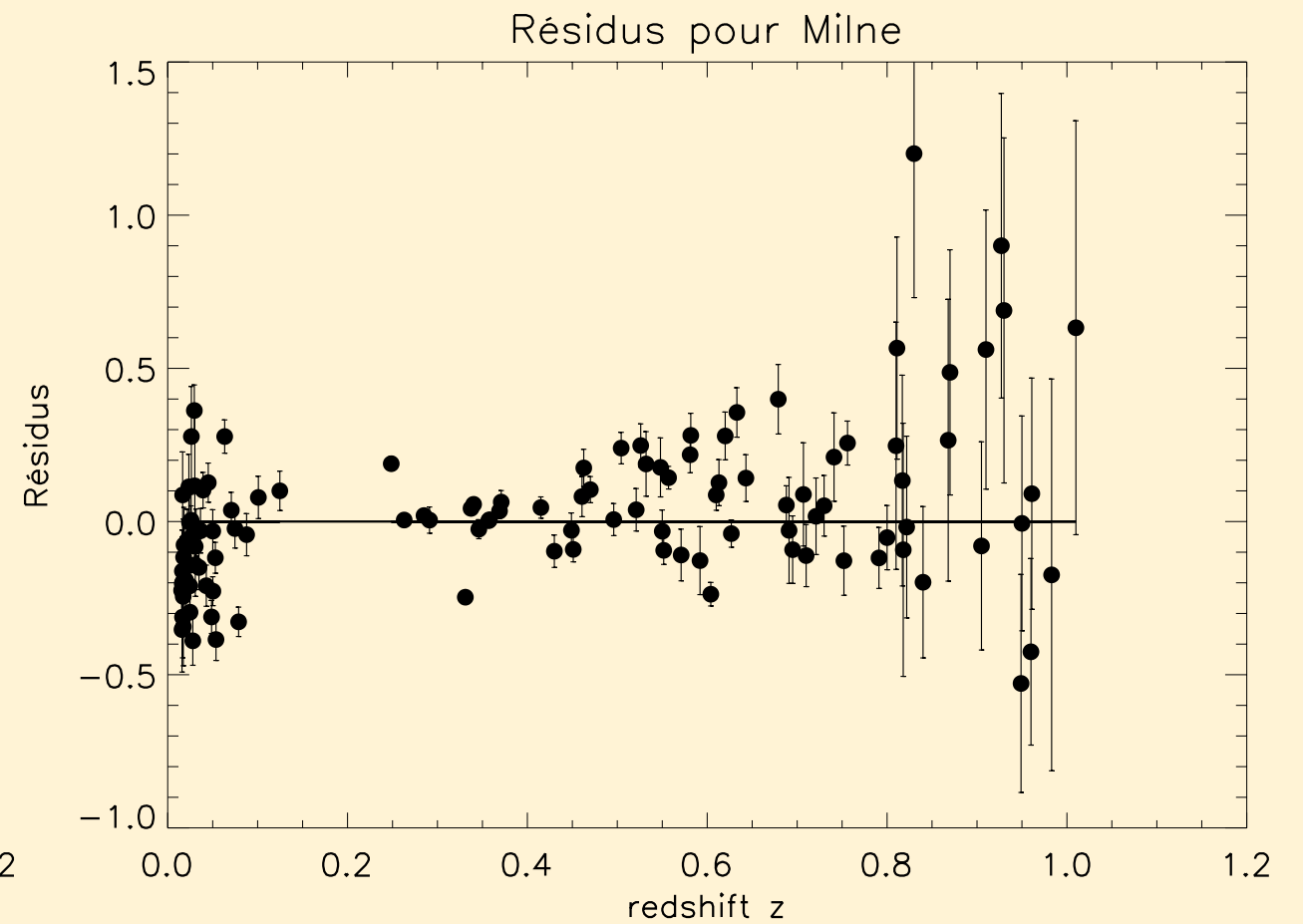


$$\mu = m - M = -5 + 5 \log \left(\frac{d_L(z)}{1 \text{ pc}} \right)$$

RÉSIDUS DU DIAGRAMME DE HUBBLE



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



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

POUR COMPARAISON, POUR EDS

$$\chi^2/dof = 13.46$$

CONCLUSION

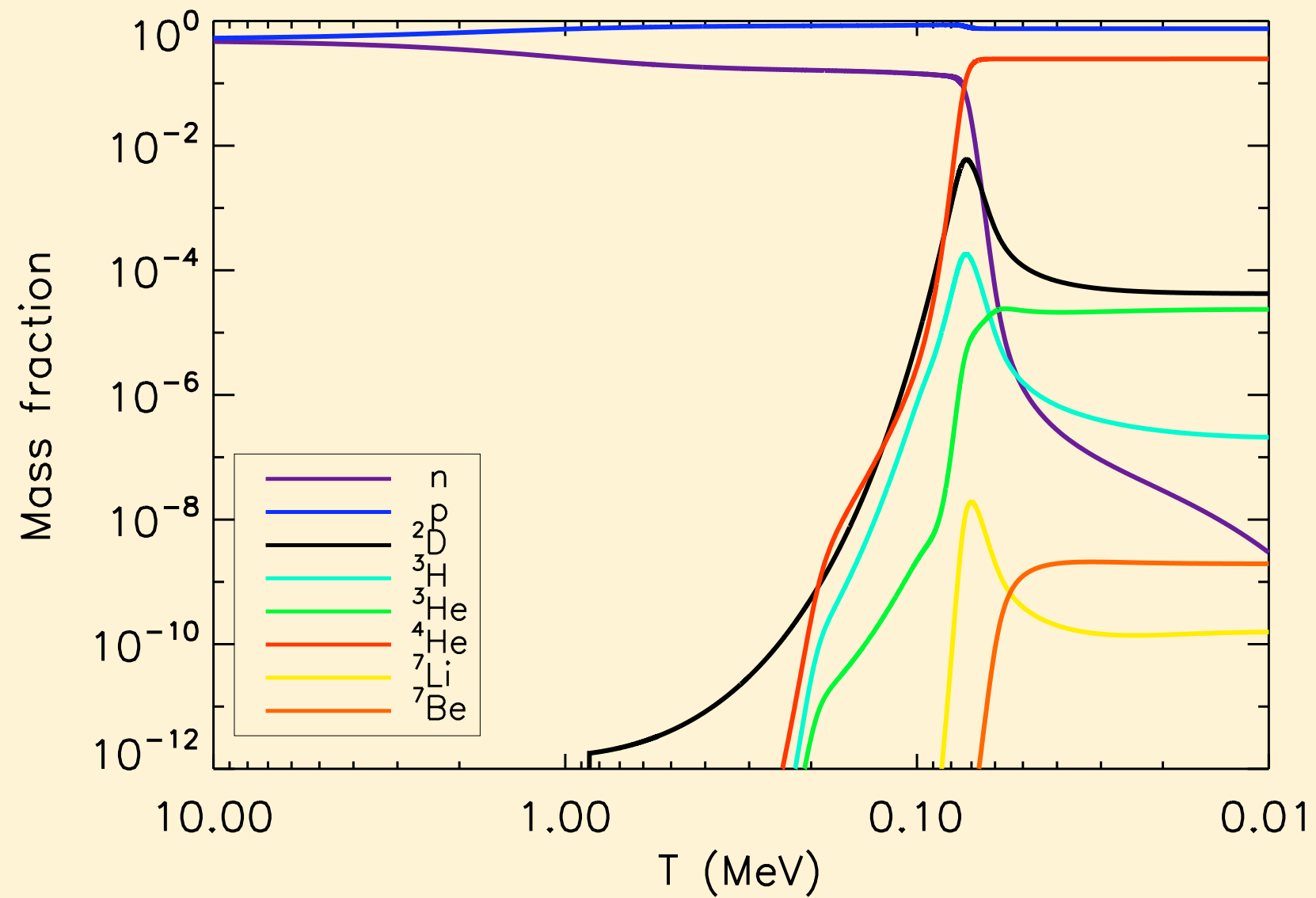
**LES SUPERNOVAE DE TYPE IA NE PERMETTENT
PAS D'EXCLURE LE MODÈLE DE MILNE**

NUCLÉOSYNTHÈSE PRIMORDIALE

FORMATION DES ÉLÉMENTS LÉGERS (JUSQU'AU ${}^7\text{Li}$) PENDANT LES PREMIÈRES MINUTES DE L'UNIVERS.

- $T \approx 1 \text{ MEV}$, $t=1 \text{ s}$: GEL DES INTERACTIONS FAIBLES, PERTE DE NEUTRONS PAR DÉSINTÉGRATION.
- $T \approx 80 \text{ KEV}$, $t=200 \text{ s}$: FIN DE LA PHOTODÉSINTÉGRATION DU DEUTÉRIUM. DÉBUT DE LA NUCLÉOSYNTHÈSE.
- $T \approx 30 \text{ KEV}$, $t=25 \text{ MIN}$: GEL DES ABONDANCES. FIN DE LA NUCLÉOSYNTHÈSE

NUCLÉOSYNTHÈSE PRIMORDIALE



NUCLÉOSYNTÈSE PRIMORDIALE

- ACCORD PRÉCIS SUR D, ${}^4\text{He}$ ET ${}^3\text{He}$
- TENSIONS ENTRE WMAP ET SBBN SUR ${}^7\text{Li}$

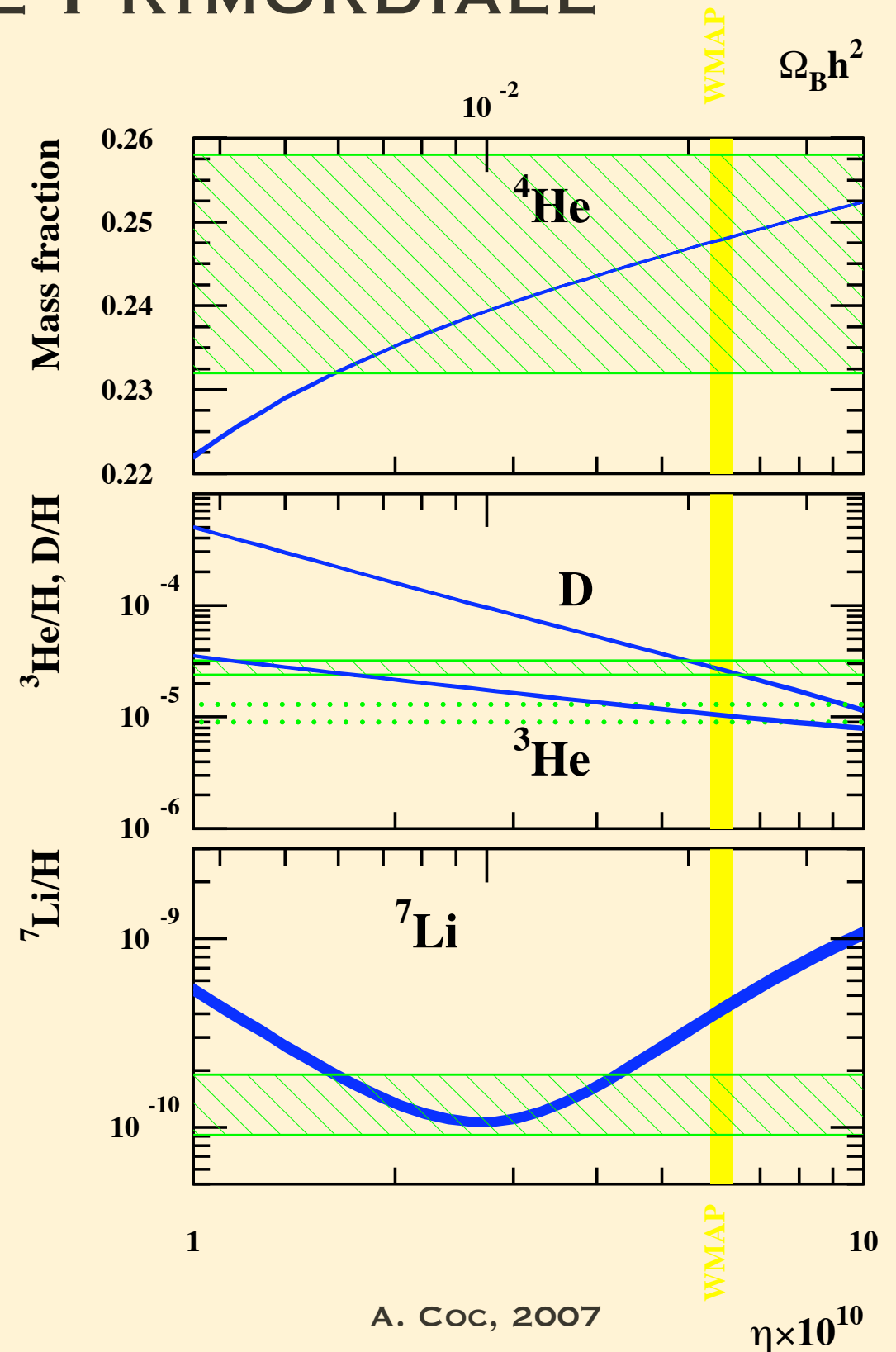
$$\eta = \frac{n_b}{n_\gamma}$$

RELATION ENTRE η ET Ω_b

AVANT WMAP $\eta \approx 3 \cdot 10^{-10}$

APRÈS WMAP $\eta \approx 6 \cdot 10^{-10}$

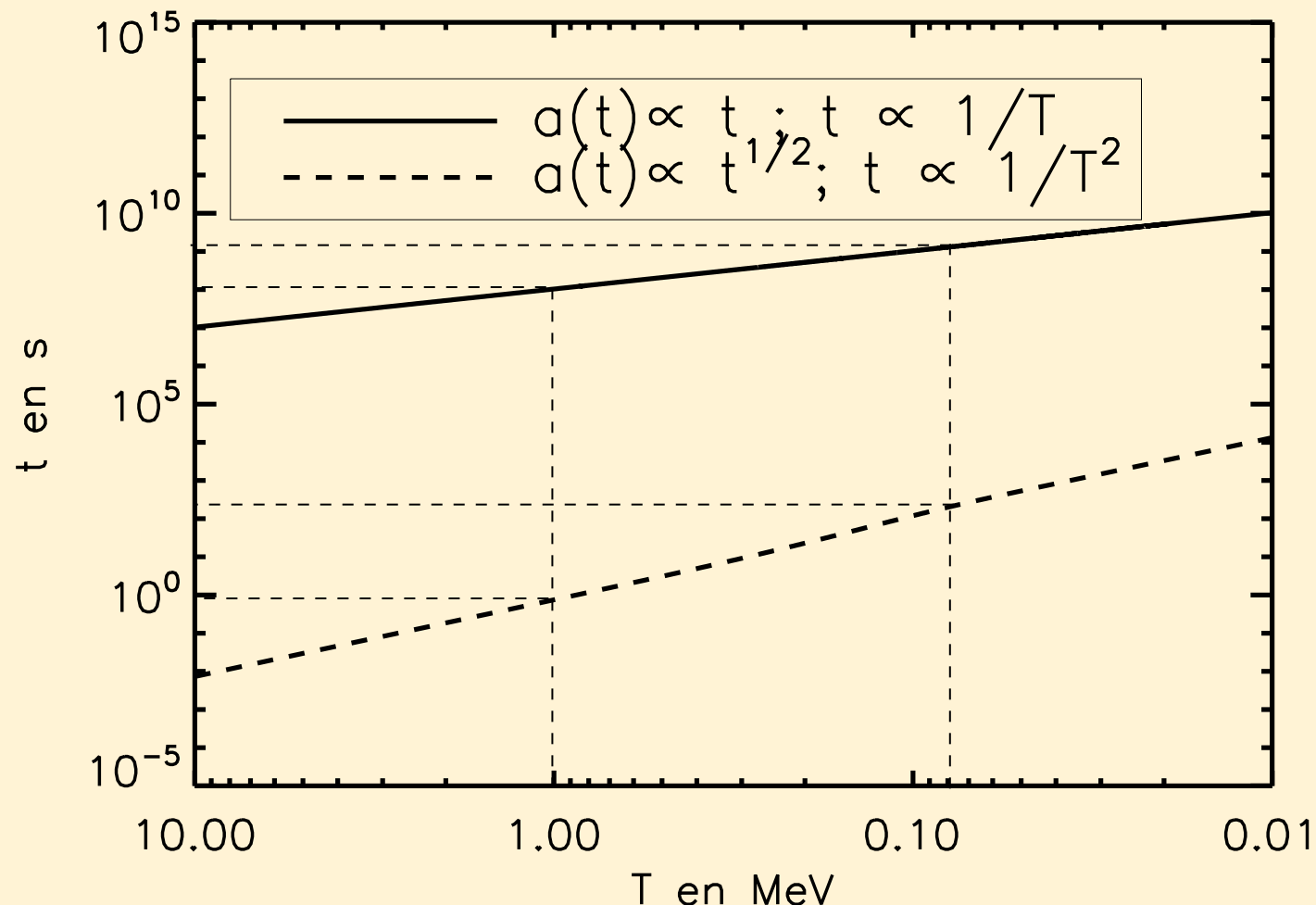
➔ $\Omega_b \approx 4 \cdot 10^{-2}$



ET DANS L'UNIVERS DE MILNE ?

NUCLÉOSYNTHÈSE DANS L'UNIVERS DE MILNE

LA DYNAMIQUE EST BEAUCOUP PLUS LENTE : À UNE MÊME TEMPÉRATURE, L'UNIVERS DE MILNE EST BEAUCOUP PLUS ÂGÉ.



À 1 MEV, $t \approx 3$ ANS (MILNE),
CONTRE 1 S DANS SBBN

À 80 KEV, $t \approx 30$ ANS
(MILNE), CONTRE ≈ 200 S
DANS SBBN

TEMPÉRATURE DE DÉCOUPLAGE DES INTERACTIONS FAIBLES : $\sim 10^9$ K
(~ 80 KEV), ie APRÈS ANNIHILATION e^-e^+ .

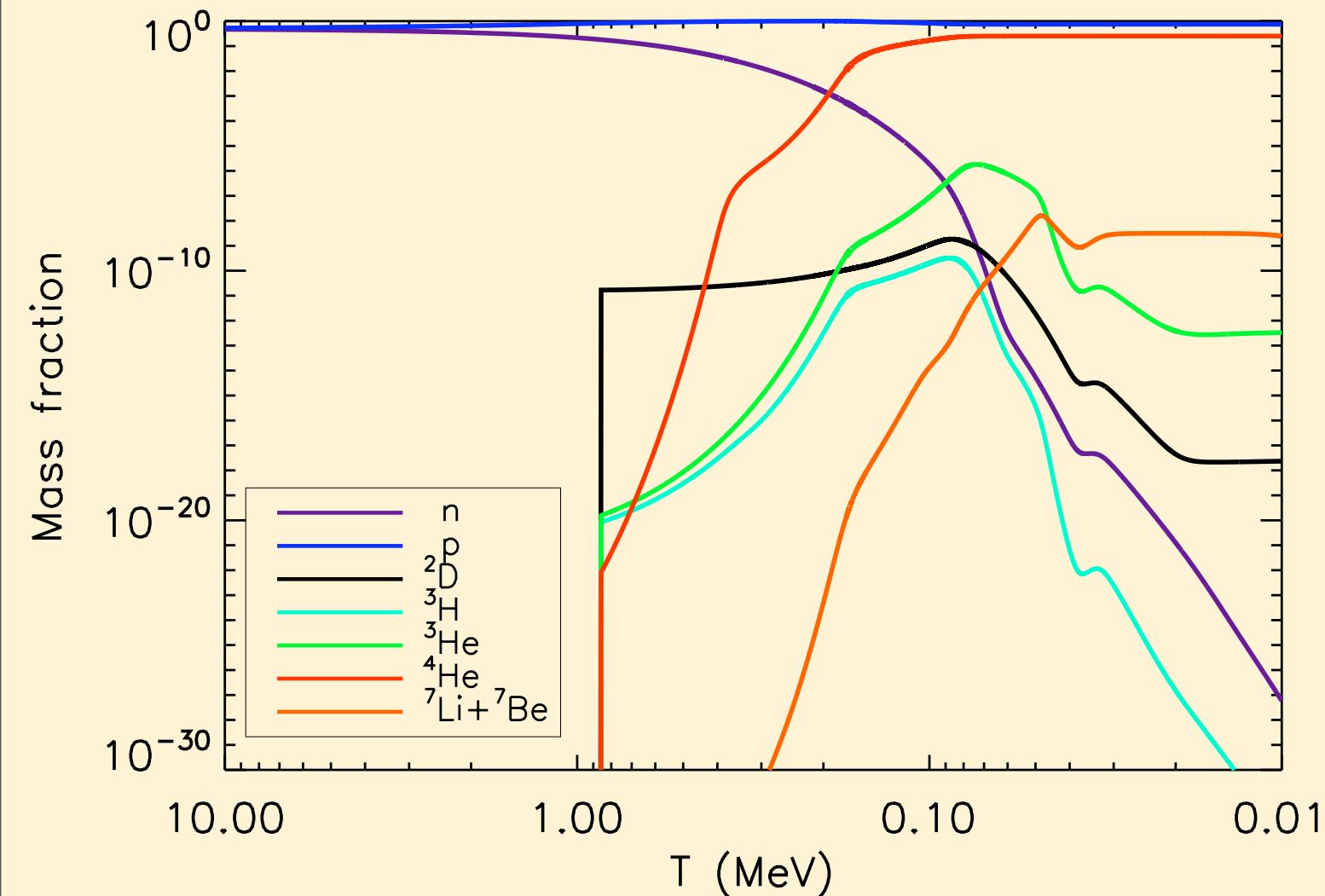


TEMPÉRATURES DU CMB ET DU FOND DE
NEUTRINOS COSMOLOGIQUES IDENTIQUES !

NUCLÉOSYNTHÈSE DANS L'UNIVERS DE MILNE

BONNE QUANTITÉ D'HÉLIUM SI DENSITÉ BARYONIQUE PLUS GRANDE :

$$\eta \approx 7 \times 10^{-9} \quad \Omega_b \approx 0.3$$



LA NUCLÉOSYNTHÈSE PERMET
UNE DENSITÉ DE MATIÈRE
ÉLEVÉE SANS RECOURIR À LA
MATIÈRE NOIRE

NÉCESSITÉ DE FABRIQUER DU DEUTÉRIUM PAR UN AUTRE MOYEN :
NUCLÉODISRUPTION, SPALLATION.

MÉCANISME DE FABRICATION DU DEUTÉRIUM

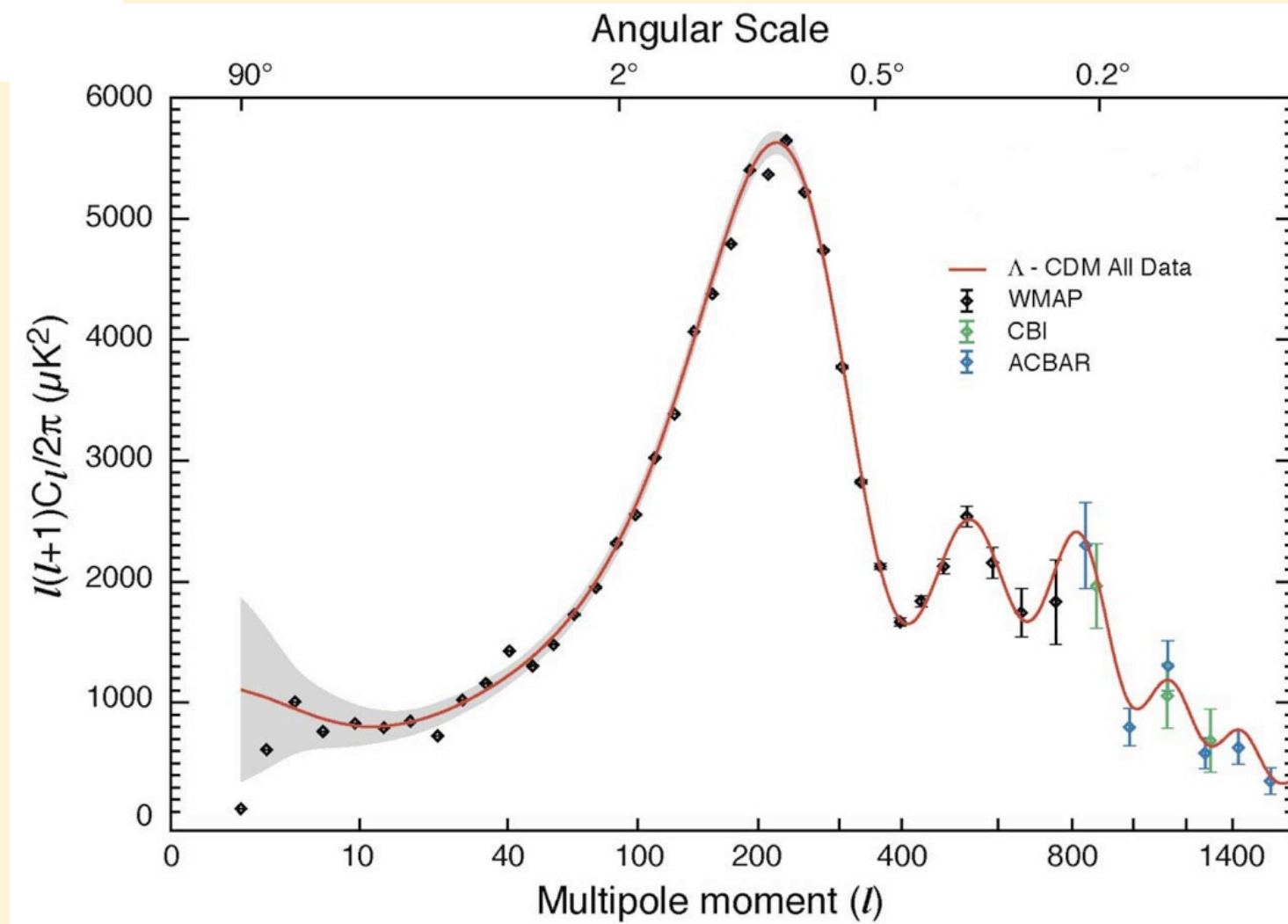
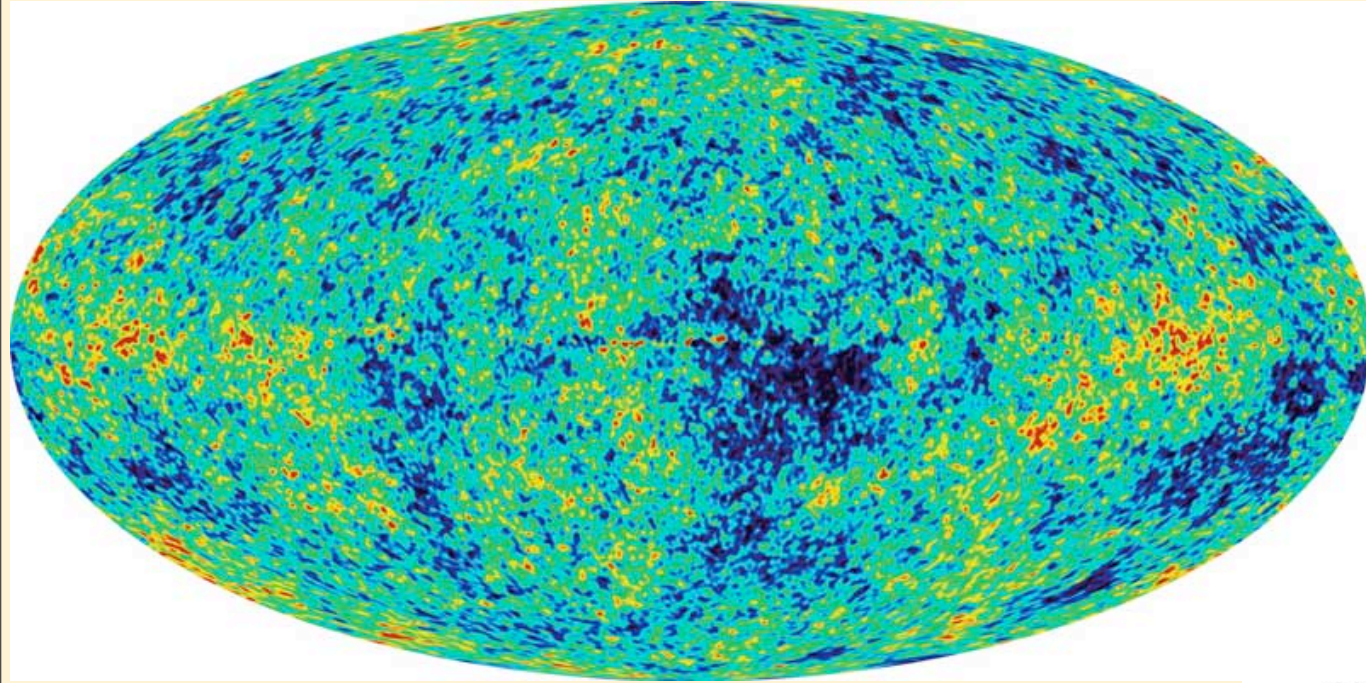
DIFFUSION DES NUCLÉONS ET ANTINUCLÉONS DANS LES DOMAINES SÉPARÉS DE MATIÈRE ET D'ANTIMATIÈRE

- $T \geq 80 \text{ KEV}$, TRANSPORT DE NOMBRE BARYONIQUE ASSURÉ PAR LA DIFFUSION DES NEUTRONS (PARTICULE NEUTRES)
- $80 \text{ KEV} \geq T \geq 5 \text{ KEV}$, PLUS DE NEUTRONS DISPONIBLES POUR L'ANNIHILATION
- $5 \text{ KEV} \geq T \geq 1 \text{ KEV}$: REPRISE ET FIN DE L'ANNIHILATION PAR DIFFUSIONS DES PROTONS. FORMATION DU DEUTÉRIUM PAR NUCLÉODISRUPTION.

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

PROBABILITÉ DE CRÉATION
PAR LA RÉACTION $\bar{p}^4\text{He}$

COSMIC MICROWAVE BACKGROUND

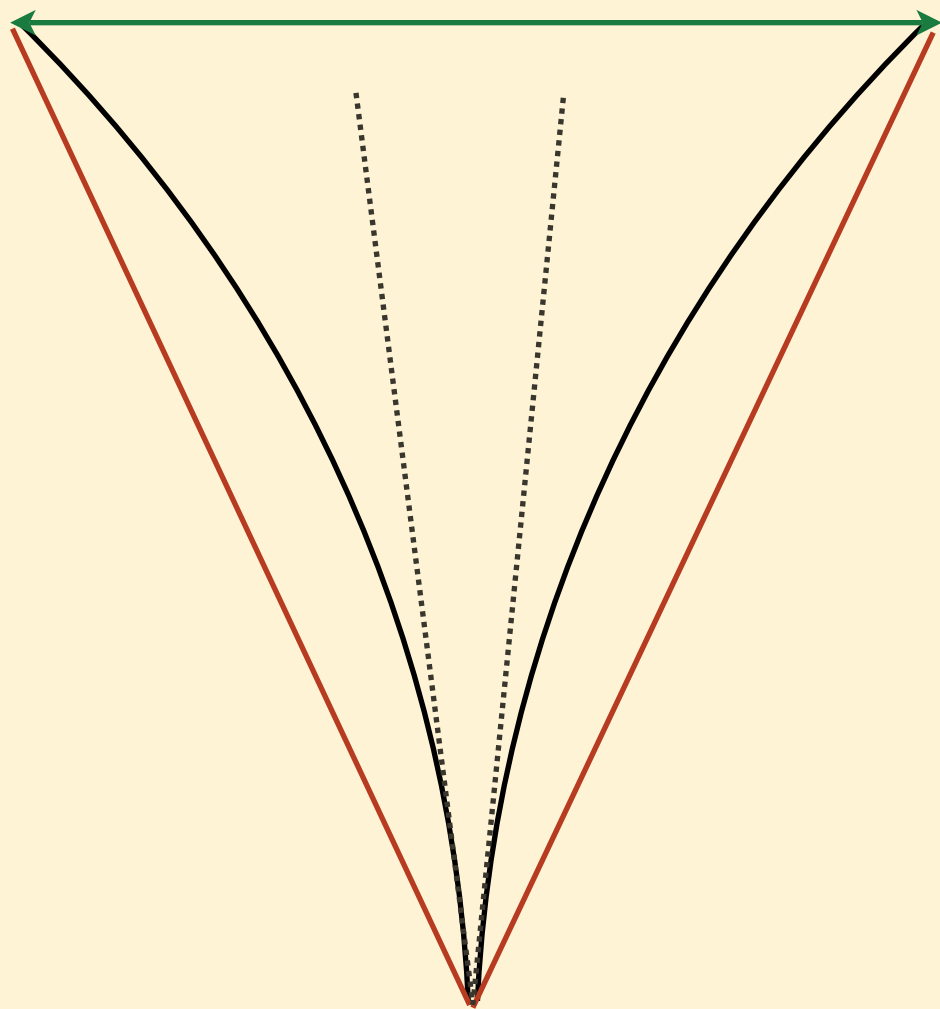


POSITION DU PREMIER PIC ACOUSTIQUE

ANGLE SOUS LEQUEL ON VOIT L'HORIZON SONIQUE À LA RECOMBINAISON
2 EFFETS :

GÉOMÉTRIE

OBJET CELESTE



HORIZON SONIQUE

DISTANCE PARCOURUE PAR UN ONDE À LA VITESSE DU SON DEPUIS UN INSTANT t_0

- MODÈLE STANDARD : PROPAGATION DEPUIS L'INFLATION
- MODÈLE MILNE : PROPAGATION DEPUIS LA TRANSITION QGP VERS 170 MEV.

LÀ ENCORE, BEAUCOUP PLUS DE TEMPS DISPONIBLE POUR LA PROPAGATION

CONCLUSION

- **MODÈLE ALTERNATIF AU MODÈLE DE CONCORDANCE PLUS SIMPLE**
- **BON ACCORD AVEC TROIS TESTS COSMOLOGIQUES**
- **DANS LA SUITE :**
 - **CONTRAINTE SUR LA TAILLE DES DOMAINES**
 - **SNLS (250 SUPERNOVAE)**
 - **CMB (POSITION PRÉCISE DU 1^{ER} PIC)**
 - **AUTRES TESTS COSMOLOGIQUES**