


# Tests observationnels d'un Univers symétrique



G. Chardin

DAPNIA/SPP

CEA/Saclay

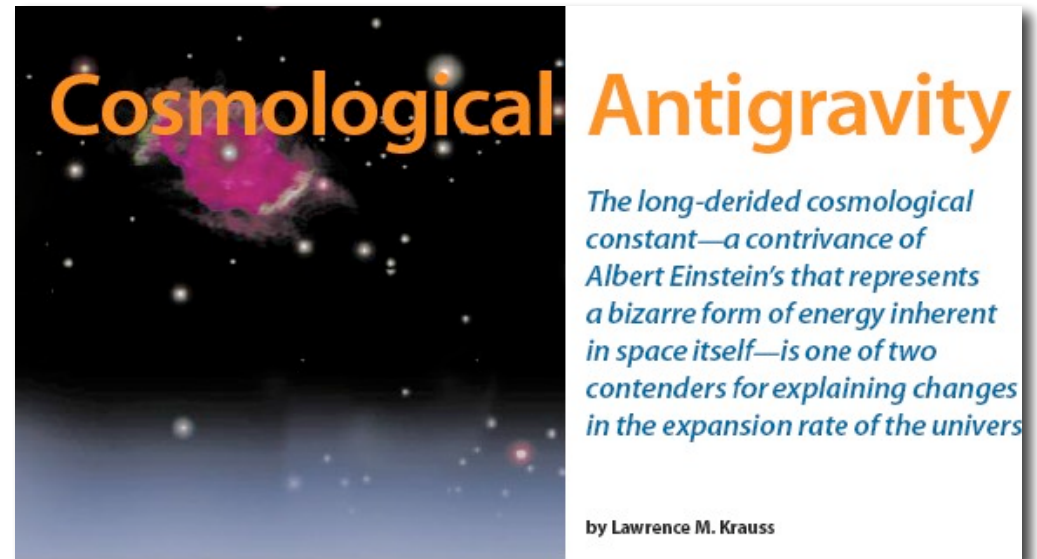


# Plan


- Motivations
- Matière vs. antimatière: C, P, et T
- “Particules trous noirs” Kerr-Newman (m, L, e)
  - renversement charge, masse, temps
- Un Univers symétrique: autant  $m > 0$  que  $m < 0$ 
  - Géométrie de Milne, avantages, caractéristiques
- Conséquences et contraintes expérimentales:
  - Structures, nucléosynthèse, supernovae SN1a, 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



**ADAM RIESS**



**Adventures in Antigravity**  
By Michael D. Lemonick

Hard as it is for earthlings to imagine, astronomers have known for some time that the universe is expanding. They've never been able to figure out, though, whether it will balloon outward forever or slow under the combined gravity of its 100 billion galaxies, stop and fall back in on itself. Thanks in large part to Adam Riess, they're a lot closer to an answer—and it's not what they expected.

Riess was only 25 when he joined a prestigious group of scientists who set out in 1995 to measure what was expected would be a post Big Bang cosmic slowdown. The idea was to compare the expansion rate today with the rate billions of years ago by gauging the speeds of exploding stars called supernovas—Riess's grad—school specialty. But in January 1998, Riess saw something weird: the number he was getting for the slowdown kept coming out negative. The universe wasn't slowing down; it was speeding up! "This seemed to imply," he says, "that some force is acting against gravity." Crazy as antigravity sounds, the idea was originally suggested by Einstein as a kind of add-on to his General Theory of Relativity.

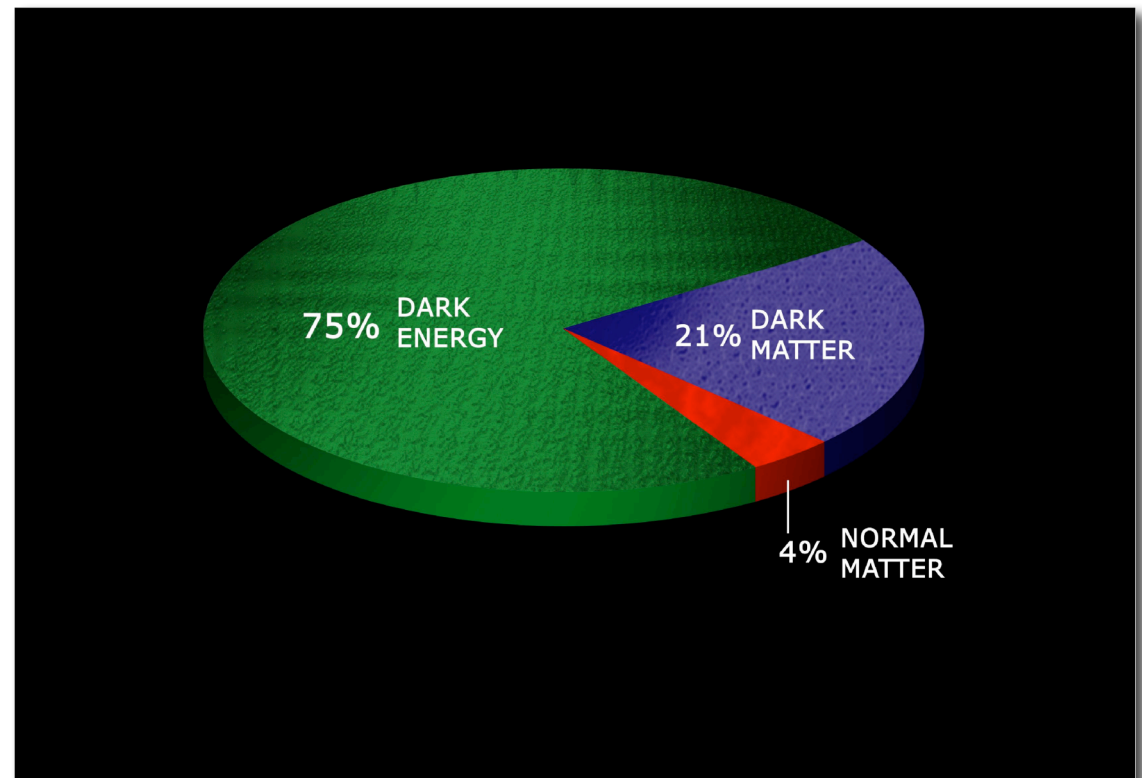
**His calculations show that the universe seems to be expanding ever faster, suggesting the existence of the antigravity force first proposed, then abandoned, by Einstein.**

1 | 2

# "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 ?

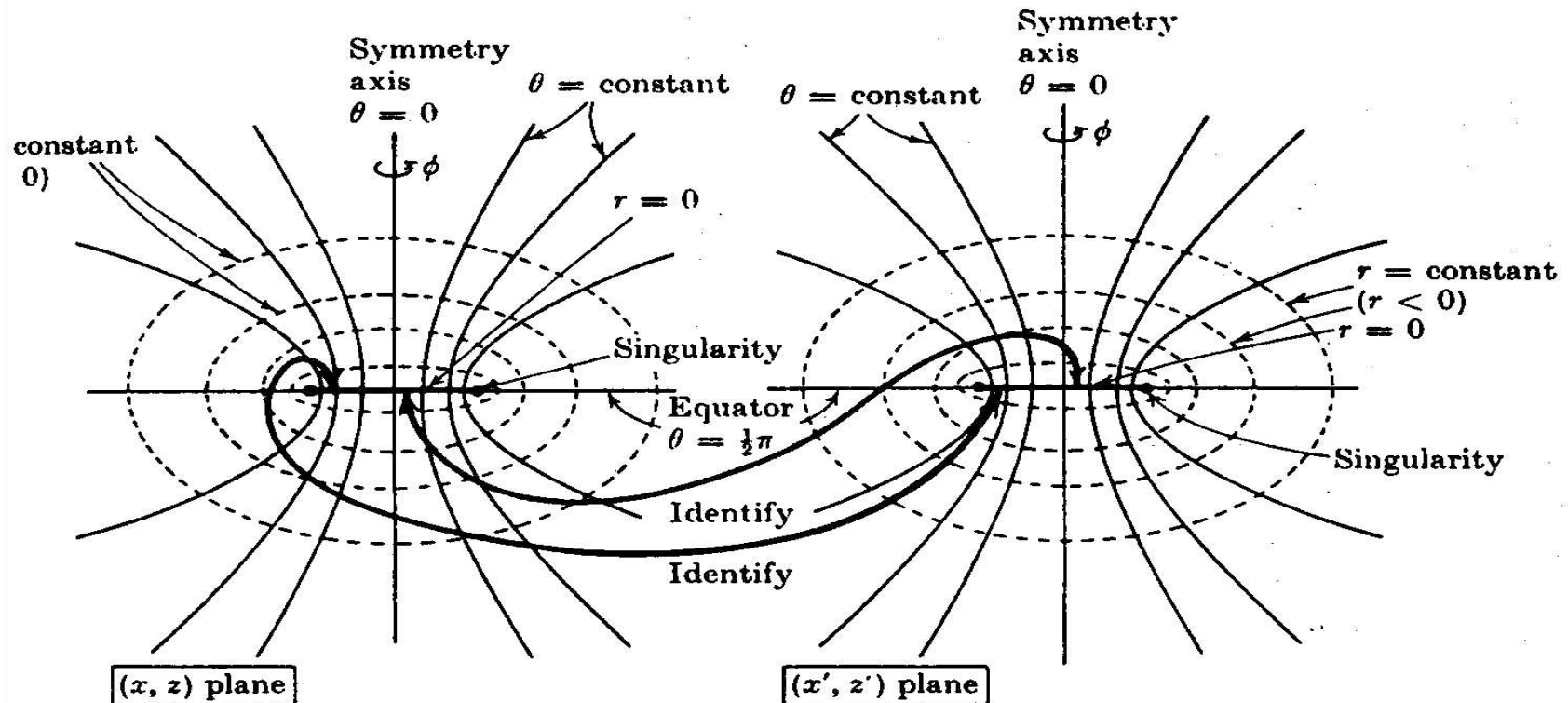


# Cosmological motivations

- « 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)

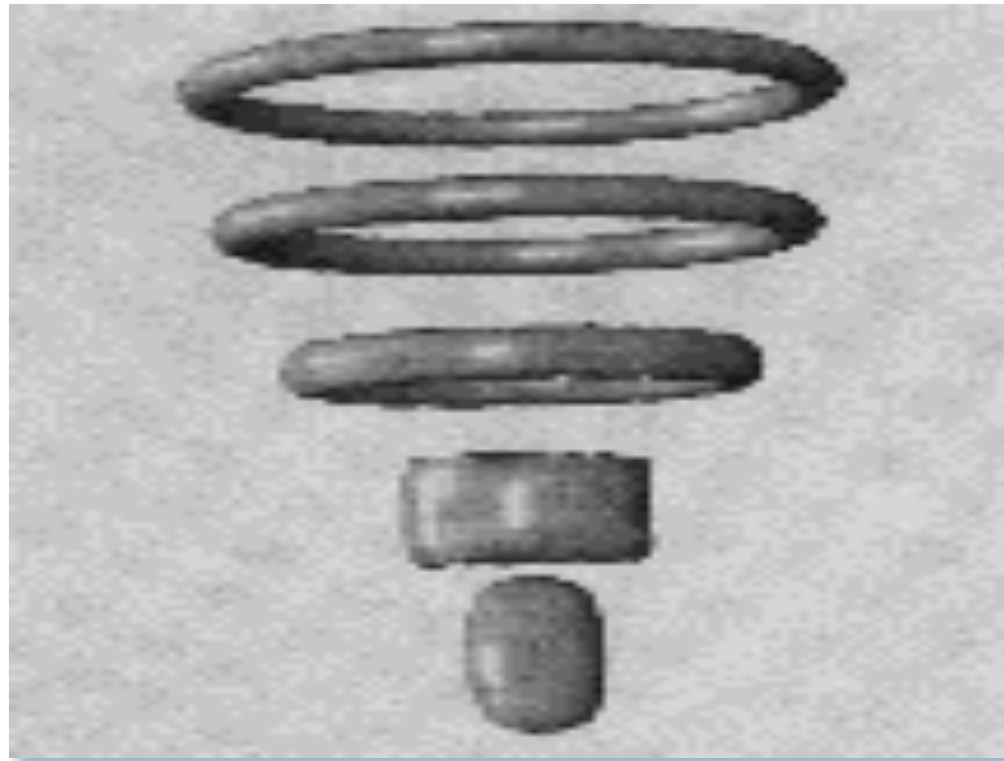
# Kerr geometry (angular momentum $a$ )



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

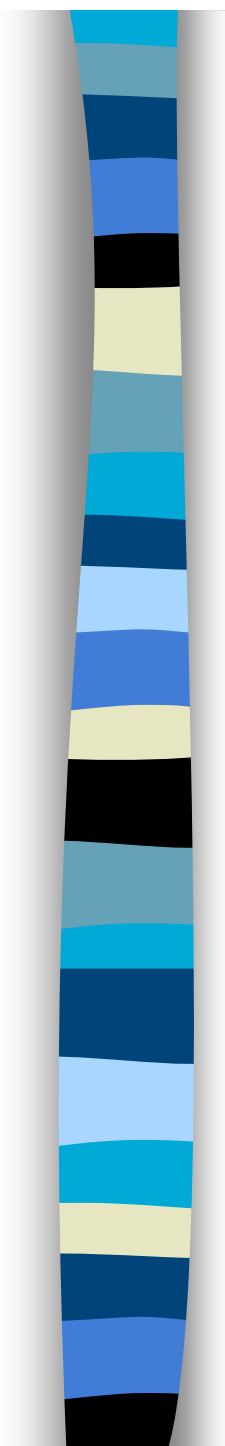
by identifying the top of the disc  $x^2 + y^2 < a^2$ ,  $z = 0$  in the  $(x, y, z)$  plane with the bottom of the corresponding disc in the  $(x', y', z')$  plane, and vice-versa.

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**





# Kerr-Newman geometry ( $m, a = L/m, \text{ charge } e \neq 0$ )

- Three-parameter family of geometries  $m, a$  and  $e$ :

Metric:

$$ds^2 = (r^2 + a^2 \cos^2 \theta) d\theta^2 - 2a \sin^2 \theta dr d\varphi + 2dr du +$$

$$\left[ (r^2 + a^2)^2 - (r^2 - 2mr + a^2 + e^2) a^2 \sin^2 \theta \right] \frac{\sin^2 \theta d\varphi^2}{(r^2 + a^2 \cos^2 \theta)}$$

$$- 2a(2mr - e^2) \sin^2 \theta d\varphi du / (r^2 + a^2 \cos^2 \theta)$$

$$- \left( 1 - \frac{(2mr - e^2)}{(r^2 + a^2 \cos^2 \theta)} \right) du^2$$

- No horizon for fast Kerr-Newman "black" holes  $e^2 + a^2 > m^2$
- Why fast Kerr? Because **all particles verify:  $e^2 + a^2 > m^2$**

# Kerr-Newman geometry (ff)

- Energy-momentum tensor:

$$F = \frac{2e}{(r^2 + a^2 \cos^2 \theta)^2} \begin{bmatrix} (r^2 + a^2 \cos^2 \theta) dr \wedge du \\ -2a^2 r \cos \theta \sin \theta d\theta \wedge du \\ -a \sin^2 \theta (r^2 - a^2 \cos^2 \theta) dr \wedge d\varphi \\ +2ar (r^2 + a^2) \cos \theta \sin \theta d\theta \wedge d\varphi \end{bmatrix}$$

- Invariance of both metric and energy-momentum tensor under the simultaneous reversal:  
 $(m, r, e) \leftrightarrow (-m, -r, -e)$
- Same topology as fast Kerr geometry
- Singularity "almost" invisible  
(initial conditions to reach singularity have zero measure)



# 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)**



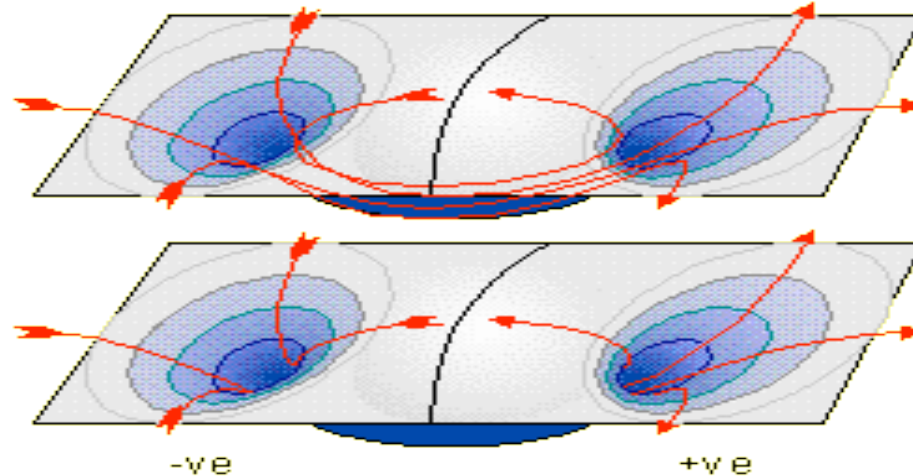
# A Kerr-Newman "electron"

- Consider a Kerr-Newman "black" hole with same quantum numbers as an electron:  $m$ ,  $e$ ,  $\hbar/2$
- Size of the Kerr ring:  $\hbar/2mc \approx 180$  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 » ?

# Note sur le renversement de la charge

- Dès 1957, Misner et Wheeler (avant la découverte de la géométrie de Kerr) avaient déjà réalisé qu'un wormhole, en piégeant les lignes de champ, devait apparaître comme une paire de particules de charge opposée et de même masse inertielle

**A Wormhole, threaded with flux-lines, can appear as a pair of oppositely-charged particles**





# Kerr-Newman et particules élémentaires

- Les particules élémentaires peuvent-elles être décrites par des structures annulaires de Kerr-Newman ?
- Géométrie sans horizon et avec singularité "visible" pour toutes les particules élémentaires (une exception de taille: Higgs scalaire neutre)
- Les particules ont une taille d'anneau de l'ordre de leur rayon de Compton (ordre de grandeur correct des sections efficaces)
- Rapport gyromagnétique de l'électron est automatiquement égal à celui de l'électron de Dirac (Carter 1968)
- Vortons comme solutions génériques (B. Carter et al.)



# 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

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



# 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  $a(t) = \text{Cte} \times t$

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

LAL Orsay, 13/11/2006



# Géométrie de Milne

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



# Géométrie de Milne

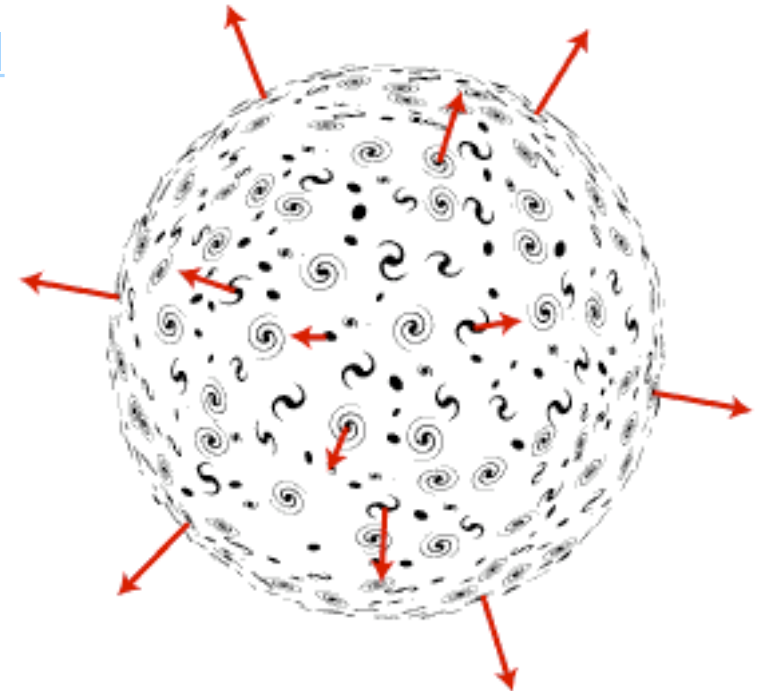
- $a(t) = Cte \times t$
- Âge de l'Univers

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

- Pour  $\Omega_{matter} = \Omega_\Lambda = 0$ , 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  $\Lambda$ -CDM, le problème d'âge est résolu
- Avec un univers plus naturel que  $\Lambda$ -CDM...

# Géométrie de Milne

- Structure causale très simple : pas d'horizon
- Site de Ned Wright  
[http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmo\\_01.htm](http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmo_01.htm)
- Site de Matt McIrvin  
<http://world.std.com/~mmcirvin/milne.html>





# 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 :

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

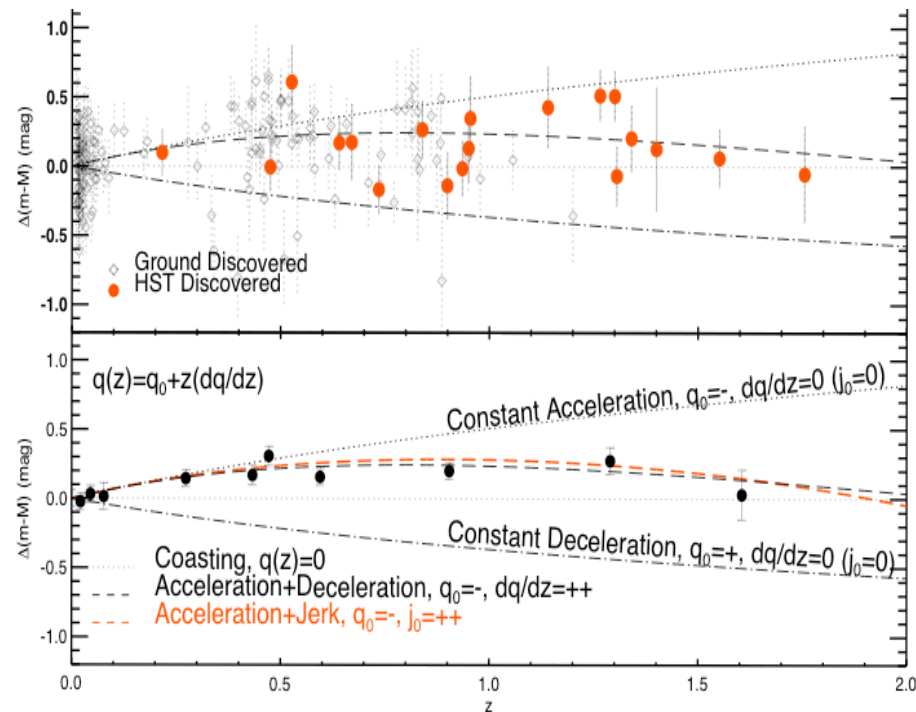
- Un univers symétrique matière-antimatière telle que défini ci-dessus vérifie en 1ère approximation  $\Omega \approx 0$

# Explication naturelle $\rho_\Lambda$

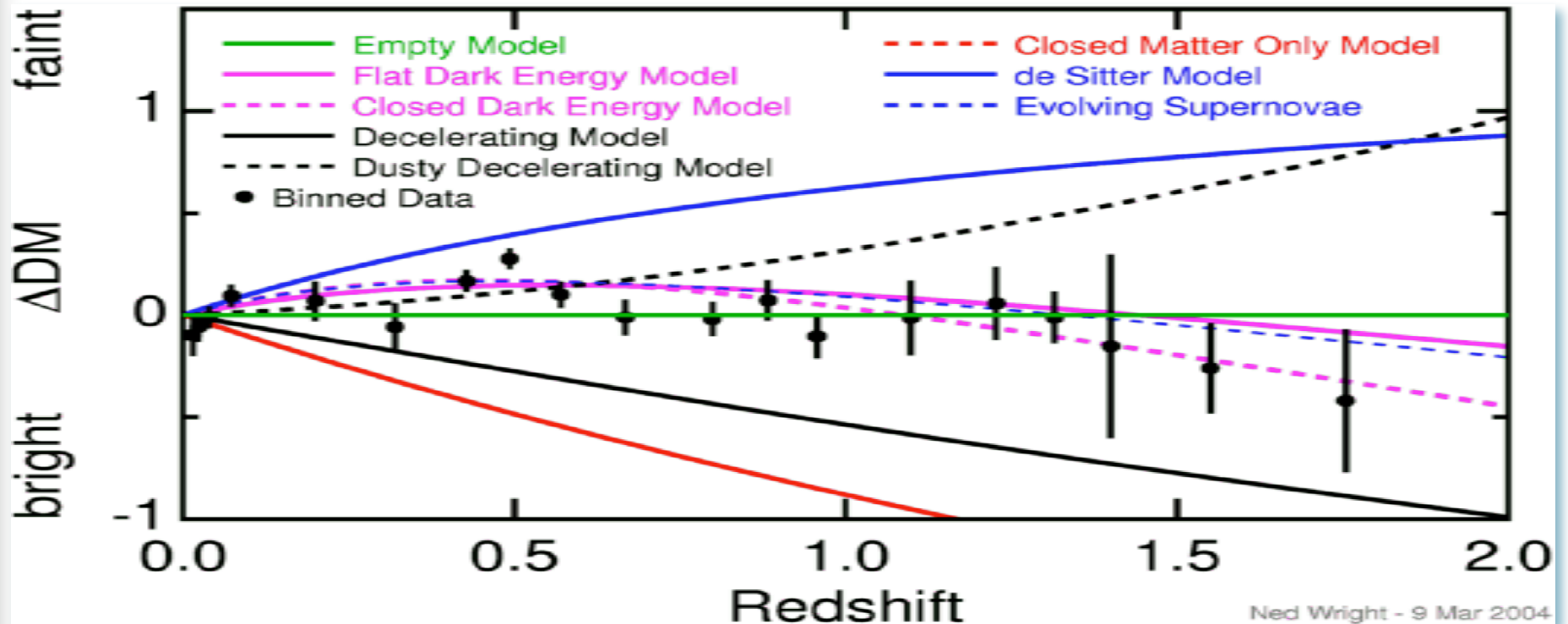
$\chi^2$  Comparison of Gold Set Data to Models

Model	$\chi^2$ (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

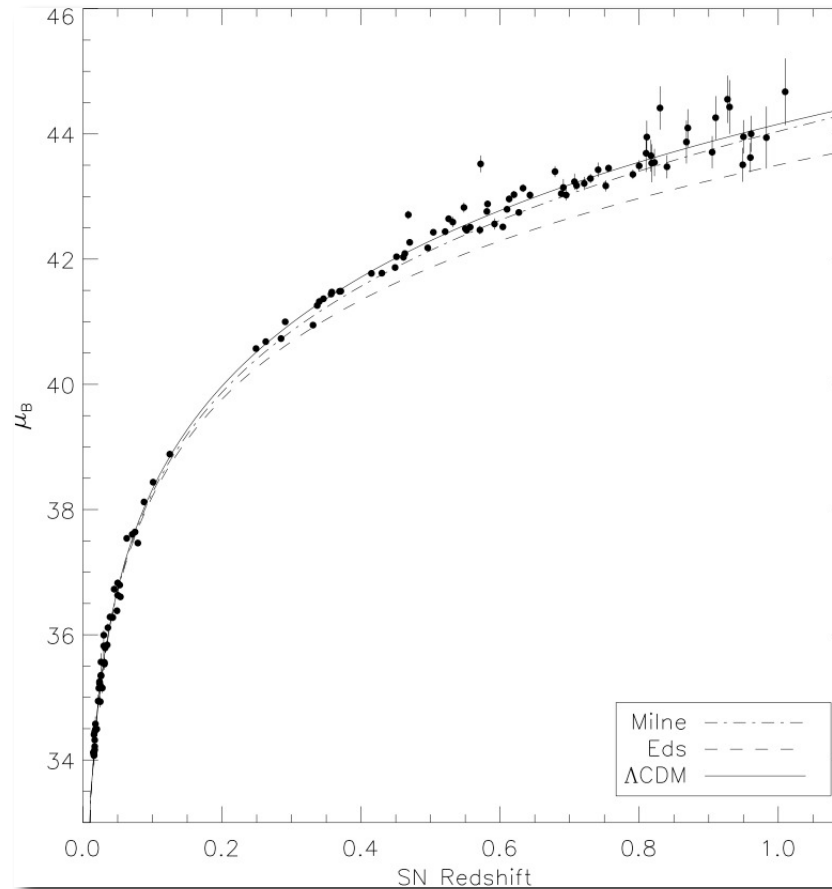


# Simple explanation for $\rho_{\Lambda} \approx 2 \rho_m$



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

# Do we live in an « empty universe » ?



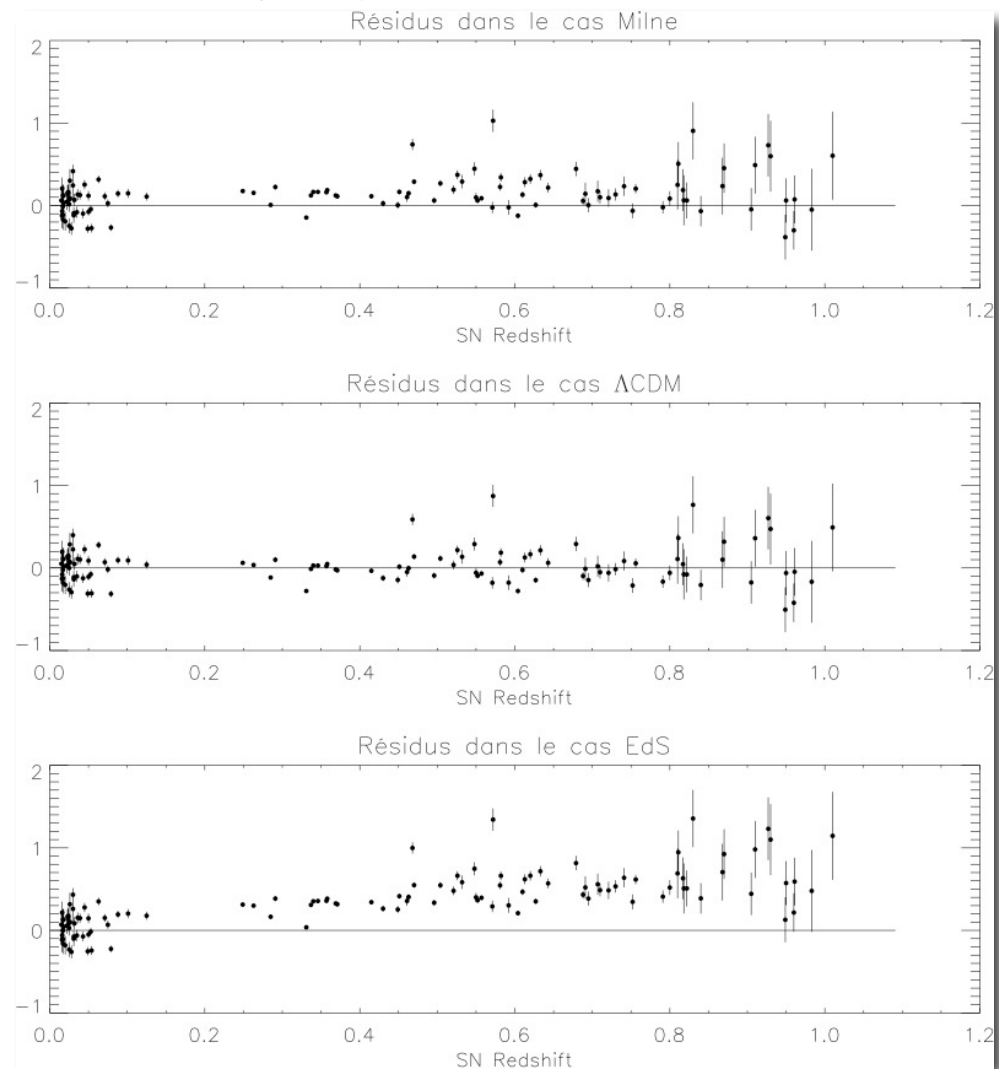
- SNLS data and fit to three cosmological hypothesis (Concordance, Einstein-de Sitter, Milne/empty)

LAL Orsay, 13/11/2006



# Do we live in an « empty universe » ?

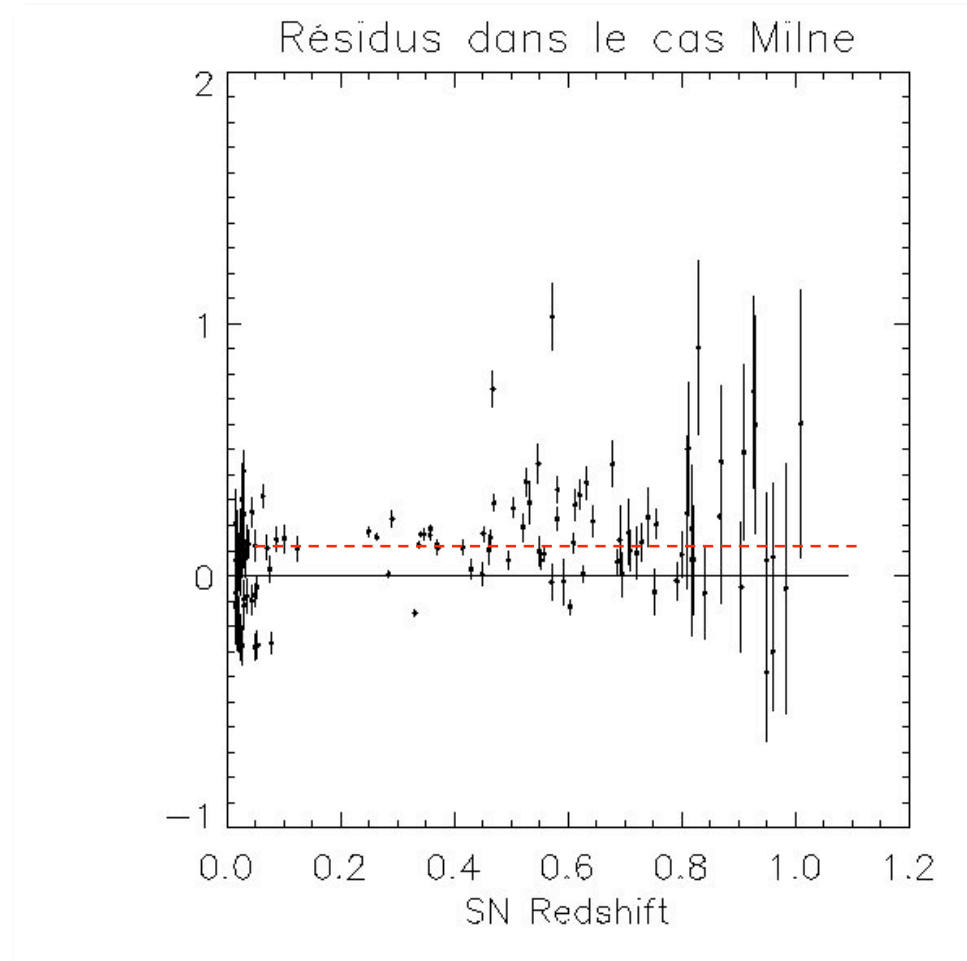
- Residual of SNLS data for (from top to bottom), statistical errors only :
  - Milne/empty Universe
  - $\Lambda$ CDM universe
  - Einstein-de Sitter universe



LAL Orsay, 13/11/2006

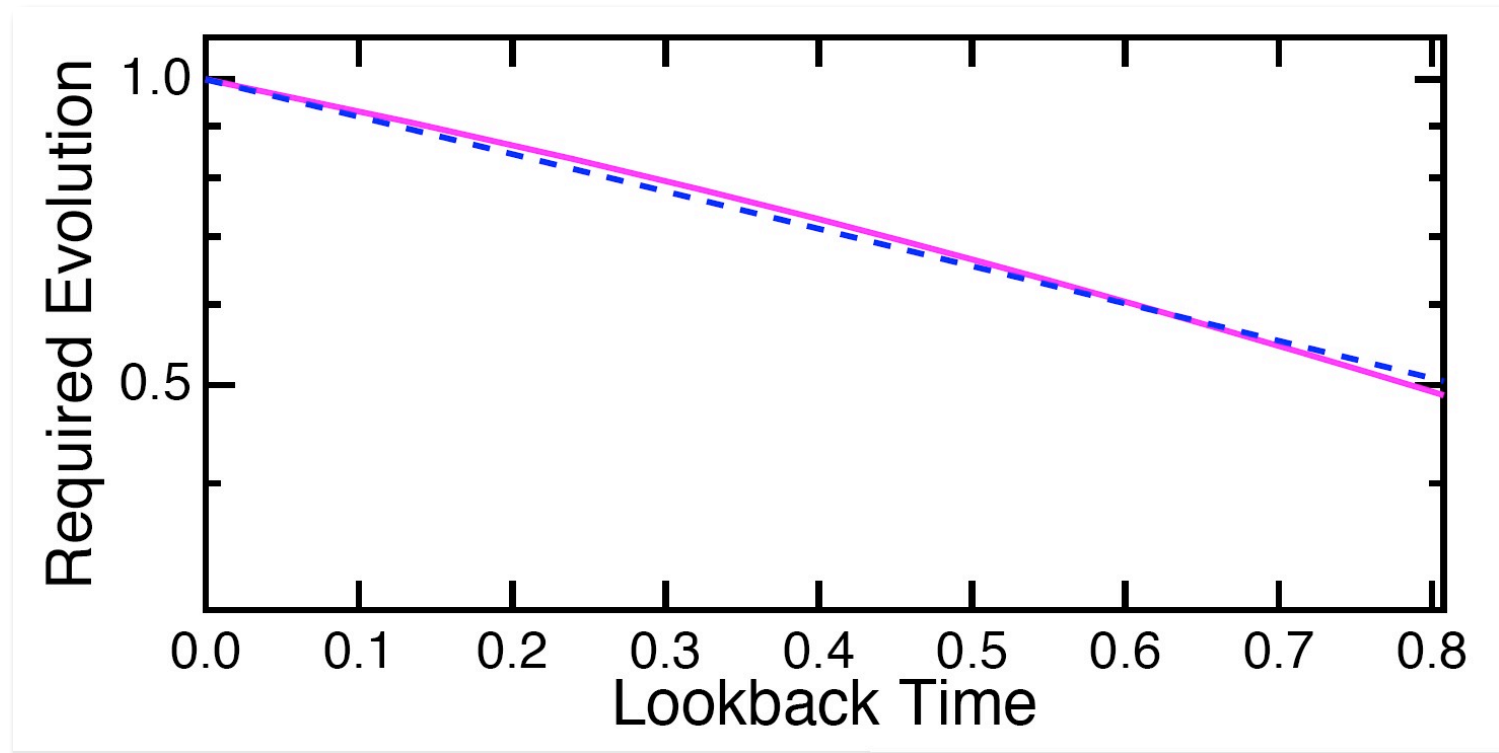
# Do we live in an « empty universe » ?

- Residual of SNLS data for Milne/empty Universe



LAL Orsay, 13/11/2006

# Do we live in an « empty universe » ?



- Another possible explanation: evolution effect on SN1a (model proposed by E. Wright astro-ph/0201196)



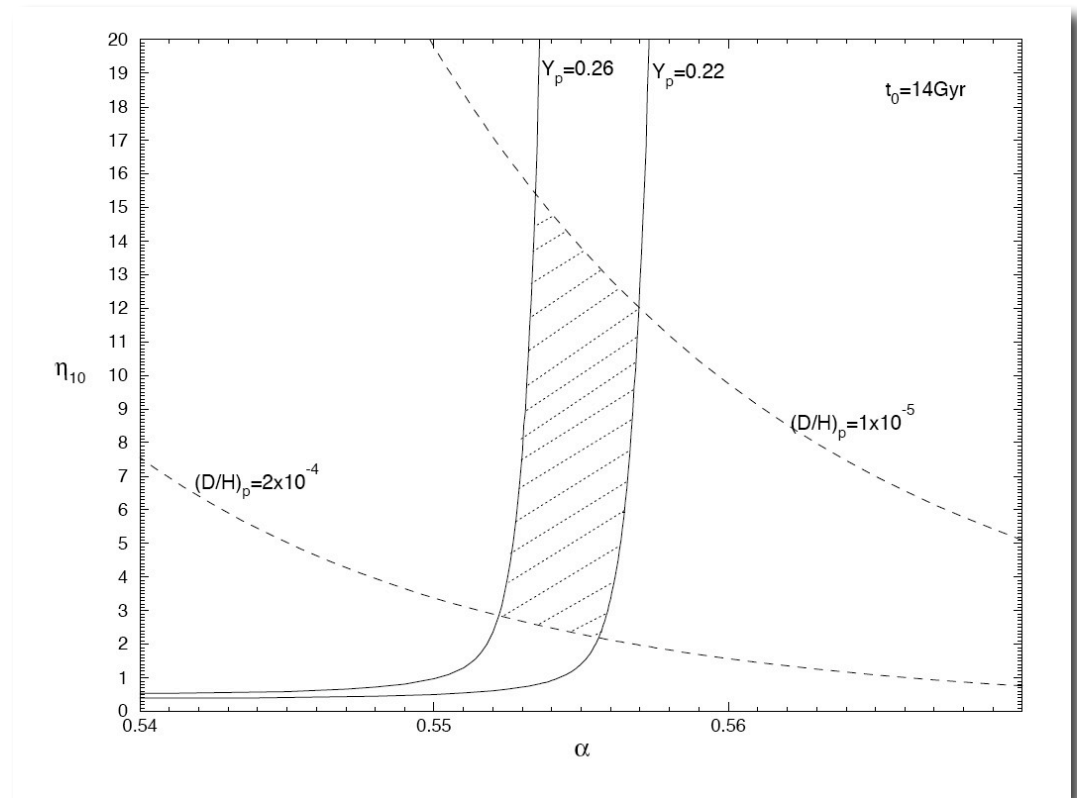
# Nucléosynthèse: un exemple illustratif

## ■ 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, conduit une valeur de He4 parfaitement en accord avec les données !
- $T = 100 \text{ keV}$ :  $\approx 100$  secondes dans cosmologie standard, mais 45 ans (!) dans cosmologie Milne

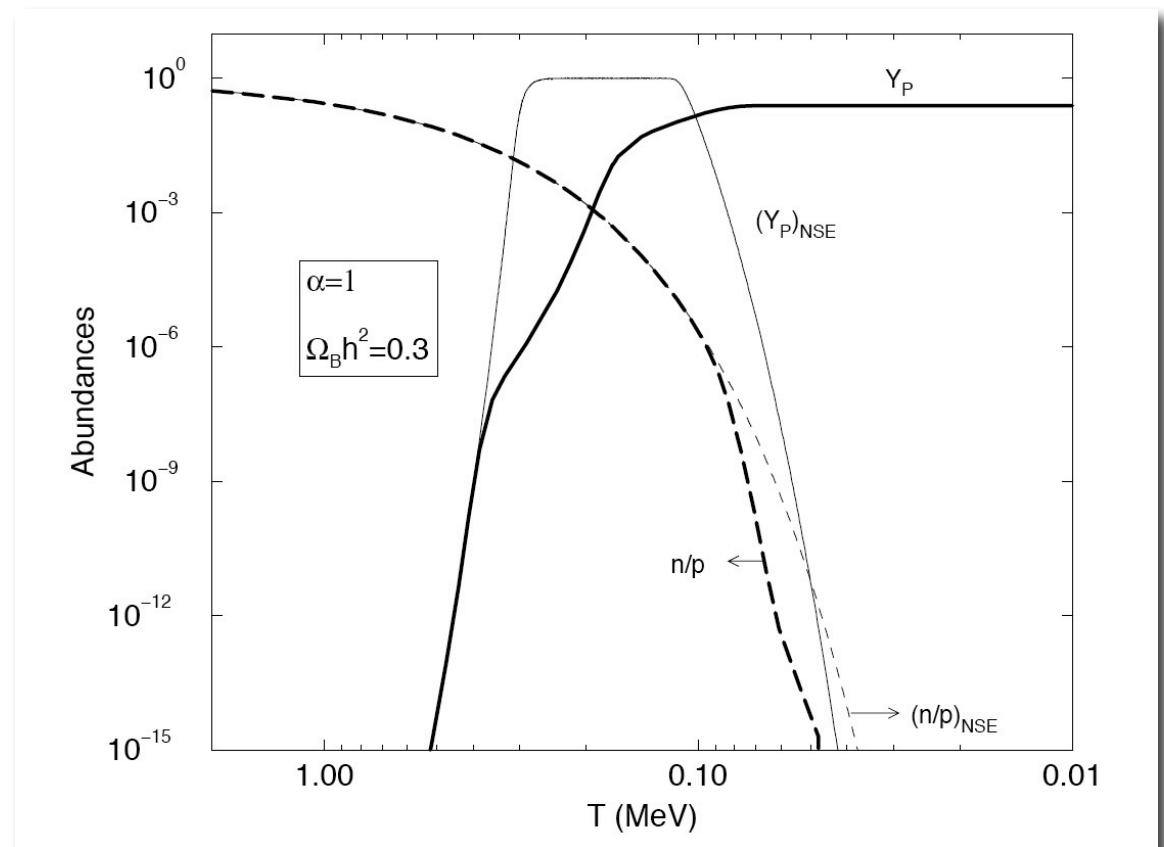
# Nucléosynthèse: un exemple illustratif

- 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  $^4\text{He}$  impose  $\alpha \approx 0.55$
- Conclusion incorrecte



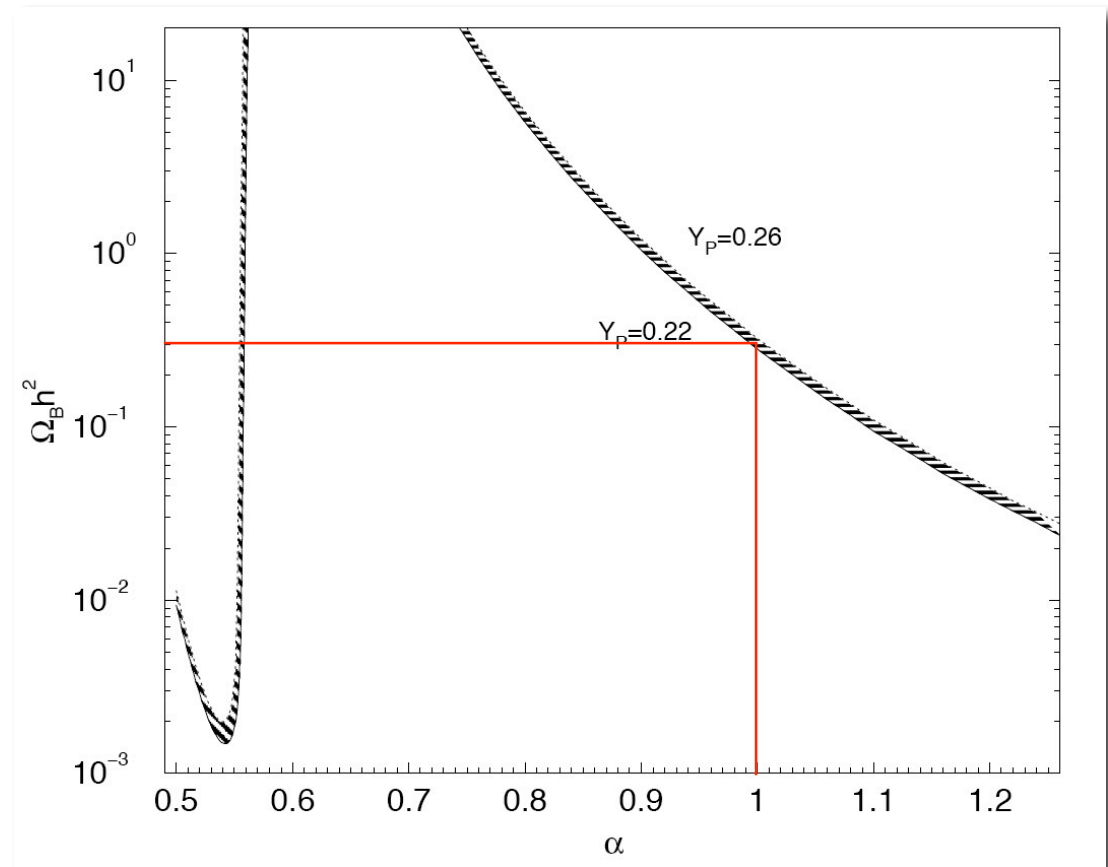
# Nucléosynthèse: un exemple illustratif

- 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  $\Omega_B h^2 \approx 0.3$





# Nucléosynthèse: un exemple illustratif

- Néanmoins plusieurs problèmes à résoudre
- Impliquerait valeur nettement plus élevée de  $\eta = n_B/n_{\text{gamma}}$  que dans cosmologie standard
- Dans cette très lente nucléosynthèse primordiale (“simmering” universe), le deutérium serait détruit très fortement (figure 5 de astro-ph/9911066)
- En contradiction avec données observationnelles ?
- Semble assez bien marcher par contre pour Li-7
- Valeur prédite He-3 plus faible que cosmo standard, mais valeur observée également plus faible
- J-J. Aly : annihilation entre domaines matière-antimatière va produire du deutérium (référence)





# Tests expérimentaux: 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
- Image d'une source de positronium refroidi:  
A.P. Mills, M. Leventhal, *NIM B* **192** (2002) 102
- Antihydrogène auprès du AD au CERN  
J. Walz et T.W. Hänsch, *Gen. Relat. and Grav.* **36** (2004) 561



# Conclusions

- La relativité générale présente des propriétés de **renversement de charge et du 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 « l'énergie noire »
- Permet peut-être une **explication sans paramètre libre de la valeur de la gravité répulsive** observée dans supernovae, CMB et grandes structures
- Contraintes multiples à tester : formation des structures, supernovae, fond diffus gamma (?), weak lensing, spectre CMB et position des pics (?)
- Encore au début de cette étude...

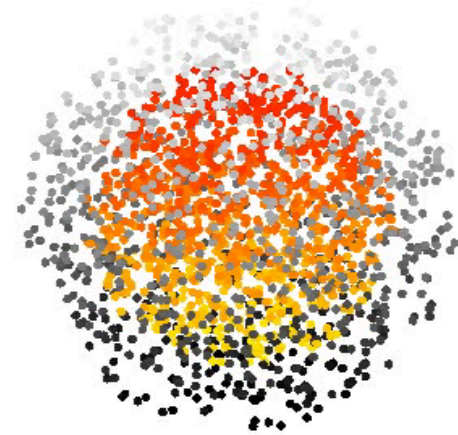
# Quelques simulations (stage M2 Jeremy Andrea)

- Sphère de densité uniforme négative



# Quelques simulations (stage M2 Jeremy Andrea)

- Sphère  $<0$  dans coquille  $>0$   
(masse totale nulle)



# Quelques simulations (stage M2 Jeremy Andrea)

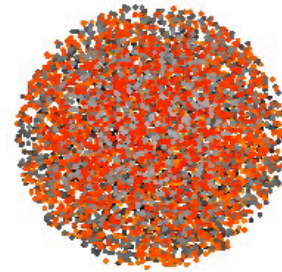
- Sphère  $>0$  dans coquille  $<0$ 
  - (masse totale nulle)



LAL Orsay, 13/11/2006

# Quelques simulations (stage M2 Jeremy Andrea)

- Sphère mélange homogène masses  $>0$  et masses  $< 0$



LAL Orsay, 13/11/2006

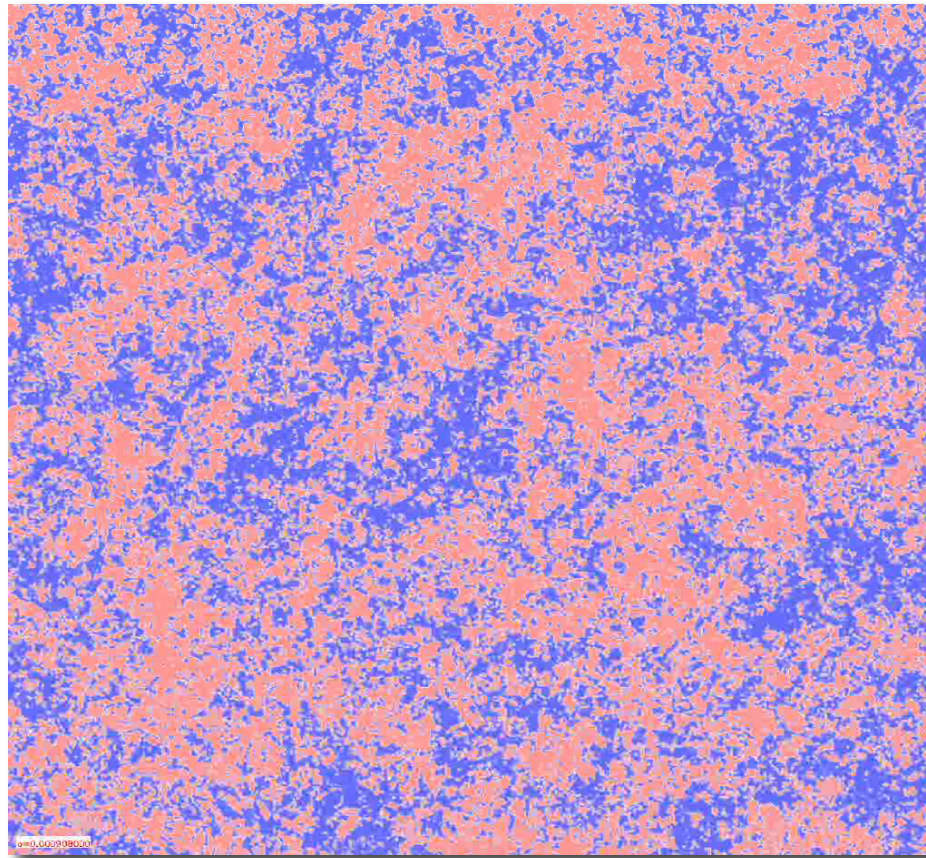


# Simulations cosmologiques

- Simulations réalisées au moyen du code RAMSES de Romain Teyssier et son groupe
- Instabilité de la cosmologie symétrique Milne semble très grande (trop grande, contraintes réionisation ?)
- Toutes ces simulations évidemment en coordonnées comobiles (on suit l'expansion)
- Annihilation **pas** prise en compte: modification importante du code RAMSES
- Idée que l'annihilation peut empêcher les masses négatives de retomber sur les masses positives, à tester par les simulations

# Simulations: quelques exemples

- Simulation cosmologique 2D 2048 x 2048 (masses + et -)

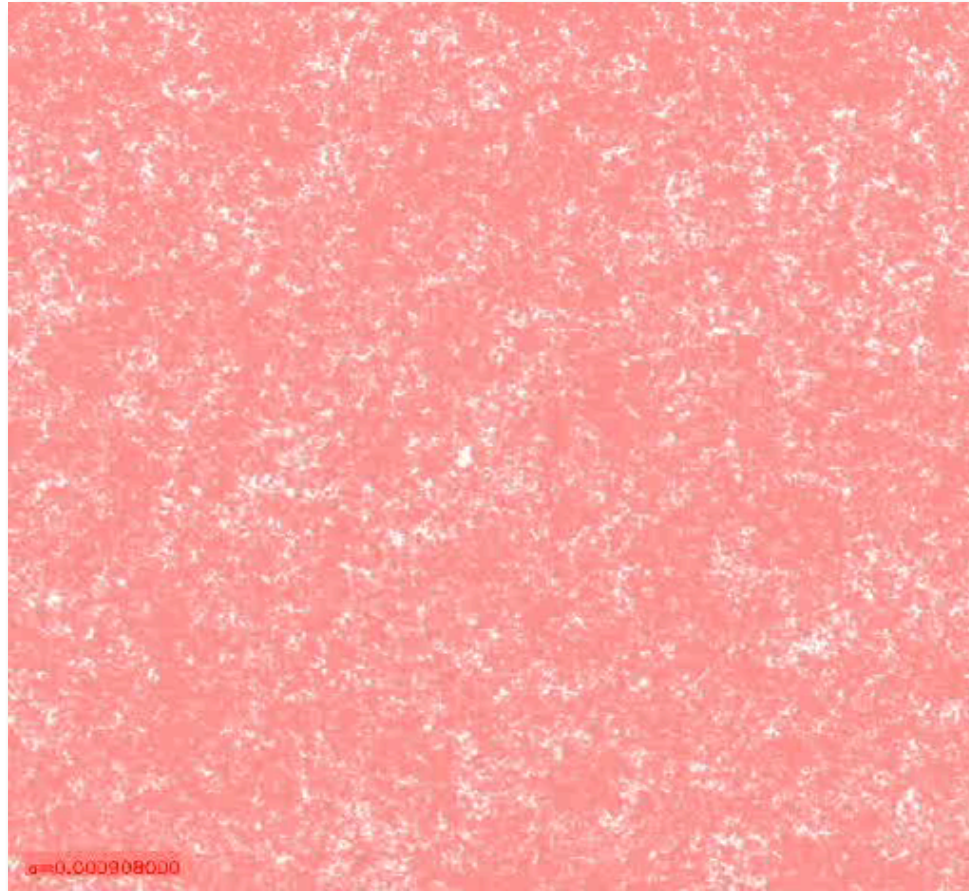


LAL Orsay, 13/11/2006



# Simulations: quelques exemples

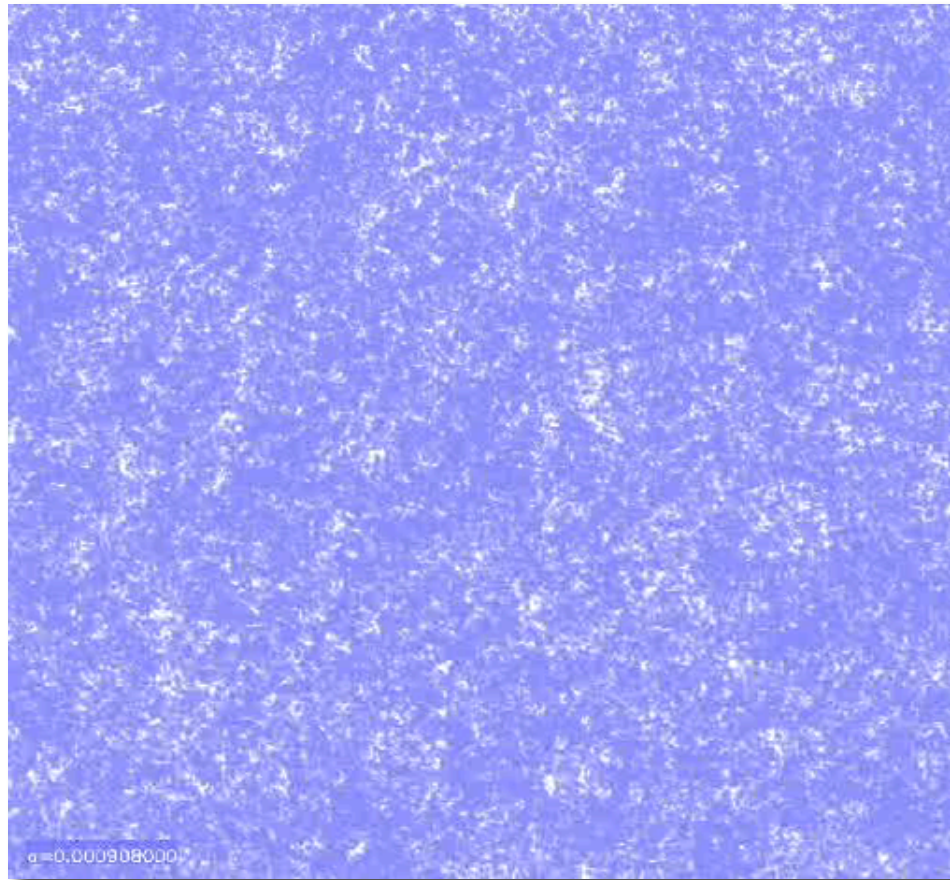
- Simulation cosmologique 2048 x 2048 (masses + seules)



LAL Orsay, 13/11/2006

# Simulations: quelques exemples

- Simulation cosmologique 2048 x 2048 (masses – seules)



LAL Orsay, 13/11/2006



# Simulations: comment aller au-delà ?

- Conditions initiales plus réalistes (domaines matière et antimatière déjà formés)
- Inclure hydrodynamique et annihilation (cf. étude de Cohen, de Rujula, Glashow (1997))
- Contraintes fond diffus gamma sans doute importantes si les domaines de masses  $< 0$  ne sont pas très froids
- Masses inertielles négatives: comment s'en débarrasser ? (réinterprétation à la Dirac ?)
- Etude de la phase de séparation matière-antimatière: J-J. Aly, J-L. Puget, R. Omnès, A. de Rujula



# Discussion critique (ff)

## Masses négatives

- Masse négative et respect du principe d'équivalence:  
H. Bondi, Rev. Mod. Phys. 29 (1957) 423
- Deux masses  $+m$  et  $-m$  : runaway solution
- Même problème dans la définition initiale de l'antimatière de Dirac
- Réinterprétation des masses négatives, quantification
- Quelle solution ici ?



# Discussion critique (ff)

## Stabilité des solutions

- température de Hawking  $\neq 0$  (Bekenstein-Hawking) dans le cas de trou noir de Kerr lent
- cas intermédiaire Kerr extrême (cas limite d'existence d'un horizon)  
 $a^2 + e^2 = m^2$  :  $T = 0$  stable
- Trou noir rapide ( $a^2 + e^2 > m^2$ ), pas d'émission thermique (?), mais instabilité attendue en raison du sous-espace défini par  $mr < 0$



# Discussion critique (ff)

## Cosmic censorship

- « Until the early 1990s, it was widely believed that general relativity hides every singularity behind an event horizon, making naked singularities impossible. This is referred to as the cosmic censorship principle. However, in 1991 Shapiro and Teukolsky performed computer simulations of a rotating plane of dust which indicated that general relativity allows for naked singularities. »
- Is this a problem anyway ? Solutions more realistic than Schwarzschild (Kerr, Kerr-Newman) have nearly invisible singularities.



# Closed Timelike Curves (CTCs) et causalité ?

- En contradiction avec l'intuition, l'existence de CTCs ne conduit pas à des paradoxes causaux :  
F. Echeverria, G. Klinkhammer et K.S. Thorne, *Phys. Rev. D* **44** (1991) 1077
- Le problème de Cauchy reste bien posé même dans des régions avec CTCs :  
J. Friedman et al., *Phys. Rev. D* **42** (1990) 1915
- L'existence de CTCs semble conduire à une indétermination et une infinité de solutions (comme la Mécanique Quantique) plutôt qu'à des paradoxes et une absence de solutions



# Quelques références

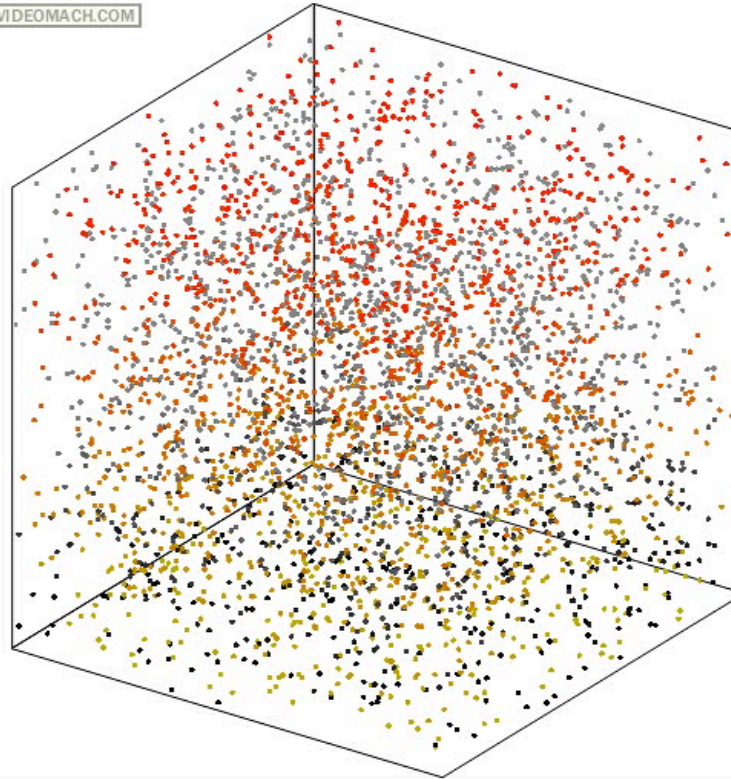
- B. Carter, *Phys. Rev.* 141 (1966) 1242
- B. Carter, *Phys. Rev.* 174 (1968) 1559
- G. Chardin et J-M. Rax, *Phys. Lett.* B282 (1992) 256.
- G. Chardin, *Hyperfine Interactions* 109 (1997) 83
- G. Chardin, *AIP Conf. Proc.* 643 (2002) 385
- H.I. Arcos and J.G. Pereira, hep-th/0210103
- B. O'Neill, "The geometry of Kerr black holes", (A. K. Peters, Wellesley, Massachusetts, 1995)
- Matt Visser, "*Lorentzian wormholes: From Einstein to Hawking*", (Springer, New York, 1995), notamment chapitre 7



# Quelques simulations (stage M2 Jeremy Andrea)

- Univers torique (cube refermé sur lui-même aux bords) mélange  $m > 0$  et  $< 0$

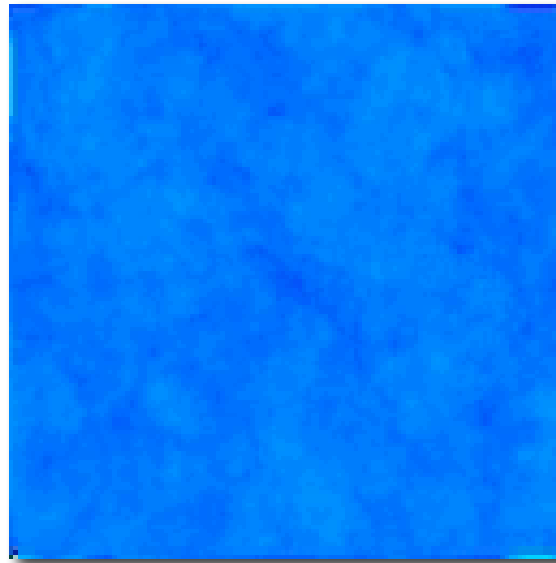
VIDEOMACH.COM



LAL Orsay, 13/11/2006

# Quelques simulations (stage M2 Jeremy Andrea)

- Univers torique (cube refermé sur lui-même aux bords)  
mélange  $m > 0$  et  $< 0$  sans expansion, code Ramses de R.  
Teyssier (DAPNIA/SAP)



# Quelques simulations (stage M2 Jeremy Andrea)

- Univers torique (cube refermé sur lui-même aux bords)  
mélange  $m > 0$  et  $< 0$  avec expansion, code Ramses de R.  
Teyssier (DAPNIA/SAP)

