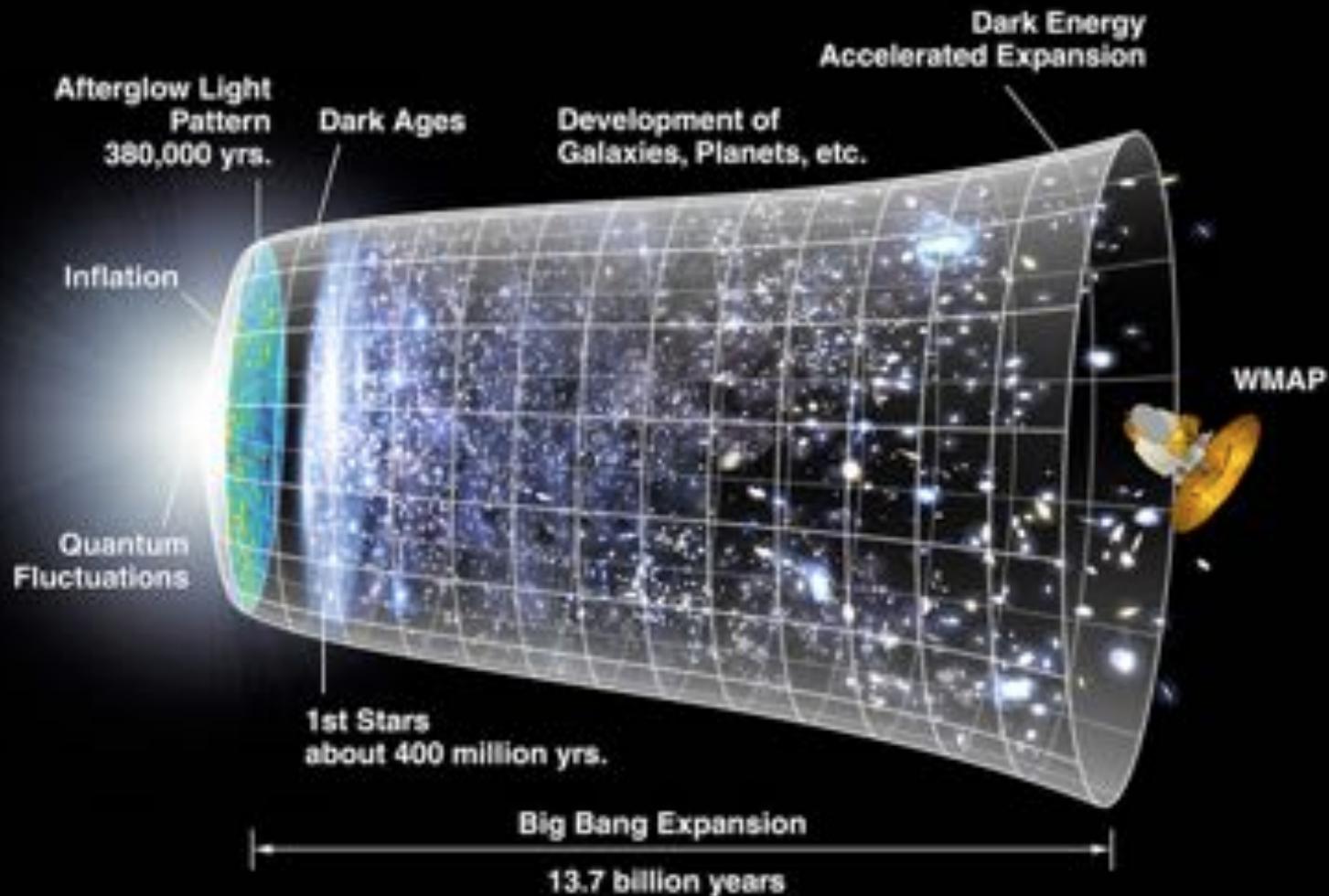


L'Univers de Dirac-Milne

Un univers symétrique matière-antimatière

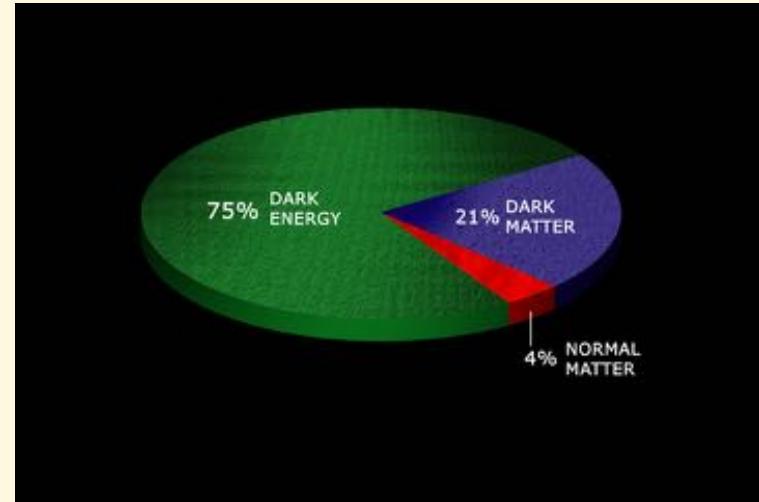
Gabriel Chardin
CNRS, Paris Michel-Ange

Le modèle de concordance de la cosmologie



Marche bien, mais peu naturel. Alternative ?

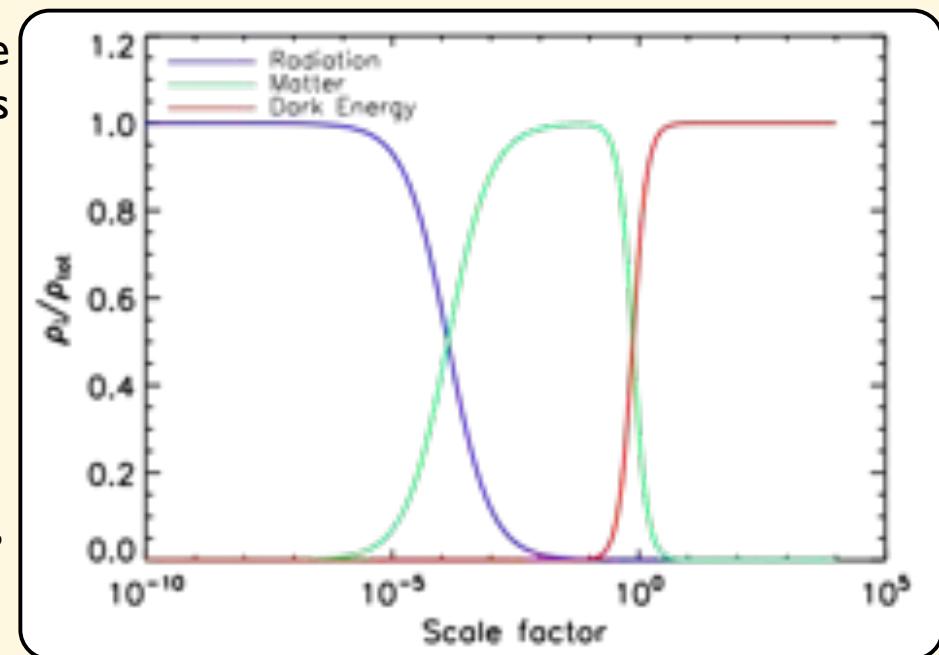
- La composition de l'Univers que semble indiquer le Modèle de Concordance est très surprenante: **moins de 5% de sa composition correspond à la matière ordinaire!**
- Le rayonnement, la matière et une mystérieuse Energie Noire sont successivement (très) dominants, chacun à leur tour : **très peu naturel** (“fine tuning”)



Avant d'accepter un univers aussi étrange, il semble nécessaire de considérer des cosmologies alternatives et si possible moins arbitraires

L'univers de Dirac-Milne: **un espace-temps plat sans Matière Noire ni Energie Noire**

- Présentation et motivations
- Confrontation aux observations cosmologiques, de plus en plus précises:
 - Supernovae de Type Ia
 - La nucléosynthèse (fabrication éléments)
 - Le fond diffus cosmologique (CMB)



Où est passée l'antimatière ?



Photo CERN

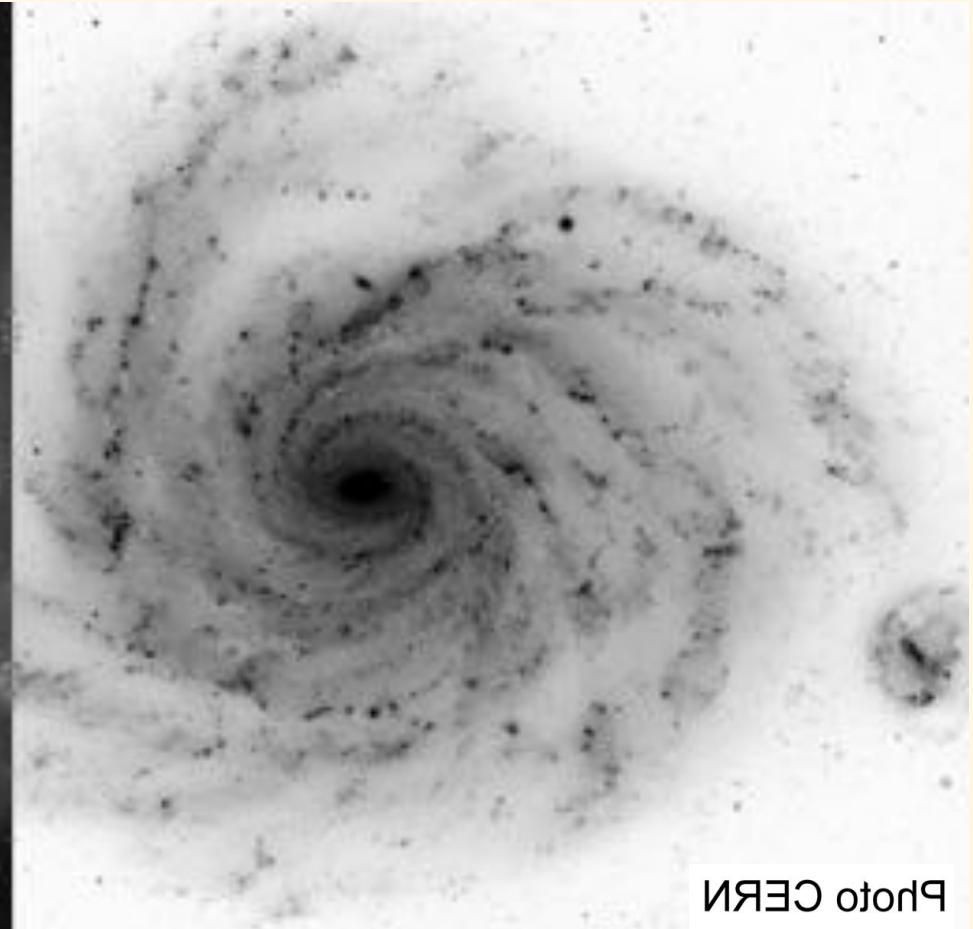


Photo CERN

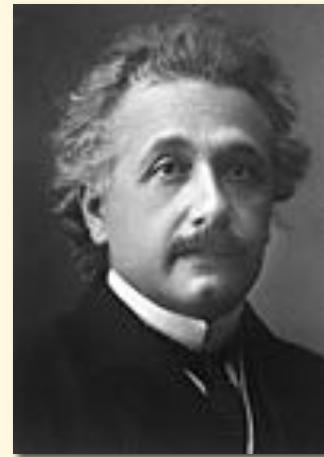
Petite histoire de l'antimatière



Maxwell

Électromagnétisme

électron



1905 : Einstein

Relativité restreinte

relativiste



1926 : Schrödinger

Mécanique Quantique

avec spin



1929 : Dirac

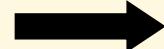
Problème...

L'équation de Dirac a 2 solutions !

L'une d'énergie positive, l'autre d'énergie négative

Que représente la deuxième solution ?

- Rien ?
- Électron d'énergie négative ...
- Une particule de charge +1 ???
- Le proton ? Mais sa masse est 2000 fois plus grande. Weyl : $m^+ = m^-$



Dirac invente
l'antiélectron
en 1930



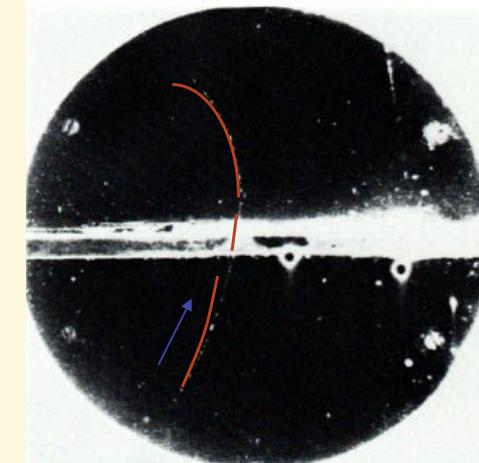
électron



positron



1932 : Anderson découvre le positron
dans les rayons cosmiques



Plomb

Cosmologies matière-antimatière

**Etudiées dans les années 1960 par groupe
Roland Omnès, étude reprise circa 1990
par de Rujula, Glashow, Cohen**

**Etude de poches d'antimatière dans
nucléosynthèse inhomogène ≈1975 - 1995**

- Hypothèse de symétrie matière-antimatière jugée impossible car...
- Distorsion du CMB (mais dépend de la taille des domaines)
- Mais surtout, flux gamma d'annihilation quand l'univers devient transparent : contrainte taille de domaines supérieure à quelques gigaparsec
- Sauf si ... la gravitation polarise le milieu matière-antimatière
- En principe impossible, si le principe d'équivalence est respecté

Hypothèses de l'univers de Dirac-Milne

- Symétrique matière-antimatière ; l'antimatière a une masse gravitationnelle active négative
- Systèmes physiques analogues : électrons et trous dans un semi-conducteur,
 - « bulle-électron » dans l'hélium superfluide
(les trous antigravitent et personne ne s'en inquiète...)
- Pas d'inflation : l'univers est extrêmement homogène à haute température $T > 170$ MeV.
Croissance d'une émulsion matière-antimatière en dessous de cette température
- L'univers ne décélère ni n'accélère : il est « coasting ». Facteur d'échelle $a(t)$:

$$a(t) \propto t$$

$a(t) = t$ et $k = -1$ dans la métrique FRW

Implique **espace-temps plat** et **espace ouvert**.

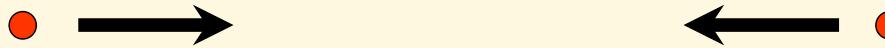
À comparer avec hypothèse habituelle **espace plat**.



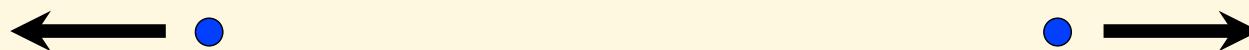
L'univers de Dirac-Milne est le deuxième univers « naturel »

Negative mass in GTR (Bondi)

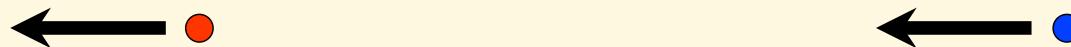
Two positive masses attract each other



Two negative masses repulse each other



One positive mass and one negative mass : runaway



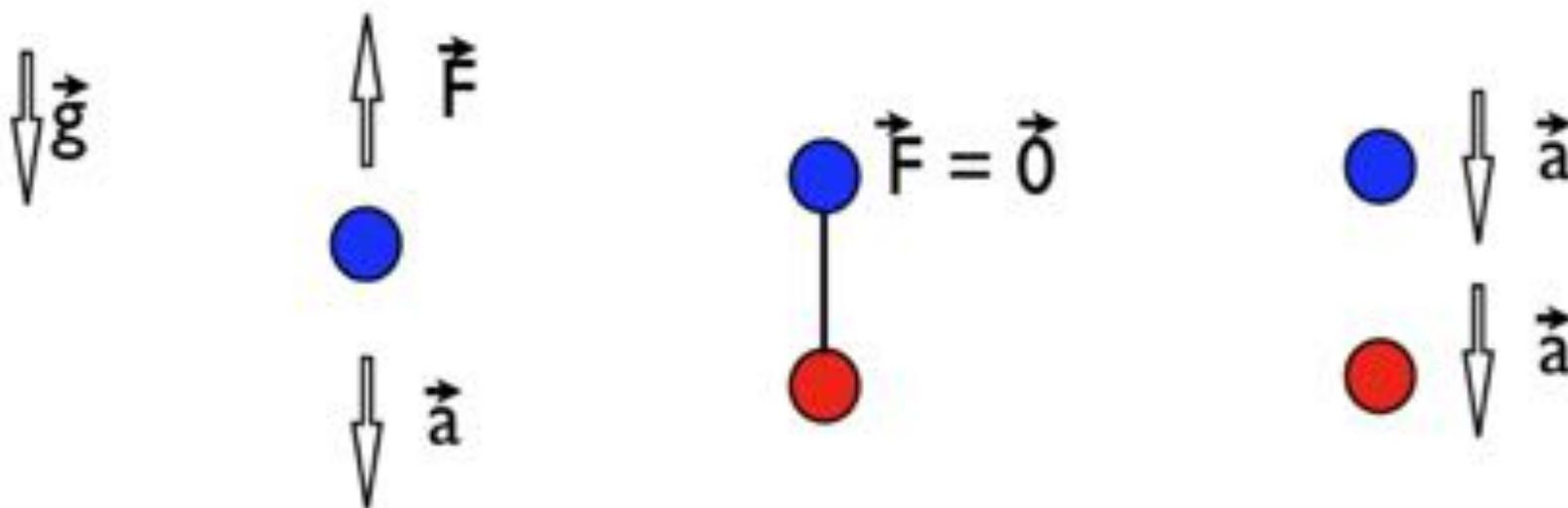
- Positive mass particle
- Negative mass particle

Système lié +m -m

A Bondi mass in Earth gravitational field

Positive and negative mass, linked by a string

Cut the string:
Both particles fall



R. Price, Am. J. Phys. 61 (1993) 216.

Un système lié +m -m lévite, se polarise et viole en ce sens le principe d'équivalence...

Particules trous de ver : Kerr-Newman

- A spinning black hole has a ring-like singularity : connects two spacetimes with opposite mass and opposite charge : matter-antimatter symmetry
- Symmetry in Kerr-Newman geometry under space, mass and charge reversal.
Two CP conjugate spaces connected by the ring
Elementary particles as “black holes”
B. Carter 1966&68, G. Chardin 1996, Arcos & Pereira 2004
- SNIa observations reveals effective repulsive gravity which is still unexplained



In the following, antimatter gravitational mass is supposed to be negative.
We also suppose gravitational repulsion between matter and antimatter.
Analog situations in condensed matter: electrons and holes in gravitational field

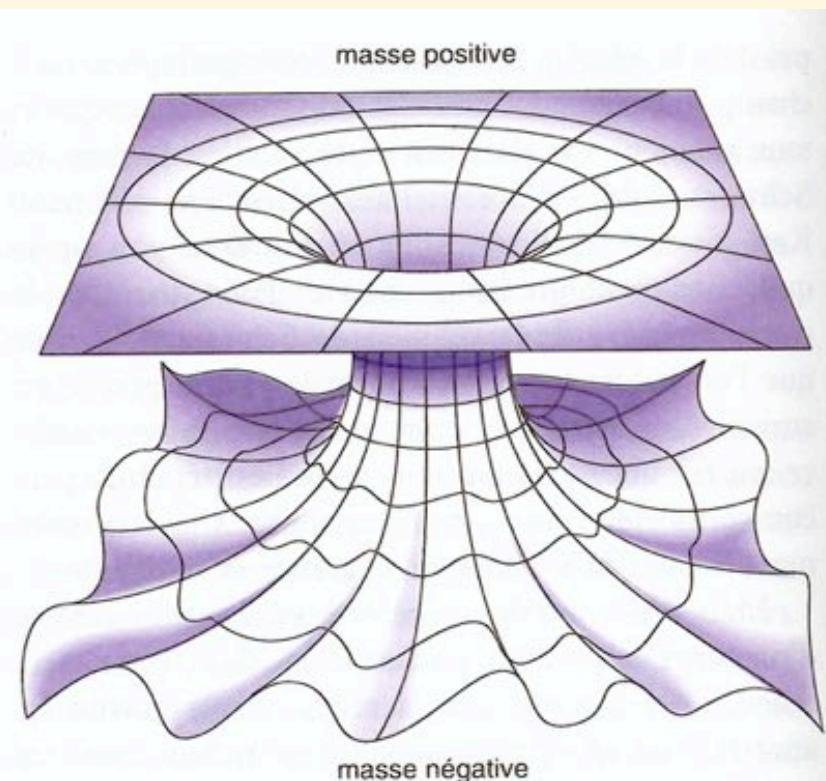
Des trous « noirs » qui ressemblent fort à des particules

- Quand un objet s'effondre en un trou noir en ayant un mouvement de rotation, il prend une forme annulaire, et non pas ponctuelle comme on pourrait le supposer.
- Que se passe-t-il quand on traverse l'anneau ?



Des trous de ver qui ressemblent fort à des particules

- Quand on traverse l'anneau d'un trou « noir » chargé, sa **charge change de signe**
- La **masse gravitationnelle change également de signe**
- Un **électron** apparaît de l'autre côté de l'anneau comme un **positron** gravitationnellement **réciprocif** !
- Mais a-t-on déjà vu de la **gravité répulsive** ?



La géométrie de Kerr.

Cette représentation (très simplifiée) d'un trou noir en rotation, ou trou noir de Kerr, permet de voir les deux parties de l'espace, l'une représentée dans le haut

de la figure où la gravitation est attractive, l'autre, représentée au bas de la figure, où la gravitation est répulsive. Les deux espaces sont reliés par une sorte de tunnel que l'on appelle un « trou de ver ».



ENERGY CONDITIONS AND NEGATIVE MASS



- P. Morrison (1958)
- S. Hawking, H. Bondi, F. Hoyle (1965)
- Tension on age of Universe ≈ 1995 : cosmological constant
- SNIa Perlmutter, Riess and B. Schmidt 1998 : experimental demonstration of cosmological constant
- Matt Visser : counterexamples to essentially all expressions of energy conditions theorems
- Cosmological constant : $P < 0$ and $\rho = -P \Rightarrow \rho + 3P < 0$
- Paranjape et al. : negative mass « bubble » in de Sitter spacetime without violating energy conditions
- Electrons and holes as solid state analog : Dirac-Milne cosmology

“antigravity”, a crazy idea ?

- **Le génie de Newton a consisté à dire que la lune tombe alors que tout le monde voit bien qu'elle ne tombe pas. Paul Valéry**
- **One has to be an Einstein to notice that the Moon is not falling, when everyone sees that it falls. John Archibald Wheeler**
- **Réexpression du principe d'équivalence (PE), évidemment violé si exprimé comme : « universalité de la chute des corps dans un champ de gravitation »**
- **Ré-expression du PE inspirée des simulations cosmologiques**

Classical examples of “antigravity”

- Analogy with solid state physics : electron-hole pairs, reminiscent of Dirac sea...
- Superfluid helium as a medium (static/Earth)
- Place an electron in this medium : vacuum bubble → negative mass relative to He background medium
- Motion of this pseudoparticle : accelerates upwards with (nearly) perfect acceleration $+2g$
- Electrons ($+g$) and holes ($-g$) in a semiconductor as model
- Voids in large-scale structures seen as negative density with respect to background density (Dubinski et al. 93, Piran 97).

Summary of cosmological tests

- Age of universe : excellent
- Supernovae SNIa : Dirac-Milne extremely close to Λ -CDM
- Nucleosynthesis : ≈ 30 years instead of 3 minutes !
Despite this, Helium and Li-7 OK
- Deuterium and He-3 produced by matter-antimatter annihilation,
not by thermal nucleosynthesis.
He-3 **overproduced** compared to standard model (pb ?)
- CMB : geometry violently different, but sound in matter-antimatter universe is ≈ 1 degree, as observed
- Structure formation : violently different from Λ -CDM
- BAO : different mechanism, **non linear, evolving with time**

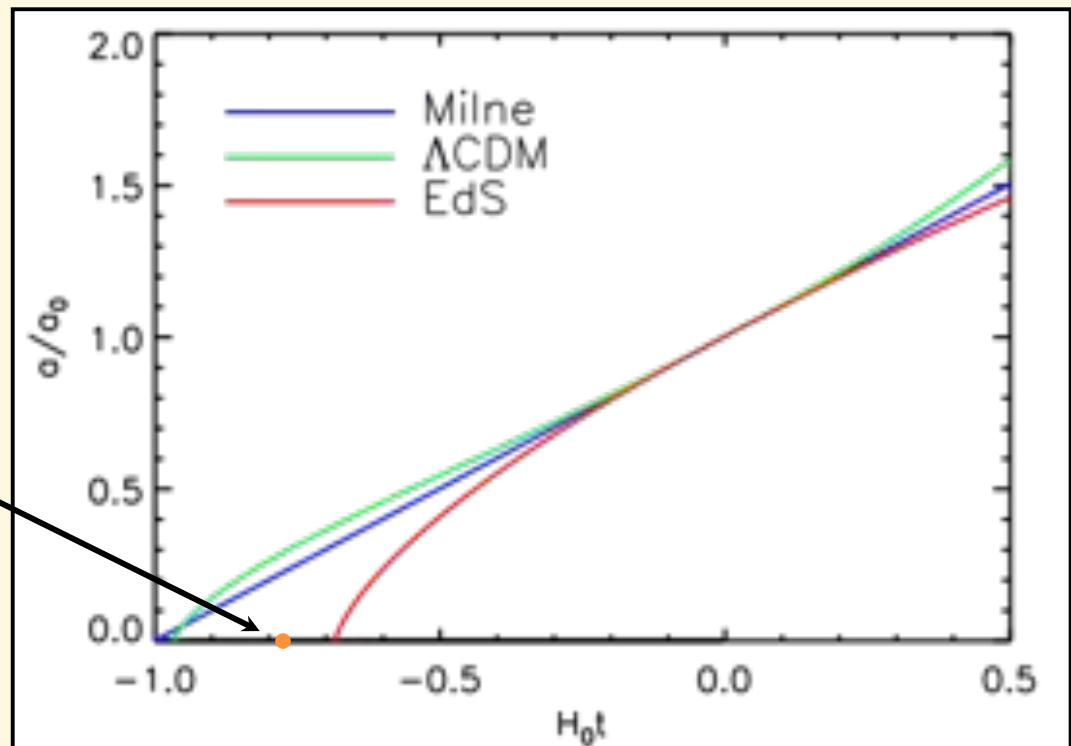
Age of the Dirac-Milne Universe

- As radial coordinate of a z redshift object: $\chi(z) \xrightarrow{z \rightarrow +\infty} +\infty$, a Universe with linear scale
- factor has **no horizon**. There is no need for inflation.
- Age of the Milne Universe is almost exactly the same as the age of Λ CDM Universe

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

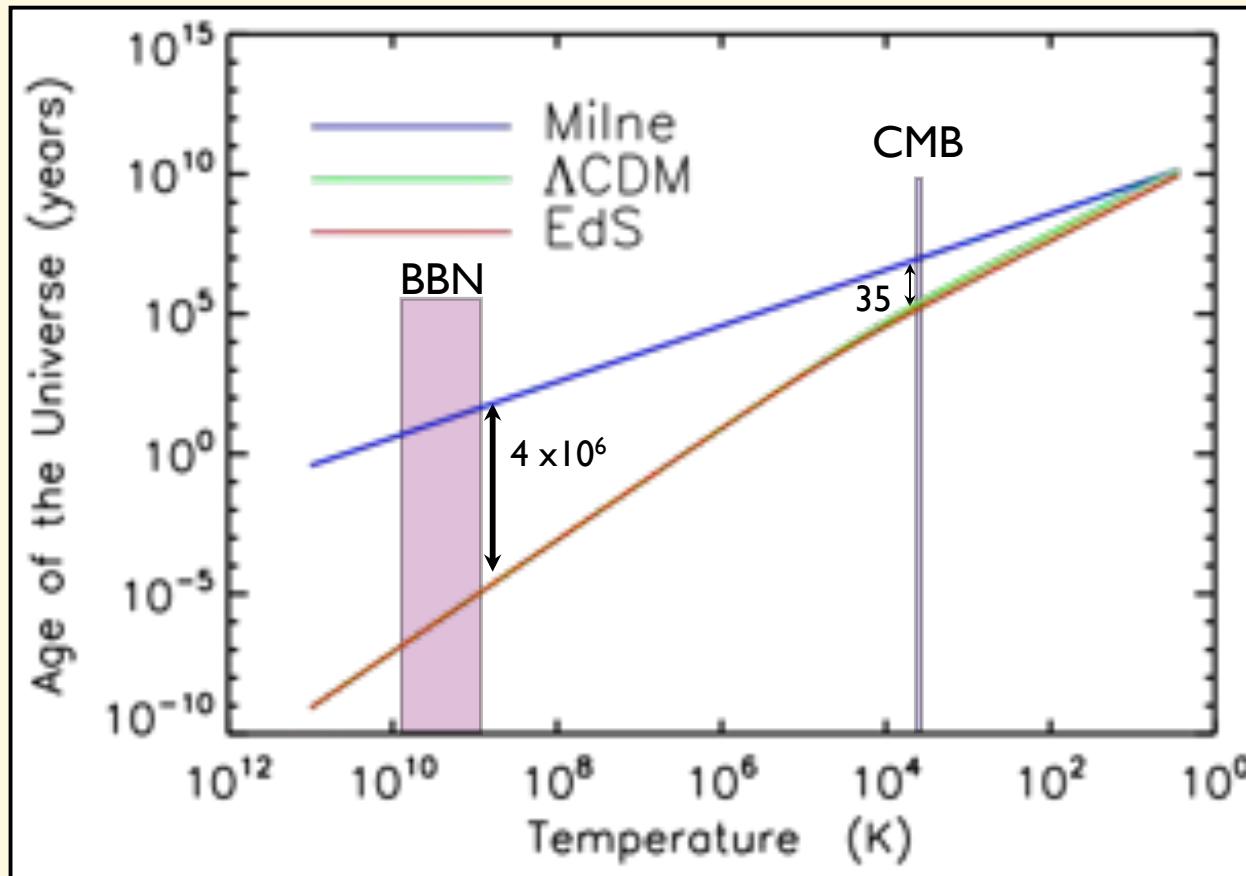
Age of the Universe was a problem for a Einstein-de Sitter model, which was solved by Λ CDM, but is also solved by Milne Universe

oldest globular clusters
(Chaboyer et al., 98)



Time scale of primordial Universe is extremely different !

First noted by Dev et al. 02



Milne Universe spends much more time at high temperature than conventional Universe.

BBN duration:
Standard BBN ≈ 200 sec
Milne BBN ≈ 30 years

Age of the Universe at recombination:
 $14 \text{ Gy}/1000 \approx 14 \text{ My}$
(compared to 0.38 My in Λ CDM)

QGP transition ($T \sim 170 \text{ MeV}$):
if separation mechanism exists,
much more time (7 days vs. $3 \cdot 10^{-5} \text{ s}$)
to create emulsion, compared to
Omnès model

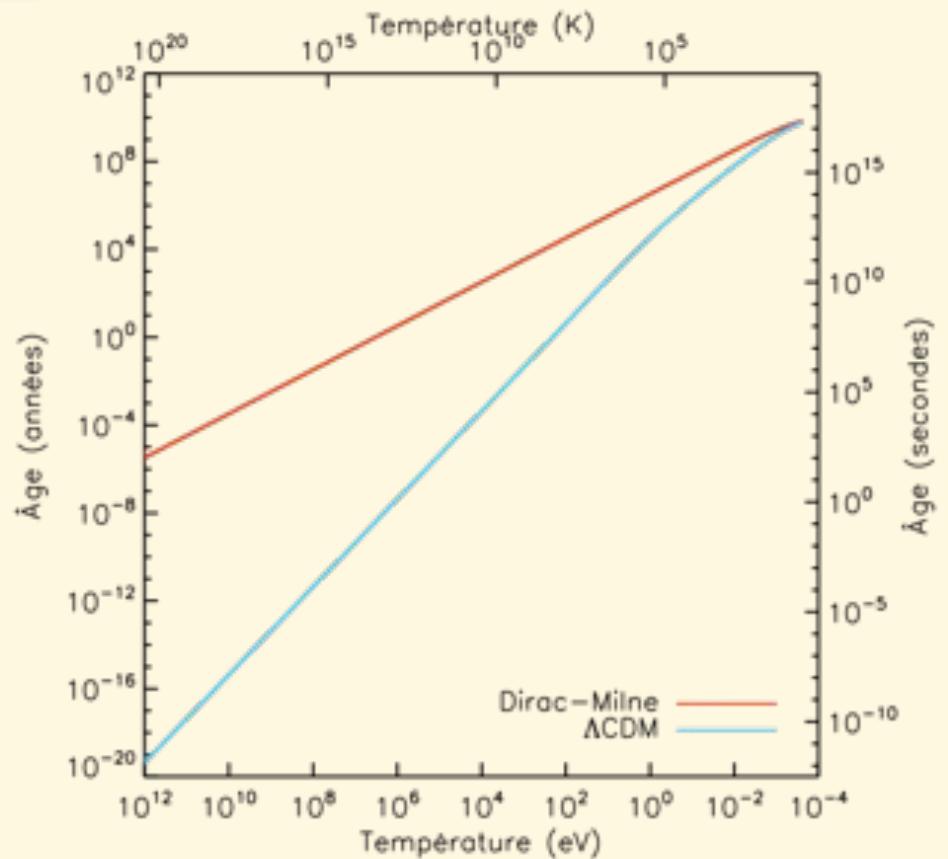
Time-temperature relation

Linear scale factor implies

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

At high temperatures, Dirac-Milne universe is much older than Standard universe

	Standard Model	Dirac-Milne	Ratio
T= 170 MeV	3×10^{-5} sec	7 days	1.7×10^{10}
T = 1 MeV	1 sec	3.3 yr	10^8
T = 80 keV	~ 200 sec	41 yr	6.5×10^6
T = 3000 K	380 000 yr	12×10^6 yr	32



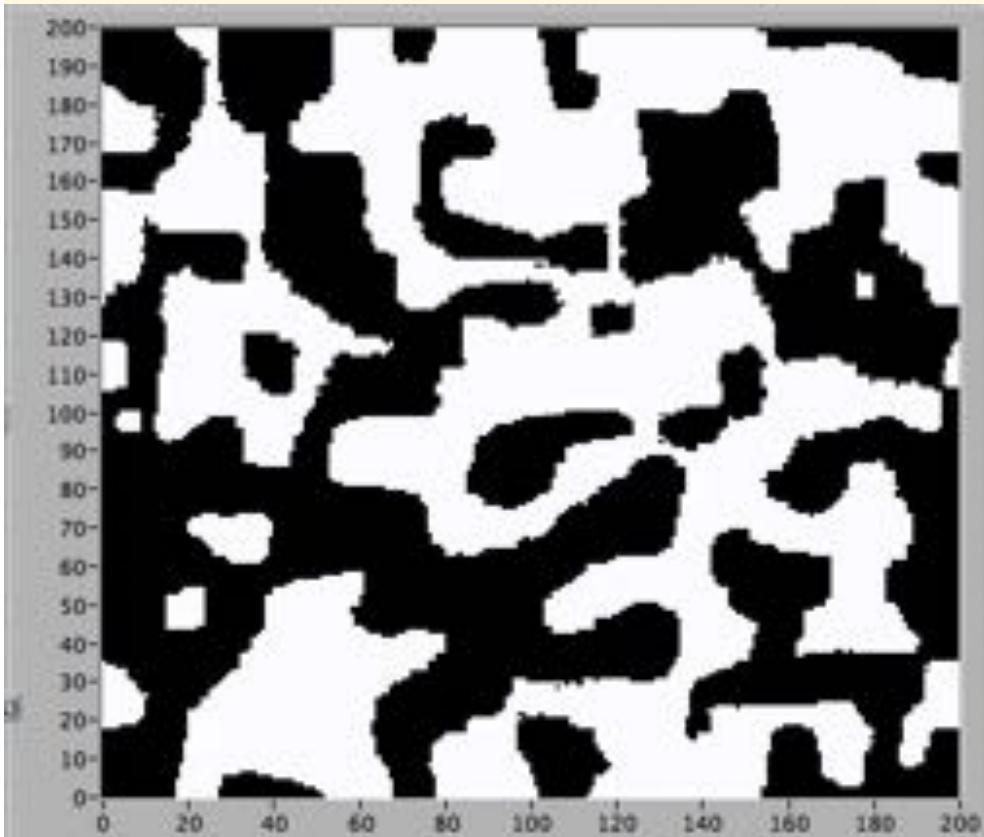
QGP transition ($T \sim 170$ MeV):
if separation mechanism exists, much more time to create emulsion, compared to Omnes model

Different thermal history
Weak expansion rate implies late decouplings in Dirac-Milne universe

Big-Bang Nucleosynthesis

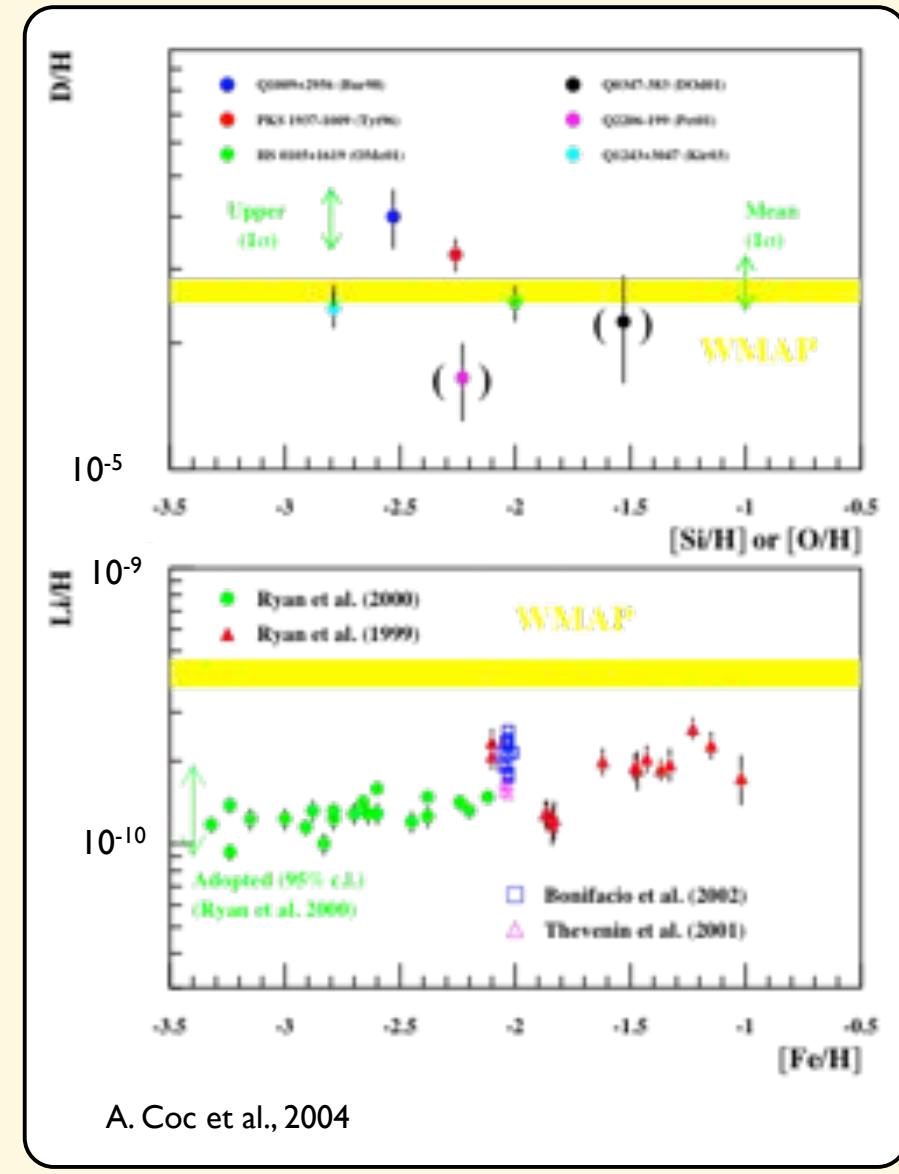
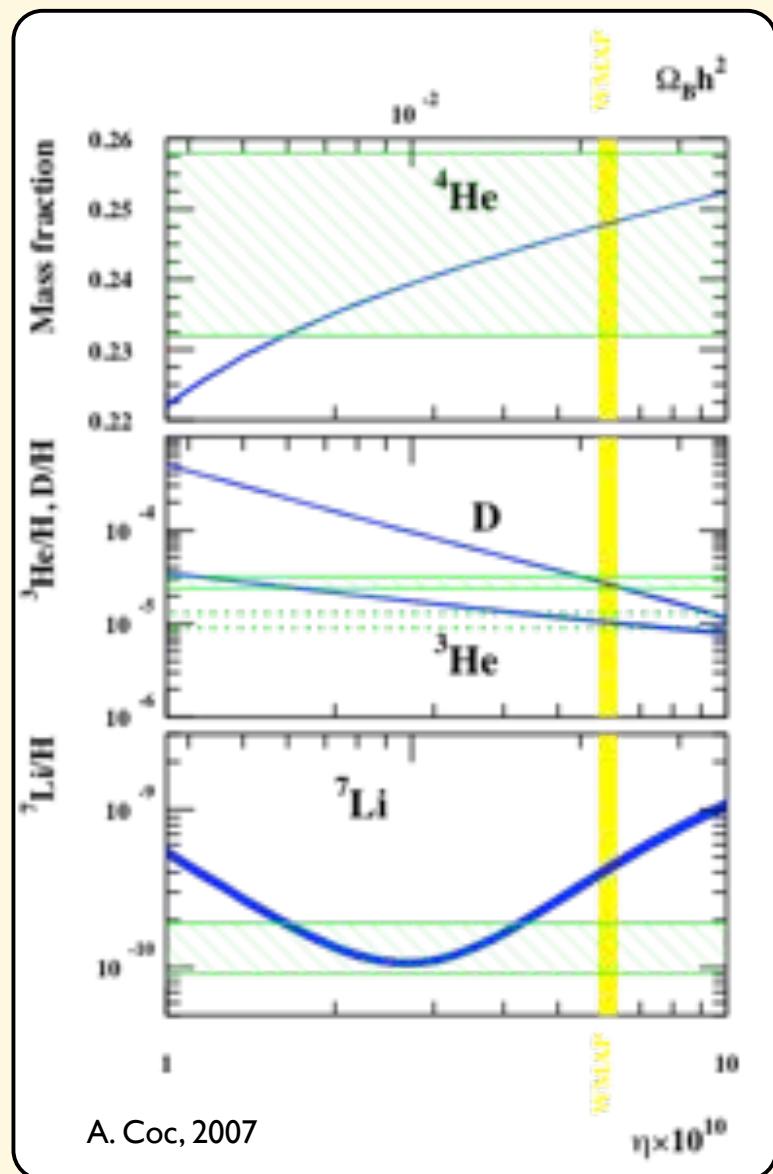


T < 170 MeV : MATTER-ANTIMATTER EMULSION



- Emulsion à 3 dimensions : Taille caractéristique de l'émulsion croît linéairement avec l'épaisseur de matière annihilée aux interfaces
- Taille de l'émulsion complètement déterminée et pas un paramètre libre
- Polarisation et arrêt de l'annihilation vers 10-30 eV

Predictions and observational status



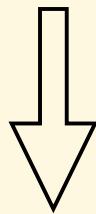
Weak interactions decoupling

Example of important changes induced by linear scale factor

Weak interactions decoupling:

Standard model: 1 MeV
Dirac-Milne: 80 keV

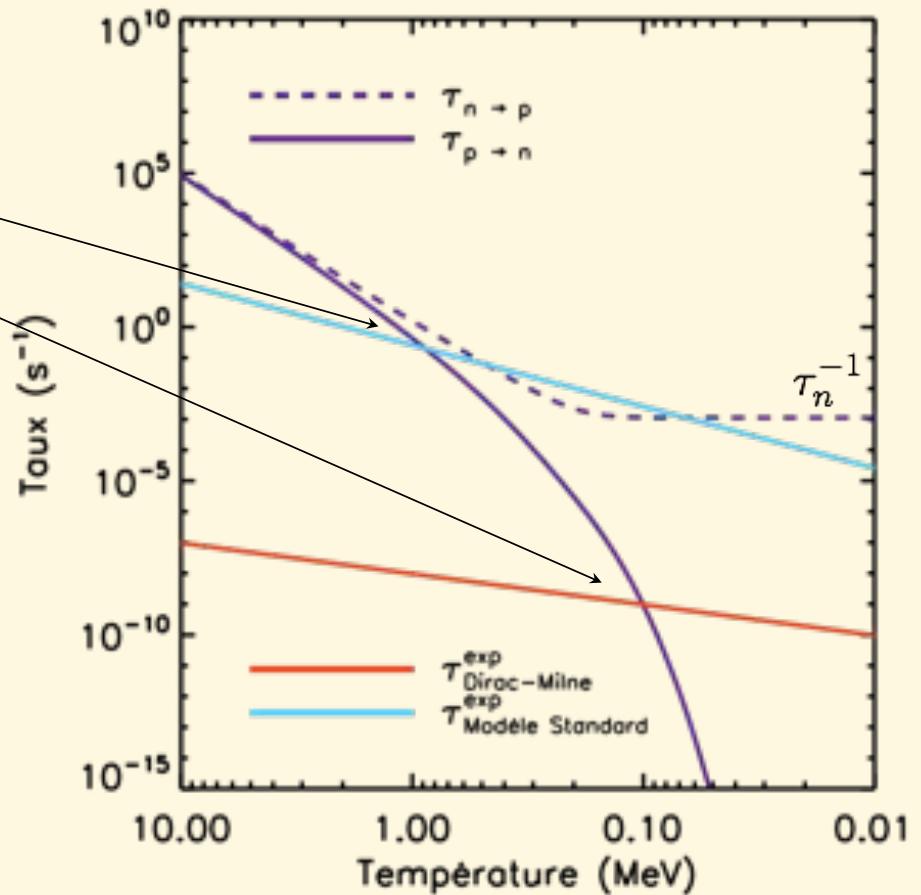
Neutrinos decoupling after e^+e^- annihilation



Neutrino background temperature same as CMB
(Lohiya et al. 98)

Standard model $T_\nu = 1.94$ K

Dirac-Milne $T_\nu = T_{CMB} = 2.725$ K



Big-Bang Nucleosynthesis

Thermal episode : production of ^4He (Lohiya et al. 98 & Kaplinghat et al. 00) and ^7Li

Thermal nucleosynthesis mechanism largely different from standard one

$$\frac{n}{p} = e^{-Q/T} \text{ down to } 80 \text{ keV}$$

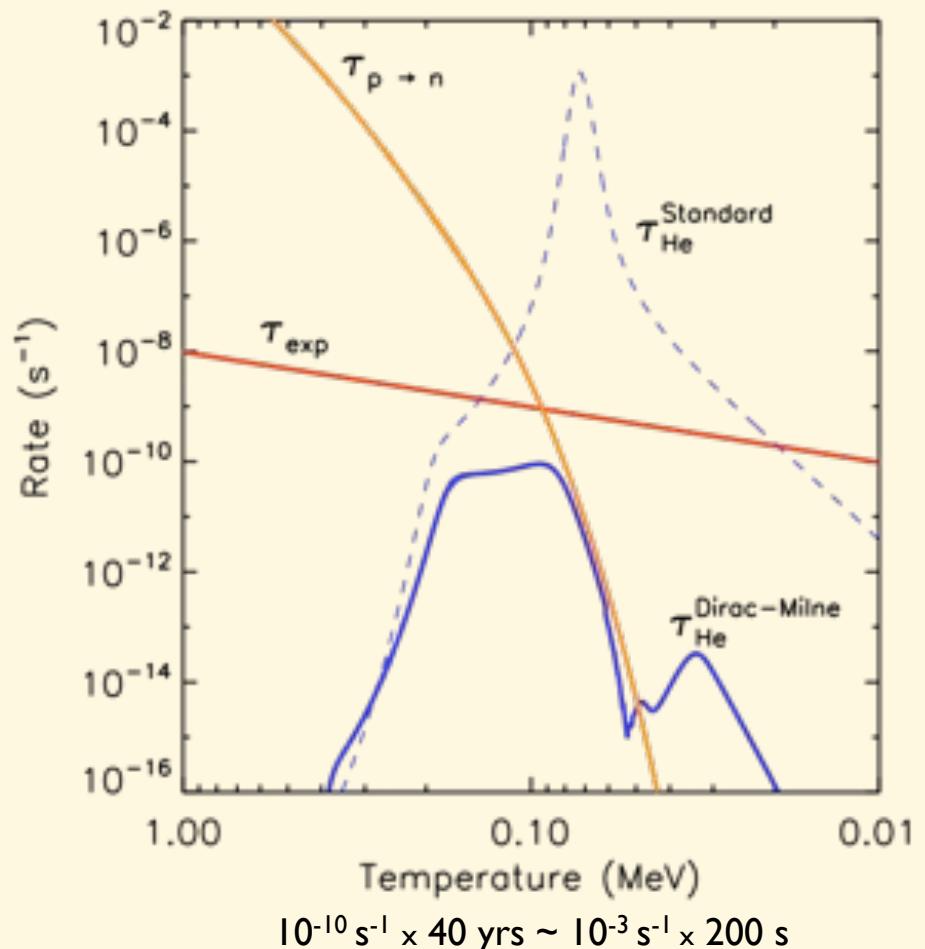
Still a small quantity, but very long time available (~ 40 yr)

Few neutrons are incorporated in nuclear network, but are regenerated from protons as weak interactions are maintained

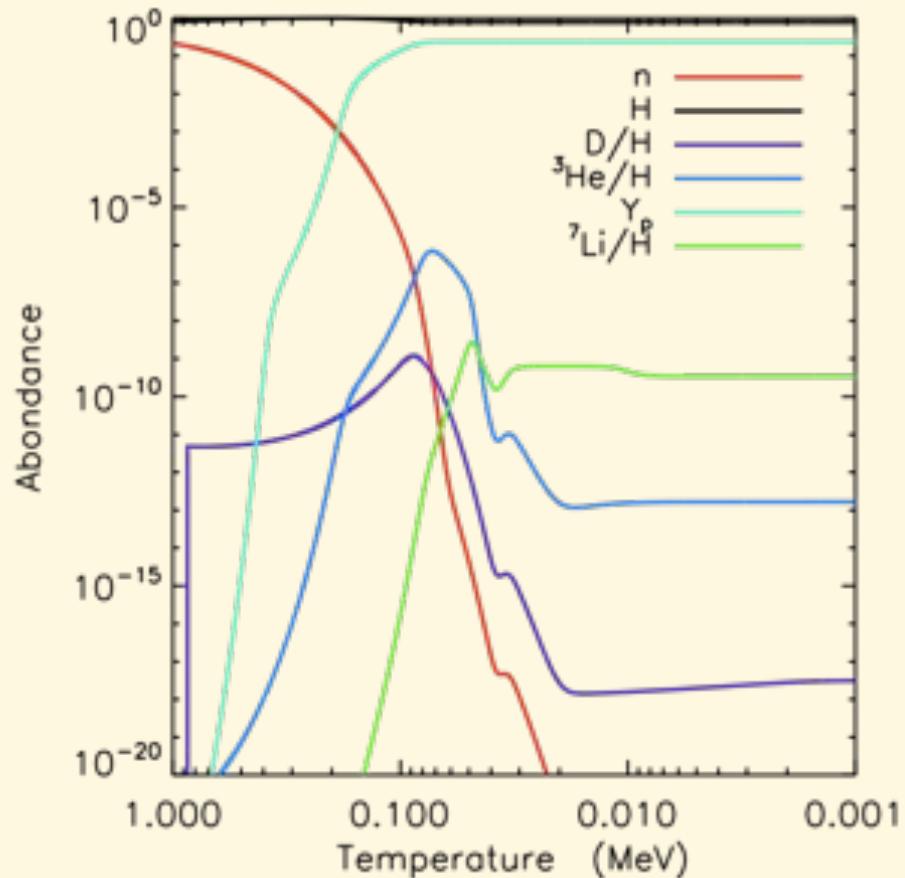
Second branch of BBN: helium production at equilibrium

Modification of A. Coc's BBN code

Nuclear network up to ~ 40 nuclei and ~ 100 reactions. Needed because of long timescale.



Big-Bang Nucleosynthesis



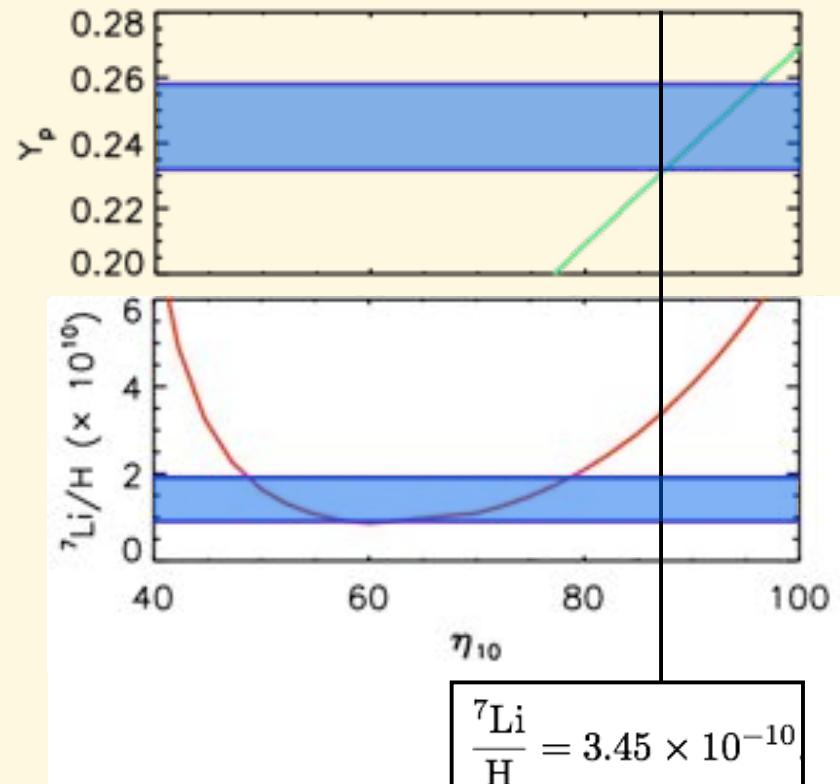
Confirms and extends previous studies

(Lohiya et al. 98)

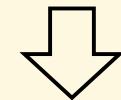
Concordant production of ${}^4\text{He}$ and ${}^7\text{Li}$

D and ${}^3\text{He}$ almost totally depleted.

Considered as fatal in Kaplinghat et al. 00



$$8.8 \times 10^{-9} < \eta < 9.6 \times 10^{-9}$$

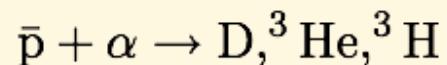


η will decrease by factor ≈ 10 after nucleosynthesis (annihilation)

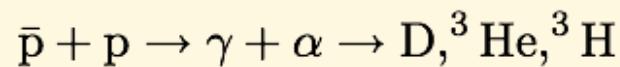
Big-Bang Nucleosynthesis

Production of deuterium and size of the emulsion

Annihilations at the border of domains can lead to D and ^3He production



Nucleodisruption, ratios given by Balestra et al. 88



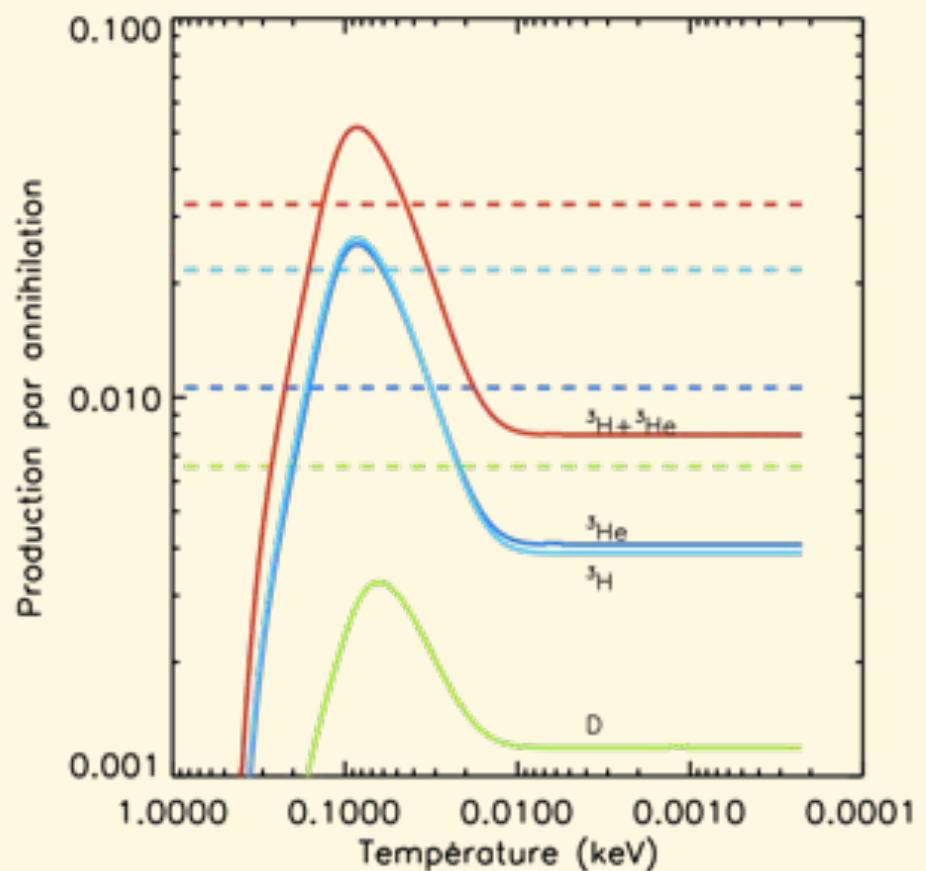
Photodisintegration. γ, e^+e^- generates E.M. cascades

Photodisintegration starts at $T \sim 0.5$ keV, when

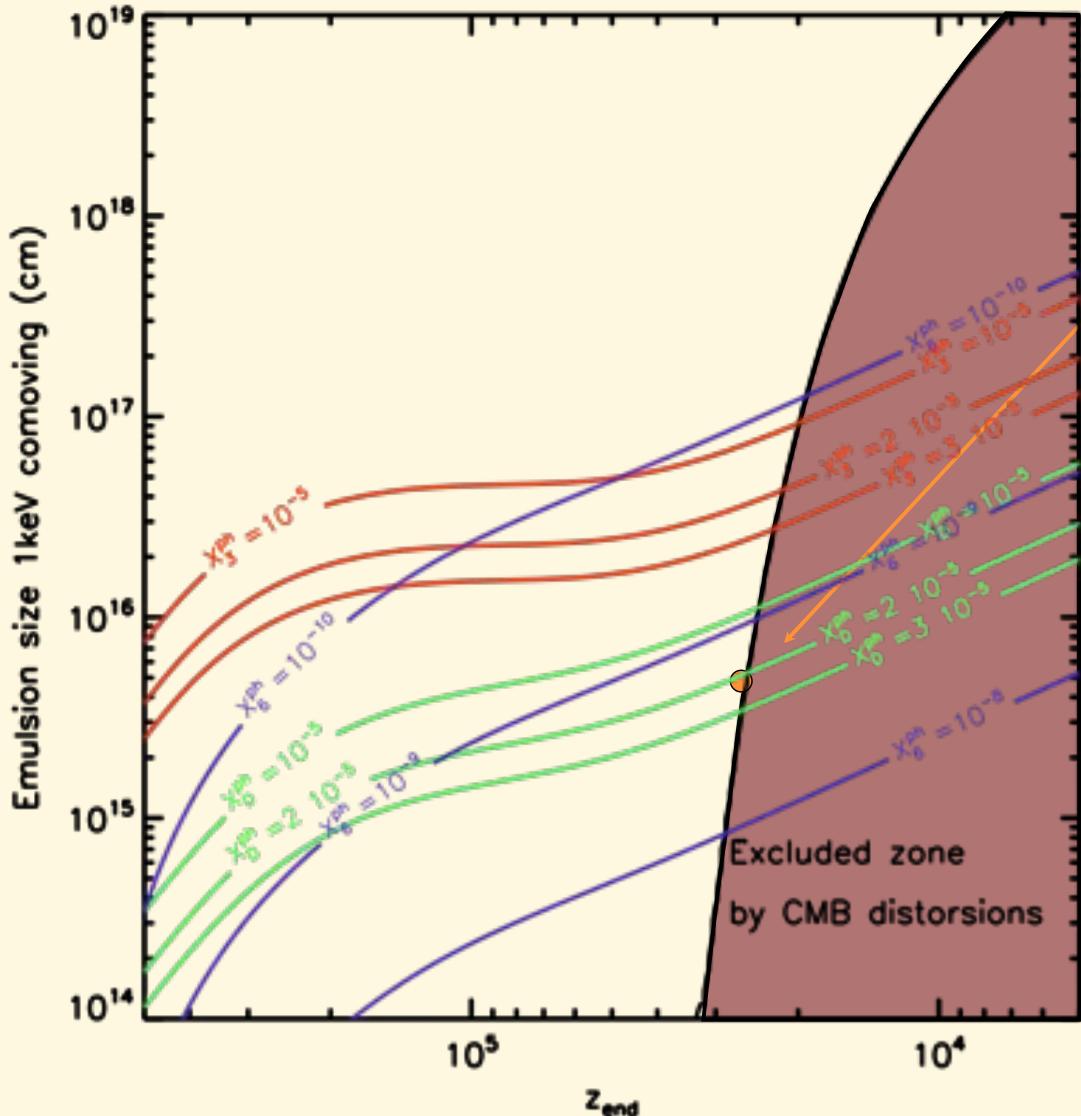
$$E_{\text{cascade}} > Q_{\text{photo}}$$

Nucleodisruption is constant

Annihilation rate ?



Big-Bang Nucleosynthesis



Domain size ~ 7 kpc comoving,
but size at the moment of
production. Will evolve after
recombination

${}^3\text{He}/\text{D} \gg 1$, possibly a
constraint as ${}^3\text{He}/\text{D}$ is observed
 < 1 (Sigl et al. 95)

${}^6\text{Li}$ also probably too high:
 ${}^6\text{Li}/\text{H} \sim 2-3 \times 10^{-9}$

Helium-3 overproduction ?

- Dirac-Milne prévoit une trop grande production d'hélium-3 par rapport au modèle cosmologique standard
- Est-ce un problème ?
- Peu étudié car ${}^3\text{He}$ peut être produit ou détruit après la nucléosynthèse primordiale

Helium-3 overproduction ?

- Robert T. Rood, T. M. Bania, Dana S. Balser, Ap. J., 280 (1984) 629 : « If this difference is due to the general chemical evolution of the galaxy, our result for ${}^3\text{He}$ is exactly the opposite of what one would expect (...) The utility of ${}^3\text{He}/\text{H}$ as a probe of the cosmological baryon-to-photon ratio rests on the resolution of this puzzle. »
- « ${}^3\text{He}$ (...) was most abundant where it was least expected... », Science 295 (2002) 804

Type Ia Supernovae

Type Ia Supernovae

Riess et al. 98 & Perlmutter et al. 99 discovered that distances measurements of SNe Ia are incompatible with an Einstein-de Sitter universe. Interpretation that our Universe is dominated by Dark Energy and that expansion is accelerating.

Type Ia SNe are commonly used to constrain cosmological parameters and possible Dark Energy redshift dependence

Dirac-Milne universe shows no acceleration nor deceleration

Are the data compatible ?

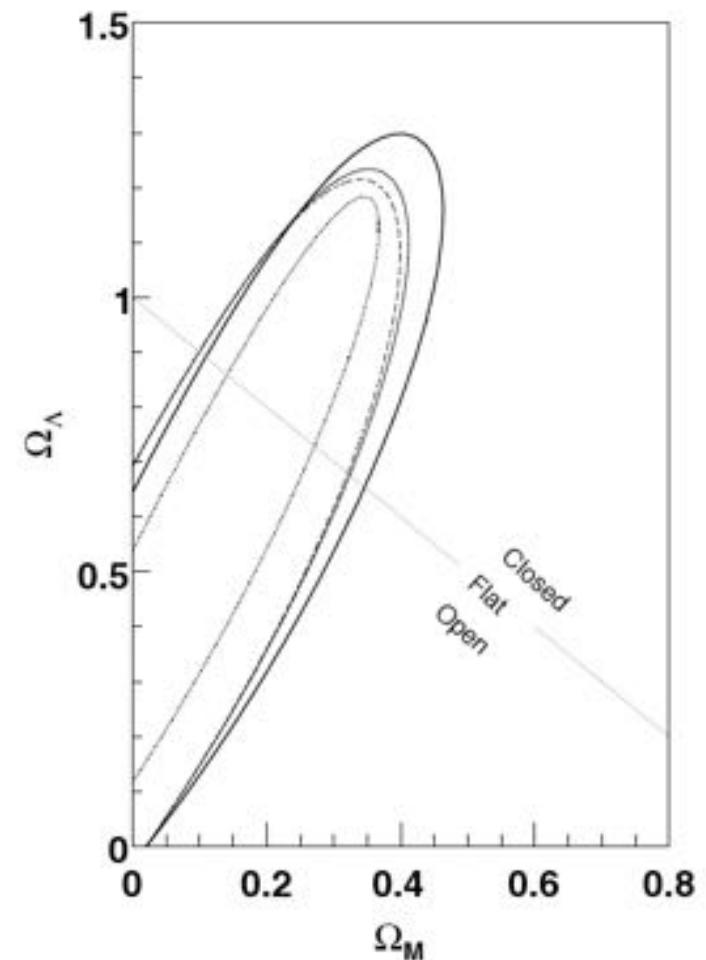
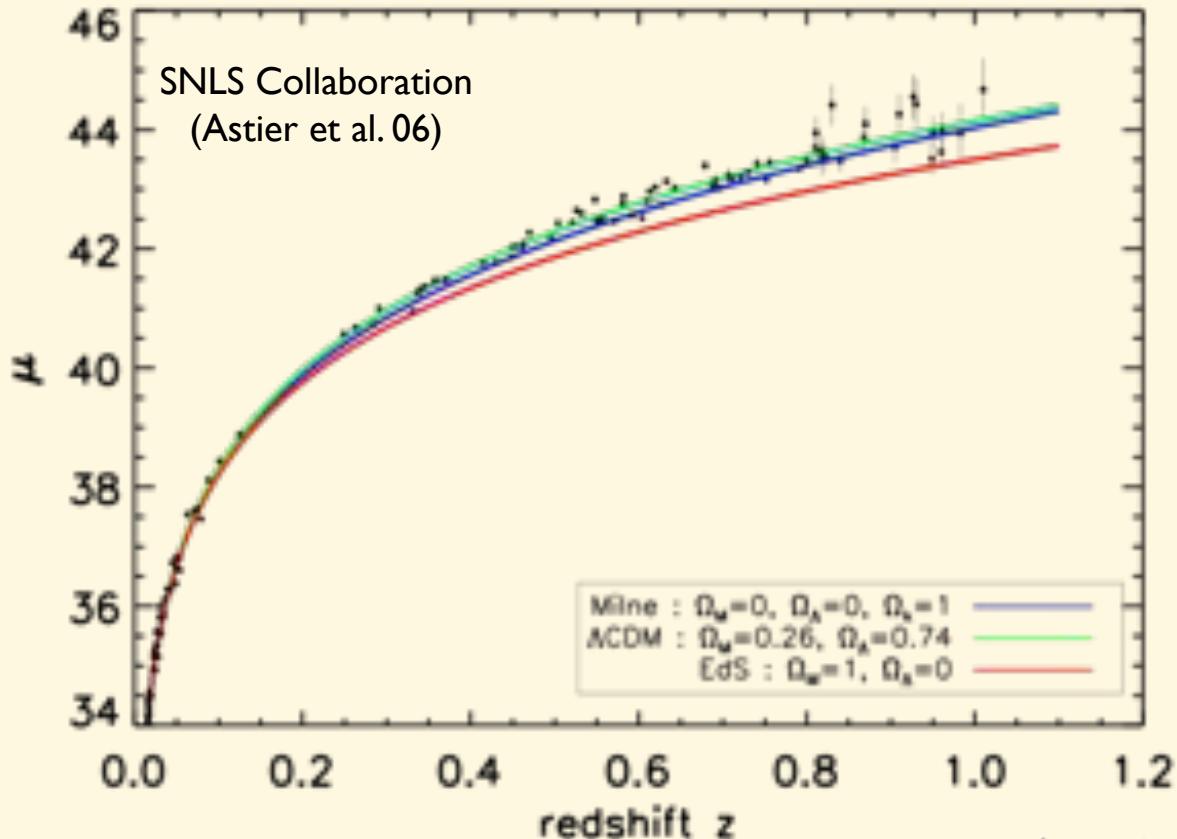


Fig. 18. Contours at 68.3% confidence level for the fit to a Λ CDM cosmology from the SNLS third year sample (without additional SNe samples) accounting for: Hubble diagram statistical uncertainties and the difference between SALT2 and SiFTO results (dotted curve), photometric calibration (dashed curve), model training statistical uncertainties and Malmquist bias uncertainties (thin solid), and finally the potential β evolution (thick solid curve).

Hubble diagram of Type Ia Supernovae



Milne Universe (blue) is very close to Λ CDM (green) as noted in Perlmutter et al. 99

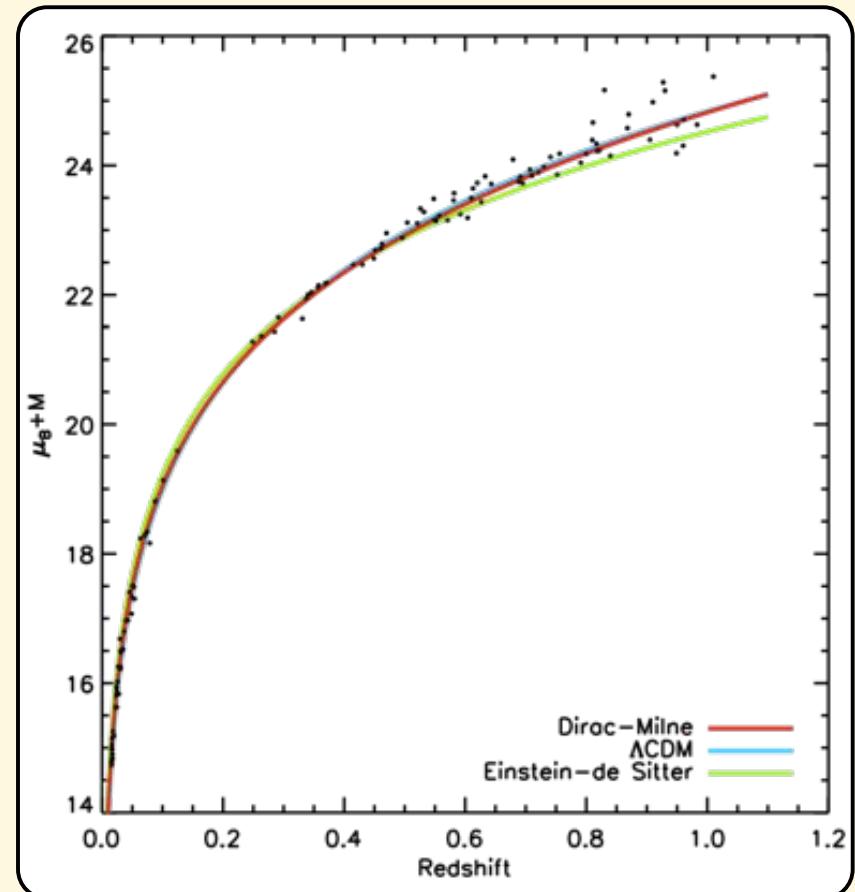
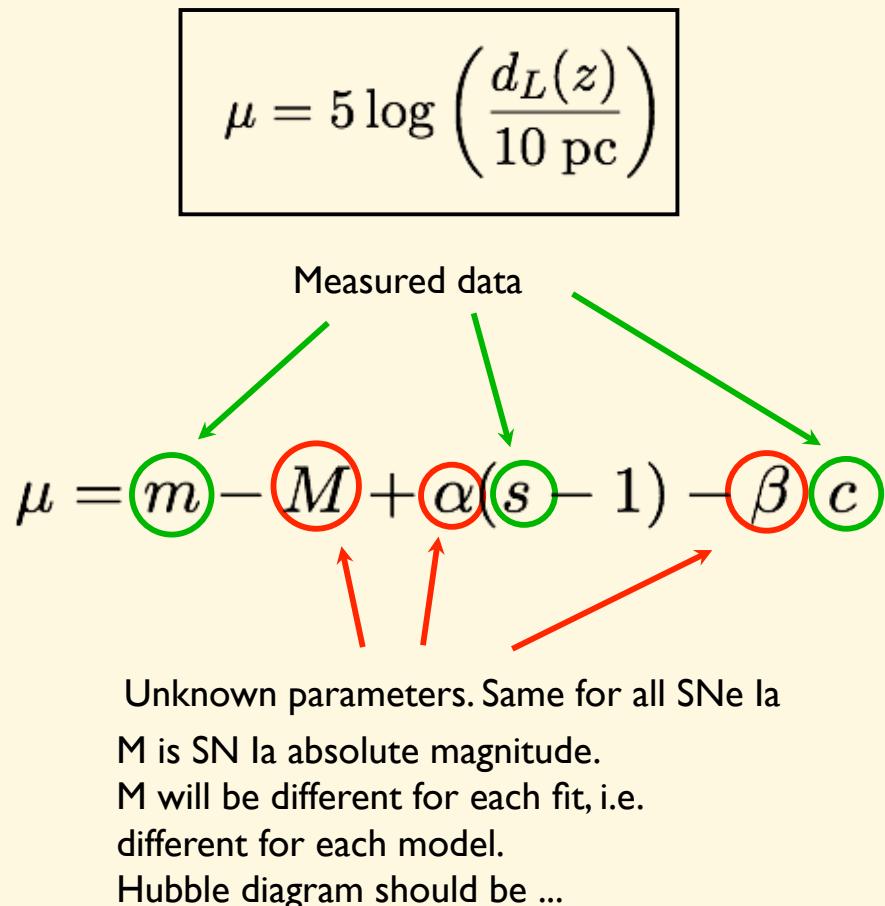
Einstein-de Sitter model seems totally ruled out

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

Unknown parameter

Type Ia Supernovae

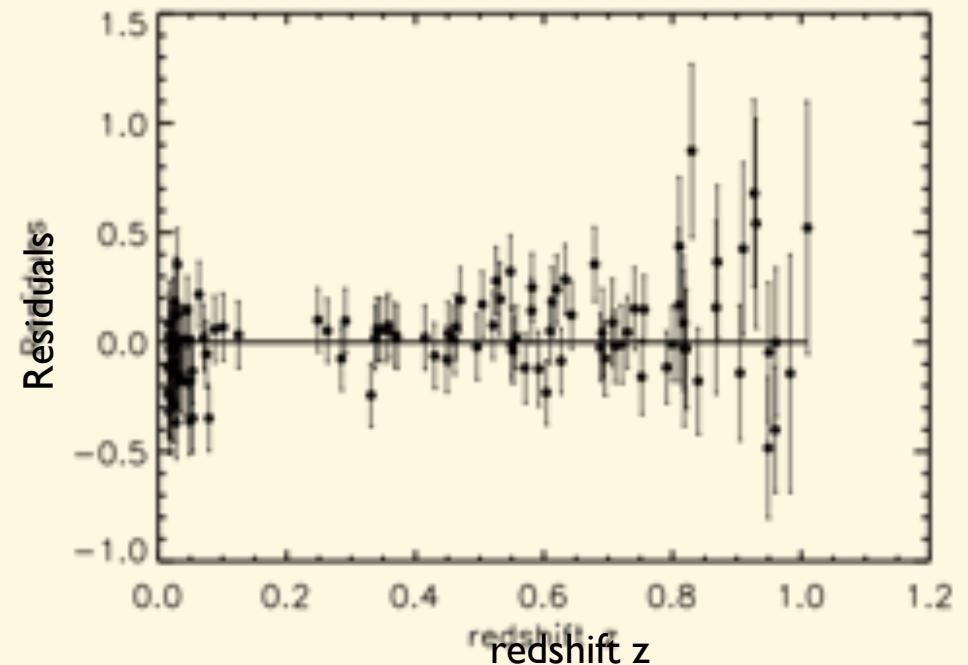
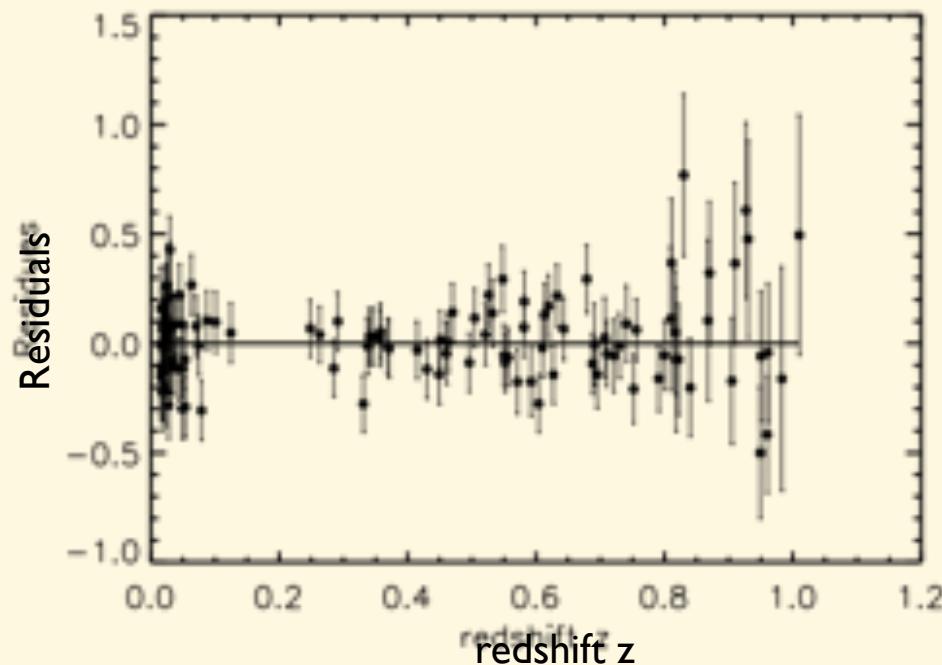
Cosmology with type Ia supernovae



Residuals of Hubble diagram for the two models

Absolute magnitude parameter M unconstrained for Milne

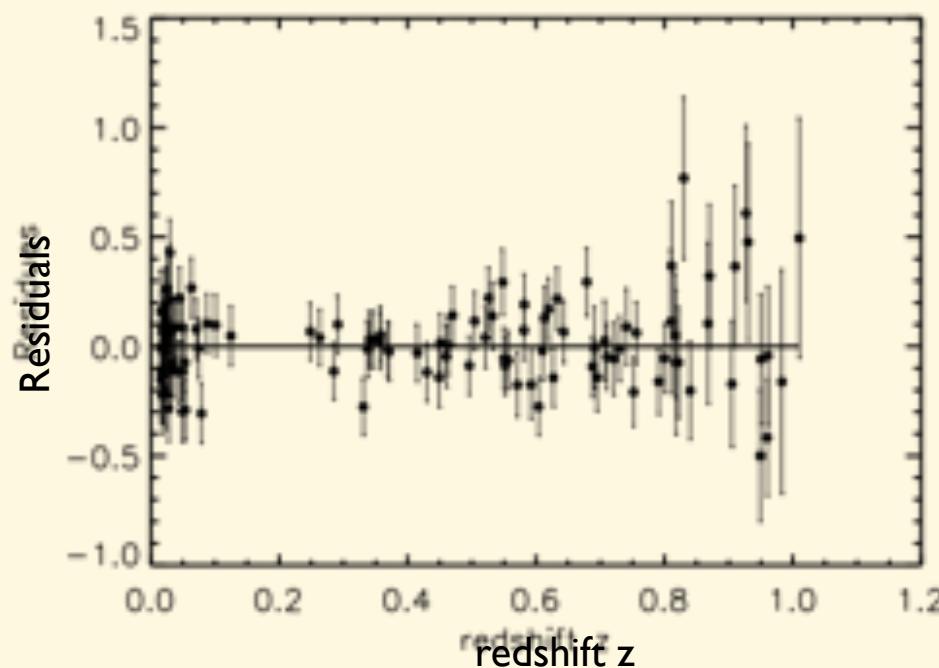
Which one is Milne ? Which one is Λ CDM ?



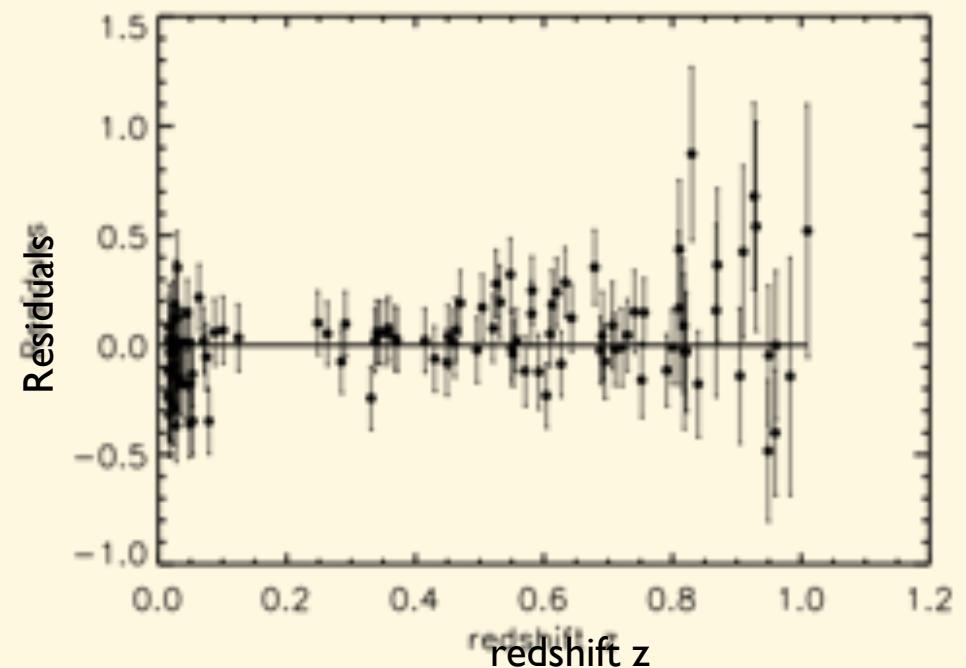
Residues of Hubble diagram for the two models

Absolute magnitude parameter M unconstrained for Milne

LCDM Best fit



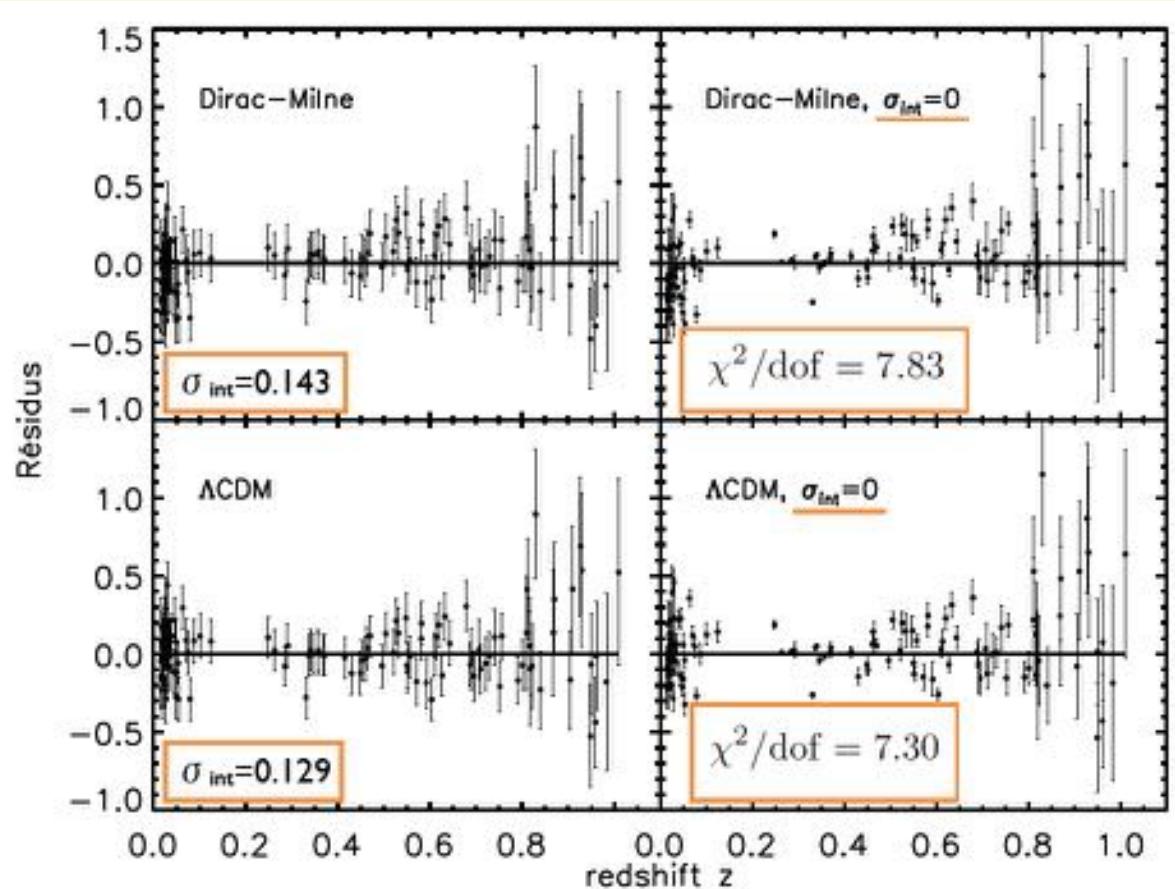
Milne - our analysis



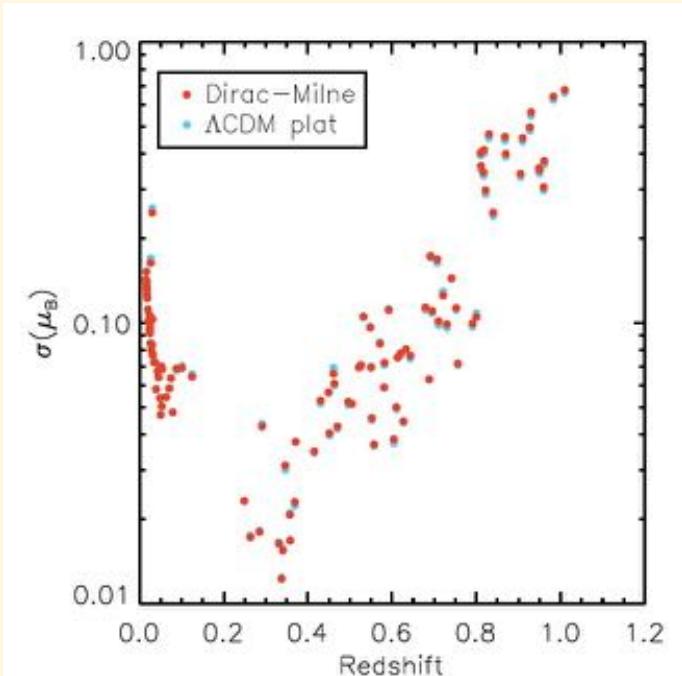
Type Ia SN test most probably does not allow to exclude the Milne model !

Residuals of Hubble diagram for the two models

Compared χ^2 for Λ CDM and Dirac-Milne



Compared errors vs. redshift



Thèse du coasting universe également développée dans :
 JT Nielsen, A Guffanti, S Sarkar, Nature Sci. Rep. 6 (2016) 35596

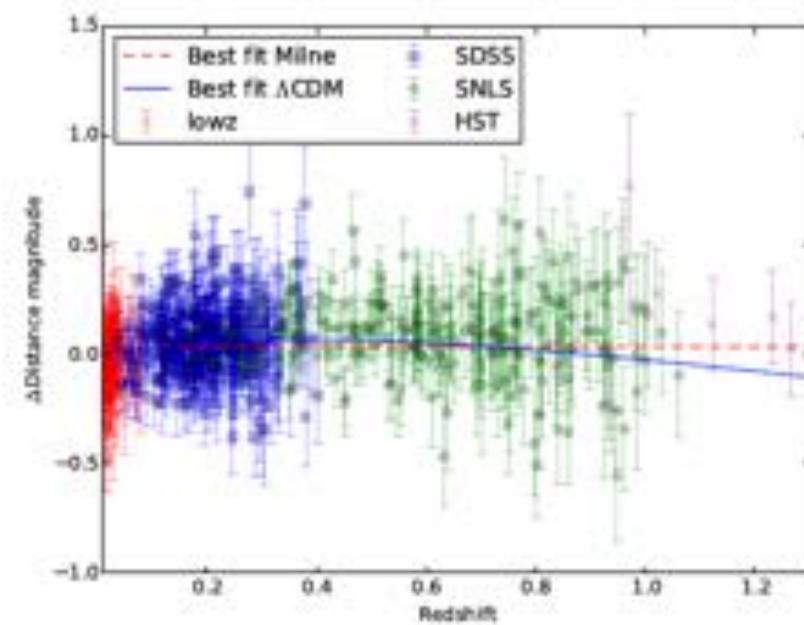
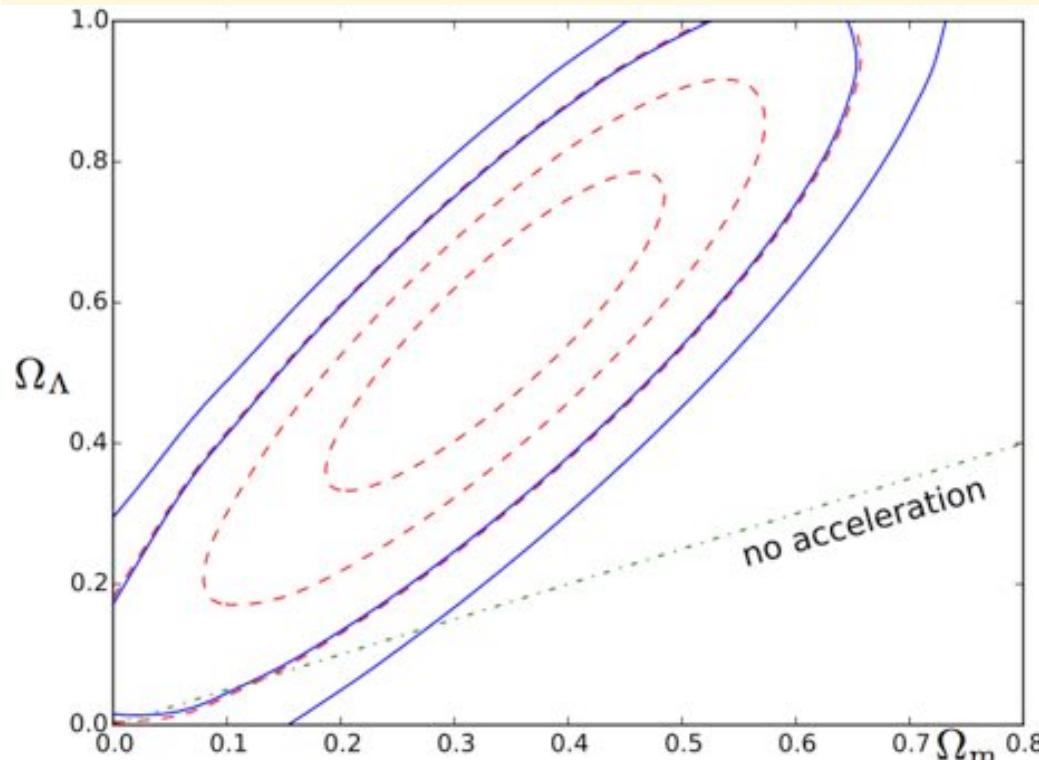


FIG. 4. Residuals relative to the Milne model for Fig. 3.

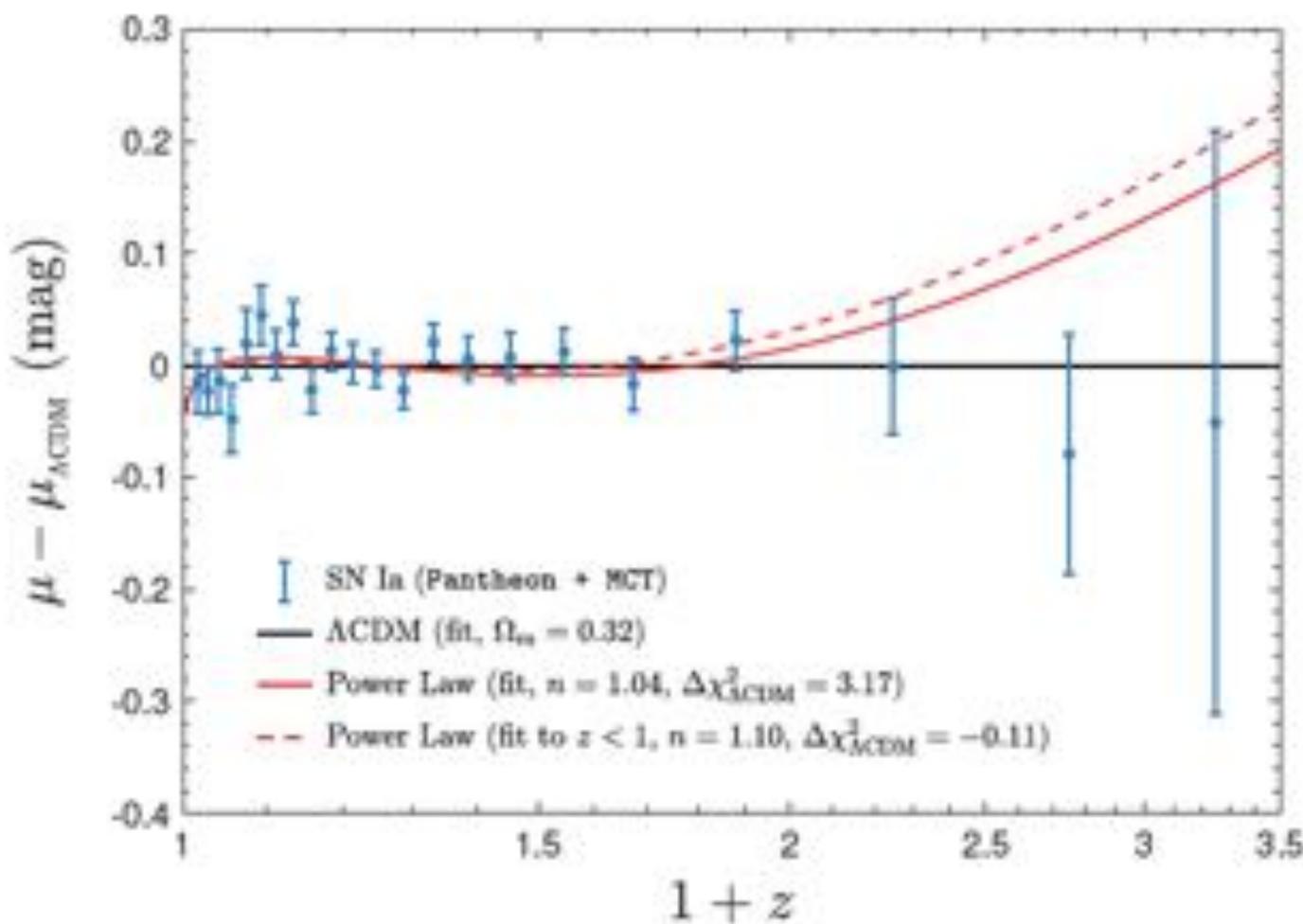


Figure 4. Comparison of ΛCDM and power-law cosmology ($a(t) \propto t^n$) fits to our SN Ia data, where in each case we allow the intrinsic luminosity to evolve as $\Delta M(z) = cz^\delta$, corresponding to Model B from [Totusaus et al. \(2017\)](#), where we fix $\delta = 0.3$. The SN data are binned for clarity, and $\Delta\chi^2_{\Lambda\text{CDM}} \equiv \chi^2 - \chi^2_{\Lambda\text{CDM}}$.

Adam G. Riess, et al., arXiv:1710.00844, submitted to Ap.J.

CMB

Acoustic scale in CMB

First peak corresponds to acoustic scale given by sound horizon seen on last scattering surface.

$$\theta = \frac{r_s}{d_A}$$

For Dirac-Milne, angular distance

$$d_A(z) = H_0^{-1} \frac{1}{1+z} \sinh(\ln(1+z)) \quad \text{is 163 times larger than in } \Lambda\text{CDM}.$$

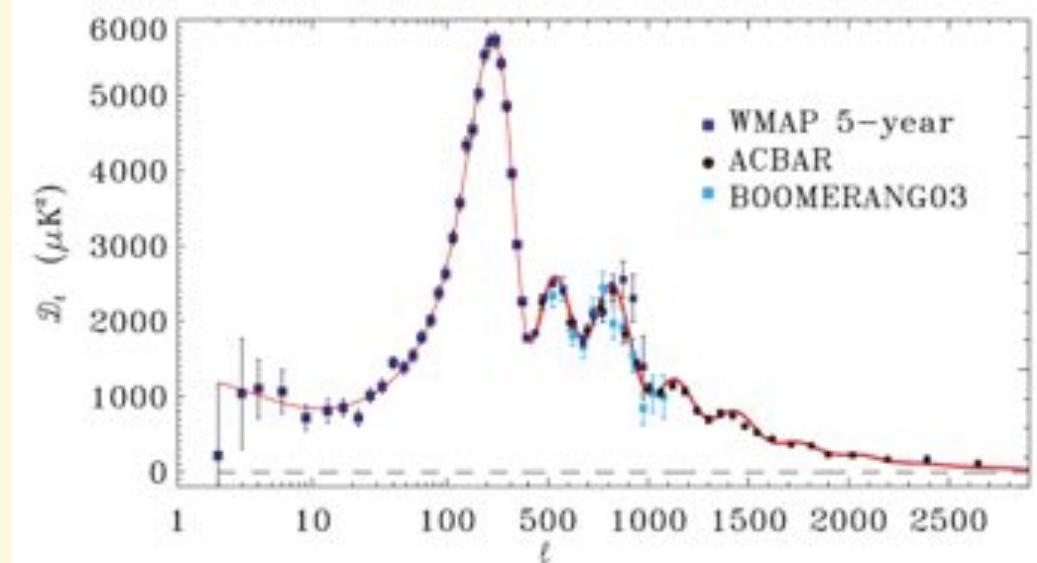
one would expect a tiny angle!

But, due to linear scale factor, sound horizon is much larger than in standard model

$$r_s = \int c_s \frac{dt'}{a(t')}$$

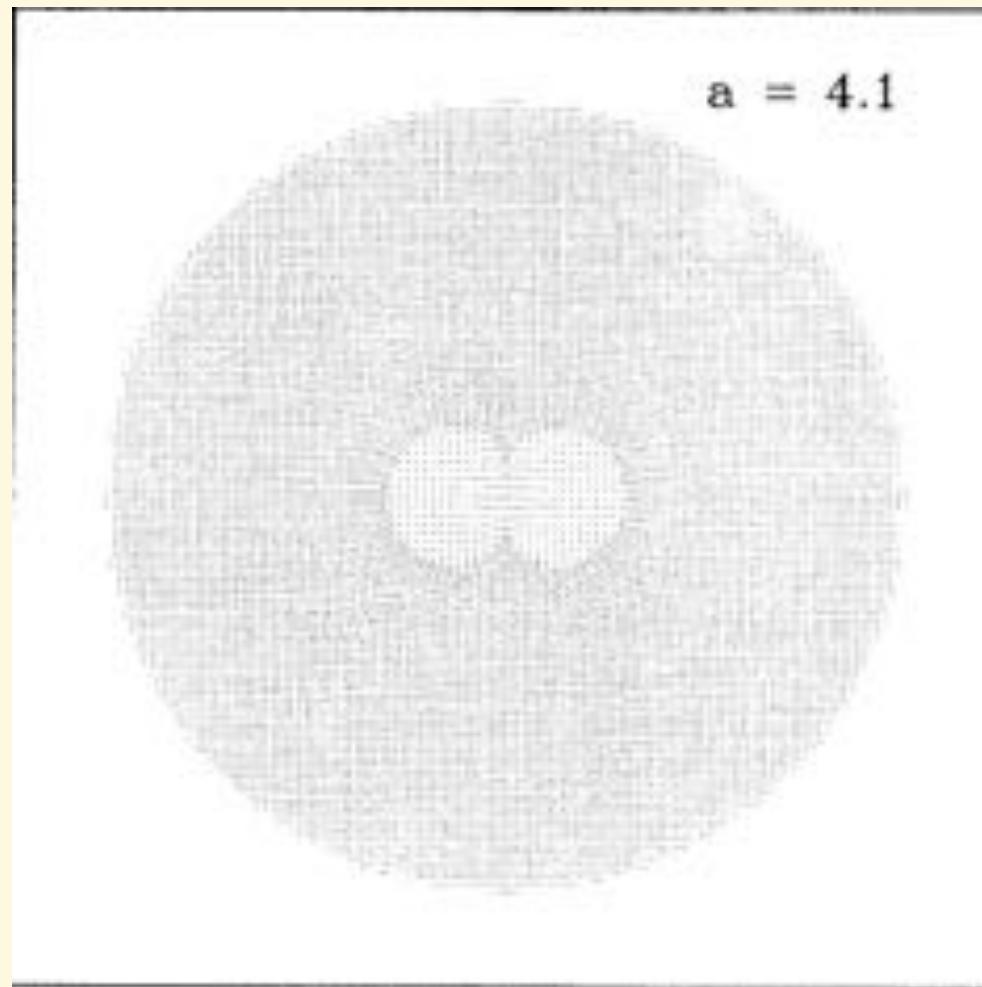
Integrating from 170 MeV to ~ 10 eV (end of annihilation, cf BBN)
yields acoustic scale around 1° !

Clearly, BAO should not be observed in Dirac-Milne universe at the reported scale of ~ 150 Mpc.

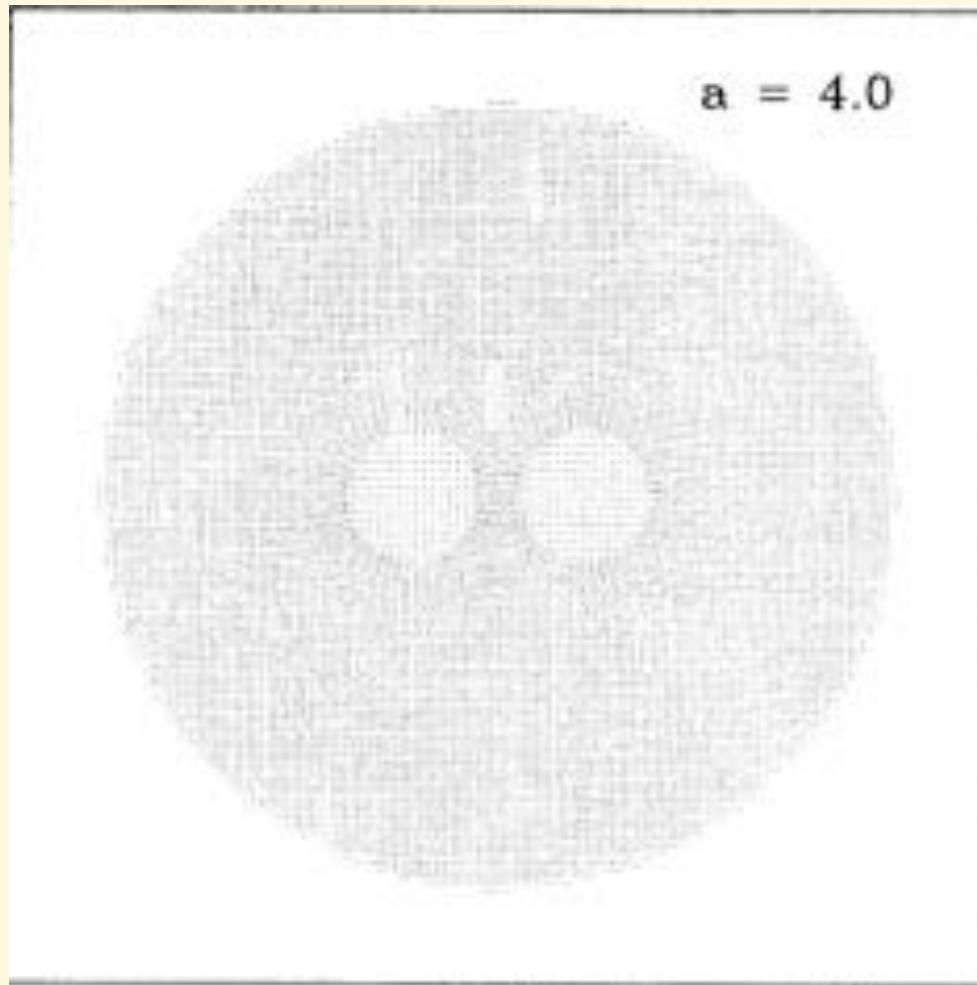


Structure formation and BAO

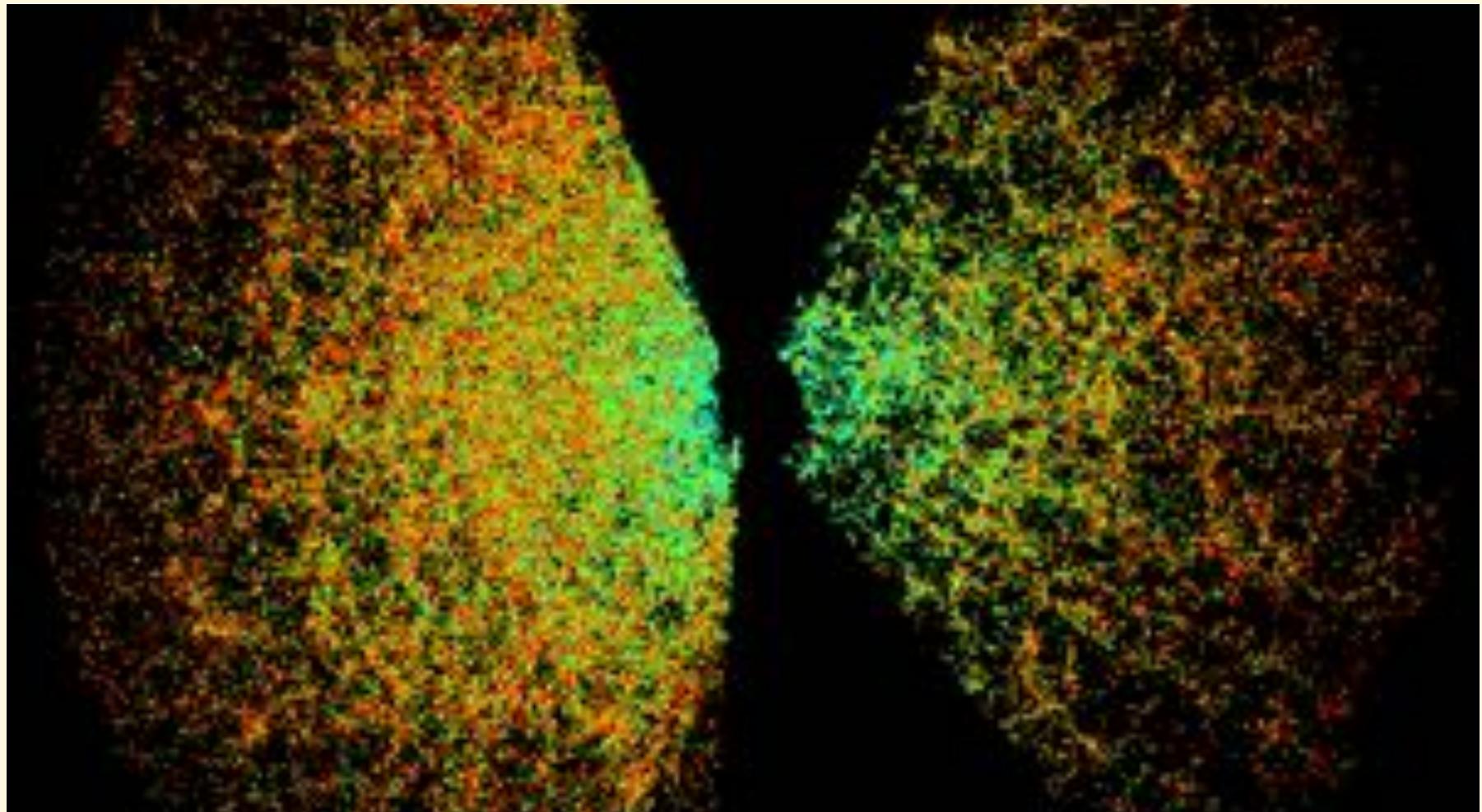
Negative mass in GTR (Dubinski et al.)



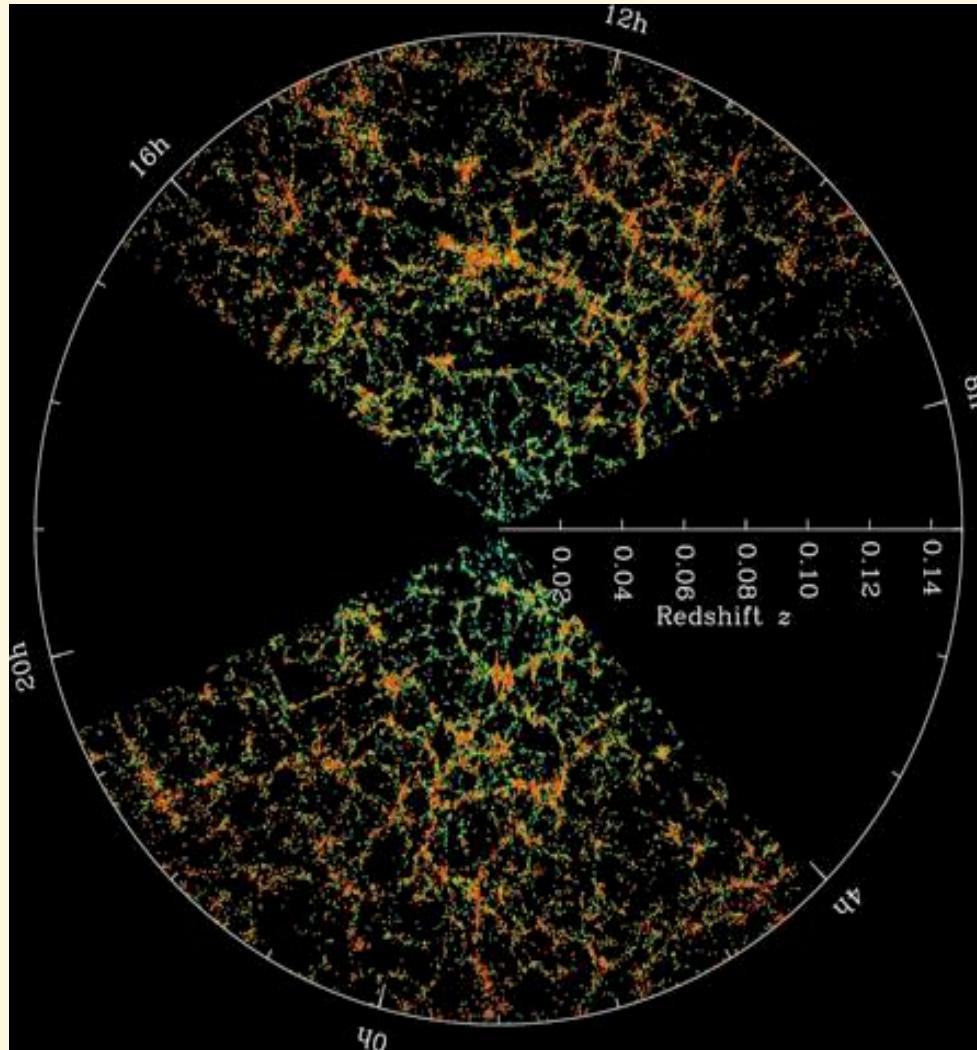
Negative mass in GTR (Dubinski et al.)



Structures dans notre univers (SDSS)



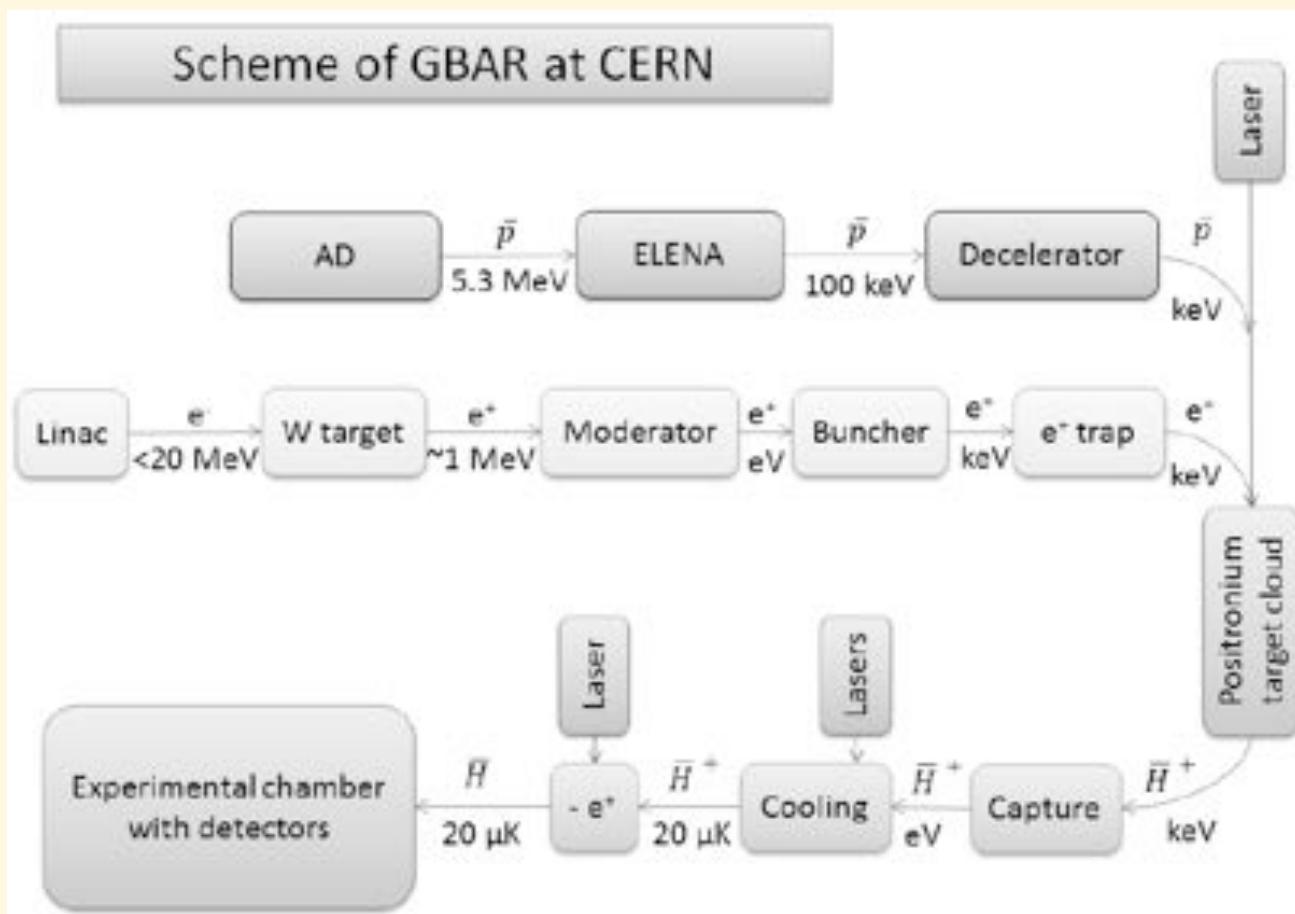
Structures dans notre univers (SDSS)



- Echelle d'un effet linéaire (BAO)
≈ échelle d'un effet non linéaire
- Pas d'explication dans le modèle standard

Test antihydrogène

- Trois expériences au CERN : Gbar, AEgIS, ALPHA-g
mesurer la trajectoire d'antihydrogènes froids dans le champ de gravitation de la Terre (≈ 2020)



Conclusions (I)

Dirac-Milne constitue un modèle d'univers assez remarquablement concordant et naturel

Il permet de répondre à plusieurs énigmes (constante cosmologique, fine-tuning, causalité et inflation) du Modèle Standard cosmologique

Mais plusieurs questions ouvertes ou contraintes fortes:

- transition QCD vers 170 MeV: il faut une transition de premier ordre (et pas de crossover, comme on le suppose généralement, sinon disparition presque totale de matière et antimatière)
- Mais si cette transition existe, la taille des domaines de matière et d'antimatière au moment du découplage est totalement contrainte $\approx \mathcal{O}(10 \text{ M}_\odot)$
- nucléosynthèse primordiale remarquablement concordante, trop d'hélium-3 est produit (facteur 5 à 10) : mal mesuré ?

Conclusions (2)

- l'horizon sonore dans l'univers de Dirac-Milne est d'environ 1 degré comme observé dans le CMB
- mais pour le moment juste un calcul d'ordre de grandeur
- le BAO (Baryon Acoustic Oscillations) ne peut pas correspondre dans Dirac-Milne à la longueur de l'horizon sonore (longueur énorme). Cette échelle ≈ 100 Mpc doit être un effet non linéaire, avec une longueur croissant dans le temps (exemple des simulations de Dubinski)
- la taille des domaines matière ou antimatière au moment où l'univers devient transparent n'est pas un paramètre libre (même s'il n'est pas facile de la calculer exactement)
- la masse concernée pour un domaine est de l'ordre d'une fraction de masse solaire à quelques dizaines de masses solaires
- Futur: test direct via les expériences Gbar, AEgIS ou ALPHA-g (espéré pour 2018, mais probablement après long shutdown, soit en 2020).

Quelques références

- A. Benoit-Lévy et G. Chardin, “Introducing the Dirac-Milne-Universe”,
A&A 537 A78 (2012)
- G. Chardin, Hyperfine Interactions, 109, 83 (1997)
- G. Chardin et J-M. Rax, “CP Violation: a matter of antigravity ?”, Phys. Lett.
B282, 256 (1992)
- M. M. Nieto and T. Goldman, “The arguments against Antigravity and the
gravitational acceleration of antimatter”, Phys. Rep. 205, 221 (1991)
- L. Blanchet, “Gravitational polarization and the phenomenology of MOND”,
Class. Quantum Grav. 24 (2007) 3529
- L. Blanchet, “Dipolar particles in general relativity”, Class. Quantum Grav. 24
(2007) 3541
- L. Blanchet and A. Le Tiec, Phys. Rev. D 78, 024031 (2008)
- J.T. Nielsen, A. Guffanti, S. Sarkar, « Marginal evidence for cosmic
acceleration from Type Ia supernovae », Nature Sci. Rep. 6 (2016) 35596
- I. Tutzus, B. Lamine, A. Dupays, A. Blanchard, « Is cosmic acceleration
proven by local cosmological probes? », astro-ph > arXiv:1706.05036