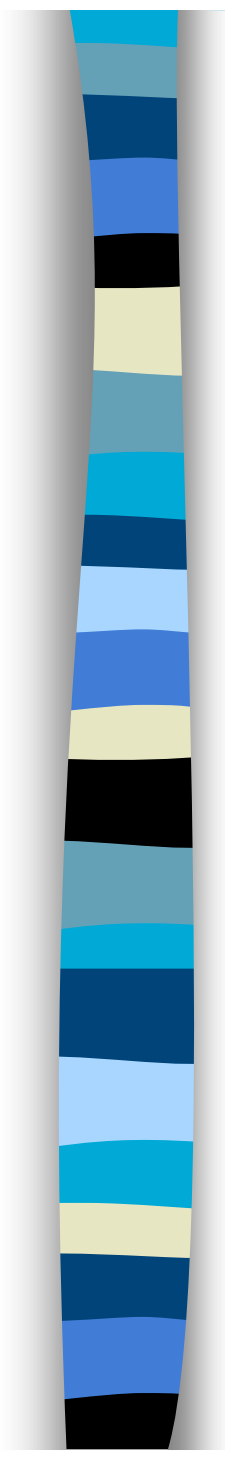


Tests observationnels d'un Univers symétrique



G. Chardin et A. Benoit-Lévy
CSNSM, IN2P3 et Univ. Paris-Sud

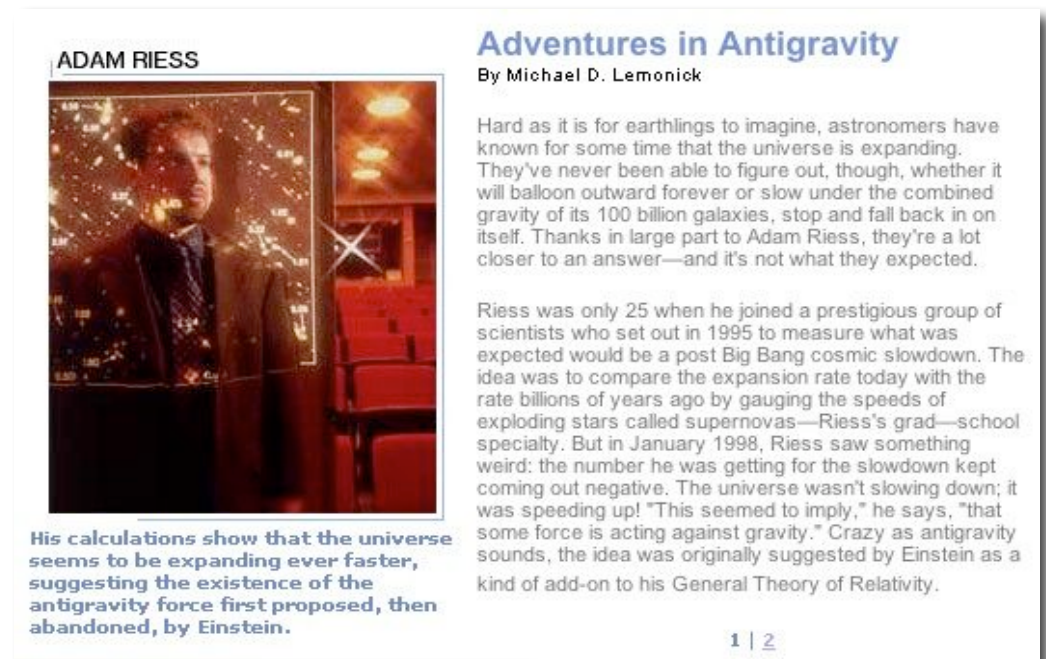
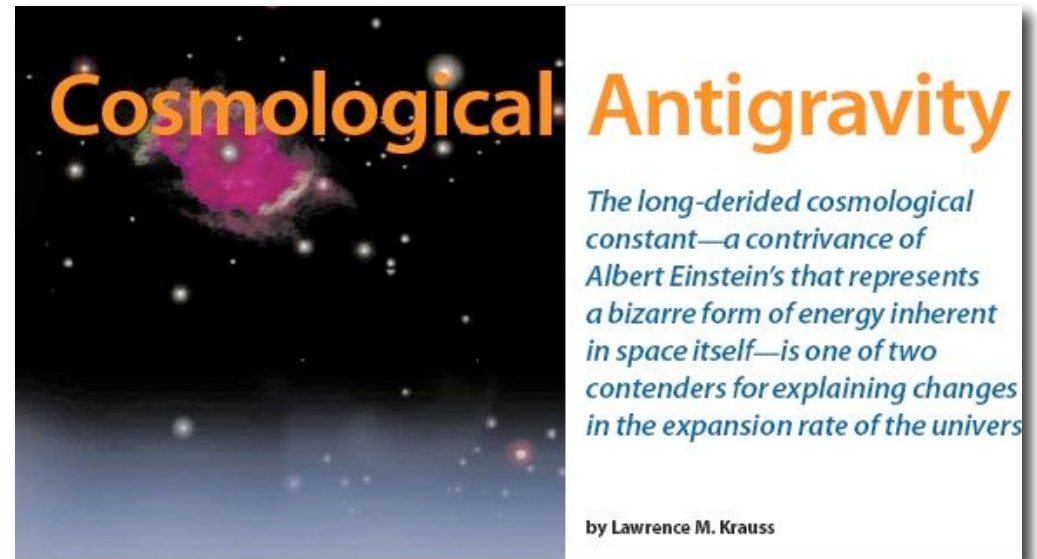


Plan

- Motivations (Kerr-Newman, énergie noire)
- Matière vs. antimatière: C, P, et T
- Un Univers symétrique: autant $m > 0$ que $m < 0$
 - Géométrie de Milne, avantages, caractéristiques
- Conséquences et contraintes expérimentales:
 - Nucléosynthèse
 - Supernovae SN1a
 - Structures
 - CMB, fond diffus gamma
- Quelques simulations
- Conclusions préliminaires

Motivations

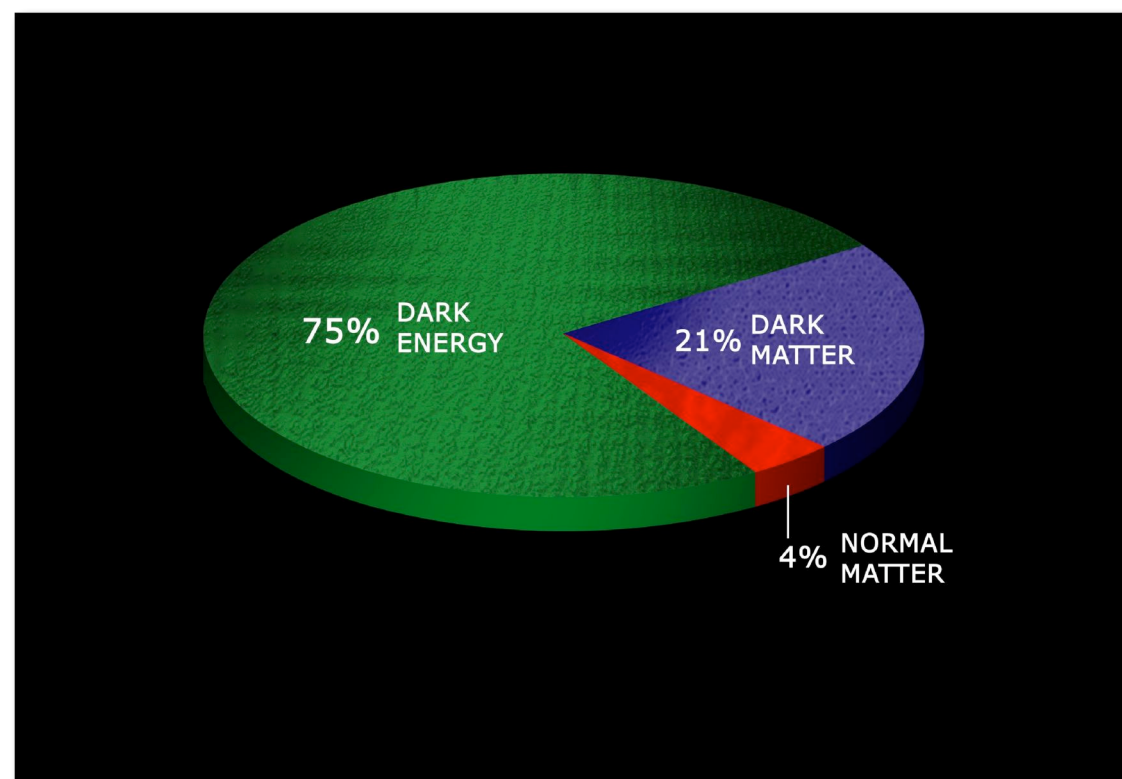
- L'énergie noire
- Antimatière: matière qui remonte le temps
- Remonter le temps: nécessité d'utiliser des masses négatives
- Particules trous noirs en Relat. Générale
- Violation de CP

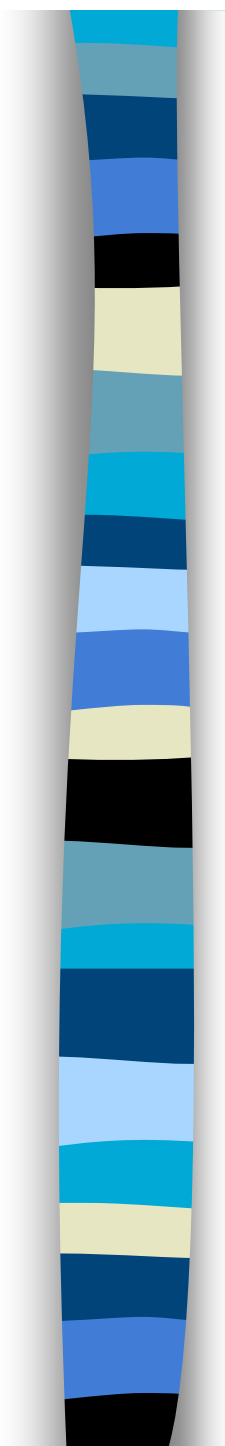


"An extravagant Universe" after WMAP + HST + SDSS + SNLS ...

- $\Omega_{\text{tot}} = 1.00 \pm 0.02$
- $\Omega_{\text{baryon}} = 0.045 \pm 0.005$
- $\Omega_{\text{matter}} \approx 0.25$
- $\Omega_{\Lambda} \approx 0.75$

"Concordance model"



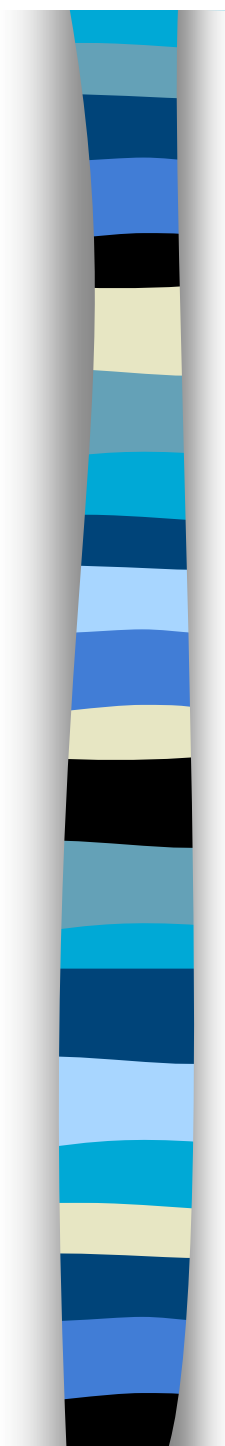


"An extravagant Universe"

- $\Omega_{\text{tot}} = 1.00 \pm 0.02$
- $\Omega_{\text{baryon}} = 0.045 \pm 0.005$
- $\Omega_{\text{matter}} \approx 0.25$
- $\Omega_{\Lambda} \approx 0.75$

Suppose, similarly to Dirac:

- symmetric primordial Universe
- i.e., as many **positive** mass states as **negative** mass states
- motivations in General Relativity ?
- consequences ?

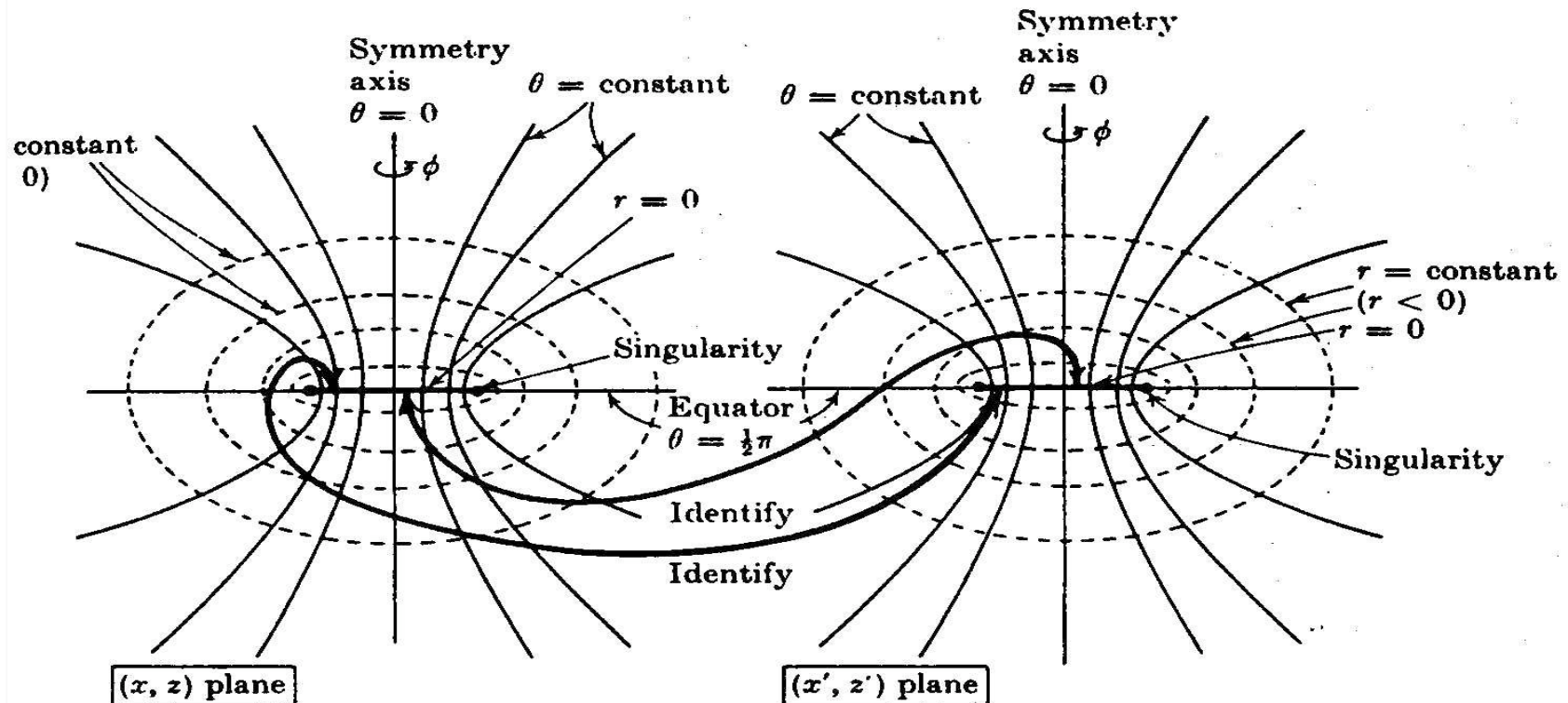


Cosmological motivations

- « In a scenario devised by Omnès (1969) and elaborated by Stecker and Puget (1972) irregularities develop through the coalescence and annihilation of pools of matter and antimatter. The idea **has considerable appeal because it commences from a simple state—a homogeneous universe with local balance of matter and antimatter**—but it proves difficult to see how the coalescence of matter pools and antimatter pools could proceed fast enough to make the growth of the scale of clustering keep pace with the growth of the horizon so as to produce an interesting degree of inhomogeneity now. »

P.J.E. Peebles, *The large-scale structure of the Universe*, p. 384
(Princeton Univ. Press, 1980)

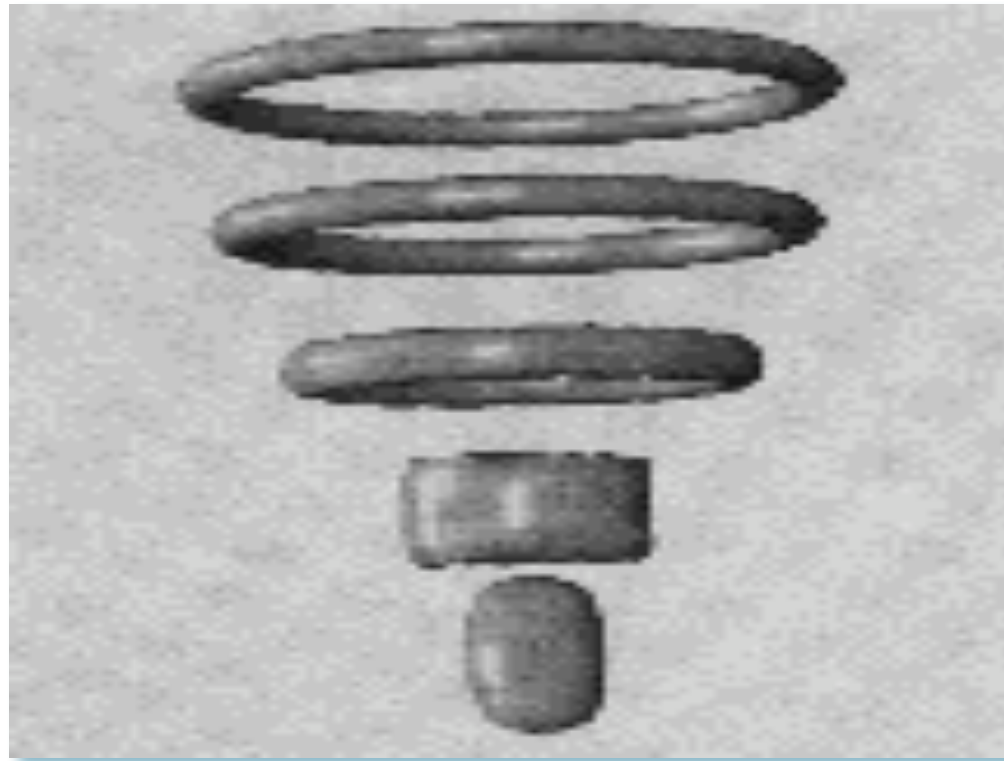
Kerr geometry (angular momentum a)



The maximal extension of the Kerr solution for $a^2 > m^2$ is obtained

by identifying the top of the disc $x^2 + y^2 < a^2$, $z = 0$ in the (x, y, z) plane with the bottom of the corresponding disc in the (x', y', z') plane, and vice-versa.

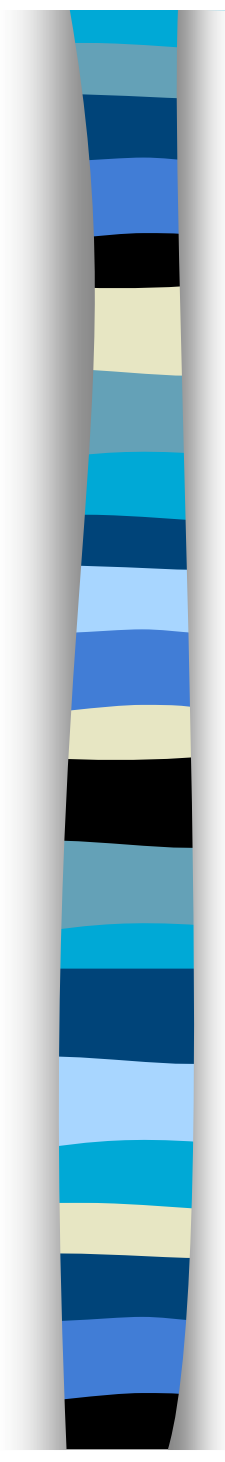
On circling twice round the singularity at $x^2 + y^2 = a^2$, $z = 0$ one passes from the (x, y, z) plane to the (x', y', z') plane (where r is negative), and back to the (x, y, z) plane (where r is positive).



- The singularity of a rotating black hole is a ring
- Two R^4 spacetimes joined by the Kerr ring
- Cross the interior of the ring to go from one space to the other

A Kerr-Newman "electron"

- Suppose an observer sees an electron in the " $r > 0$ " region, when he crosses the ring interior (" $r < 0$ "), the invariance:
 - $(m, r, e) \leftrightarrow (-m, -r, -e)$
- ... means that **after crossing the ring, he observes a positron**
- Note that sign of mass is also changed (**repulsive gravity in the region $r \times m < 0$**)
- This **$r \times m < 0$** region allows the observer to go backward in time
- Physical significance of this second spacetime:
 $r < 0$: Charge, $E \leftrightarrow t$, mass : **CP-conjugate (antimatter)**



A Kerr-Newman "electron"

- Consider a Kerr-Newman "black" hole with same quantum numbers as an electron: $m, e, \hbar/2$
- Size of the Kerr ring: $\hbar/2mc \approx 180 \text{ fm}$
- $1/2$ Compton radius of this particle
- For an electron, $g = 2$ is automatically obtained in Kerr-Newman
- Very similarly to Dirac's equation, the geometry of this "electron" is linked to a "positron" in the same solution !
- Particle-antiparticle pair appears as a single geometry: way around the « energy conditions » ?

Les masses positives s'attirent



Les masses négatives se repoussent

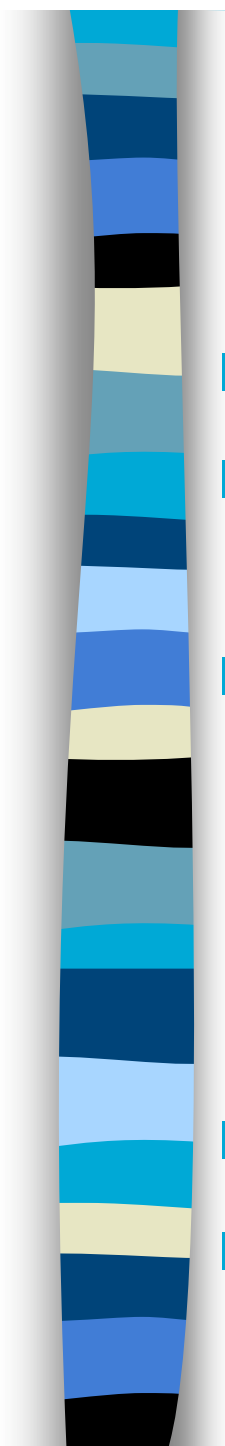


Les particules restent à distance constante et s'accélèrent mutuellement (runaway)



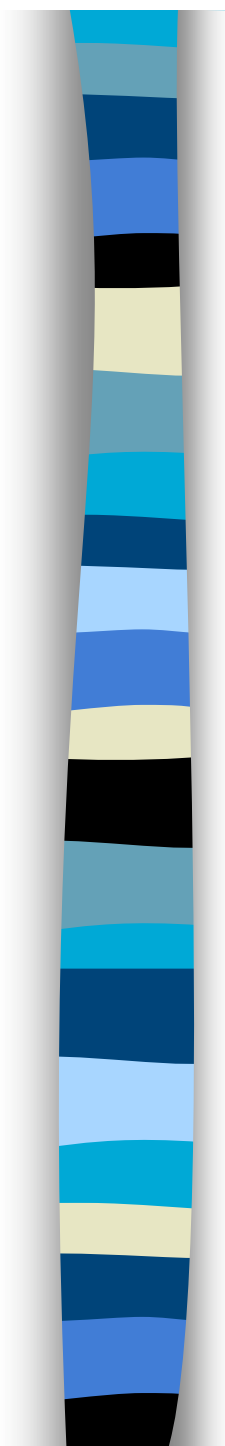
● Particule de masse positive

● Particule de masse négative



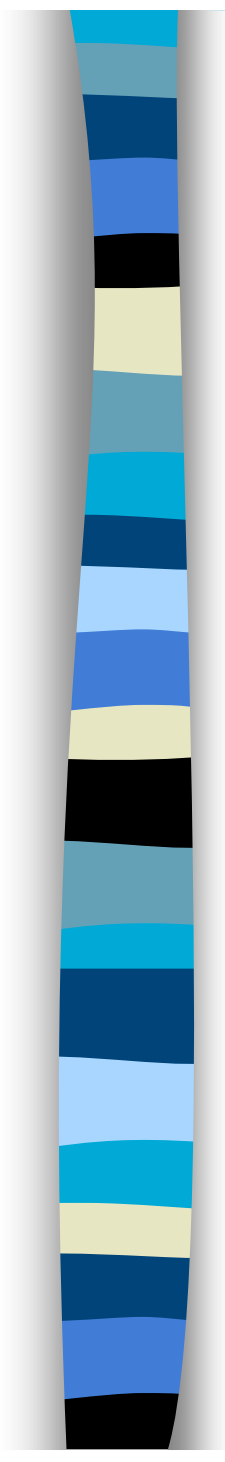
Conséquences expérimentales

- Une cosmologie symétrique matière/antimatière
- Séparation dans l'univers primordial: mécanismes Omnès-Puget, Alfven (années 60-70)
- A notre époque, la survivance de la matière et l'antimatière ayant survécu au Big-Bang conduit à un univers plat et “vide” (très proche de celui observé dans les observations récentes de supernovae)
- Permettrait d'expliquer la coïncidence $\Omega_{\Lambda} \approx \Omega_m$
- Pas de fine tuning nécessaire...



Tests expérimentaux

- Nucléosynthèse primordiale
- Distance de luminosité = $f(z)$ pour les supernovae SN1a
- Formation des structures, weak lensing
- Fond diffus gamma
- Spectre du CMB
- Masse gravitationnelle antihydrogène, violation de CP...



Caractéristiques d'un univers de Milne matière-antimatière

APC-IPHC, 17-19 octobre 2007

Géométrie de Milne

- Univers “vide” proposé par Milne en 1932
- Vide donc *espace-temps* plat, mais de courbure *d’espace* négative $k = -1$

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

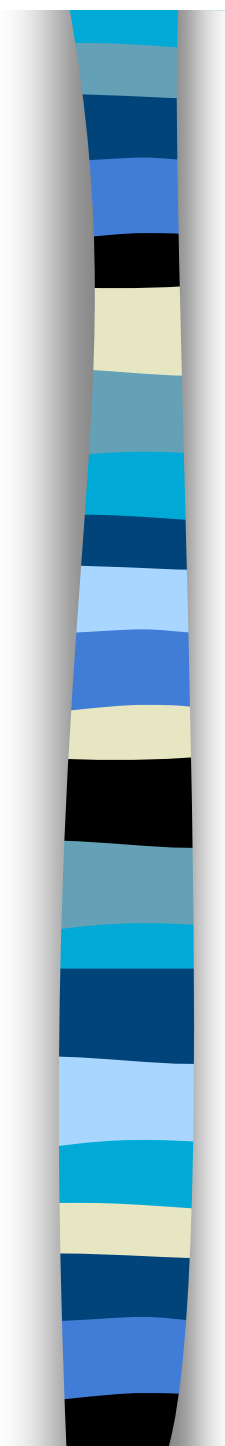
ou

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 (d\chi^2 + S_k^2(\chi) d\Omega^2) \quad \begin{cases} r = \sin\chi & \text{si } k = 1 \\ r = \chi & \text{si } k = 0 \\ r = \sinh\chi & \text{si } k = -1 \end{cases}$$

- Variation du facteur d’échelle $a(t) = \text{Cte} \times t$

$$\frac{d\theta_{\text{Milne}}}{d\theta_{\text{EdS}}} \approx \frac{2}{\sinh(\ln(1+z))} \approx 0.0035$$

APC-IPHC, 17-19 octobre 2007



Géométrie de Milne

■ Principales caractéristiques:

- Sans accélération ni décélération $a(t) = Cte \times t$
- Âge de l'Univers ≈ 13.9 Gy presque identique à l'âge de l'univers Λ -CDM de concordance
- Pas de problème d'horizon dans l'univers primordial
- Reproduit bien les données SN1a
- Nucléosynthèse: voir discussion suivante
- CMB : différence très importante sur la distance angulaire vue à travers $k = -1$ (Milne) et $k = 0$ ("plat")
- Univers très instable : formation des structures à grand z

Géométrie de Milne

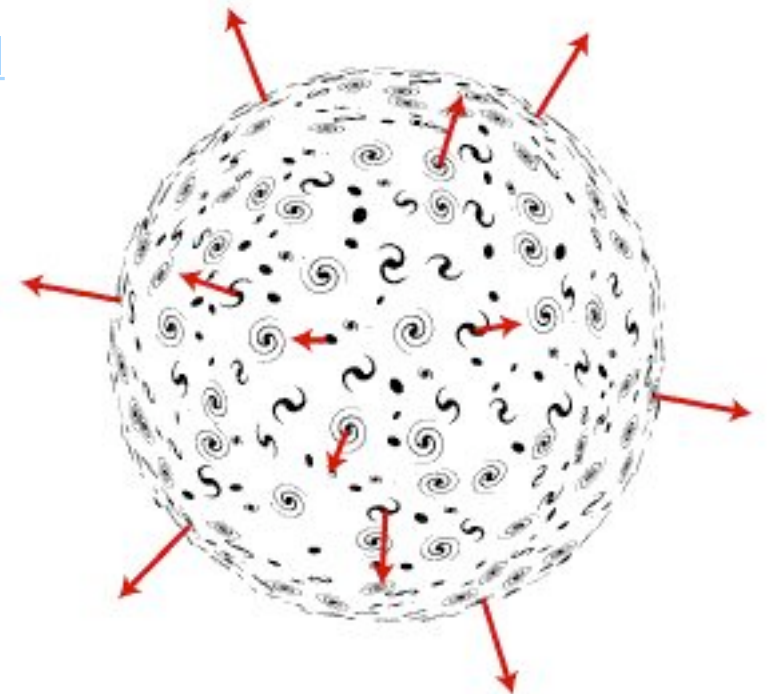
- Structure causale très simple : pas d'horizon

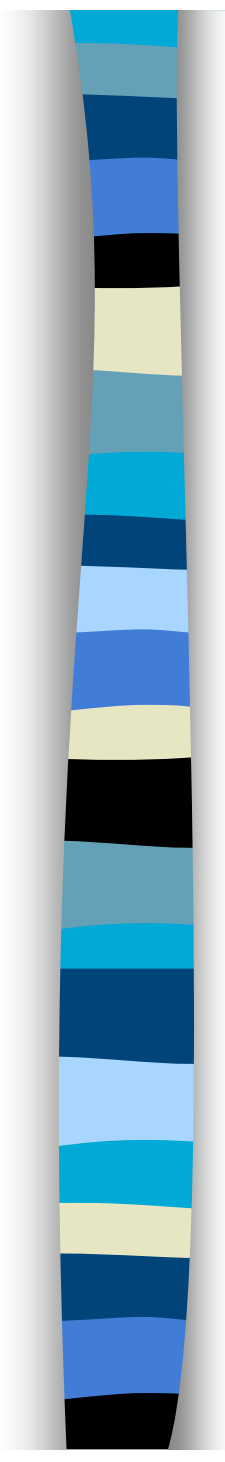
- Site de Ned Wright

http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmo_01.htm

- Site de Matt McIrvin

<http://world.std.com/~mmcirvin/milne.html>





Âge d'un univers de Milne matière-antimatière

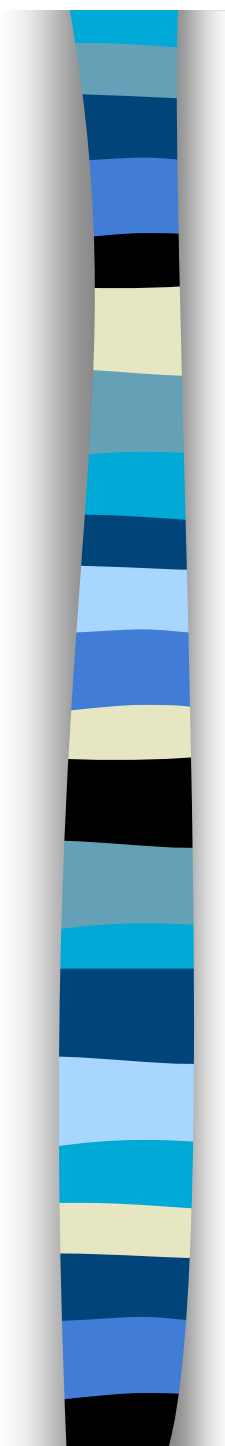
APC-IPHC, 17-19 octobre 2007

Géométrie de Milne

- $a(t) = \text{Cte} \times t$
- Âge de l'Univers

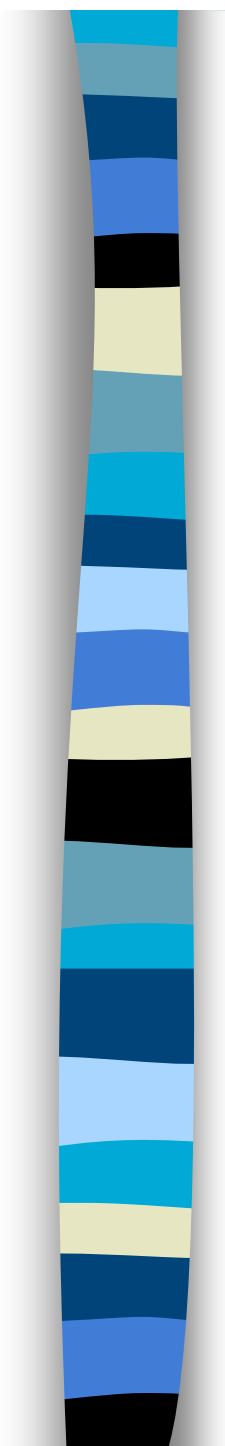
$$H_0 t_0 = \int_0^\infty \frac{dz}{(1+z)E(z)} \quad \text{avec:} \quad E(z) = \left[\Omega_{\text{matter}} (1+z)^3 + \Omega_k (1+z)^2 + \Omega_\Lambda \right]^{1/2}$$

- Pour $\Omega_{\text{matter}} = \Omega_\Lambda = 0$, on a :
 $H_0 t_0 = 1$, soit 13.98 Gy pour $H_0 = 70 \text{ km}/(\text{s Mpc})$
- A la différence de Einstein-de Sitter, et comme pour l'univers Λ -CDM, le problème d'âge est résolu pour Milne
- Avec un univers plus naturel que Λ -CDM...



Distance de luminosité et SN1a dans un univers de Milne matière-antimatière

APC-IPHC, 17-19 octobre 2007



Explication naturelle

$$\rho_{\Lambda} \text{ apparent} \approx \rho_m$$

- Dans un univers symétrique matière-antimatière, où « matière » attire tout le monde et « antimatière » repousse tout le monde, on observe à grande distance un univers « gravitationnellement vide » qui peut apparaître au 1er ordre comme une constante cosmologique de densité $\rho_{\Lambda} \approx \rho_m$ (ce qui semble bien être le cas dans les observations de supernovae SN1a)
- En effet: dans l'hypothèse $\Lambda \neq 0$, le paramètre de décélération q (où a est le facteur d'échelle) dans un univers “matter dominated”, avec $p \approx 0$ (dust), s'écrit :

$$q \equiv - \frac{\ddot{a} a}{\dot{a}^2} = \frac{1}{2} \Omega_M - \Omega_{\Lambda}$$

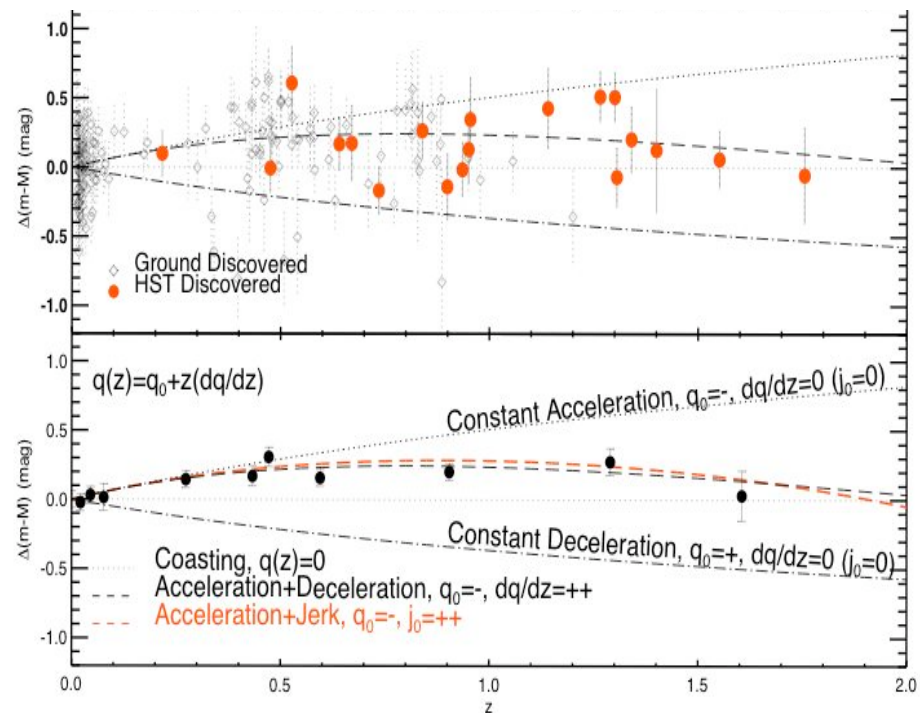
- Un univers symétrique matière-antimatière telle que défini ci-dessus vérifie en 1ère approximation $\Omega \approx 0$

Explication naturelle ρ_Λ

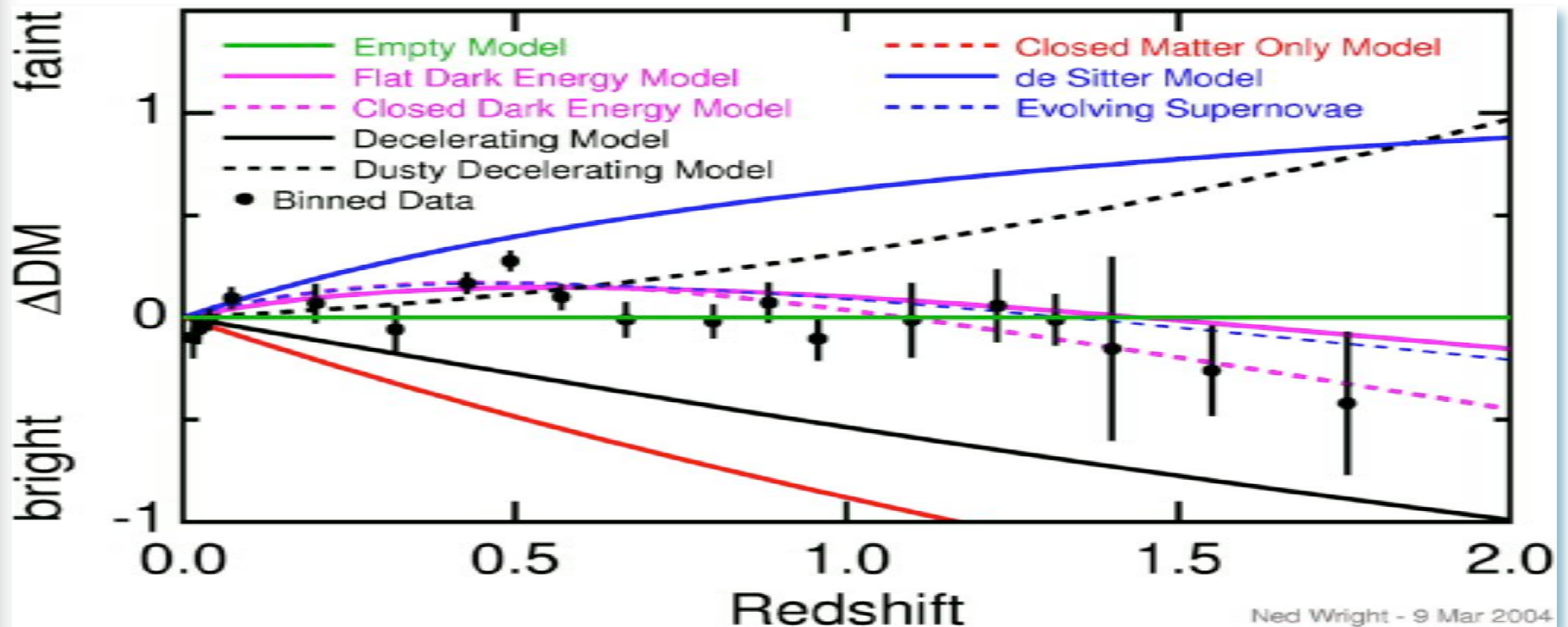
χ^2 Comparison of Gold Set Data to Models

Model	χ^2 (for 157 SNe Ia)
$\Omega_M = 0.27, \Omega_\Lambda = 0.73$	178
$\Omega_M = 1.00, \Omega_\Lambda = 0.00$	325
$\Omega_M = 0.00, \Omega_\Lambda = 0.00$	192
High-redshift gray dust (with $\Omega_M = 1.00, \Omega_\Lambda = 0.00$)	307
Replenishing dust (with $\Omega_M = 1.00, \Omega_\Lambda = 0.00$)	175
Dimming $\propto z$ (with $\Omega_M = 1.00, \Omega_\Lambda = 0.00$)	253

- A. G. Riess et al., astro-ph/0402512
- Ajustement univers vide proche du meilleur fit

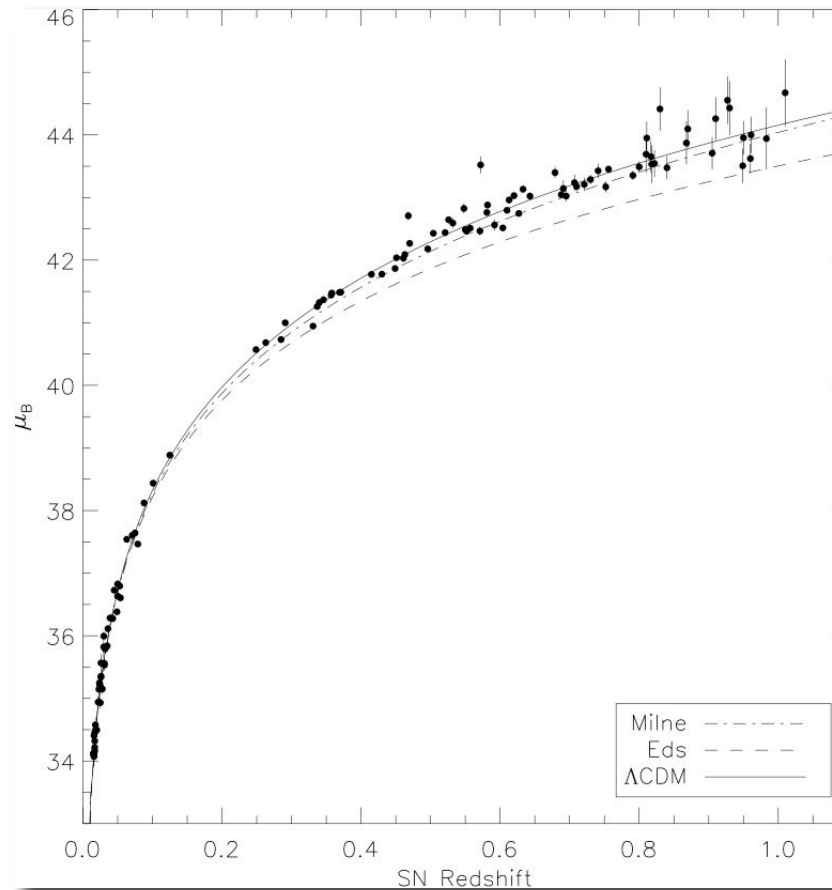


Simple explanation for $\rho_{\Lambda} \approx 2 \rho_m$



- Our universe looks very much like an empty universe (after E. Wright, DM 2006, Santa Monica)

Do we live in an « empty universe » ?



- SNLS data and fit to three cosmological hypothesis (Concordance, Einstein-de Sitter, Milne/empty)

APC-IPHC, 17-19 octobre 2007

Do we live in an « empty universe » ?

- Residual of SNLS data for (from top to bottom), statistical errors only :

- Milne/empty Universe
- Λ CDM universe
- Einstein-de Sitter universe

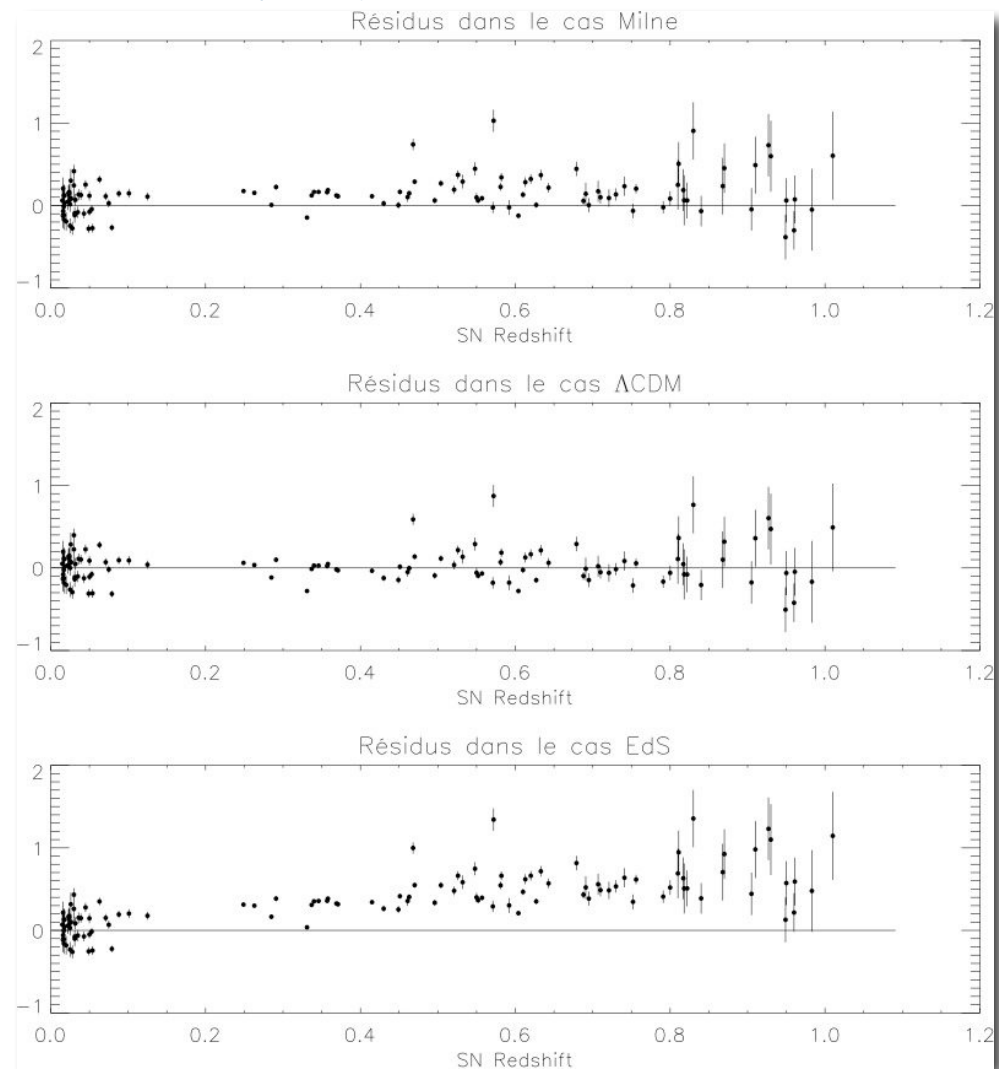
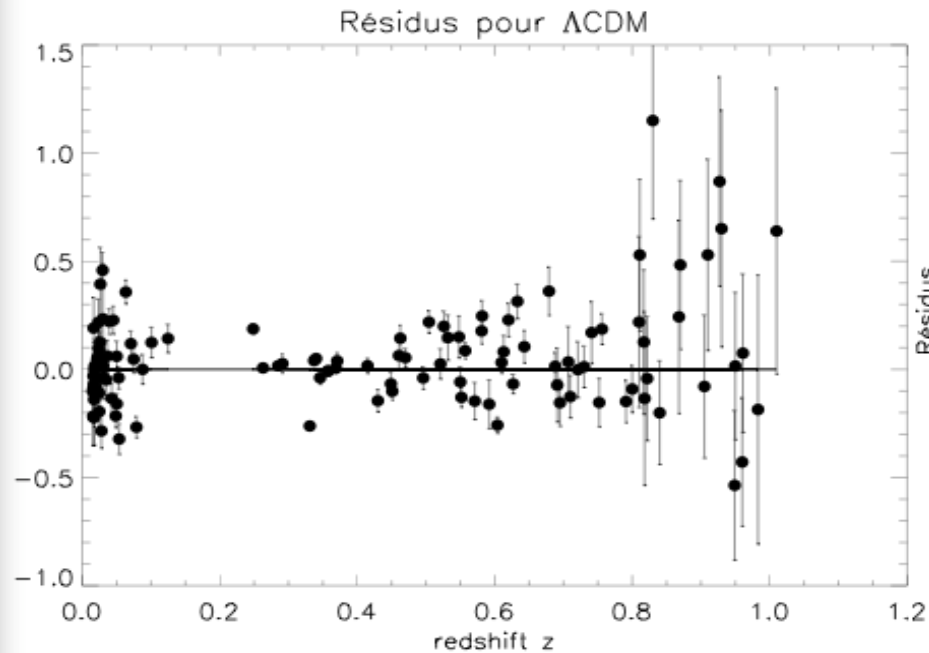
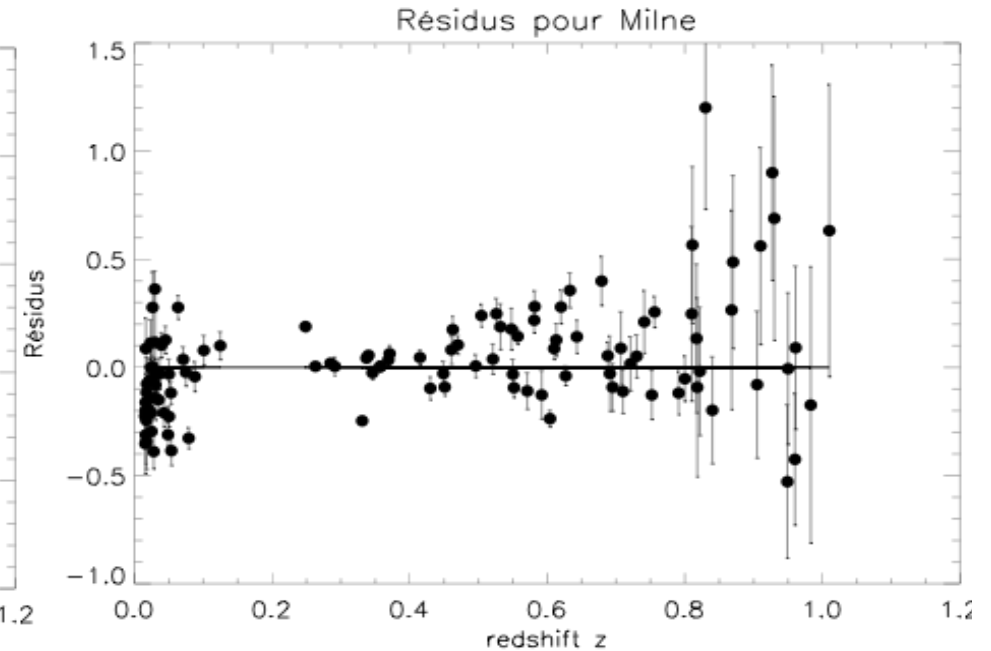


Diagramme de Hubble

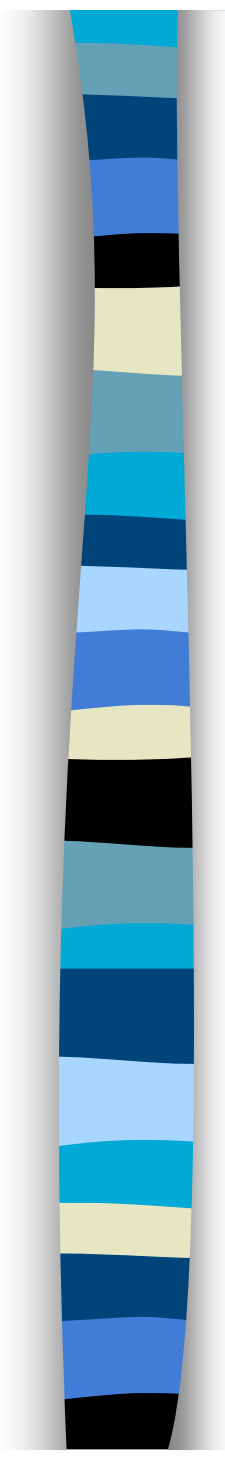


$$\chi^2/dof = 7.29$$



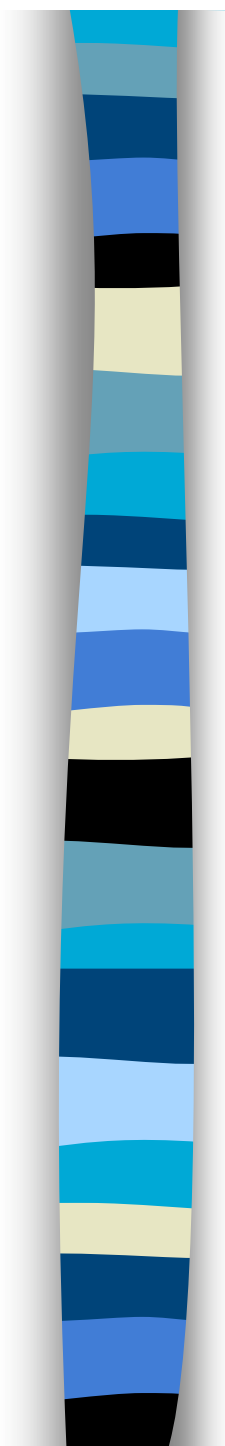
$$\chi^2/dof = 7.83$$

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



Nucléosynthèse dans un univers de Milne matière-antimatière

APC-IPHC, 17-19 octobre 2007



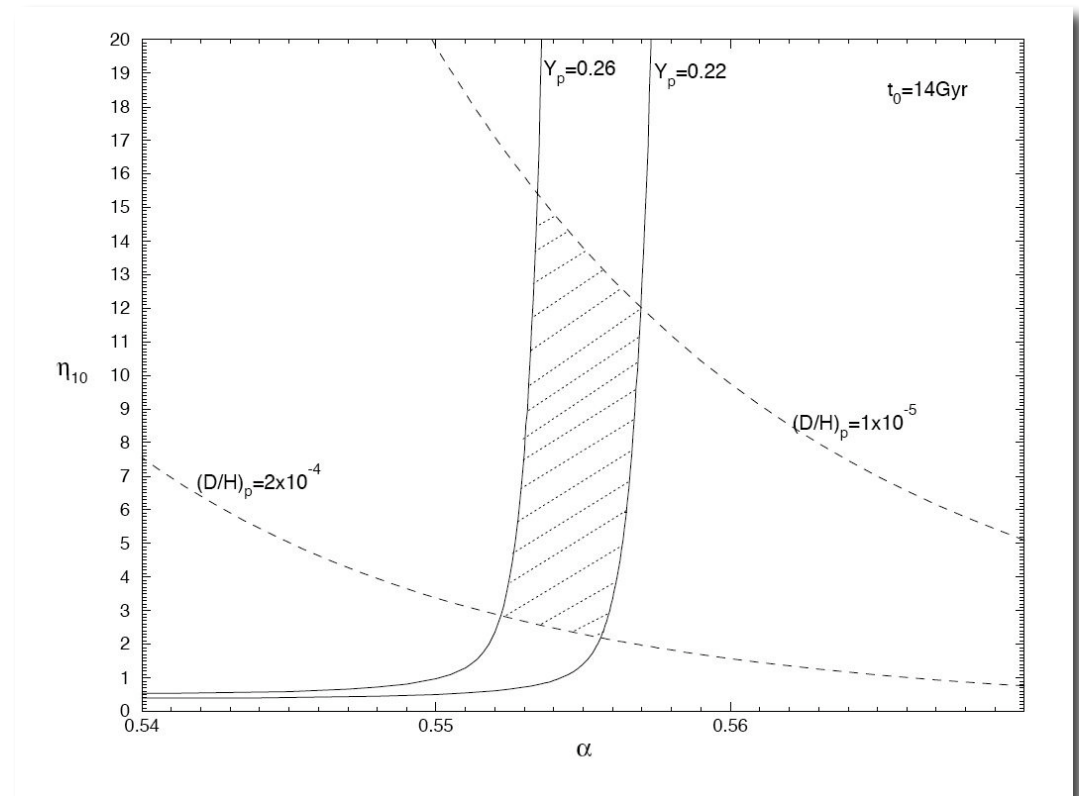
Nucléosynthèse: un exemple illustratif

■ Références:

- M. Kaplinghat, G. Steigman, I. Tkachev, T.P. Walker, *astro-ph/9805114*
- M. Sethi, A. Batra, D. Lohiya, *astro-ph/9903084*
- M. Kaplinghat, G. Steigman, T.P. Walker, *astro-ph/9911066*
- Un univers “vide” (“coasting”), d’âge extrêmement différente de l’âge standard au moment de la nucléosynthèse, peut conduire à une valeur de ^4He parfaitement en accord avec les données !
- $T = 80 \text{ keV}$: ≈ 200 secondes dans cosmologie standard, mais ≈ 50 ans (!) dans cosmologie Milne

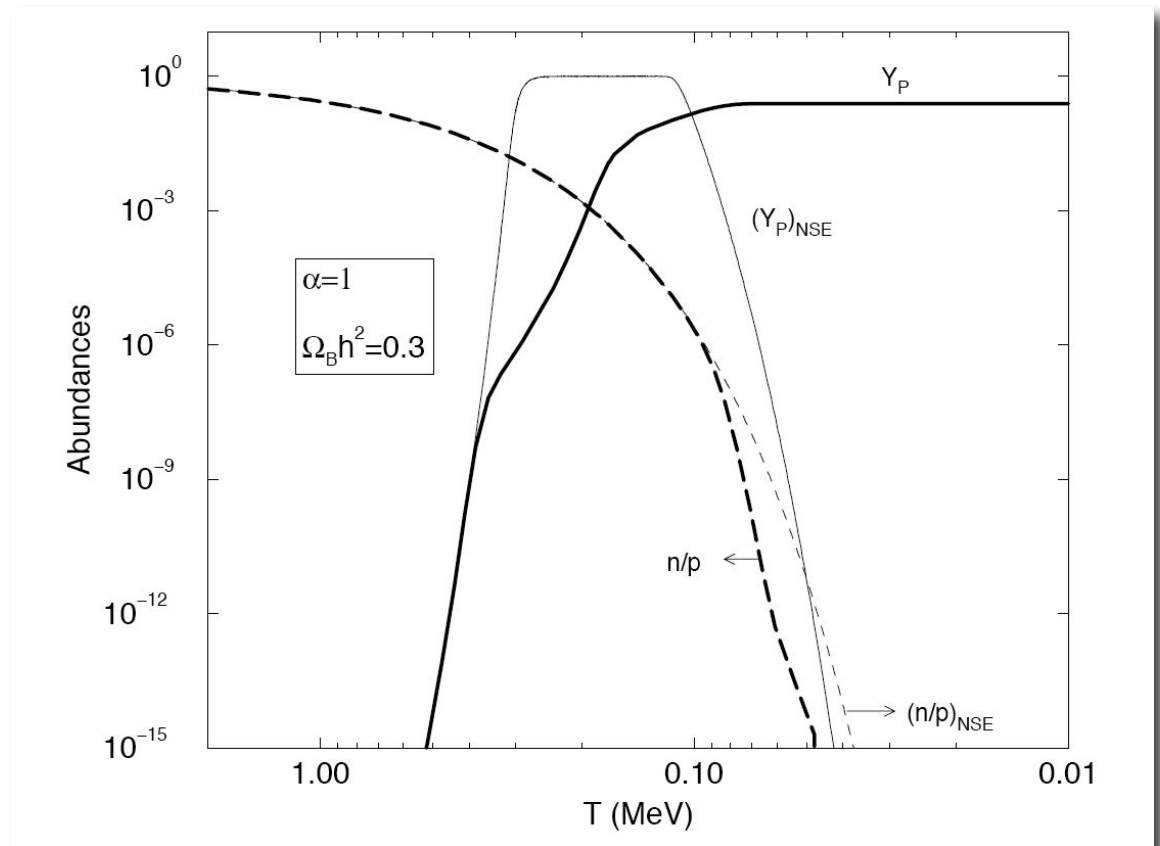
Nucléosynthèse: un exemple illustratif

- Première publication
M. Kaplinghat, G. Steigman, I. Tkachev, T.P. Walker, *astro-ph/9805114*
- Dans les power-law cosmologies, $a(t) = At^\alpha$ la nucléosynthèse ^4He impose $\alpha \approx 0.55$
- Conclusion incorrecte



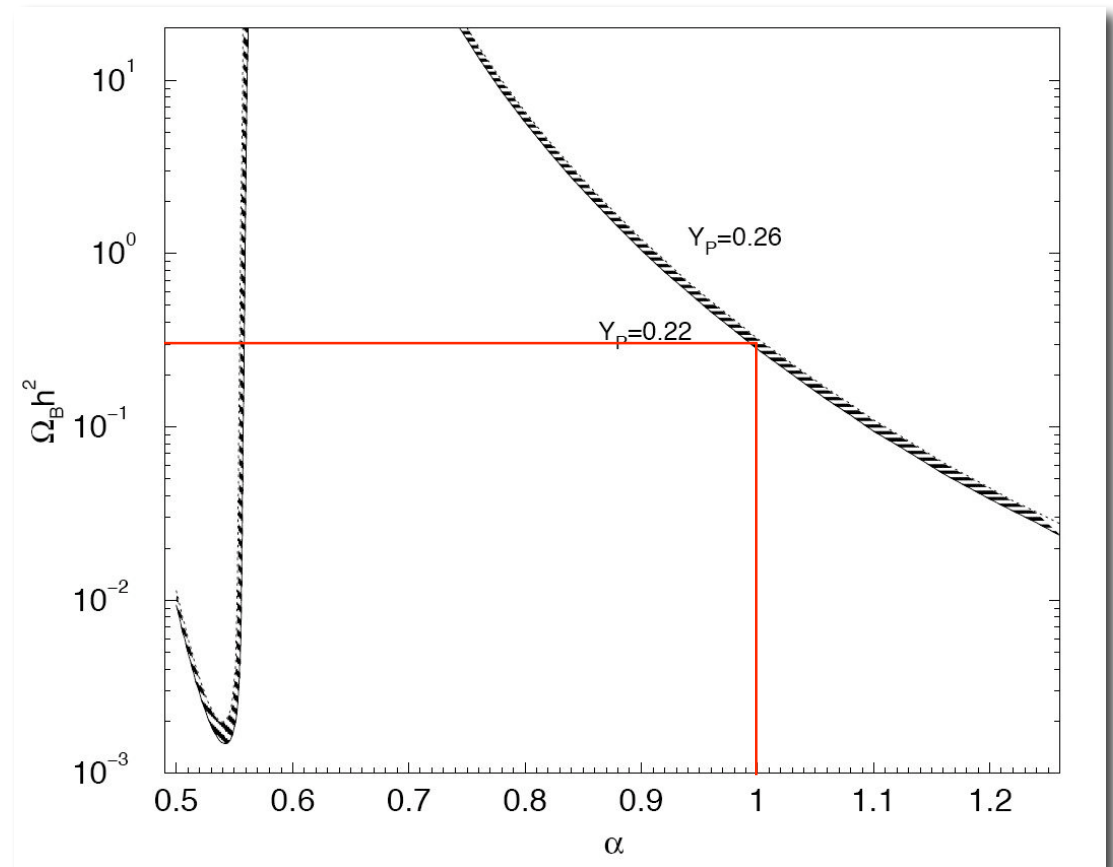
Nucléosynthèse: un exemple illustratif

- Deuxième publication
M. Kaplinghat, G. Steigman, T.P. Walker,
astro-ph/9911066
- Pour $a(t) = At^\alpha$
avec $\alpha = 1$ (Milne !),
la valeur en ${}^4\text{He} \approx 0.25$
correspond bien à ce
qui est observé pour un
univers sans matière
noire $\Omega_B h^2 \approx 0.3$



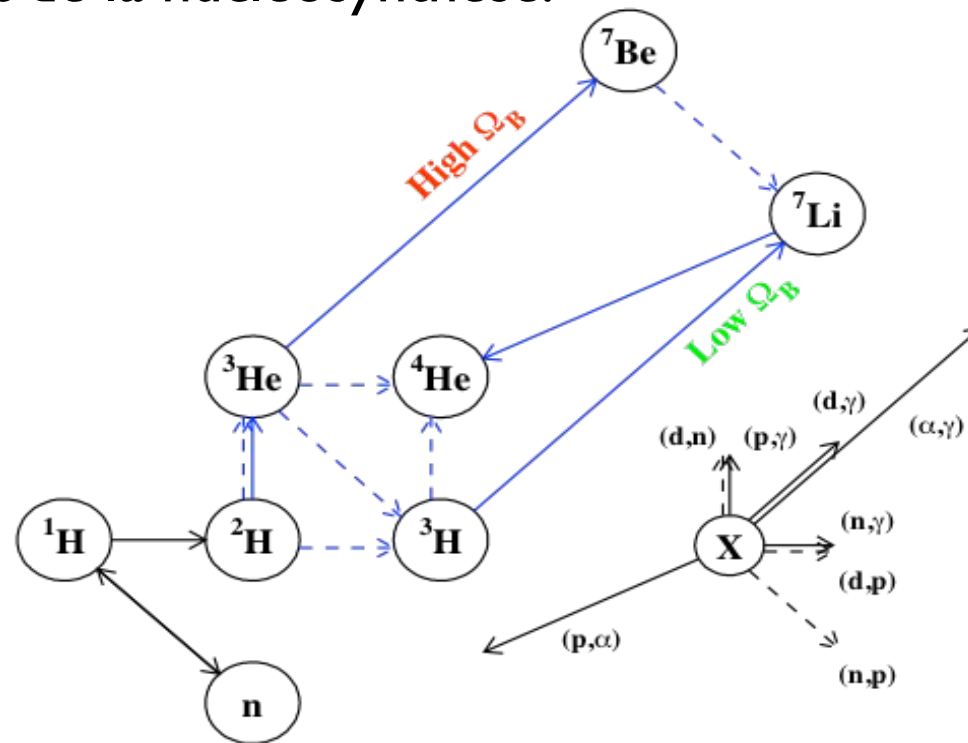
Nucléosynthèse: un exemple illustratif

- Deuxième publication
M. Kaplinghat, G. Steigman, T.P. Walker,
astro-ph/9911066
- Pour $a(t) = At^\alpha$
avec $\alpha = 1$ (Milne !),
la valeur en ${}^4\text{He} \approx 0.25$
correspond bien à ce
qui est observé pour un
univers sans matière
noire $\eta \approx 7 \cdot 10^{-9}$



Standard Big-Bang Nucleosynthesis

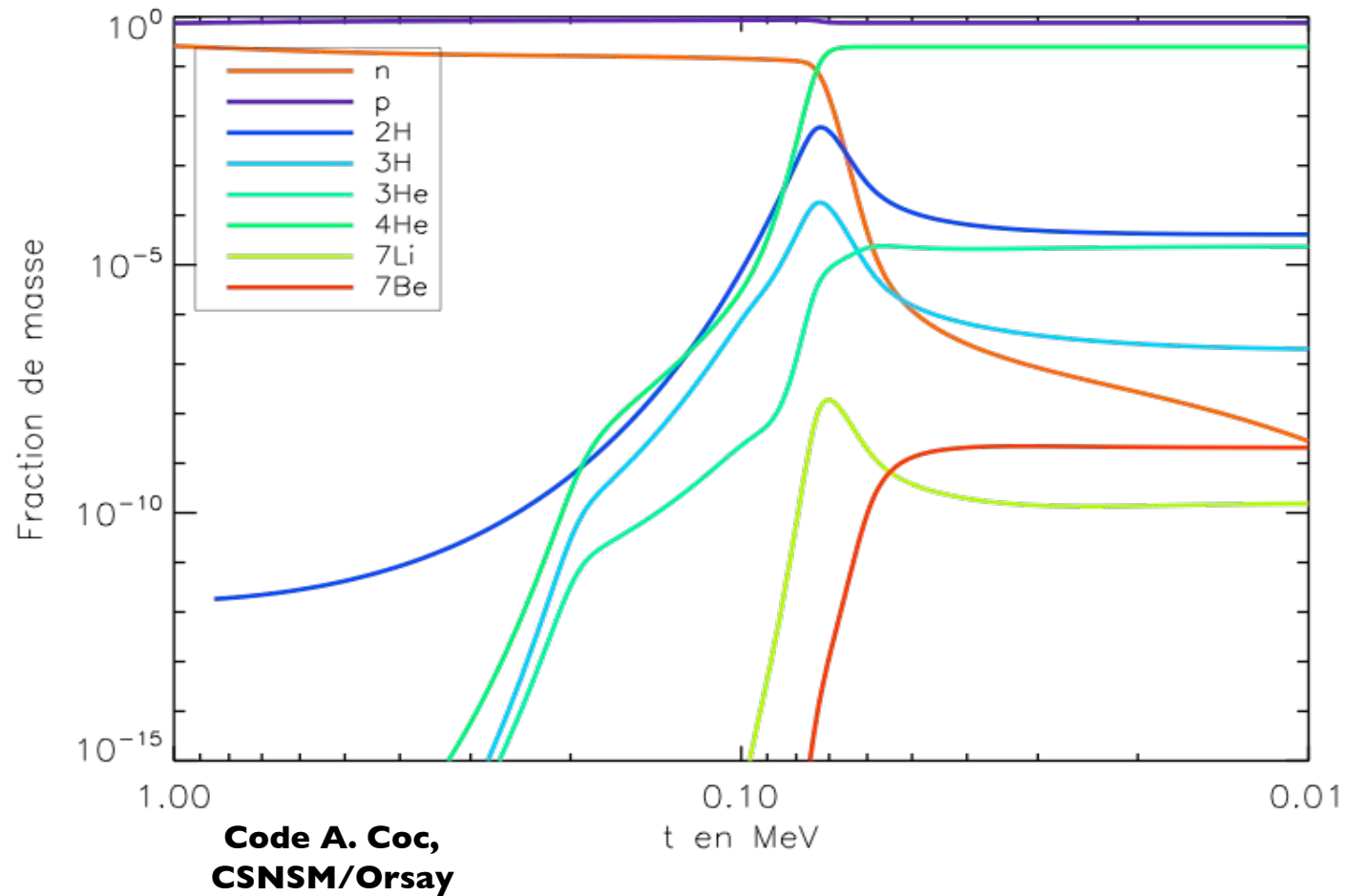
- $T \approx 800 \text{ keV}$, $t=1 \text{ s}$: Gel des interactions faibles
- $T \approx 80 \text{ keV}$, $t=200 \text{ s}$: Fin de la photodésintégration du deutérium. Début de la nucléosynthèse.



A. Coc, 2007

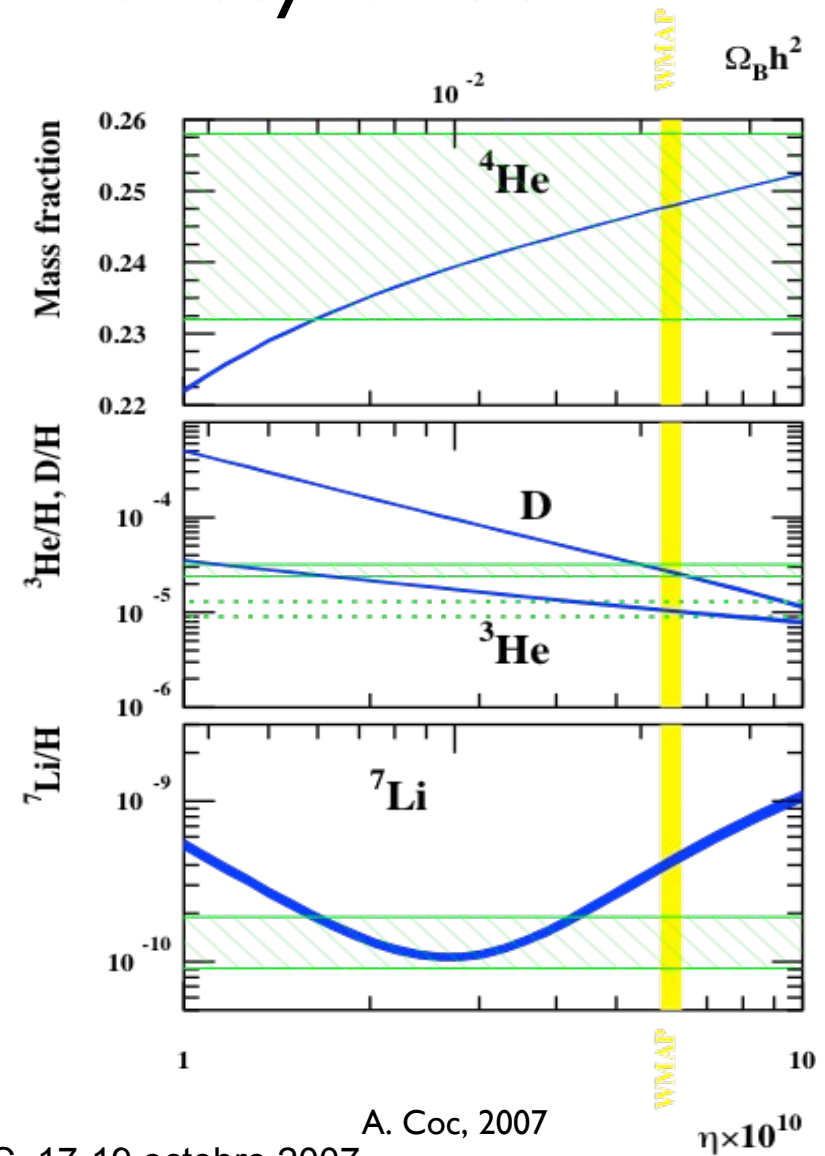
Standard Big-Bang Nucleosynthesis

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



Standard Big-Bang Nucleosynthesis

- Test précis sur D, ^4He et ^3He
- Tensions entre WMAP et SBBN sur ^7Li

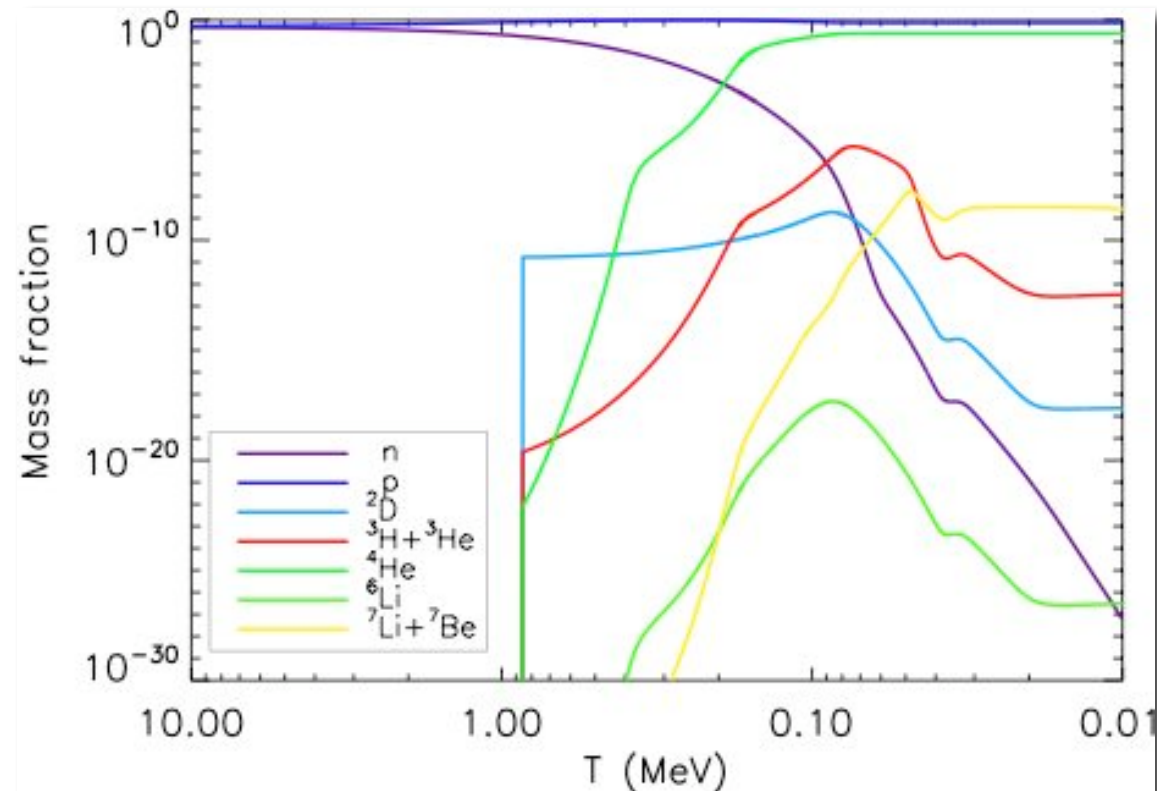


A. Coc, 2007

APC-IPHC, 17-19 octobre 2007

Nucléosynthèse dans l'Univers de Milne

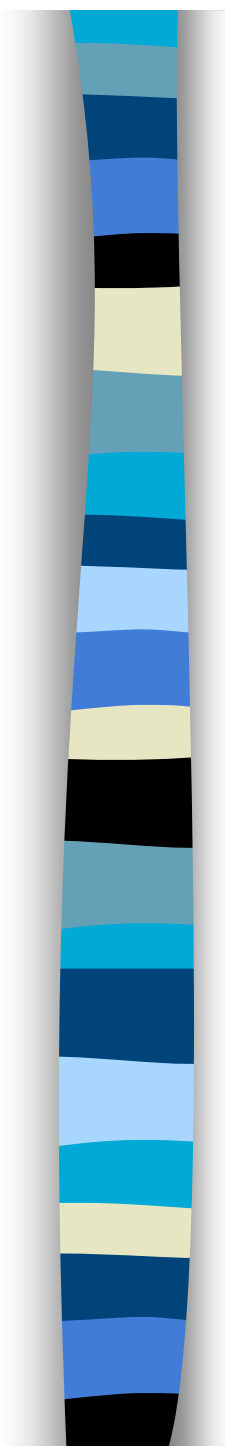
Bon accord pour l'hélium pour $\eta \approx 7 \cdot 10^{-9}$, perte presque totale du deutérium



En collaboration avec
A. Coc, CSNSM/Orsay

Mais le deutérium peut être fabriqué par un autre moyen :
spallation, nucléodisruption (ainsi que ⁶Li)

APC-IPHC, 17-19 octobre 2007

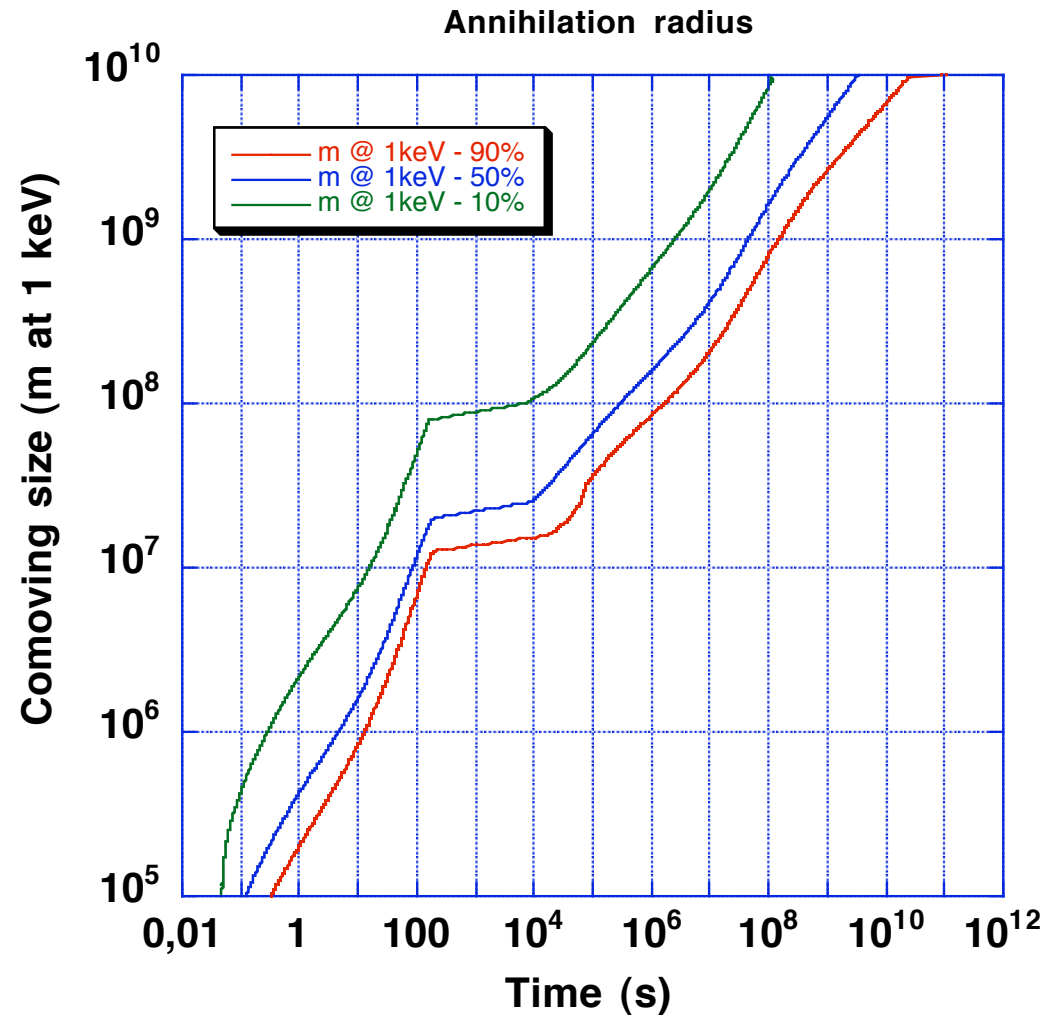


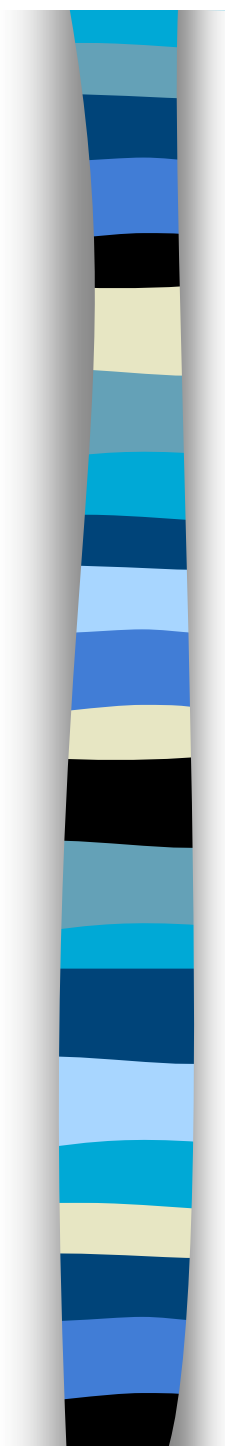
Nucléosynthèse univers de Milne

- Implique valeur ≈ 10 fois plus élevée de $\eta = n_B/n_{\text{gamma}}$ que dans cosmologie standard (exit la matière noire)
- Dans cette très lente nucléosynthèse primordiale (“simmering” universe), le deutérium serait détruit très fortement
- En contradiction avec données observationnelles ?
- J-J. Aly : annihilation entre domaines matière-antimatière va produire du deutérium : contrainte sur taille “ domaines ” matière-antimatière
- Valeur ${}^7\text{Li} \approx 10^{-9}$ deux fois plus élevée que WMAP
- Valeur prédite ${}^3\text{He}$ plus faible que cosmo standard, mais valeur observée également plus faible

Nucléosynthèse univers de Milne

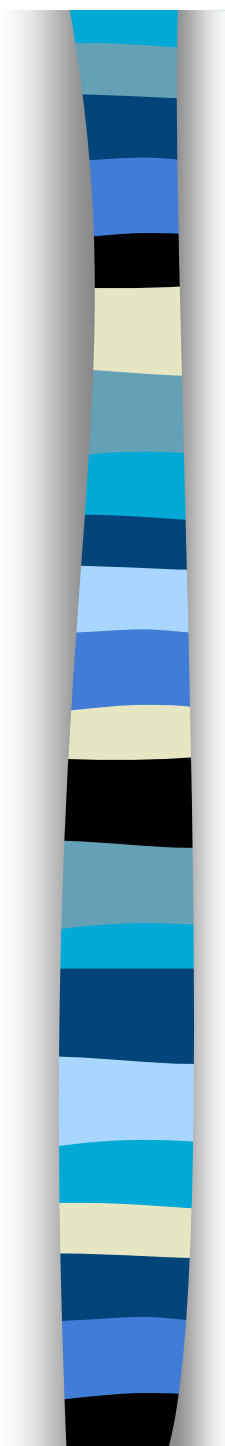
- Annihilation entre domaines matière-antimatière et production de deutérium : contrainte sur taille “domaines” matière-antimatière
- Taille typique émulsion: $2-3 \cdot 10^{14}$ cm à 1 MeV





Premier pic du CMB dans un univers de Milne matière-antimatière

APC-IPHC, 17-19 octobre 2007

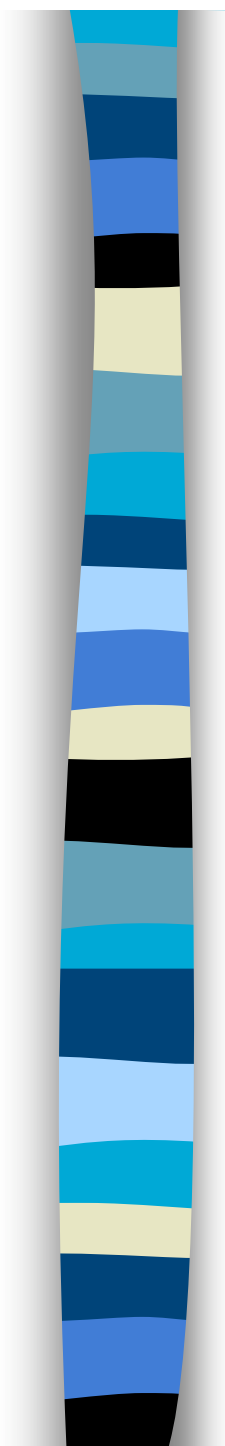


Premier pic du CMB

- On s'attend à un facteur :

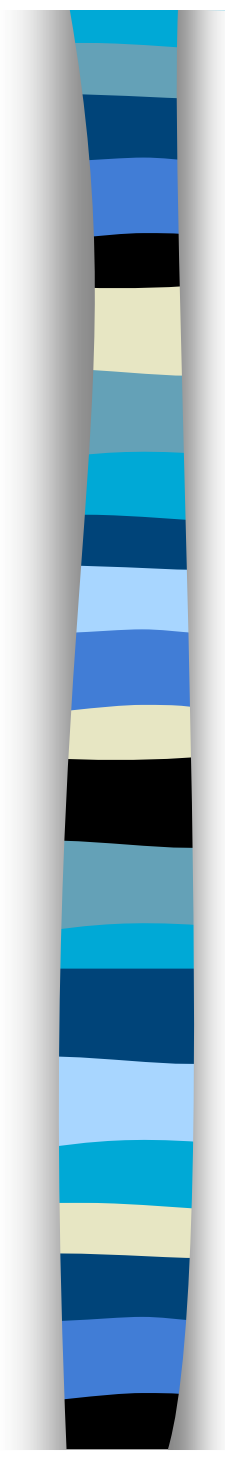
$$\frac{(1+z^*)}{4} \approx 270$$

- pour le rapport des distances angulaires d'un même objet vu:
 - à travers un univers vide de Milne
 - à travers l'univers Λ -CDM
- Pourquoi malgré tout un pic à l'échelle $\approx 1^\circ$



Premier pic du CMB

- En fait, le facteur géométrique: $\frac{(1+z^*)}{4} \approx 270$ est compensé par deux facteurs non triviaux:
 - L'allongement de l'âge de l'univers dans sa phase initiale (facteur ≈ 35)
 - L'allongement dû au temps conforme $\frac{dt}{a(t)}$ qui vaut :
 - 2 pour un univers radiation dominated
 - ≈ 17 (divergence logarithmique) pour un Univers de Milne entre $z(170 \text{ MeV})$ et $z(3000 \text{ Kelvins})$



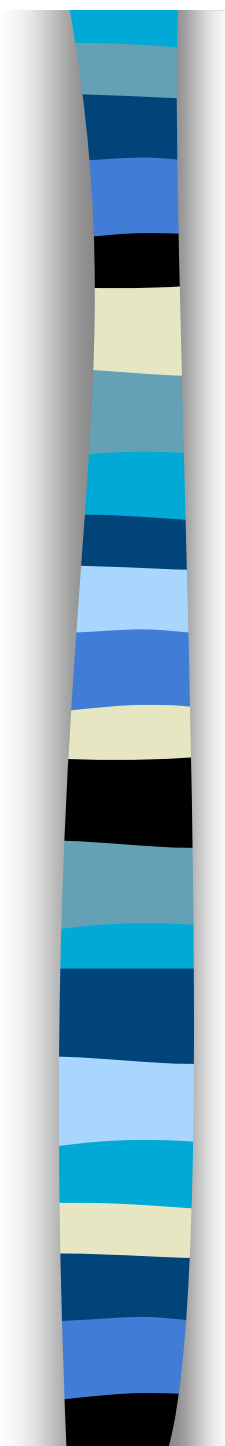
Premier pic du CMB

- Plus précisément, ce qui a été calculé est le rapport:

Horizon sonique/distance angulaire
où l'horizon sonique est défini par:

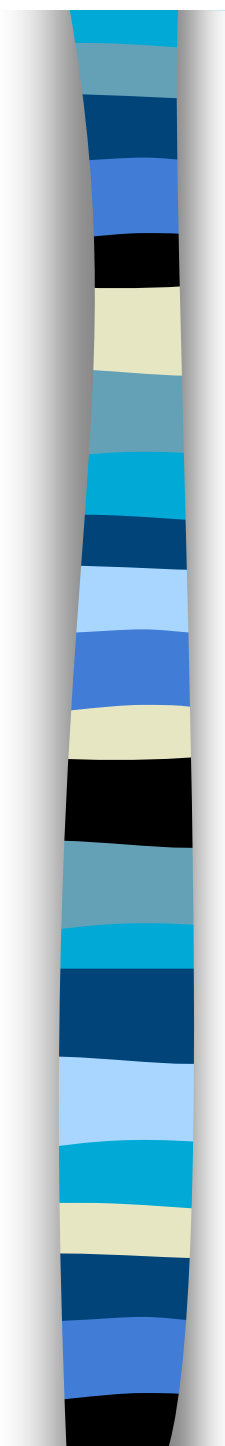
$$r_s = \int_{z(150\text{MeV})}^{z(3000\text{K})} dt \frac{c_s}{a(t)} = \int_{z(150\text{MeV})}^{z(3000\text{K})} \frac{dt}{a(t)} \frac{c}{\sqrt{3\left(1 + \frac{3\rho_b}{4\rho_\gamma}\right)}}$$

Voir pour plus de détails note de Aurélien



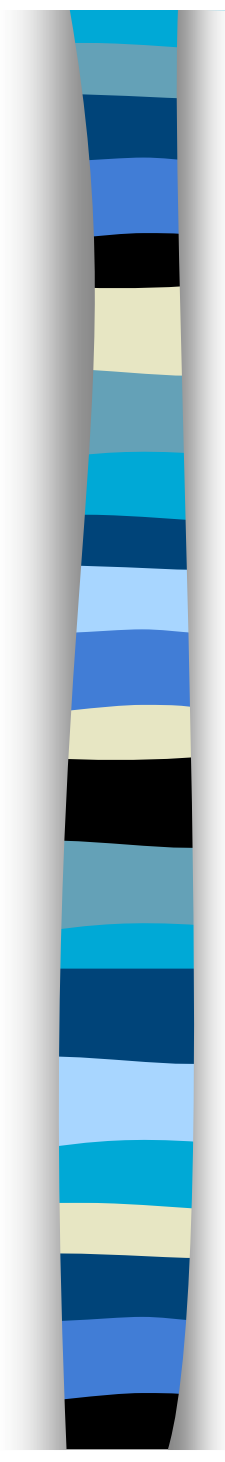
Test du CMB

- Pour affiner le test, il faut préciser plusieurs points:
 - Caractère isocurvature vs. adiabatique des fluctuations (a priori, plutôt isocurvature dans Milne matière-antimatière)
 - Facteurs de projection 3D/2D pour un calcul précis de l'angle
 - Damping et cohérence temporelle du son émis à la transition QGP vers 170 MeV
 - Autres tests (polarisation, ...) ?
- Aide bienvenue des experts si intérêt



Emulsion matière-antimatière

- Transition de phase QGP vers ≈ 170 MeV
- Construction d'une émulsion (Omnès, Aly, et al. Circa 1970) par diffusion $D \approx \lambda c/3$
 - taille émulsion ≈ 10 cm à 100 MeV
 - Par comparaison, $\approx 10^{-4}$ cm dans cosmologie standard
- Annihilation massive (survit $\approx 10^{-8}$) jusque vers 100 keV
- Croissance taille émulsion par coalescence $O(10^{14}$ cm) à $T = 1$ MeV (âge ≈ 3 ans !)
- Raisonnable dans cette cosmologie d'imaginer une cosmologie symétrique matière-antimatière



Autres tests: peser l'antimatière

- Peser un antiproton ou un positron : énorme problème des champs électriques résiduels
- Gravité $\approx 10^{-7}$ V/m pour antiproton, qqs 10^{-11} V/m pour un électron ...
- Expérience historique de Witteborn et Fairbank (électrons) complètement fausse
- Peut-être possible pour des antiprotons froids en utilisant l'électronique quantique (Single Electron Transistor):
V. Bouchiat, G. Chardin, M.H. Devoret and D. Estève, *Hyperfine Interactions* **109** (1997) 345
- Antihydrogène auprès du AD au CERN
J. Walzl et T.W. Hänsch, *Gen. Relat. and Grav.* **36** (2004) 561



Conclusions

- La relativité générale présente des propriétés de **renversement de charge, énergie et temps** qui évoquent très fortement la transformation **matière-antimatière**
- Premiers tests d'une cosmologie symétrique matière-antimatière avec masse gravitationnelle négative pour l'antimatière, motivée par « énergie et matière noire »
- Permet peut-être une **explication sans paramètre libre des énigmes de la matière noire et de l'énergie noire**
- Très encourageant pour les tests nucléosynthèse, SN1a et CMB
- Approfondir le CMB, autres tests (weak lensing, observation BAO a priori fausse, structures, ...) ?
- Encore au début de cette étude...