

Crédibilité du Big Bang  
La recherche des « fossiles  
cosmologiques »

Aout 2014

# Question no 1

- Quelles sont les preuves de la valeur de la théorie du Big Bang?
- Le meilleur choix ?

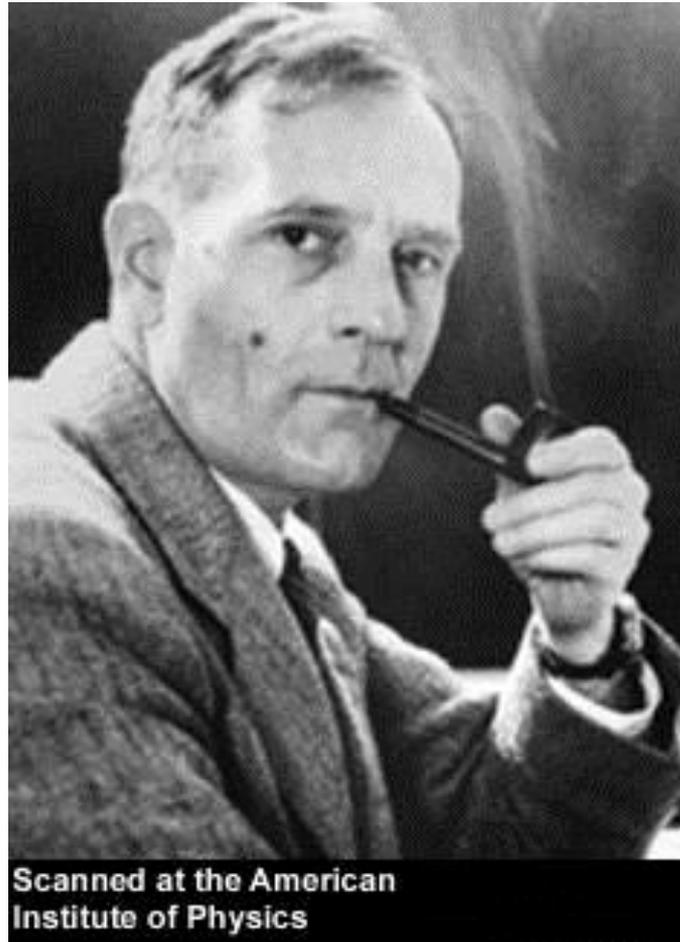
# Question no2

- 
- Jusqu'à quelle température peut on affirmer que l'univers a été porté dans le passé ?
- Les « pièces à convictions »

# Les « explorateurs » du territoire du temps .

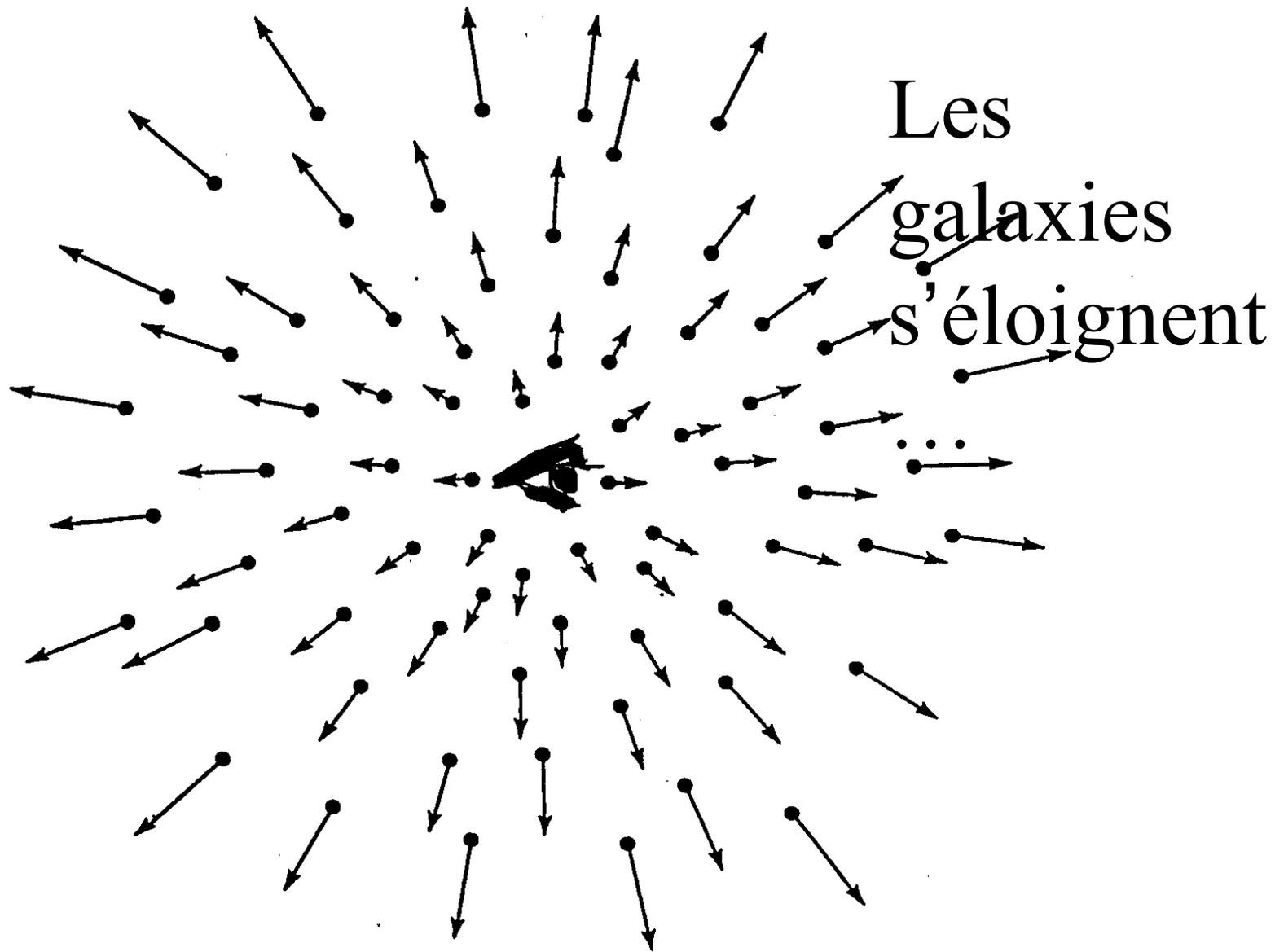
- Le voyage vers le passé ...
- A partir d'aujourd'hui .

# Edwin Hubble



Observe les galaxies





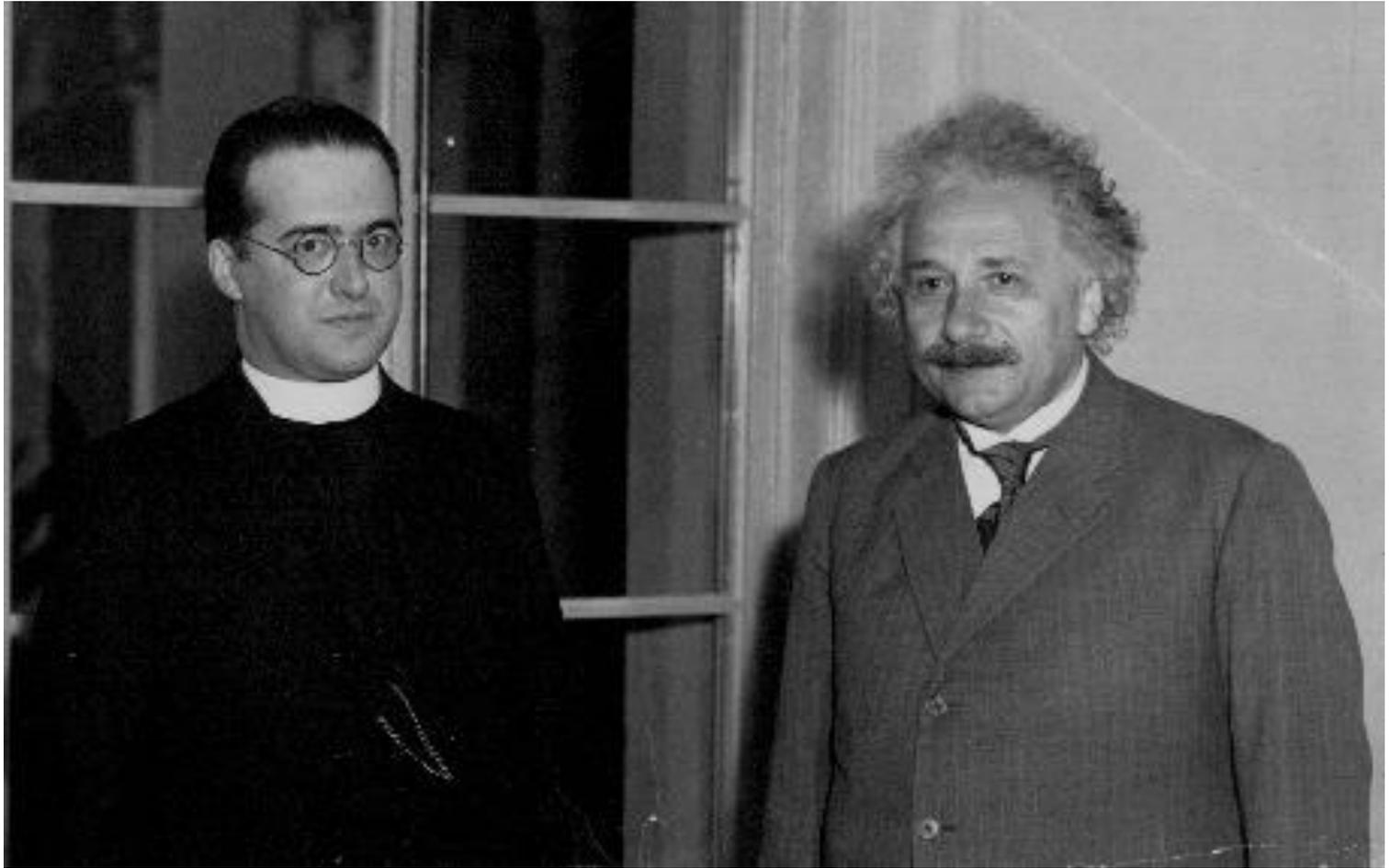
# Fossile no 1

- Les galaxies s'éloignent les unes des autres
- D'autant plus vite qu'elles sont plus loin
- L'univers est en expansion .

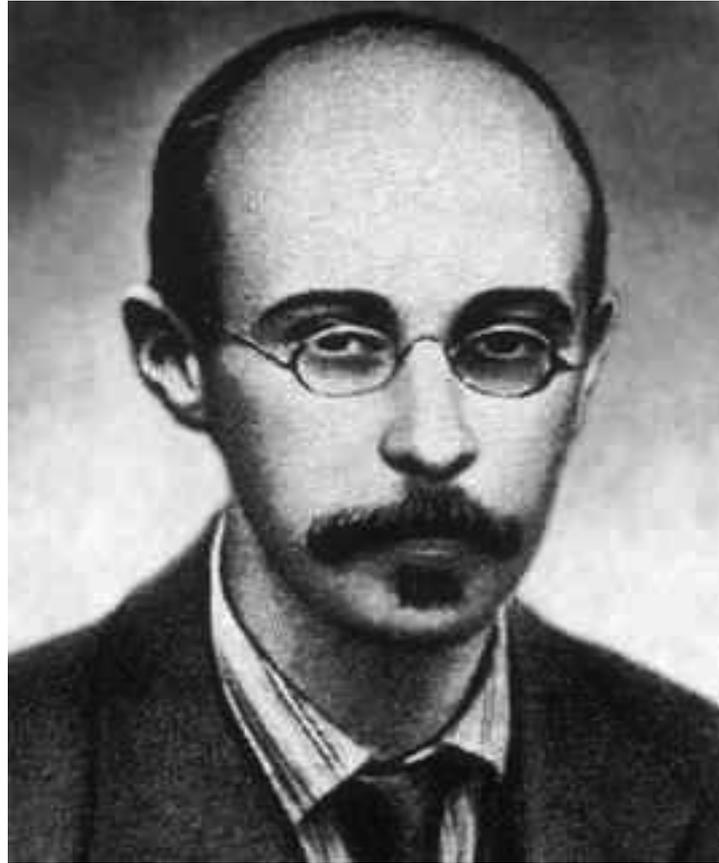
# L'univers a une histoire.

- L'astrophysicien devient un historien. .

# Les artisans du Big Bang



# Friedmann



La théorie du Big Bang est fondée  
sur

Einstein 1916-1917.

La Relativité Générale.

Théorie de la gravitation

.

# Georges Lemaitre 1928-1930. met ensemble les théories d'Einstein et les observations de Hubble

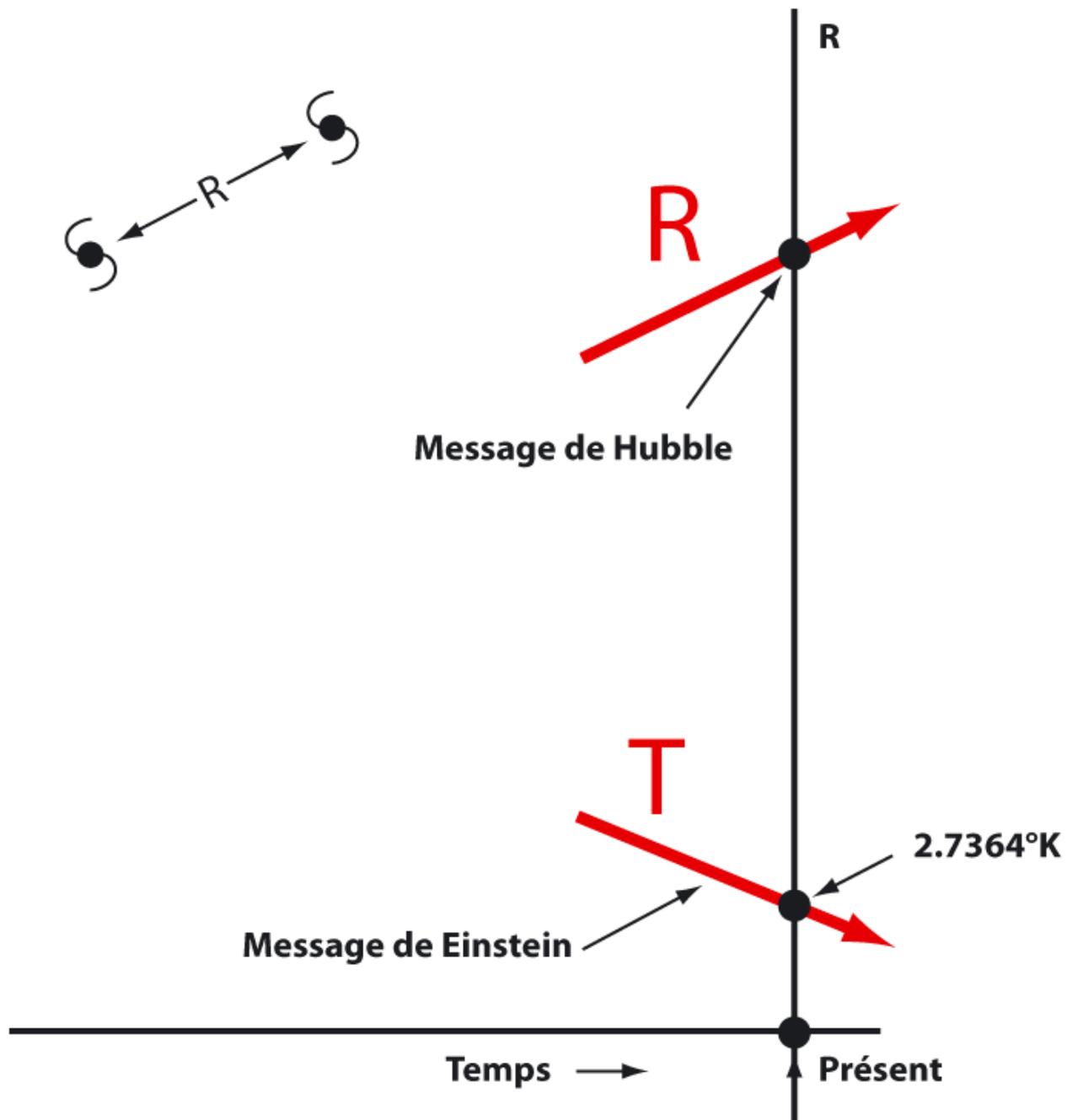
Conclusion:

- L'univers se refroidit...
- Dans le passé il était plus chaud
- Jusqu'à quelle température ?

# Observer loin

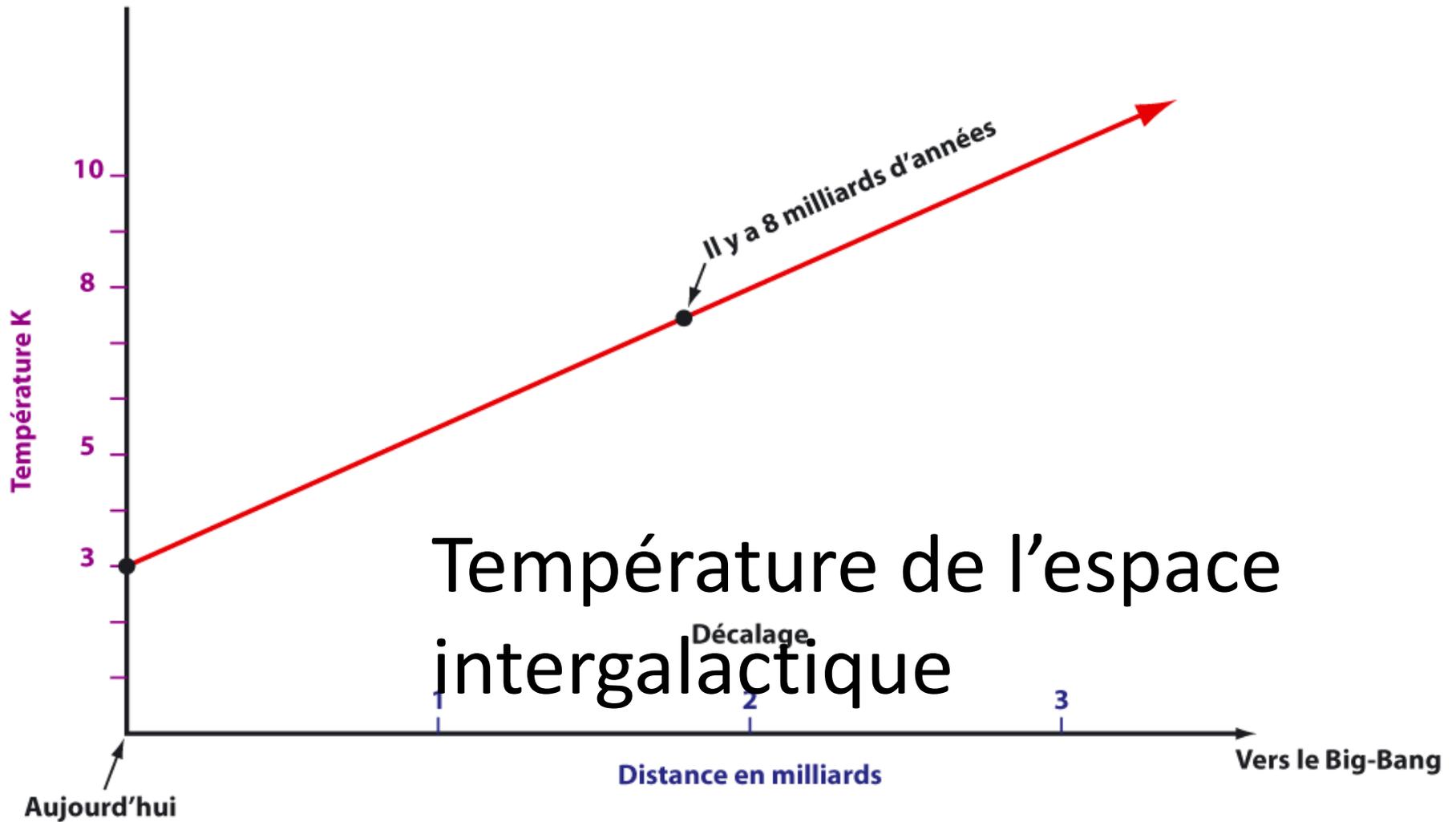
C'est observer « tôt »

- C'est observer « dense »
- C'est observer « chaud »

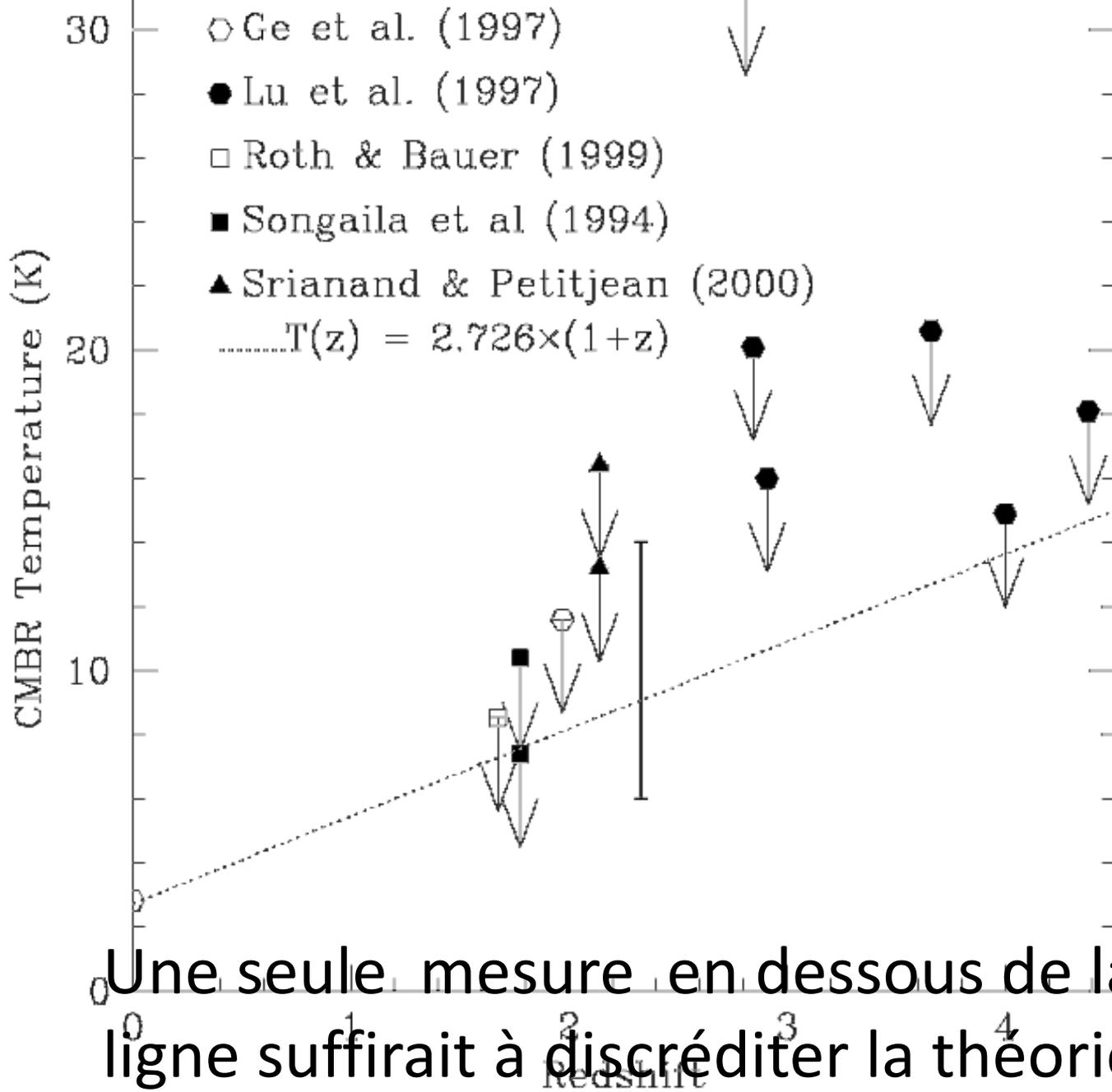


Fossile no 2  
(en négatif )

On n'observe pas d'astre plus froid  
que l'espace intergalactique



Milliards d'années-lumières



Une seule mesure en dessous de la  
 ligne suffirait à discréditer la théorie!!!!

# Georges Gamow

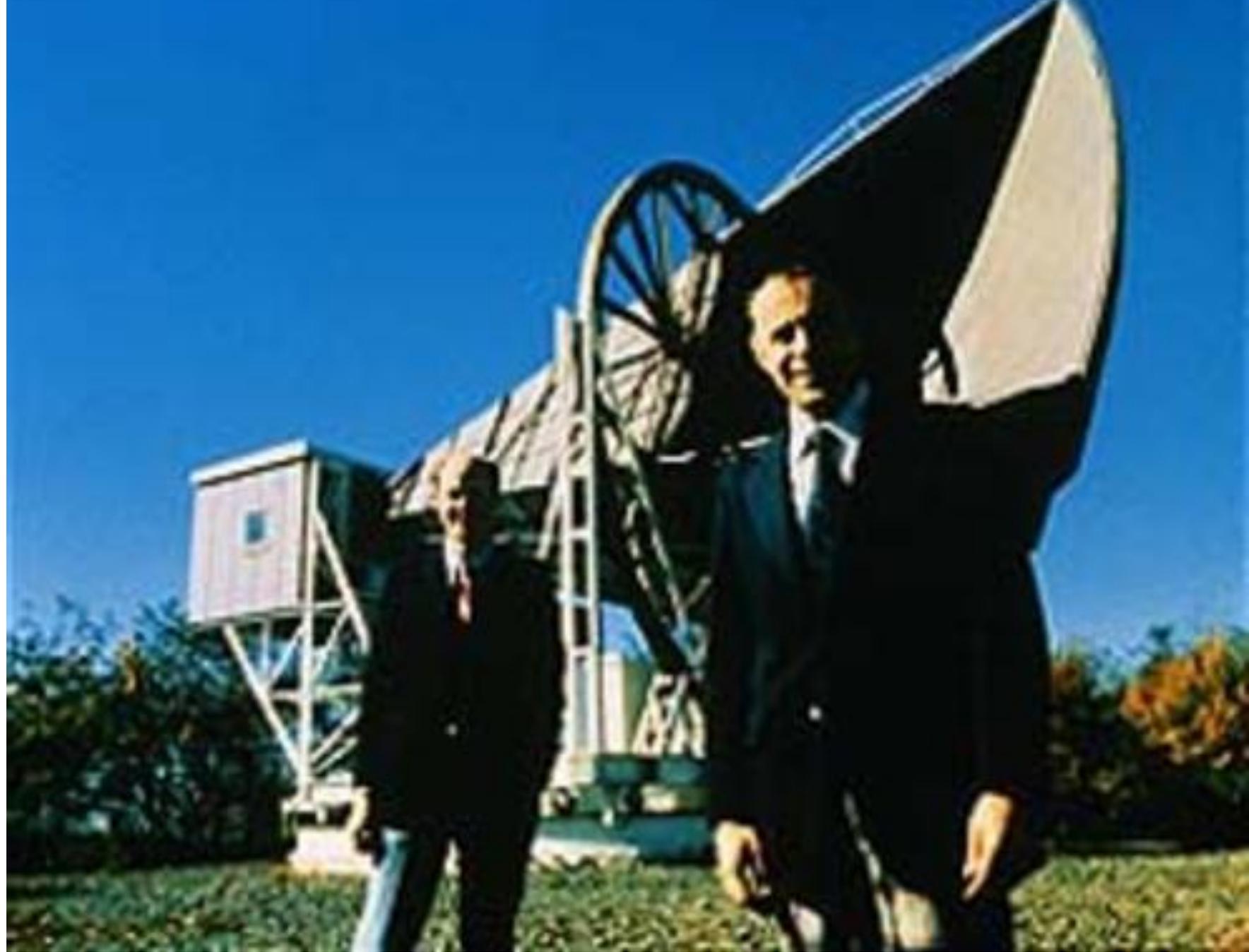


Et avant ?

Einstein + Hubble + Gamow  
(1948)

L'univers s'obscurcit!

Il était plus lumineux dans le  
passé



Fossile no 3

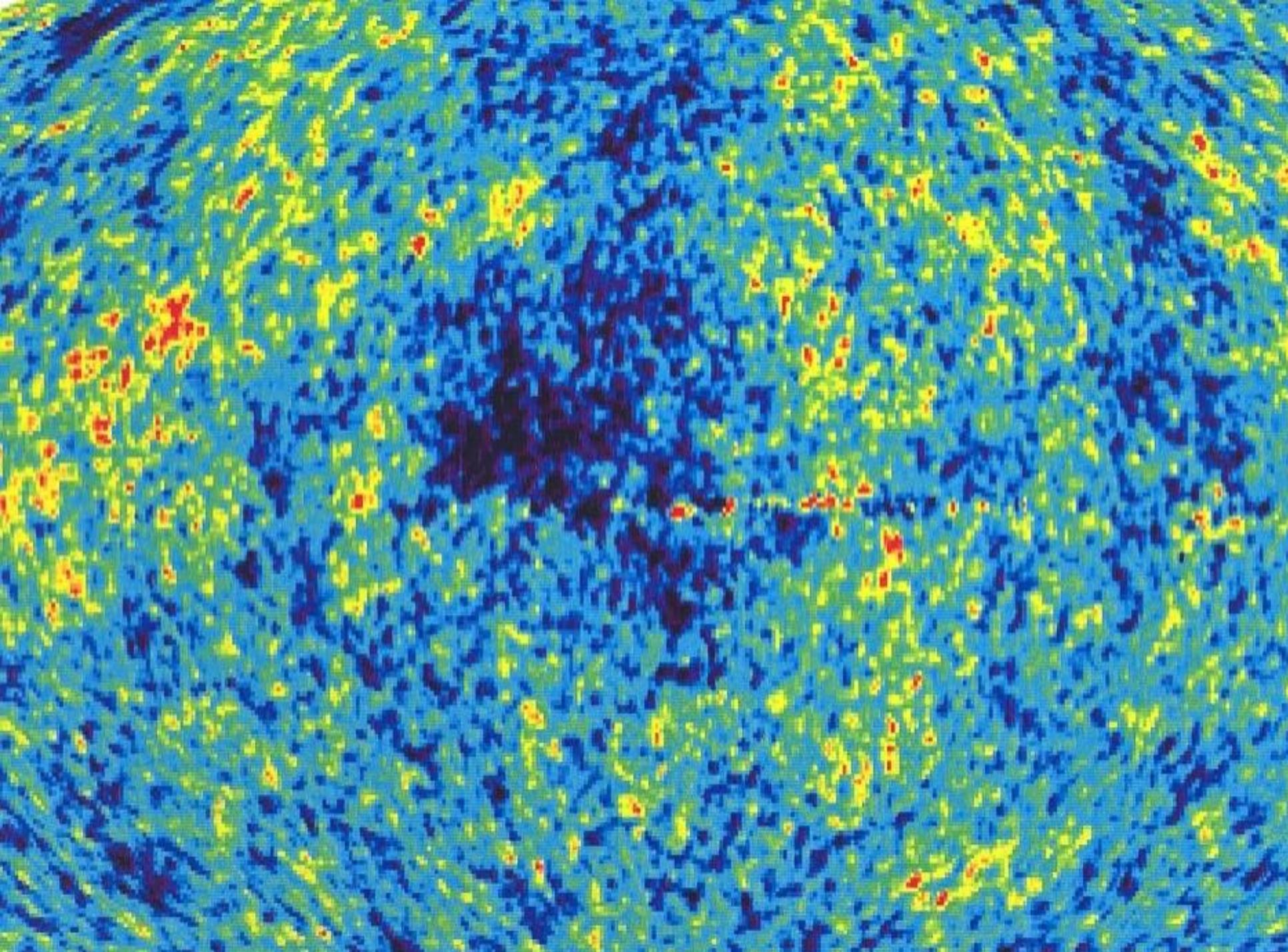
Le rayonnement fossile

Penzias et Wilson

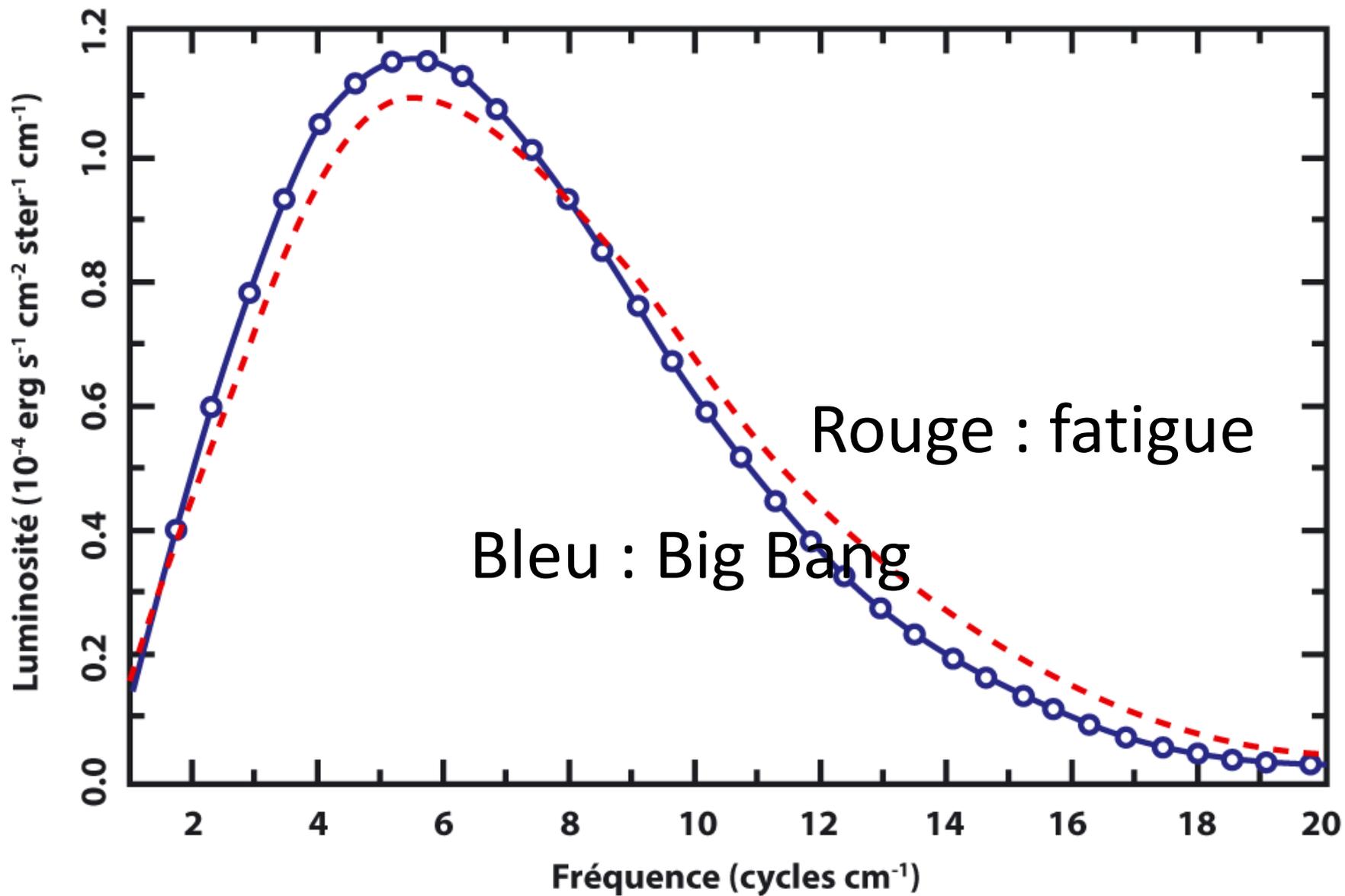
DéTECTÉ en 1965

Emis il y a 13,7 milliards d'années

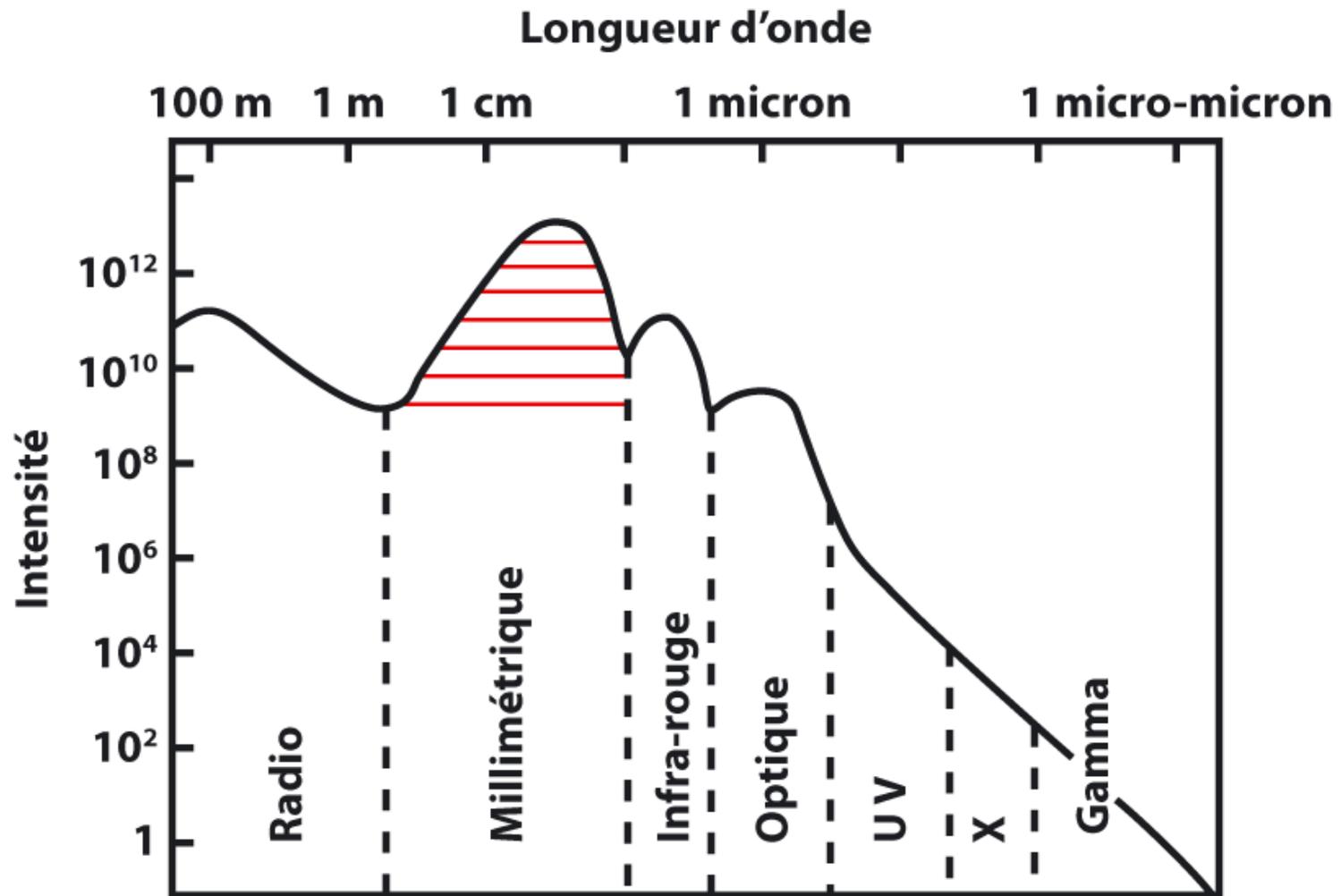
L'univers avait 380 mille ans



La distribution des intensités  
dans le rayonnement fossile  
est en accord avec la théorie  
(a mieux de un pour cent !!)



# Le rayonnement fossile



Conclusion du fossile no 3

L'univers a été porté jusqu'à au moins

3000 K

t = 380 000 ans après le Big Bang

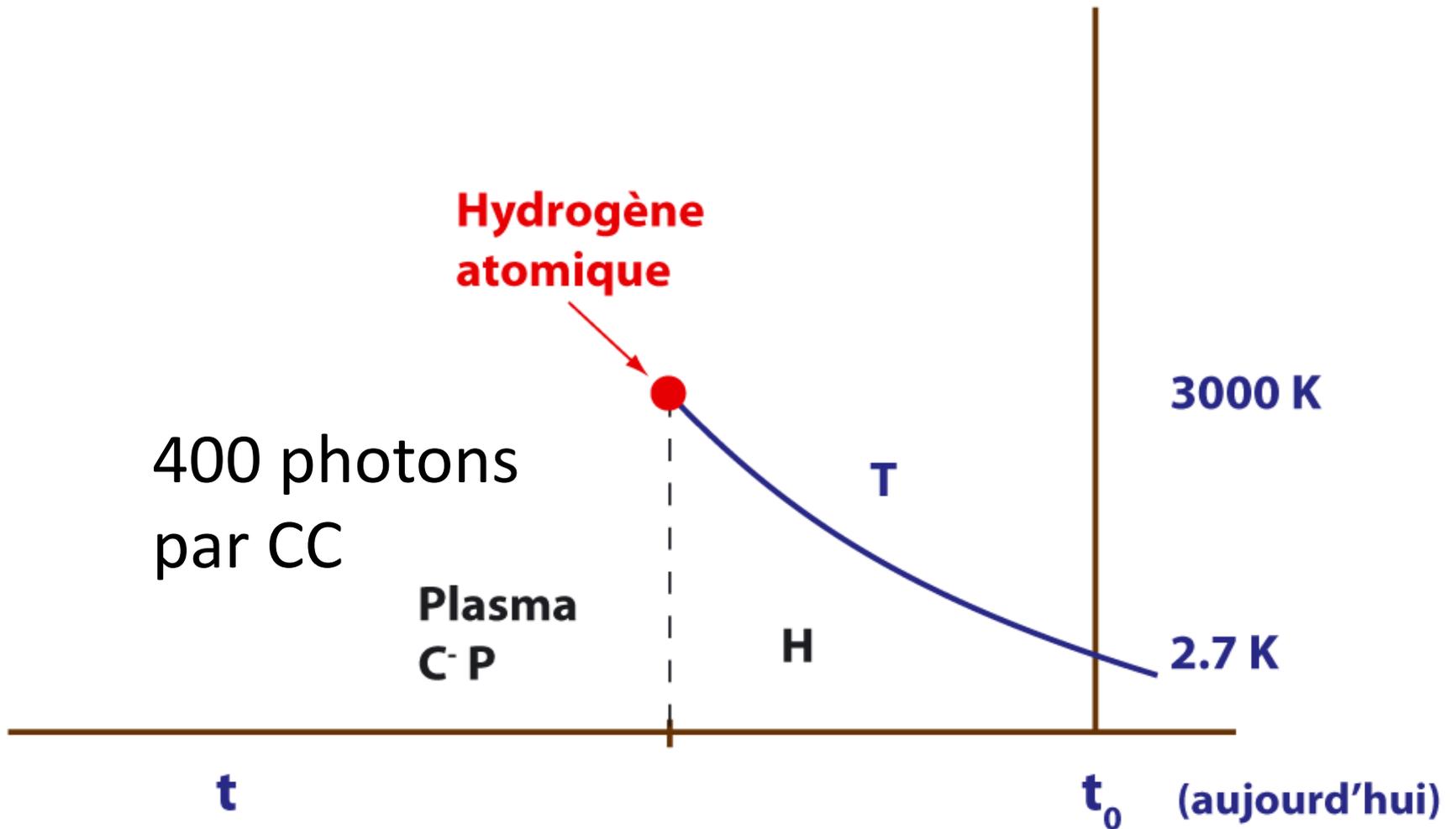
Conclusion du fossile no 3

Pour expliquer l'existence du rayonnement

Fossile il faut admettre que l'univers

A été porté a plus de 3000 degres K

# Le rayonnement fossile



L'univers primitif contient de l'hélium.

Fossile no 4

( 75 % hydrogene , 25 % hélium)

L'hélium est produit par la fusion  
nucléaire de l'hydrogene.

A une température d'au moins  $10^{10}$  K  
(Nucléosynthèse primordiale)

# Composition de la soupe atomique prégalactique

•  
Les cendres nucléaires du  
Big Bang:  
le deuterium  
les helium-3 helium-4  
le lithium-7

# Johannes Geiss



# Fred Hoyle



# William Fowler



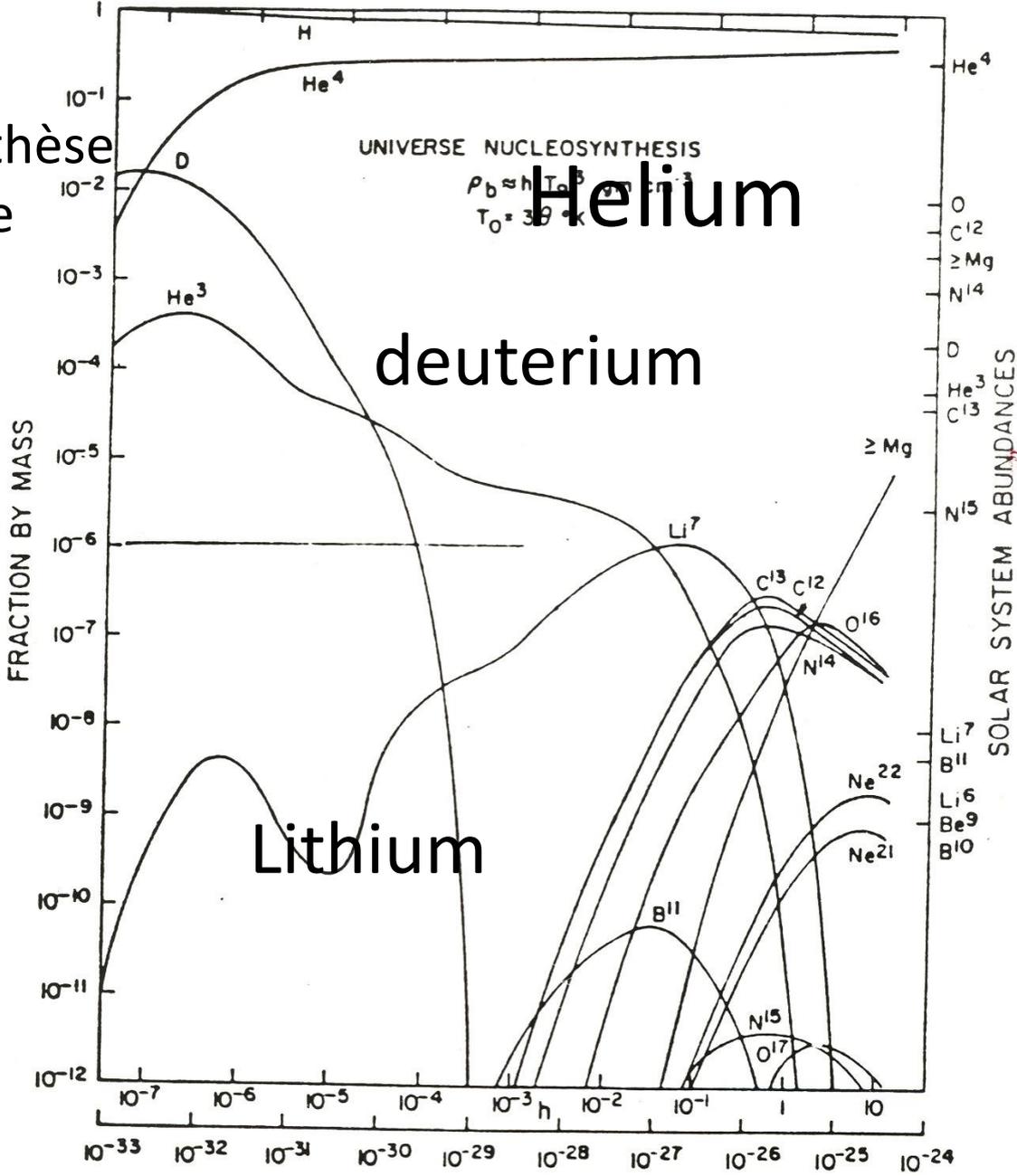
Les abondances mesurées de  
Deuterium He-3 He-4 Li-7  
sont en bon accord avec les prédictions  
du Big Bang

Fossile no 5 ( négatif)

La soupe atomique primordiale

Ne contient aucun atomes lourds  
comme C N O Fe

Nucléosynthèse  
Primordiale



**Helium**

deuterium

Lithium

SOLAR SYSTEM ABUNDANCES

# Fossile no 6

## Nombre de familles de particules élémentaires

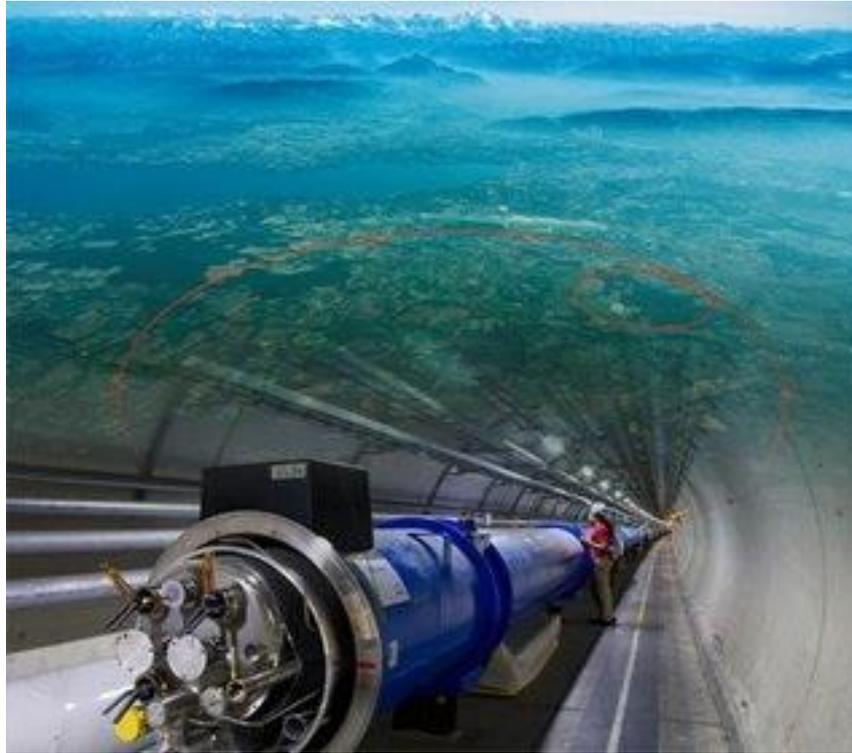
- 1 Electronique
- 2 Muonique ,
- 3 Tauique  
et ???

Combien y a t il de familles  
de particules élémentaires ?

# Nombre de familles

- Pour expliquer correctement les populations de noyaux – cendres du Big Bang en prévoit trois et pas plus.
- : (1970)

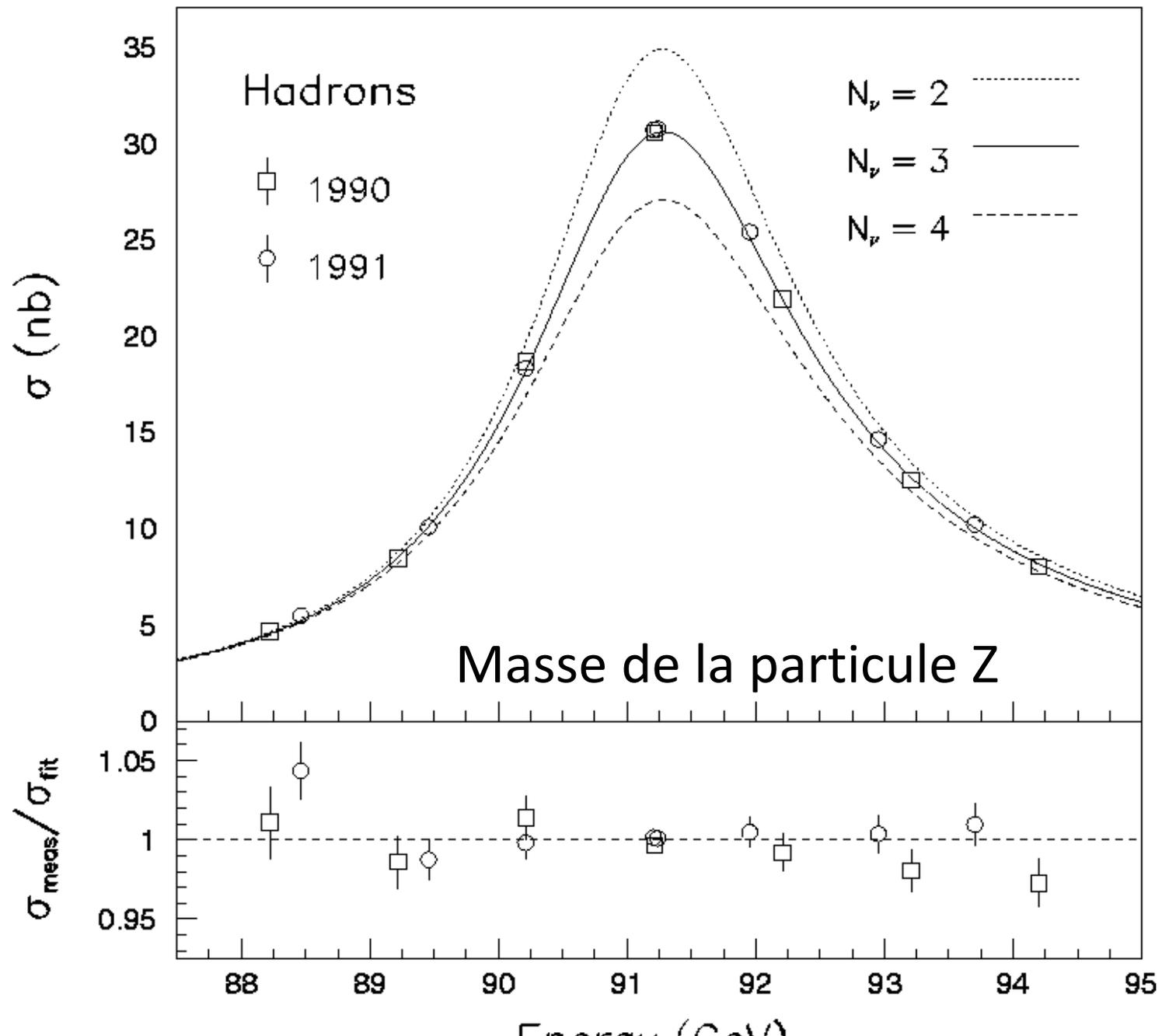
# LHC CERN



Mesure de la masse de la particule Z 1974 )

Expérience du Cern (1982) sur la  
génération de la particule  $Z_0$  des  
interactions faibles

Résultat: trois familles !!!



# Explication des fossiles 4 , 5 et 6

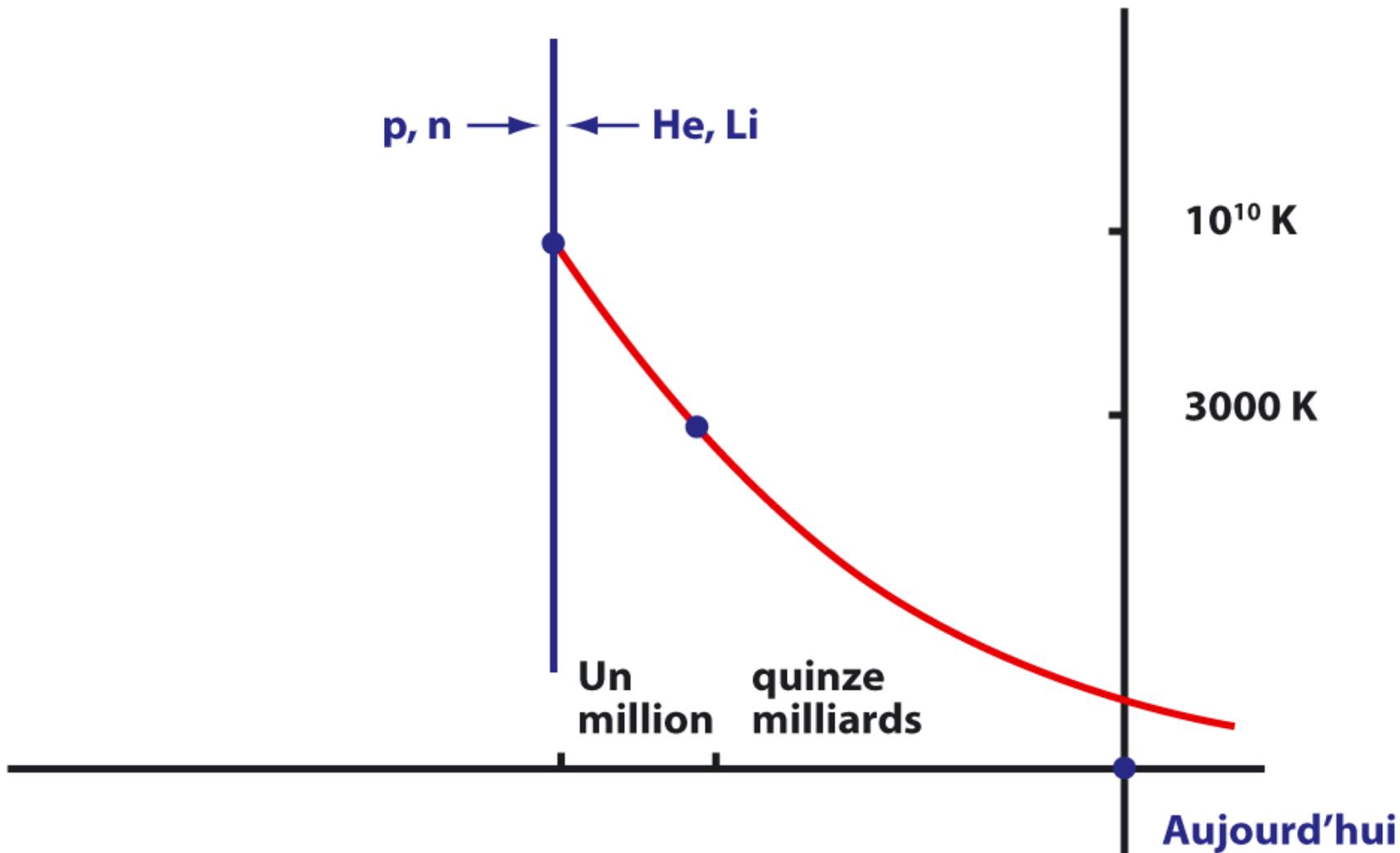
Le cosmos a été porté à (au moins)

$$T = 10^{10}$$

10 000 000 000 K

à  $t =$  une seconde

Conclusion de la nucléosynthèse  
primordiale

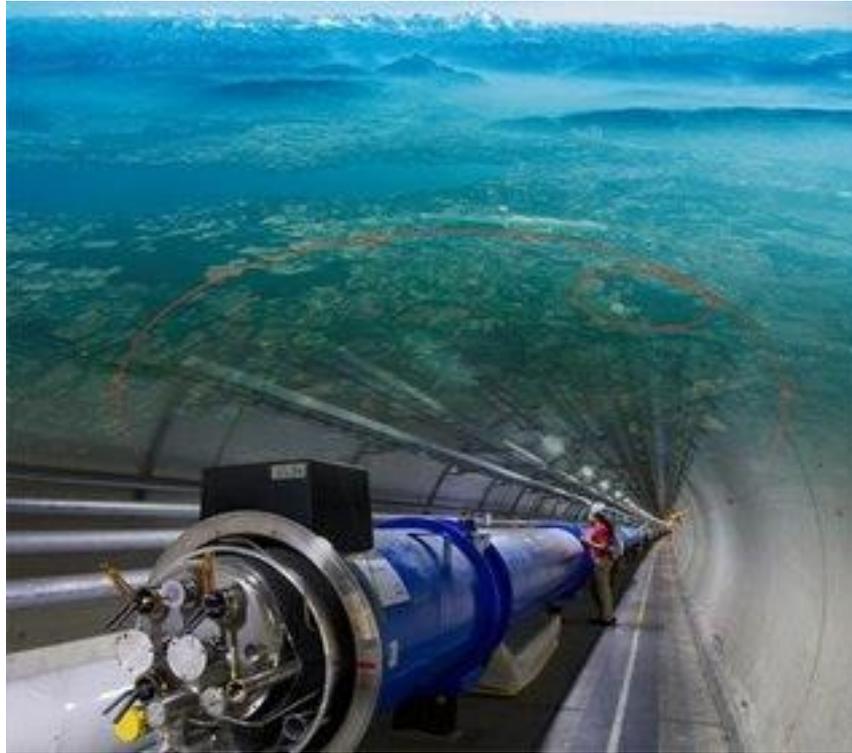


# Fossiles

No 7 Absence d'antimatière  
dans le cosmos

.

# LHC CERN



Mesure de la masse de la particule Z 1974 )

Matière et antimatière n'interagissent pas exactement de la même manière.

## Fossile no 8

Les charges électriques du  
proton et de l'électron sont

numériquement égales  
(au signe près)

## Unification des forces

Deux forces sont dites « unifiées » si elles sont , en fait , des manifestations différentes d'une même force

19 ième siècle

Electricité et magnétisme

: = Force électromagnétique

1972 Force électromagnétique  
Et Force faible

= Force Electrofaible

Force Electrofaible

Et

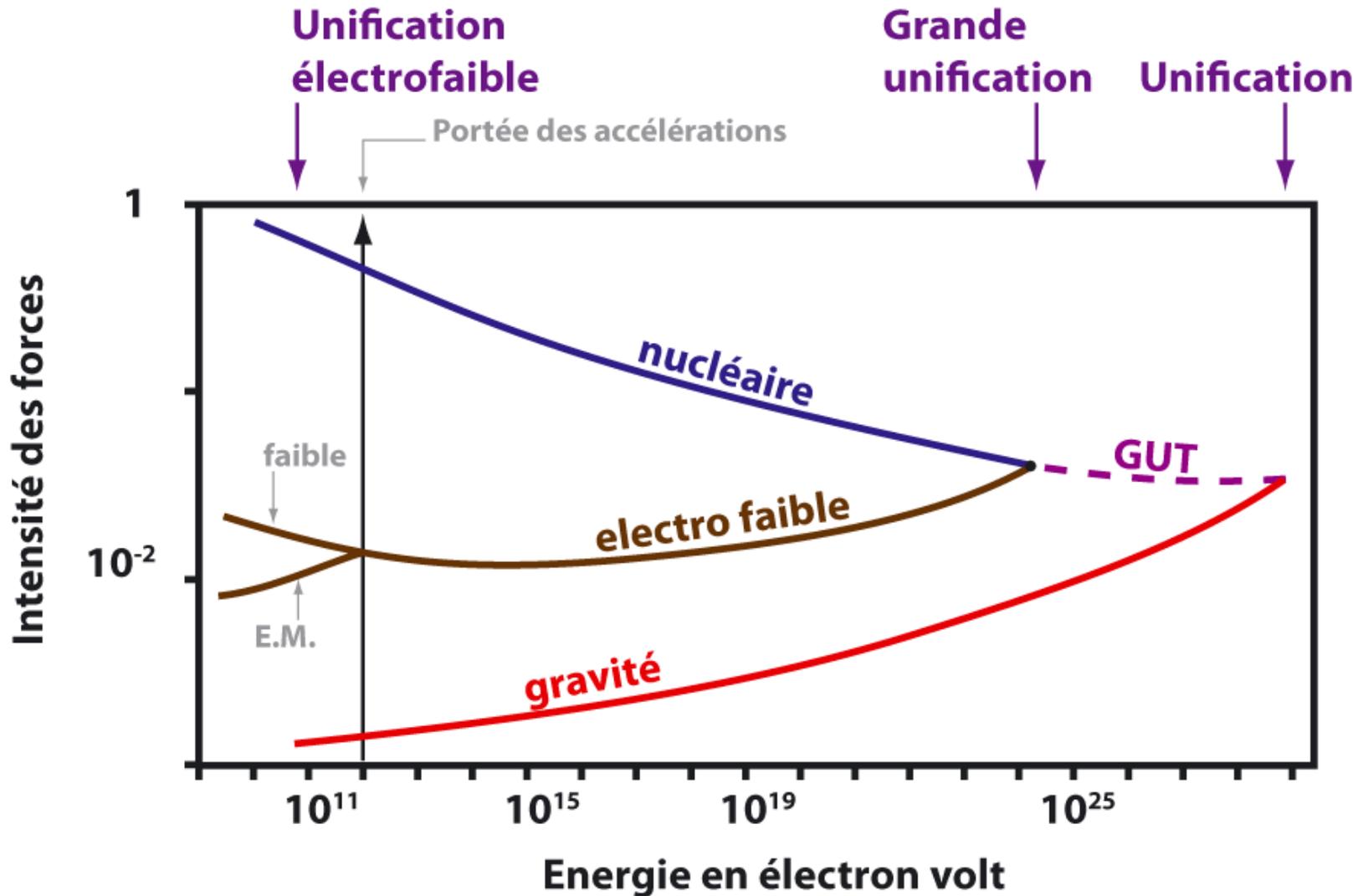
Force Nucléaire

= Grande Unification

A  $T = 10^{15}K$

=

# Unification des forces



Contraint par la structure en groupes  
du modèle standard de la physique  
Théorie de jauge  
Algèbre de Lie  
Invariance de phase.

Confirmation  
Découverte du  
boson de Higgs  
au  
CERN 2012

# Fossiles

NO 9 Trois milliards de  
photons par électron  
dans le cosmos .

Paramètres fertiles

Permet la complexité et la vie !

Discussion du principe anthropique

Explication des fossiles 7 , 8 et 9

,

Unification des forces à  $T = 10^{28}$

a  $t = 10^{-28}$  sec

(nucléaires, faibles et  
électromagnétiques.)

Fossile no 10

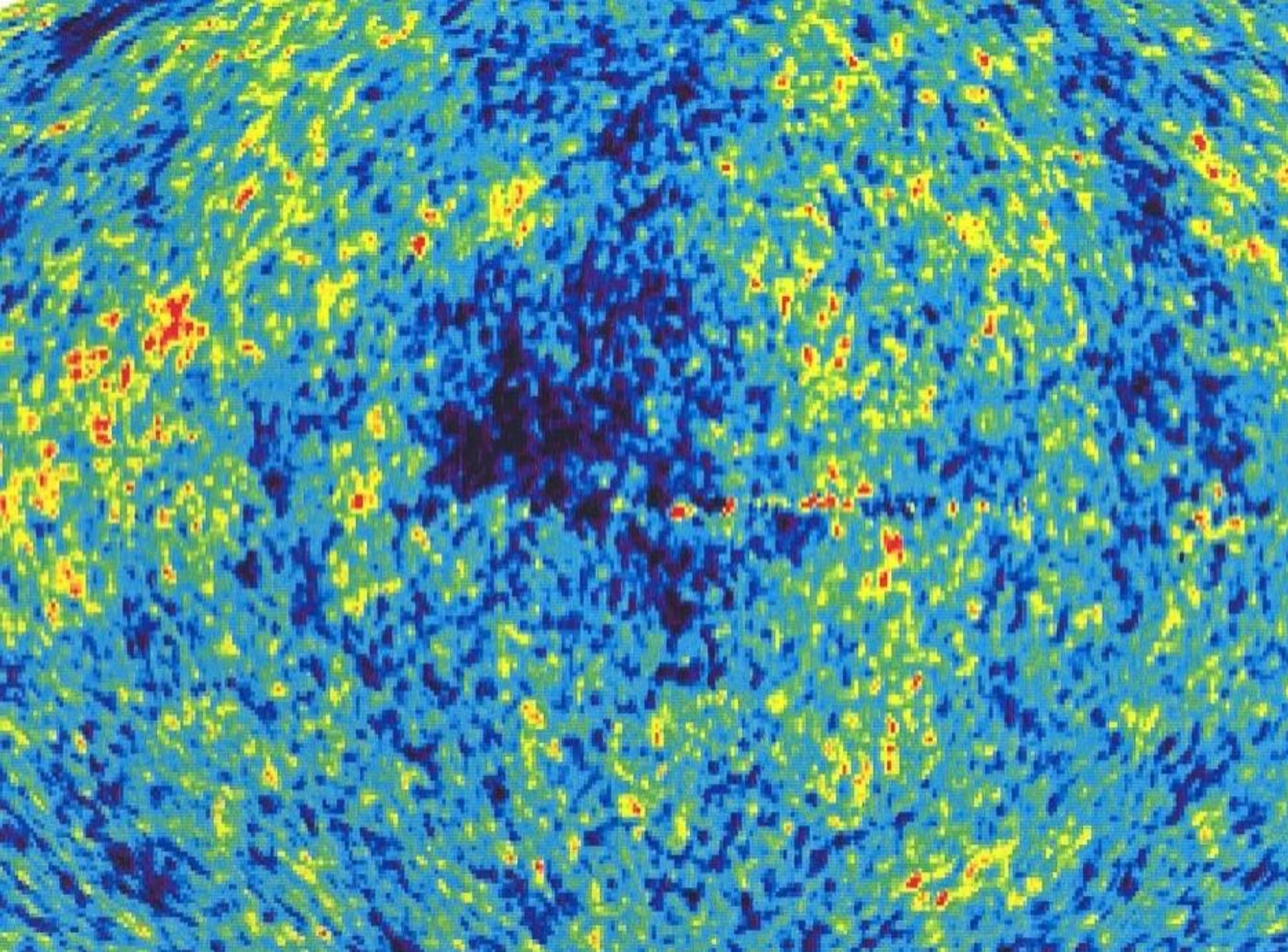
Détection des ondes de gravité ? 2014

Polarisation du rayonnement fossile

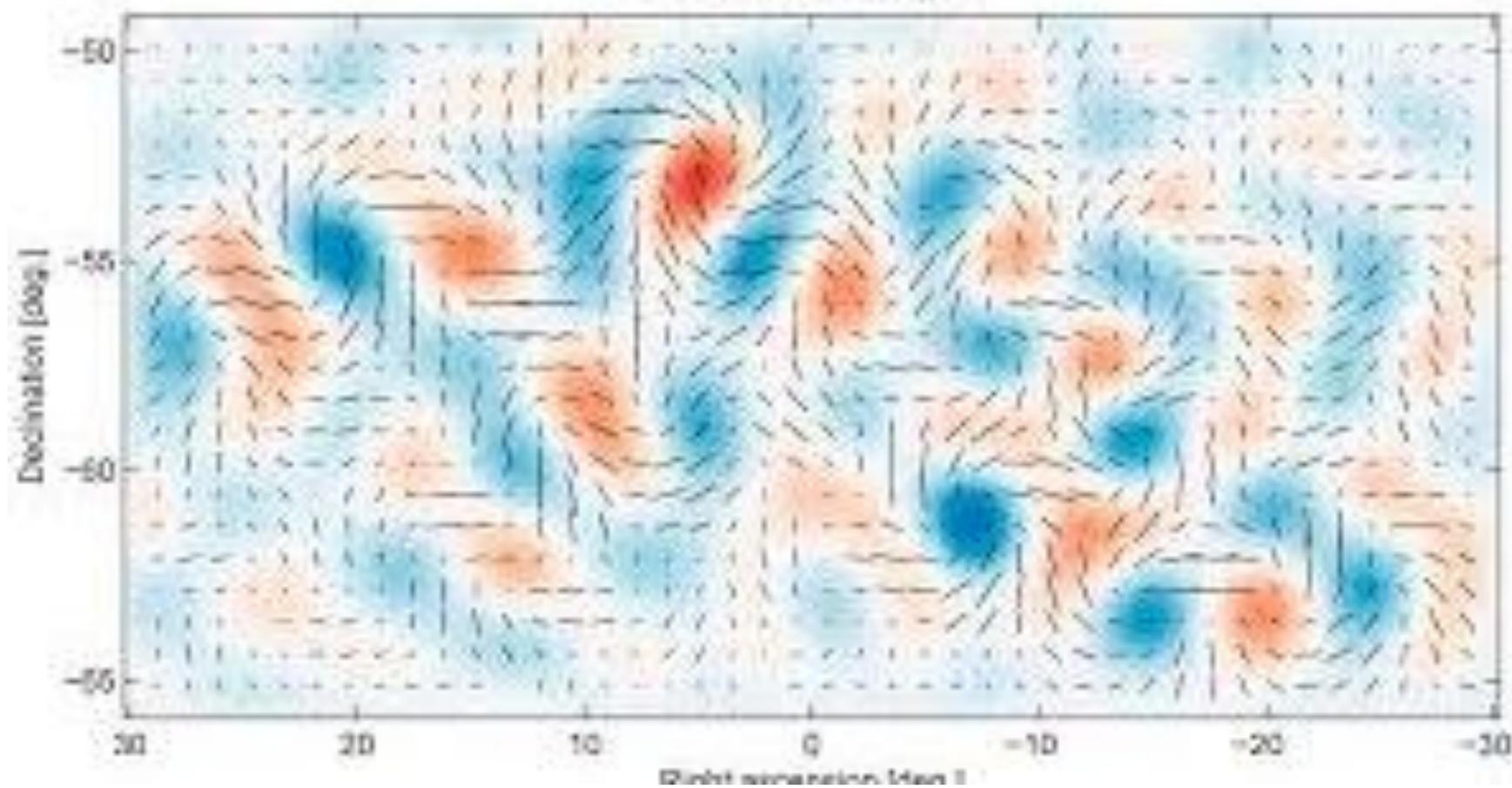
Confirmation de l'inflation ?

# Experience BICEP au Pôle Sud





BICEP2 B-mode signal



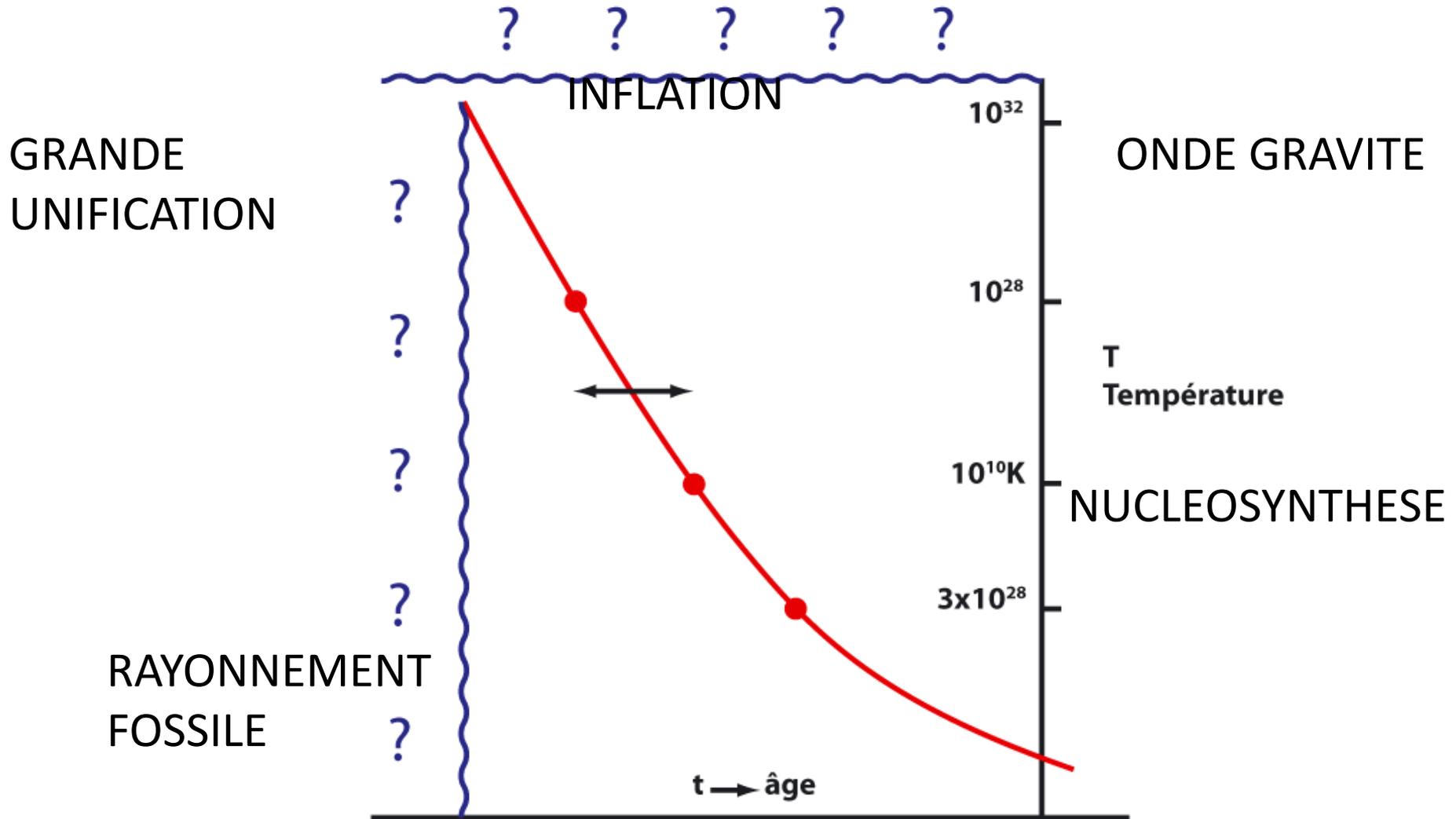
- Détection d'ondes de gravité par la polarisation
- dans le rayonnement fossile ?

Si confirmée : Confirmation de l'inflation primordiale ?

L'univers a atteint  
 $10^{32}$  K

À  $t = 10^{-33}$  sec

# Le mur de Planck



# Mur de Planck

- A  $T = 10^{32}$  degrees
- $t = 10^{-43}$  sec
- Notre connaissance de la physique s'effondre
- Les concepts : temps énergie, masse temperature sont inapplicables
- ???,

Et avant ?

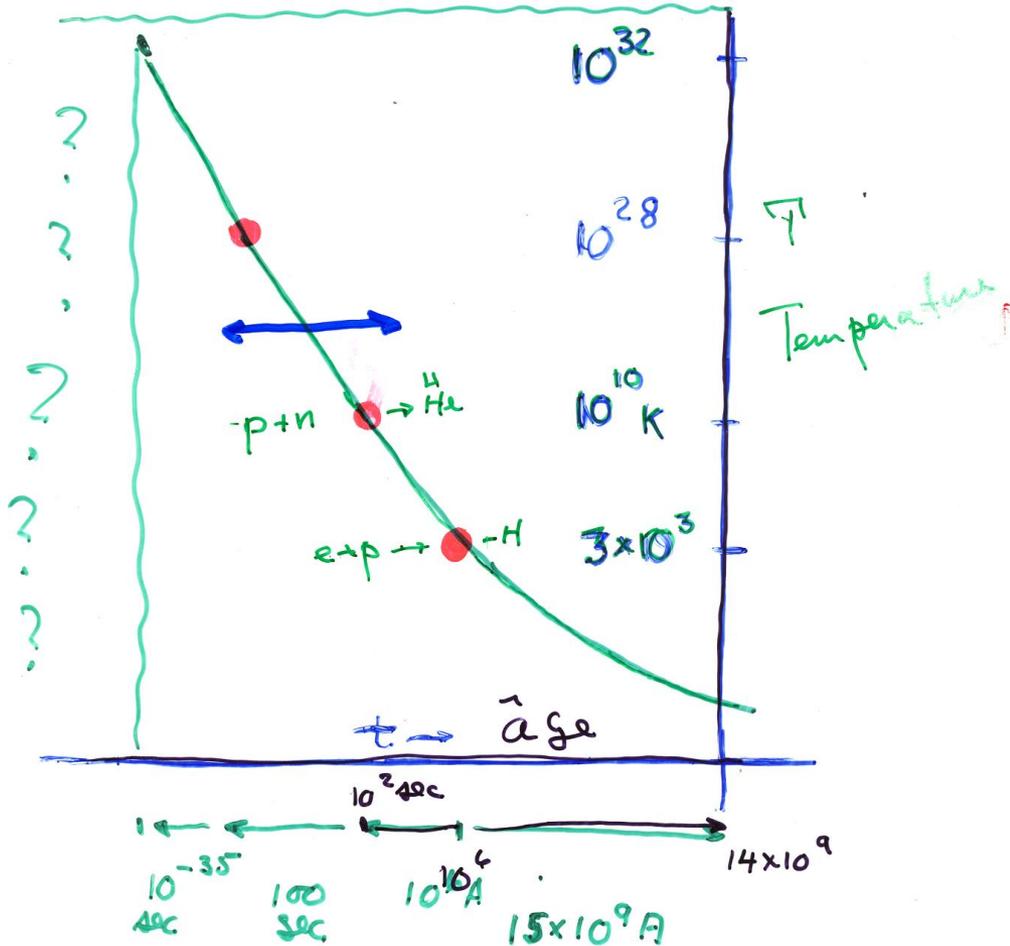
Empreintes dans le rayonnement  
fossile ?

En l'absence de fossiles  
on ne peut rien dire.

Les limites de la physique (juin 95).  
 Manque: une théorie quantique de la gravité.

Le Mur de Planck.

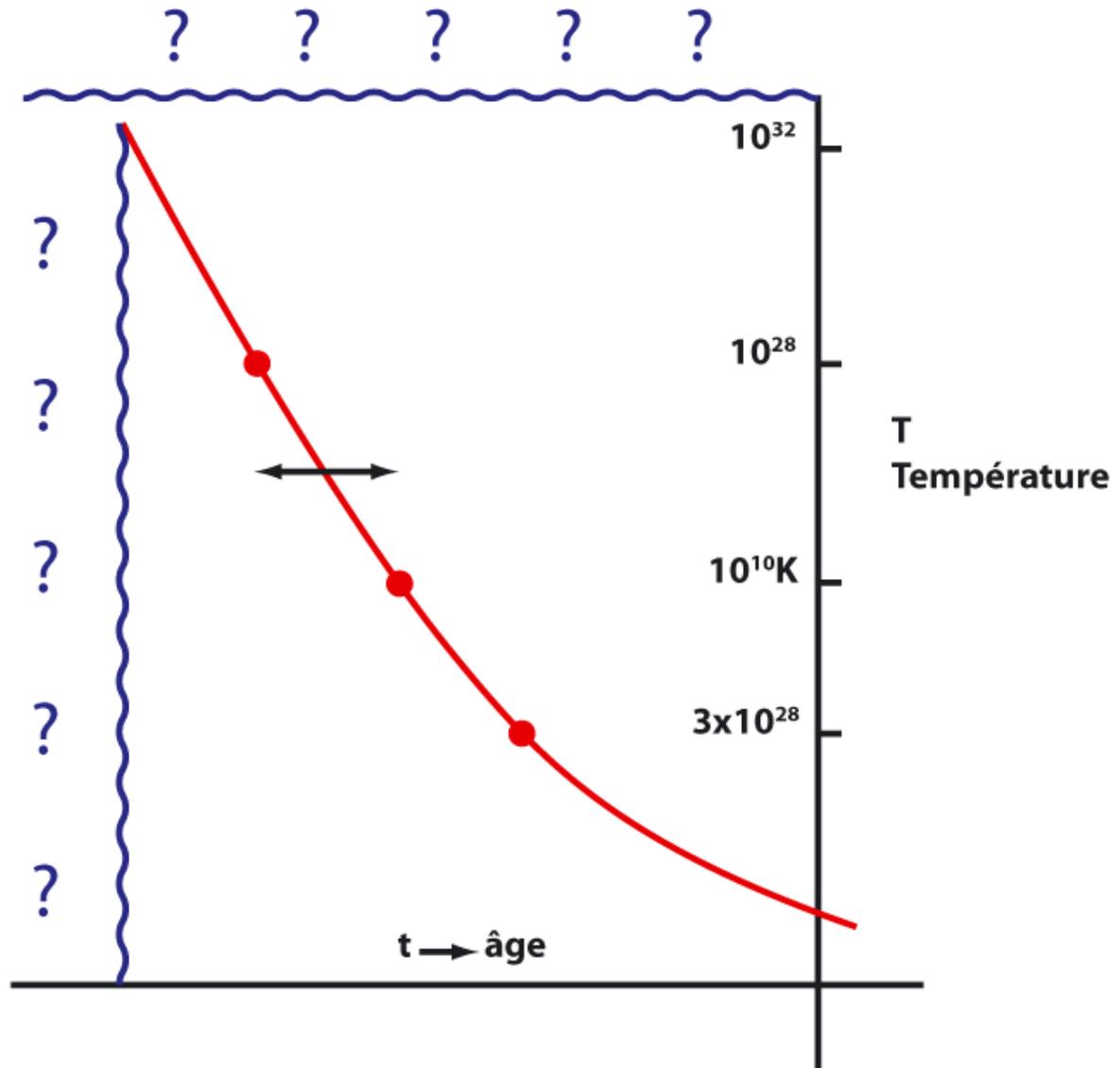
? ? ? ? ?



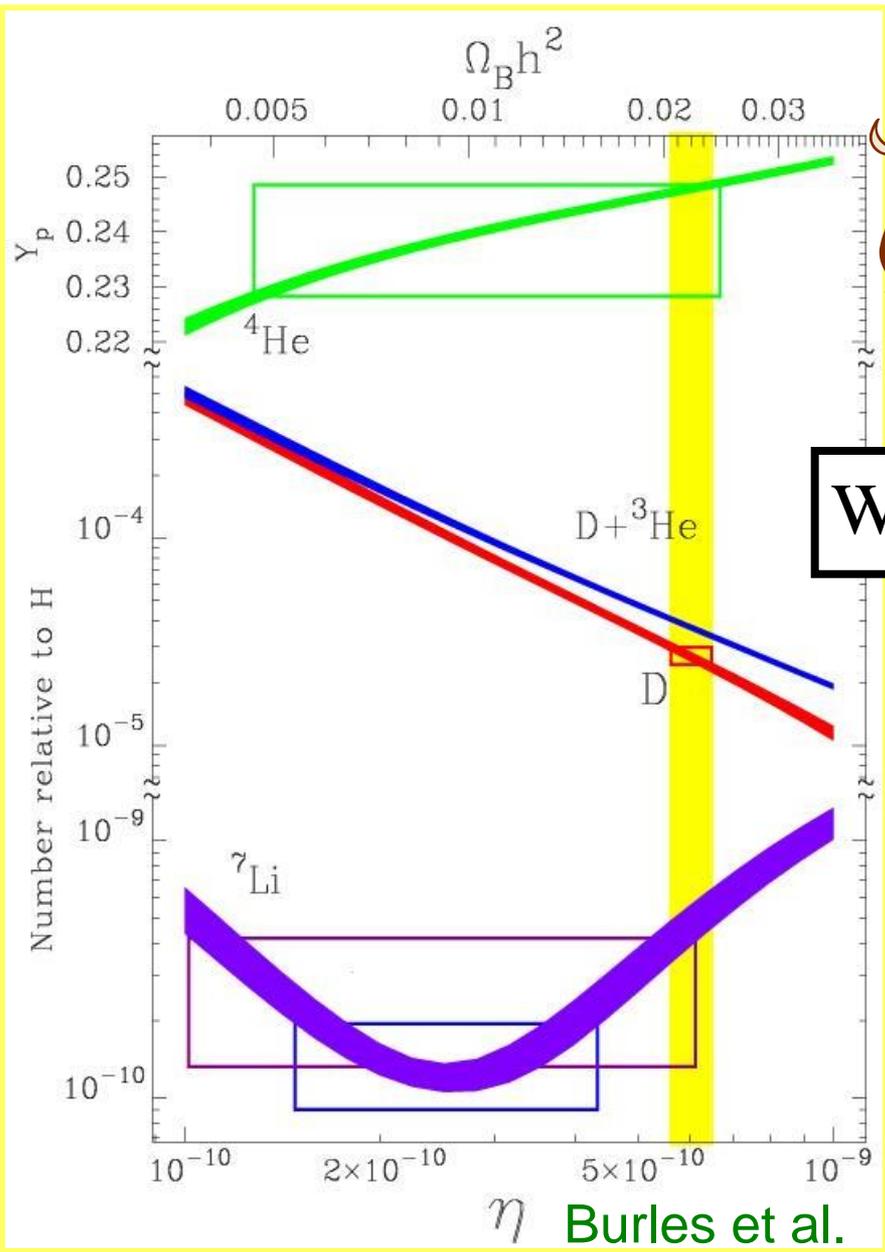
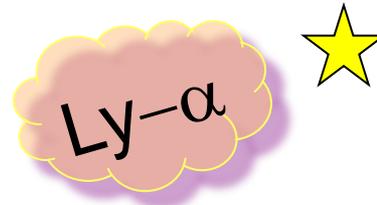
Essais:

1- ?

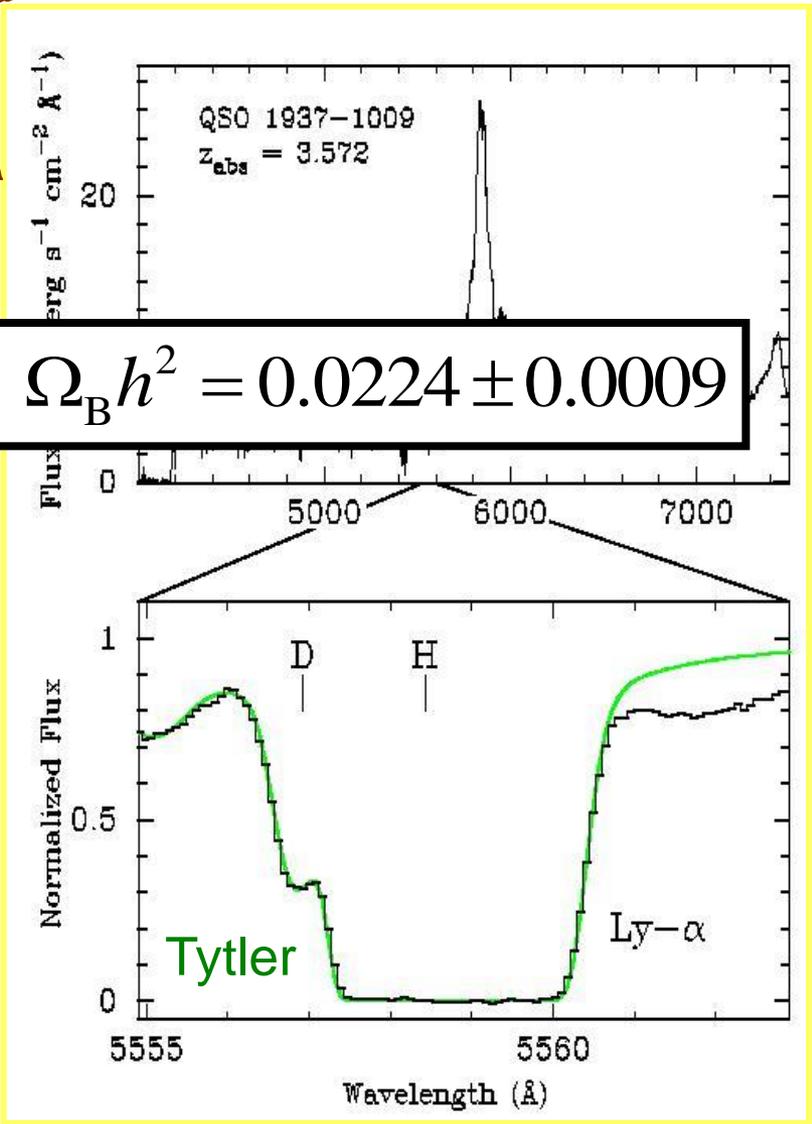
# Le mur de Planck



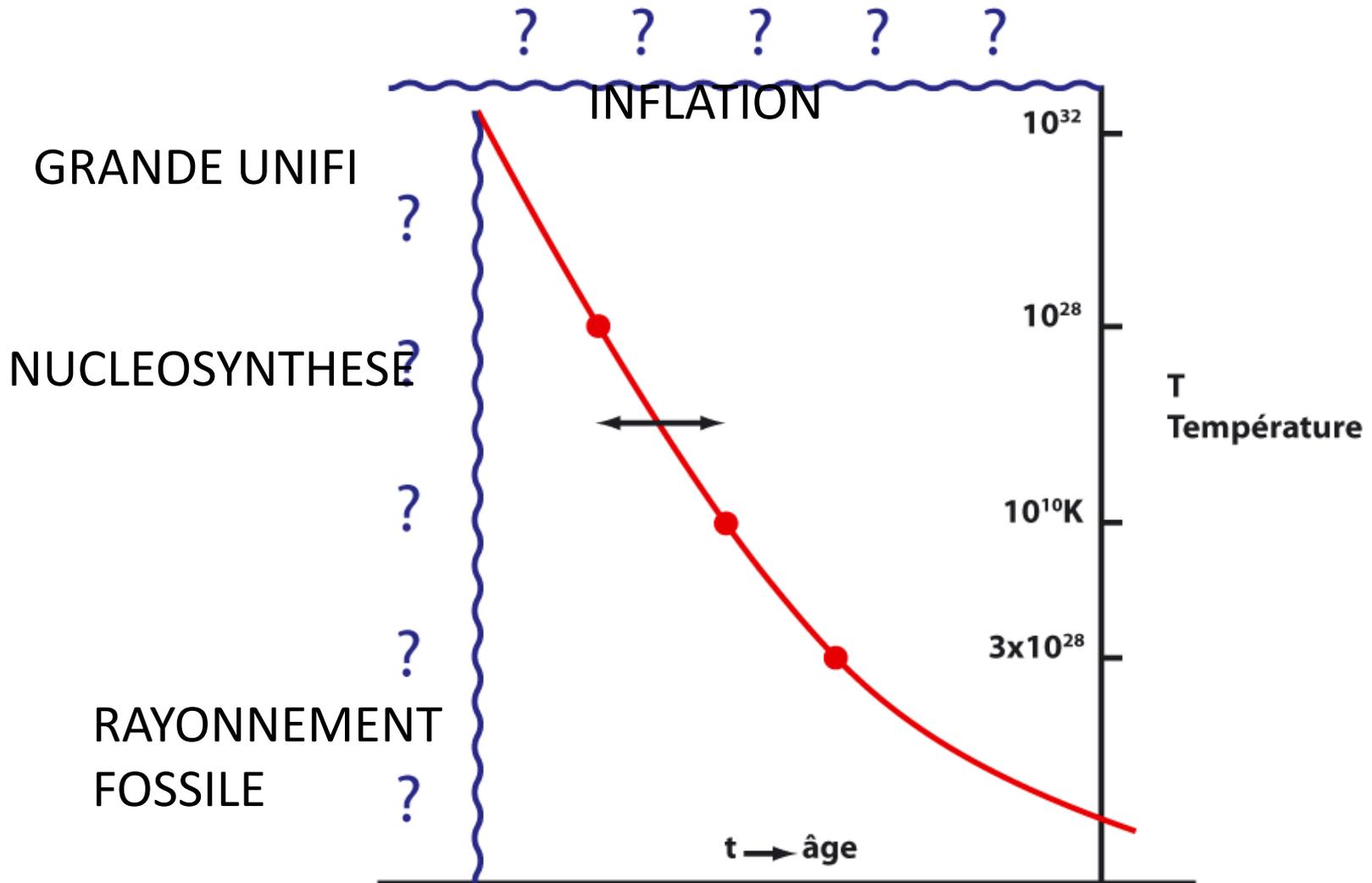
$$\Omega_B \sim 0.04$$



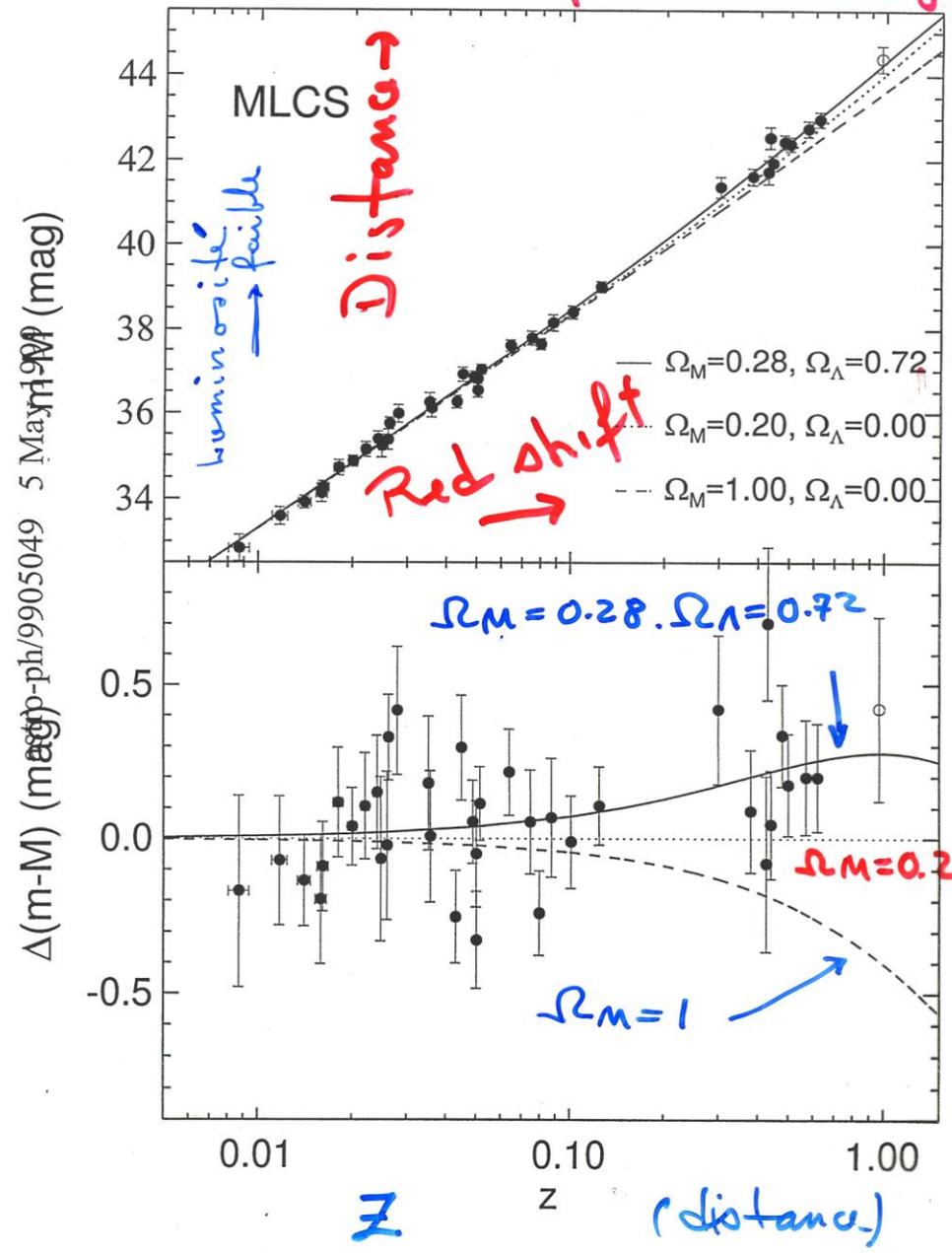
WMAP:  $\Omega_B h^2 = 0.0224 \pm 0.0009$



# Le mur de Planck

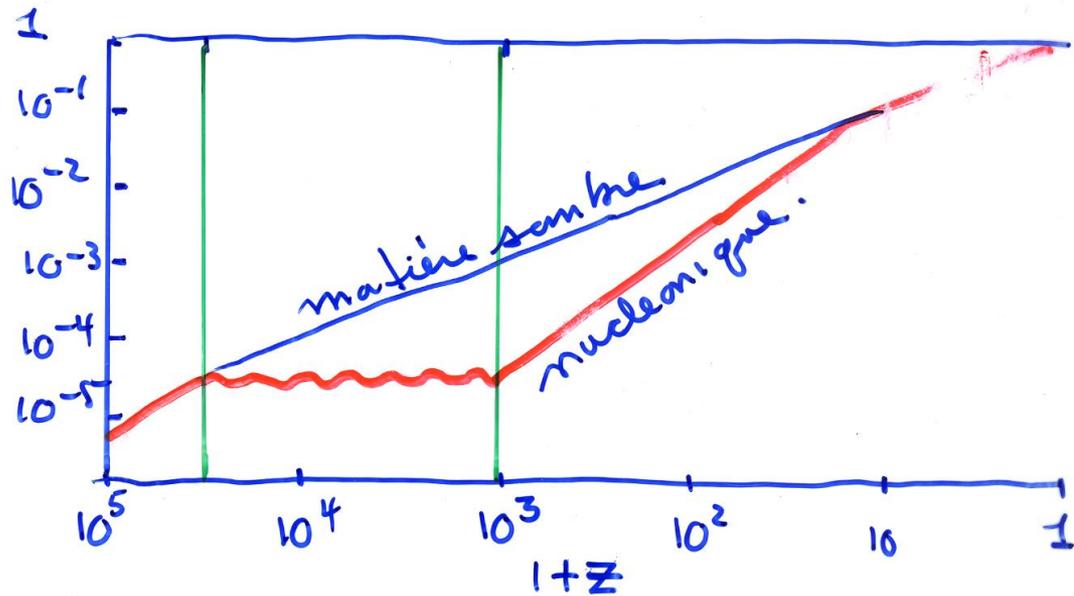


# Evidence for dark energy



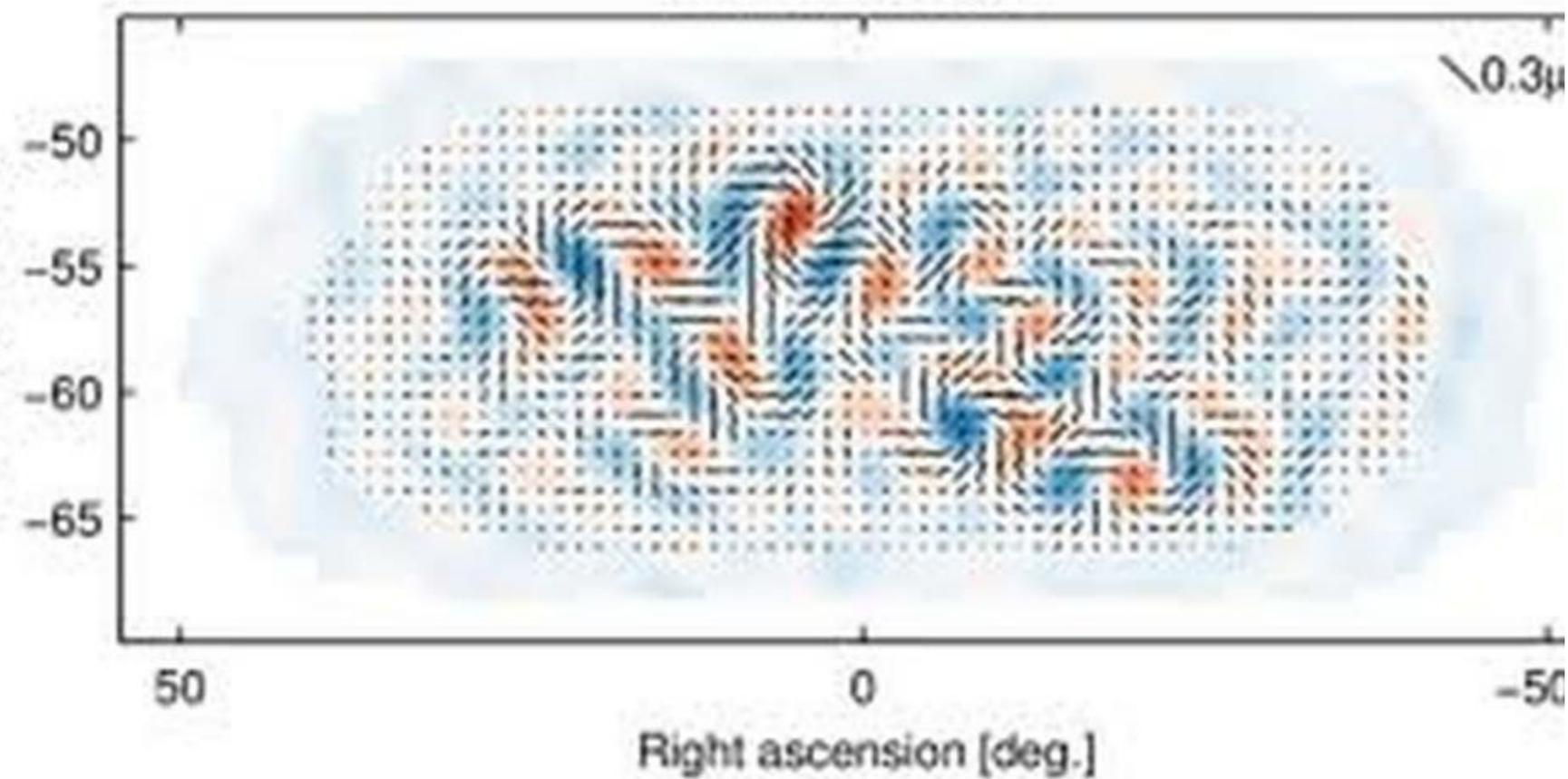
Croissance d'une surdensité  
avec matière sombre.

$\Omega_m = 1 \quad \Omega_0 = 0.02$ .

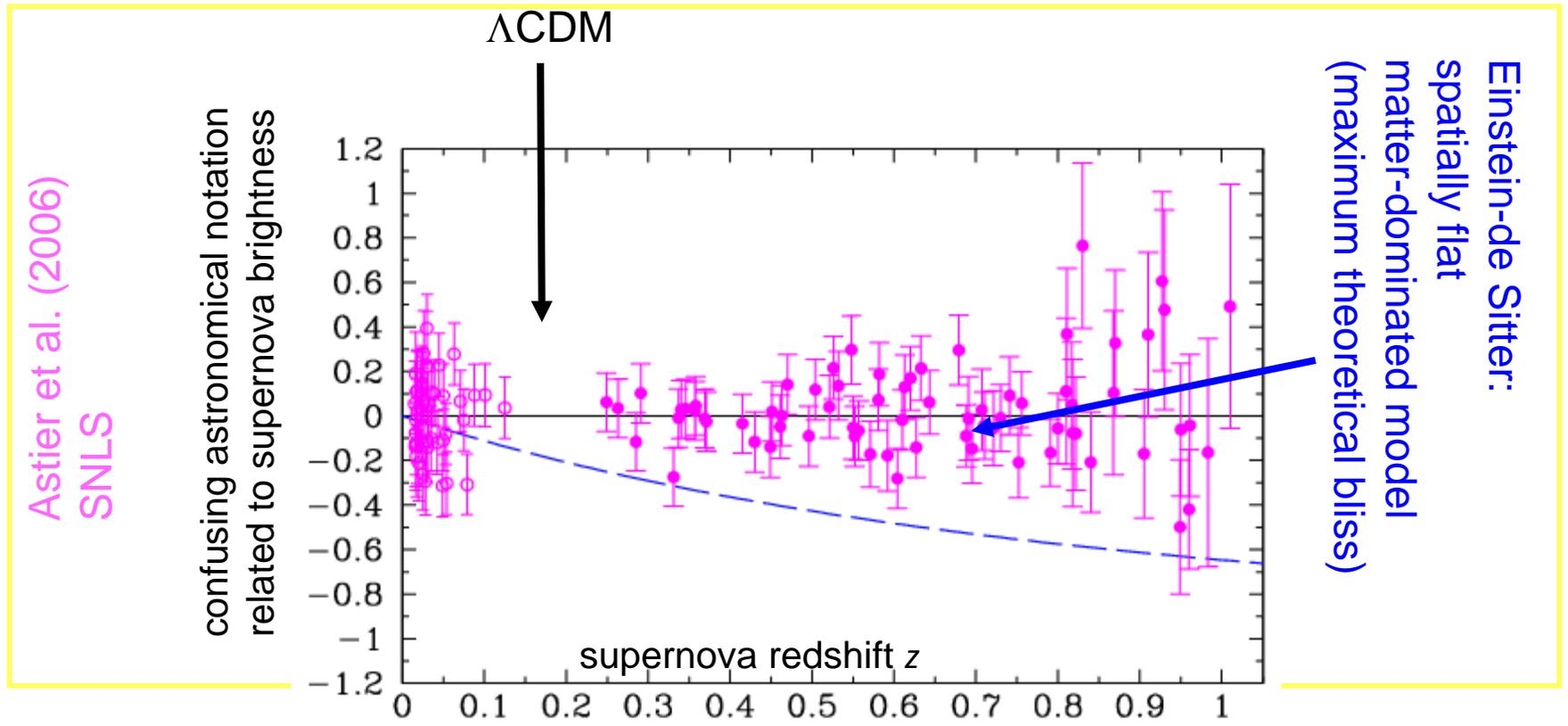


Croissance suffisante.

BICEP2: B signal



# High-z SNe are fainter than expected in the Einstein-deSitter model



## Experiments.

a) Energy width of  $Z_0$  particle.

$$\Delta t = \Delta E / \hbar.$$

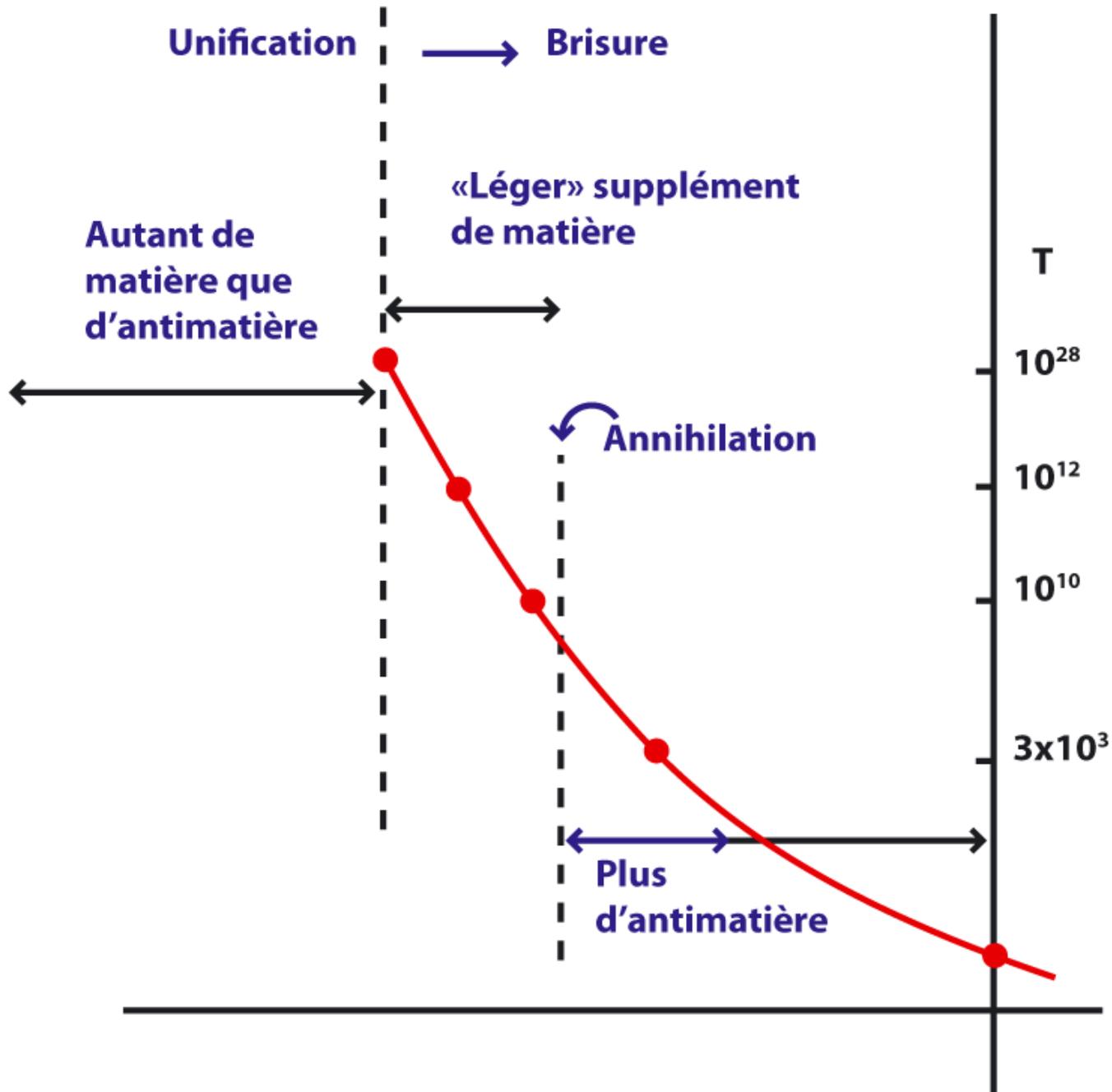
$$Z_0 \begin{cases} \rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_e \\ \rightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_\mu \\ \rightarrow \nu_\tau + \bar{\nu}_\tau \\ \rightarrow \dots \end{cases}$$

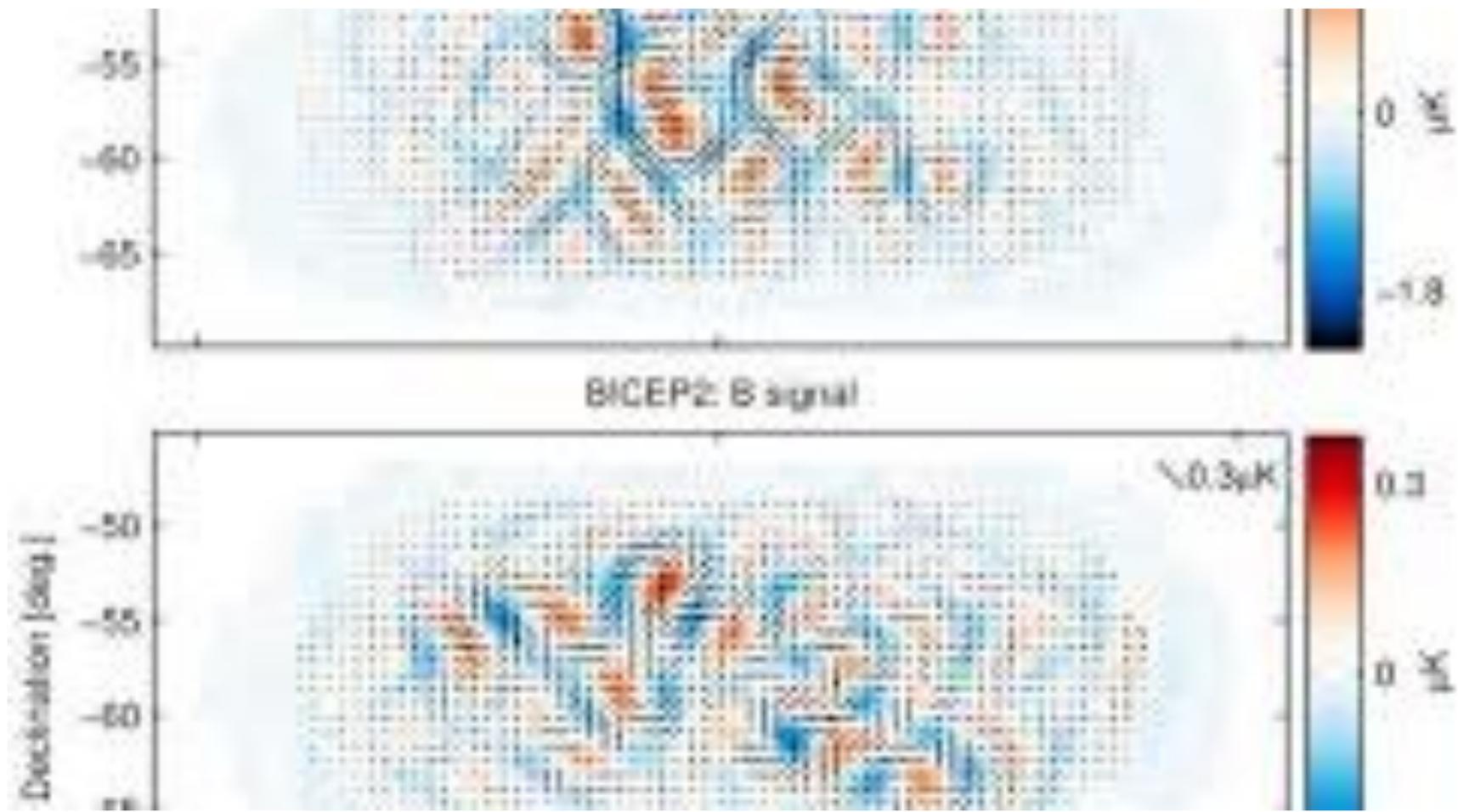
$$\Gamma_{\nu\bar{\nu}} = G m_Z^2 / 12\pi V_e \approx 180 \text{ MeV}.$$

$$\Gamma_Z = \sum_i \Gamma_i = 2.63 \text{ GeV} + 0.18 \Delta N_\nu$$

$$\Gamma \quad \Delta N_\nu < 3 \quad 90\%.$$

b)  $M_W^2 = M_Z^2 \cos^2 \theta_w$

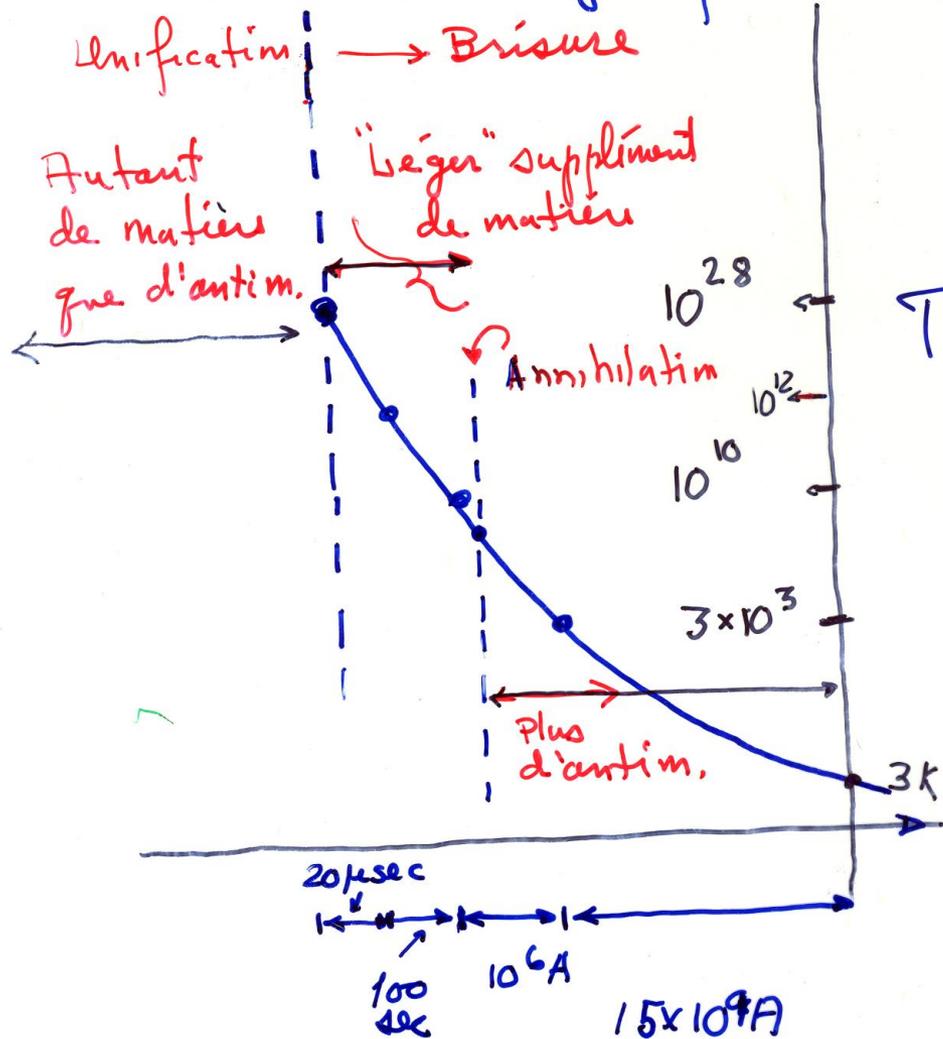


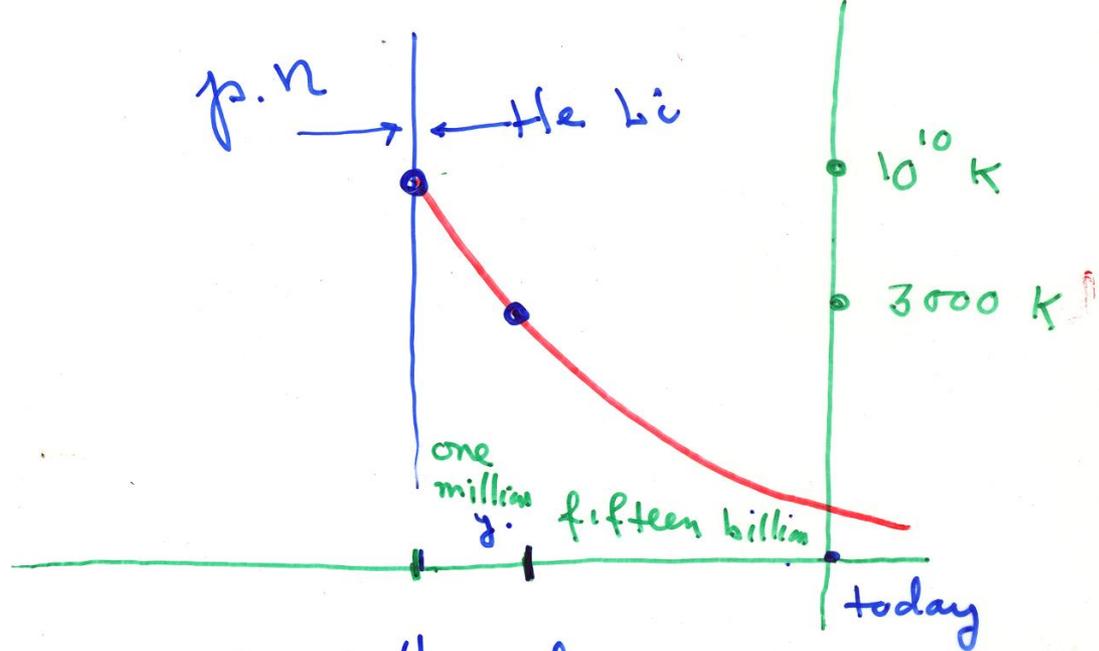


Fossiles: 1) pas d'antimatière

2) Trois milliards de photons  
par nucléons-

3 charge du proton = charge de l'électron





$T >$  ten billion degrees

[bonus: density of atoms (p+n)  
: no of families of particles.]

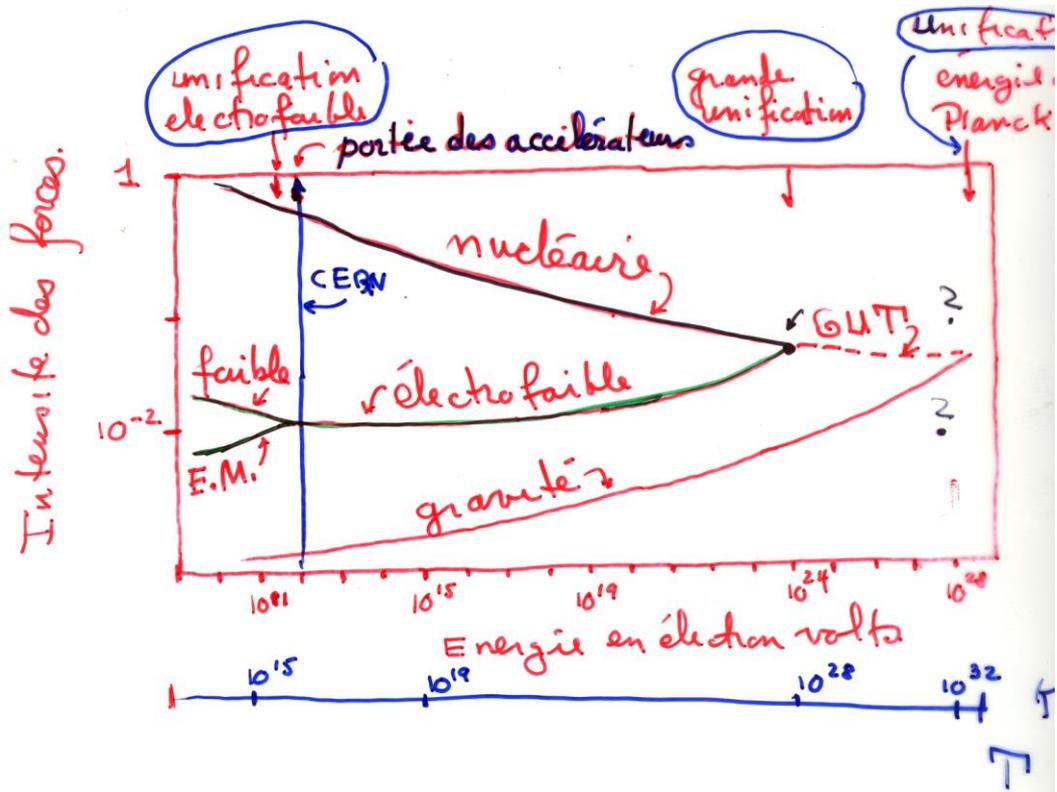


fig 04-3

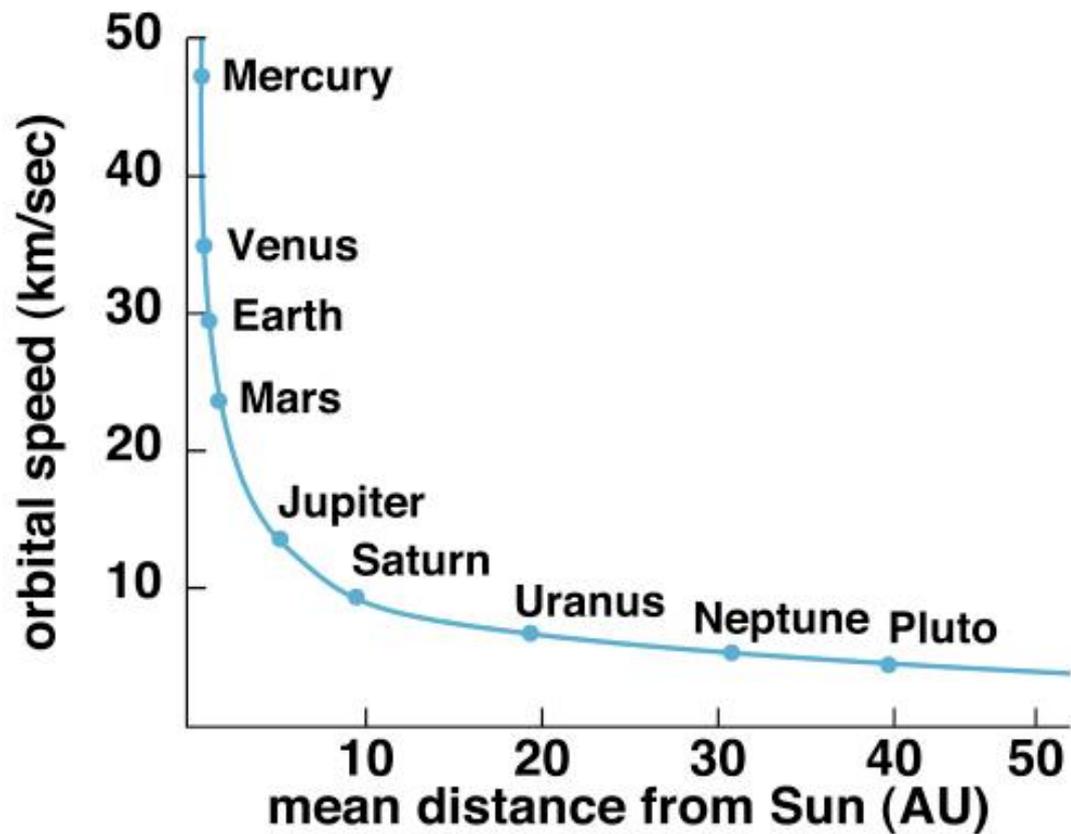
- L'intensité des forces change en fonction de l'énergie
- Jonction de N, EM-F à  $10^{24}$  eV =  $10^{28}$  k

Unification des forces.

# Matière sombre (Zwicky 1937)

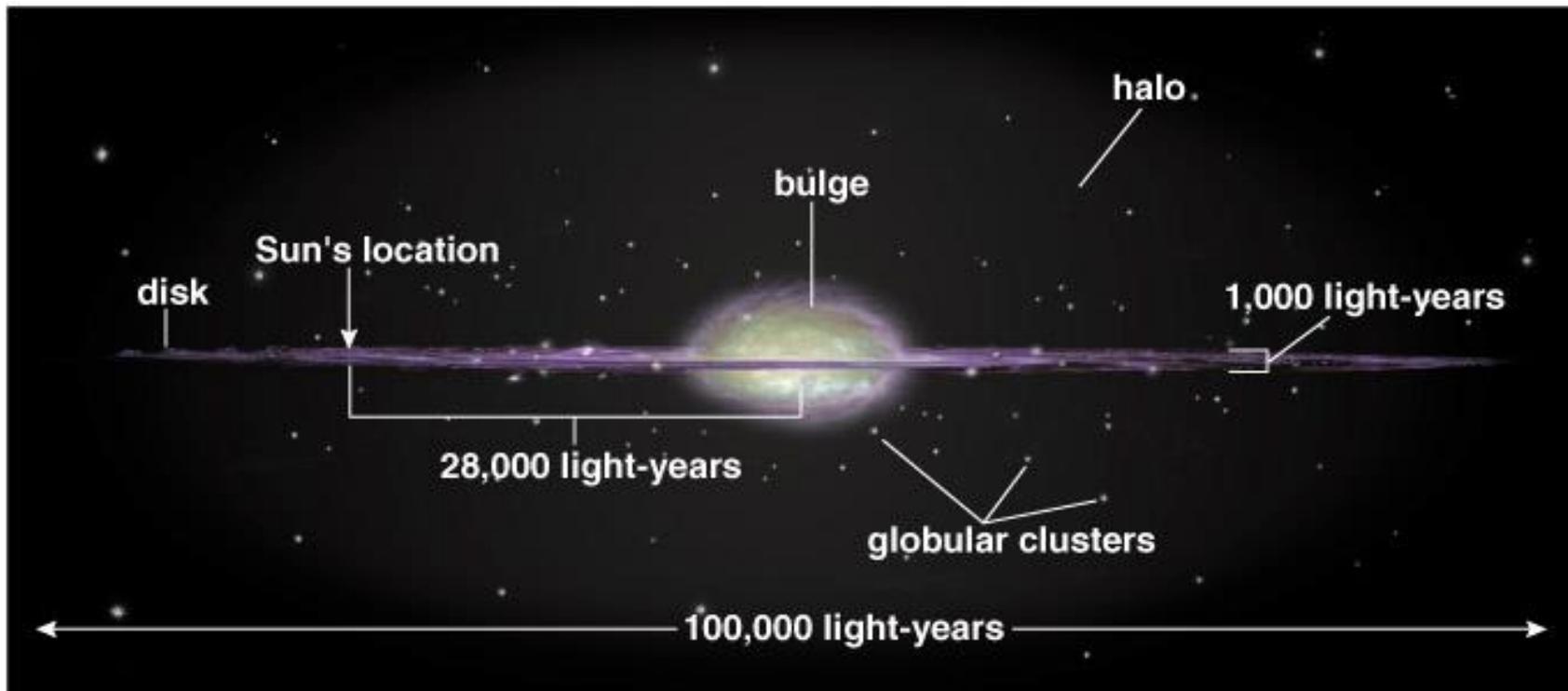
- Vitesses radiales des étoiles de la galaxie
- . Vitesses des galaxies dans les amas

Déformation des images de galaxies par l'effet de la gravité .



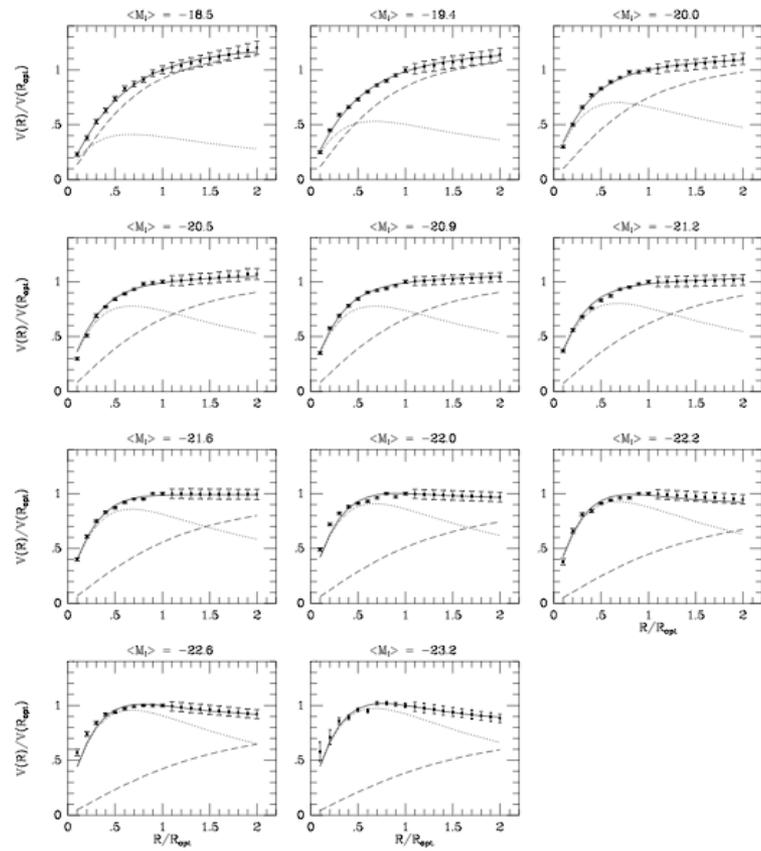
(b)

Copyright © Addison Wesley

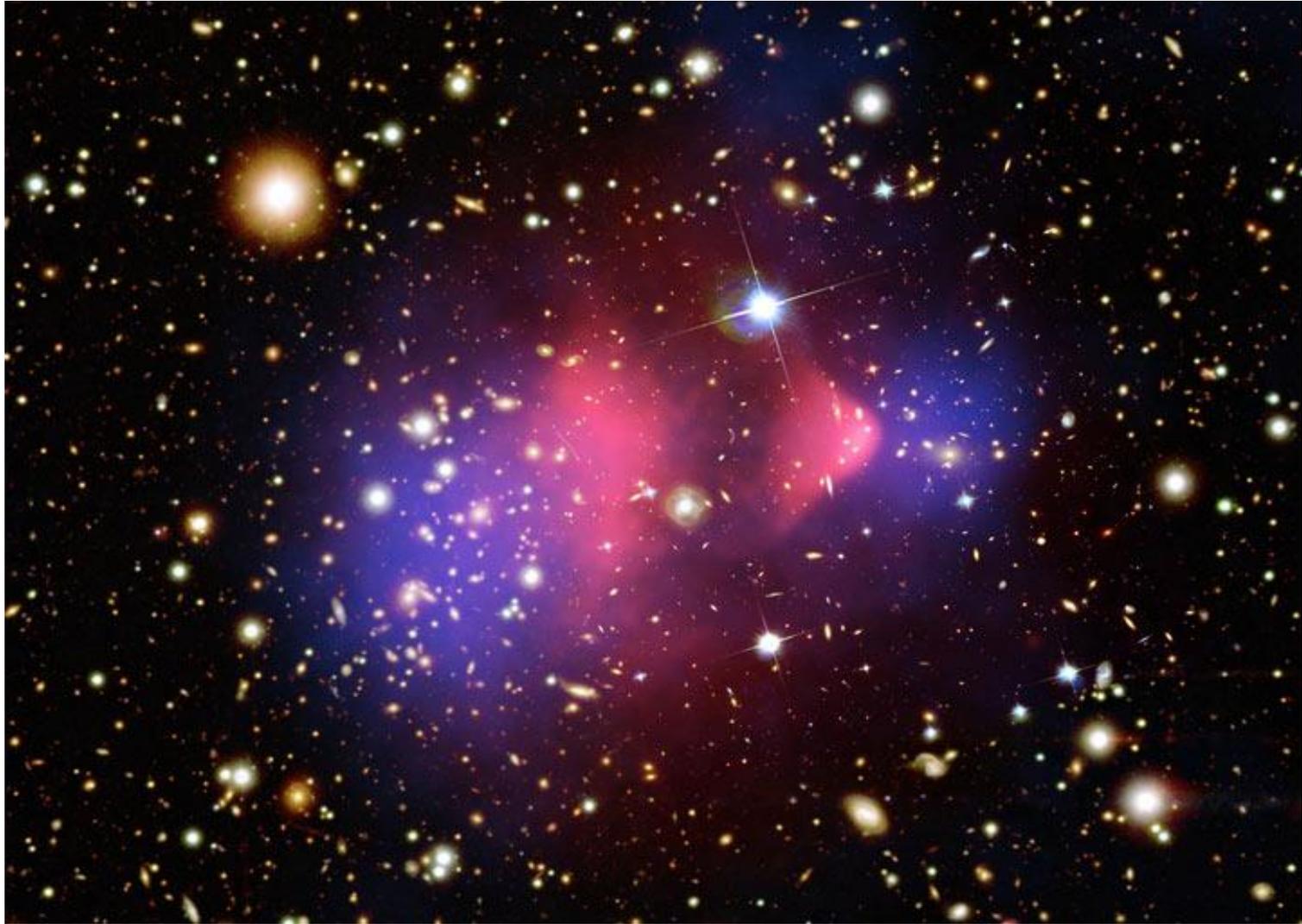


**(b)**

Copyright © Addison Wesley



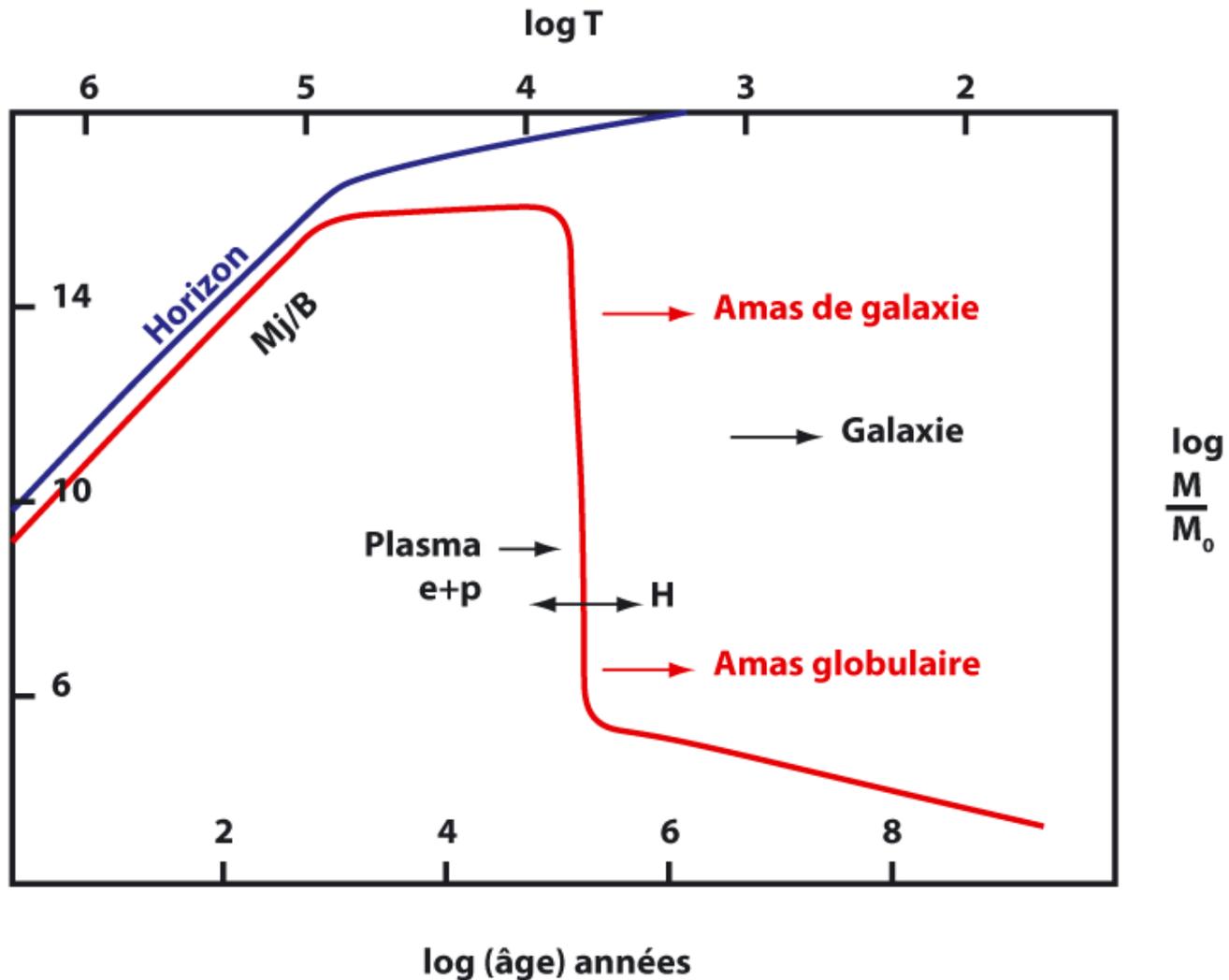


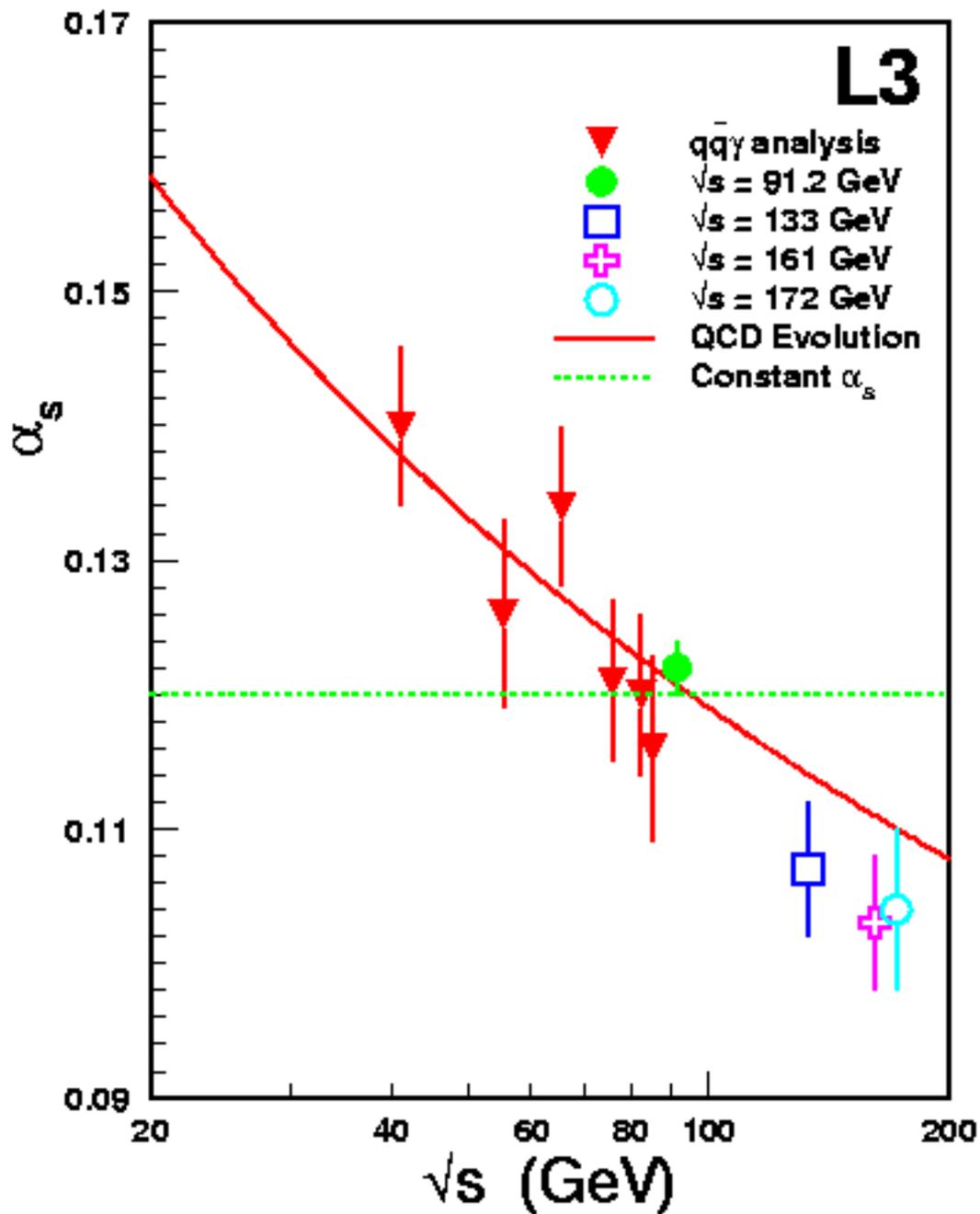


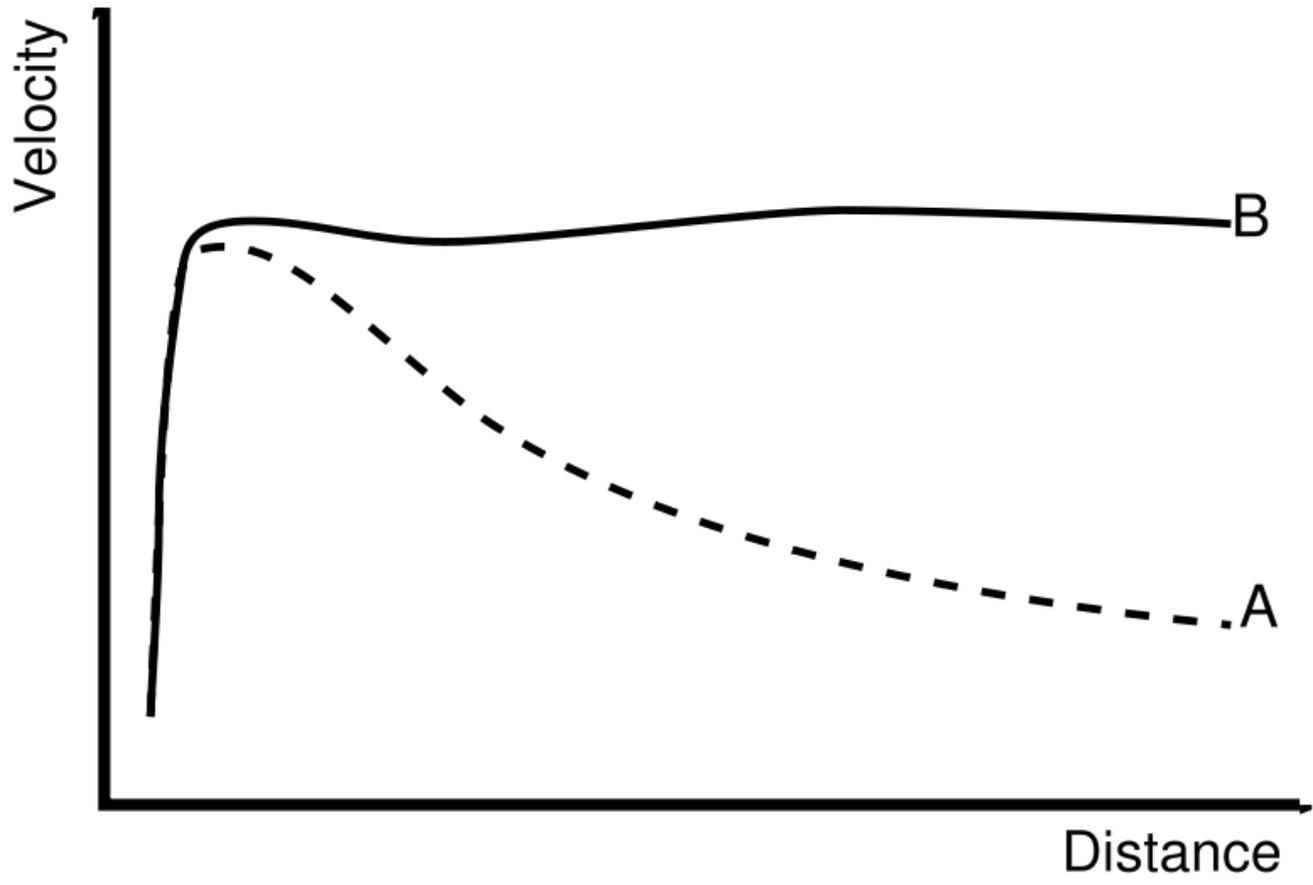
# Evidences en faveur de l'énergie sombre ( 1995)

Accélération des vitesses des galaxies

# Evolution le l'horizon et de la masse de Jeans







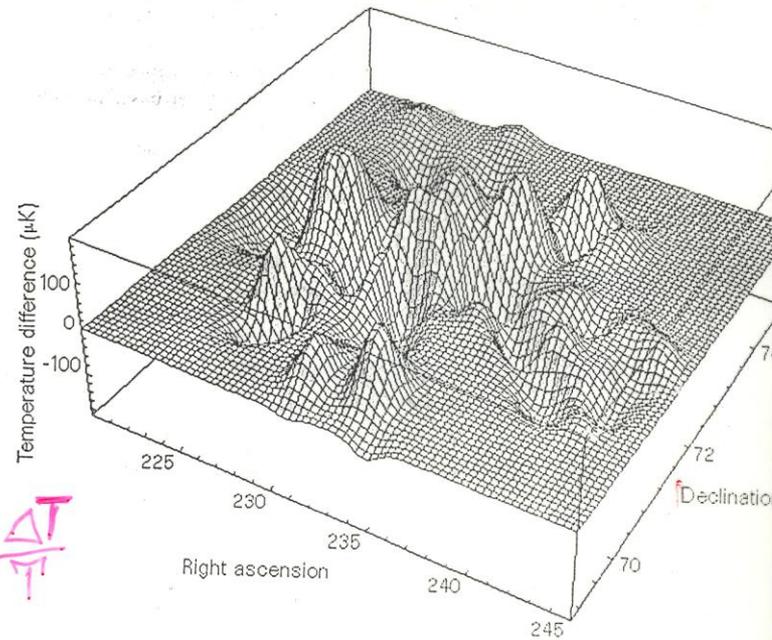
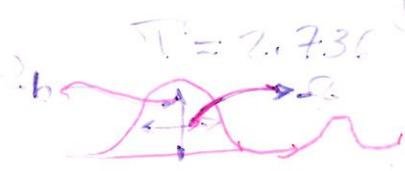


Figure 2 Microwave hot spots. The cosmic microwave background has an average temperature of 2.726 kelvin, but it fluctuates slightly in temperature, marking primordial fluctuations in the density of matter. Here is a small section of the sky, showing fluctuations on an angular scale of around 1 degree — fluctuations that seem to be too large for us to live in an open Universe with  $\Omega_0 = 0.3$  and no cosmological constant.

NATURE | VOL 393 | 25 JUNE 1998

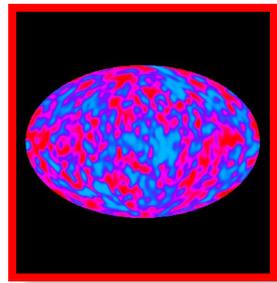
Fluctuations d'intensité  
 sur la route céleste  
 les rayonnements fossiles



$T = 2.73 K$   
 $\frac{\Delta T}{T} = 10^{-5}$

$\propto$  largeur  
 $\propto$  densité  
 nucléaires

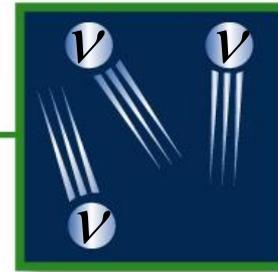
Faut-il modifier la loi de gravité?



Radiation:  
0.005%



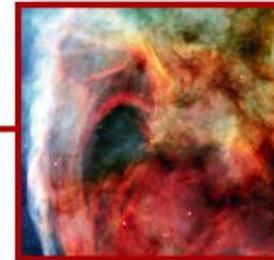
Chemical Elements:  
(other than H & He) 0.025%



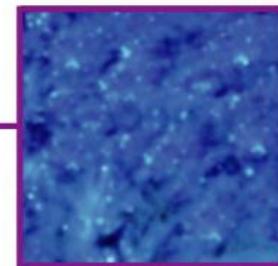
ly Neutrinos:  
Neutrinos:  
0.47%



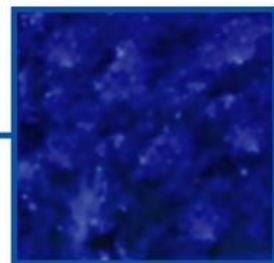
Stars:  
0.5%



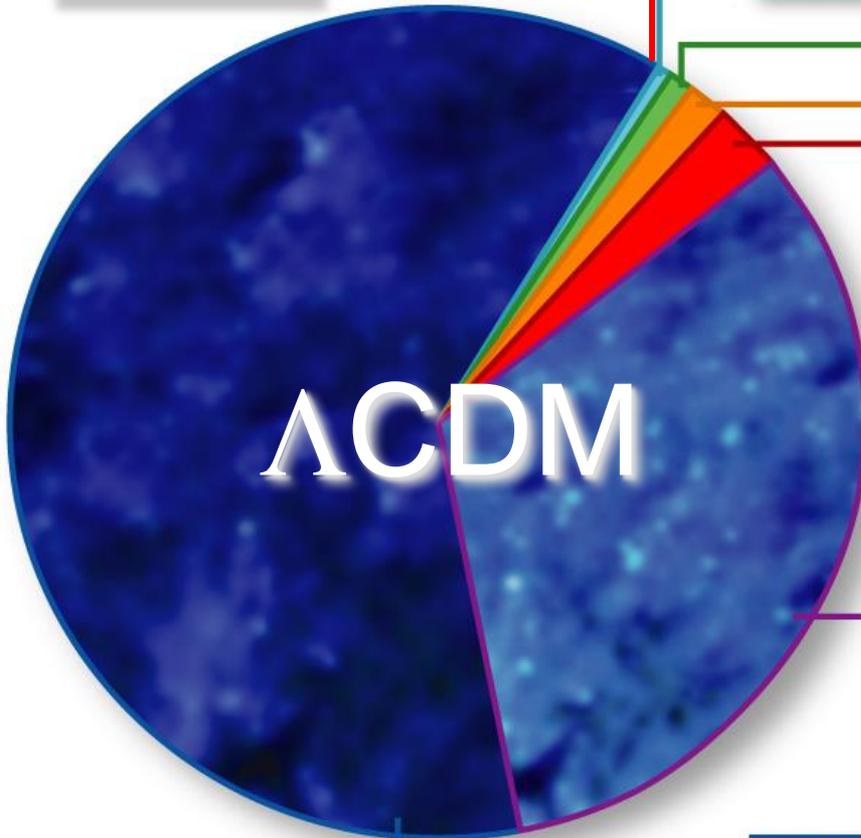
Free H  
& He:  
4%



Cold Dark Matter:  
25%



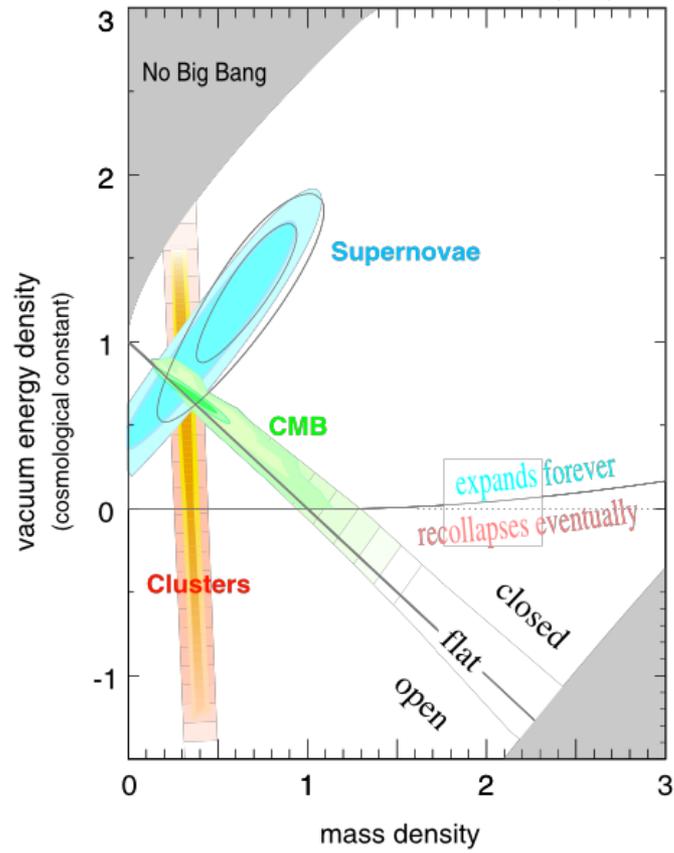
Dark Energy ( $\Lambda$ ):  
70%



$\Lambda$ CDM

+ inflationary perturbations  
+ baryo/lepto genesis

Tonry et al. (2003)  
Knop et al. (ApJ, in press)  
Spergel et al. (2003)  
Allen et al. (2002)



# La valeur numérique de la constante cosmologique ?

- Problème majeur de la physique contemporaine!

$$R_{\mu\nu} - R g_{\mu\nu}/2 = 8\pi G T_{\mu\nu} + \lambda$$

Géométrie

Matière-énergie

Lambda = ?

constante cosmologique?

énergie des champs quantiques ?

electroweak scale

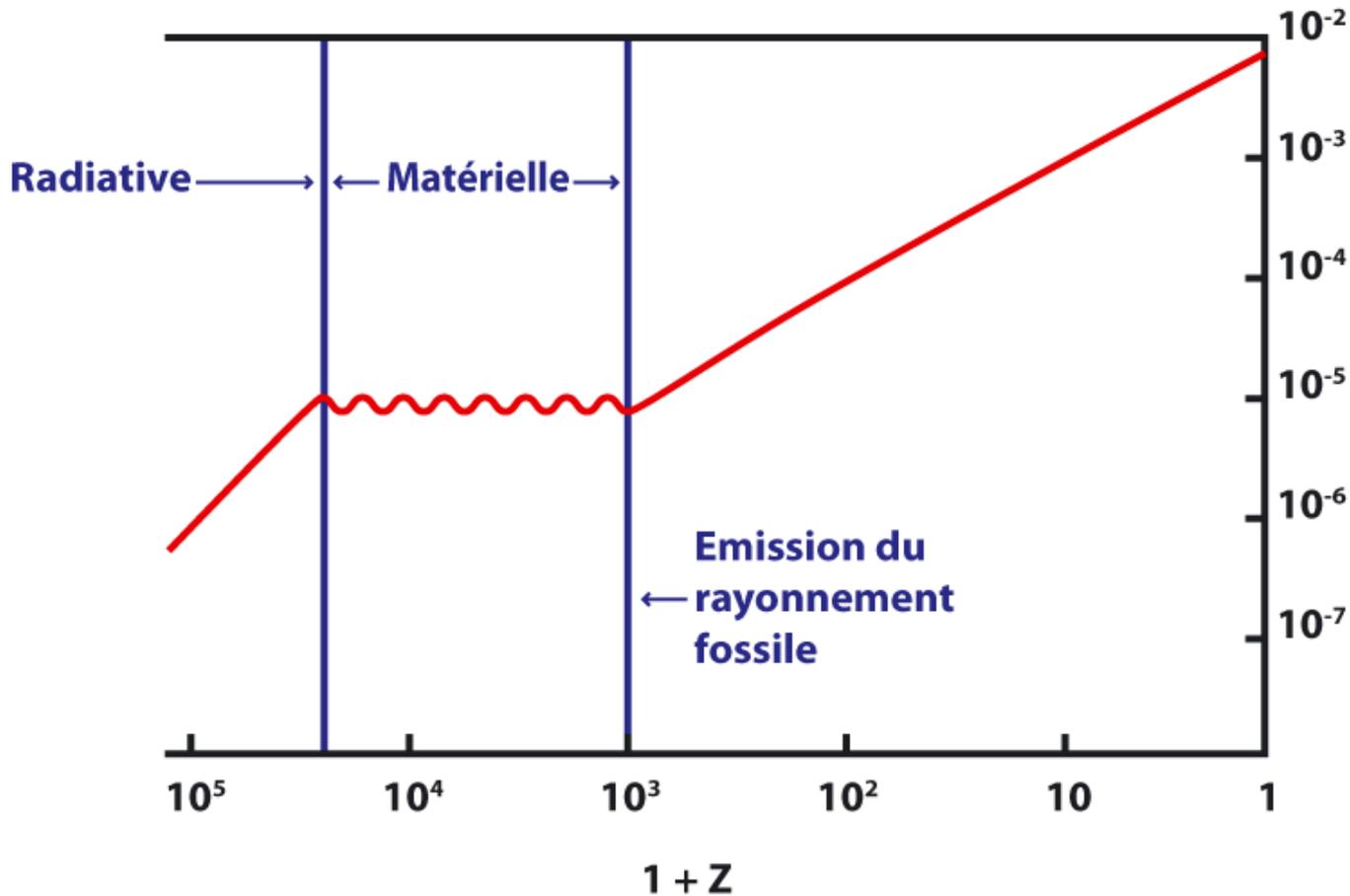
$$\lambda^{-1/2} \sim M_W^{-1} \sim 10^{-18} \text{ m}$$

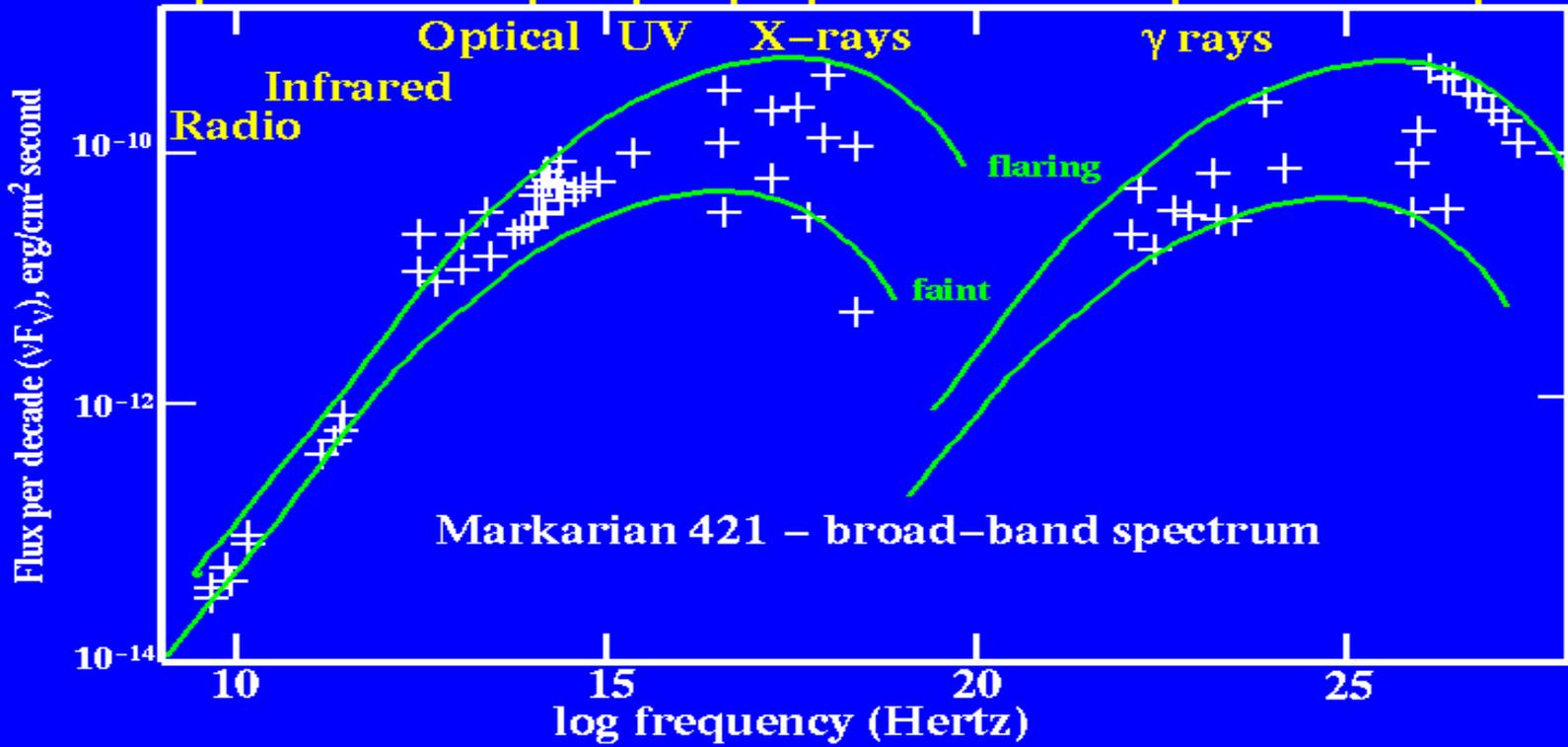
or

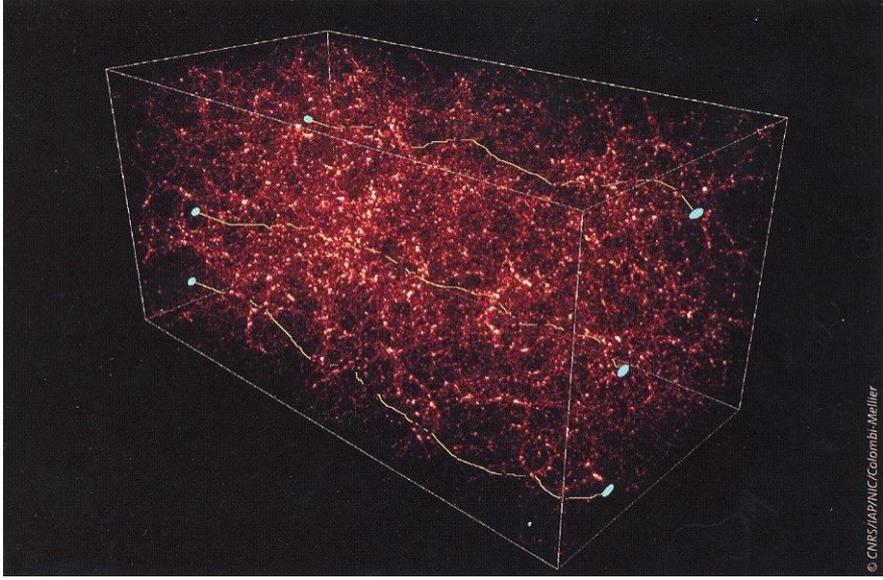
$$\lambda^{-1/2} \sim m_p^{-1} \sim 10^{-34} \text{ m}$$

Planck scale

# Croissance d'une surdensité (sans matière sombre)



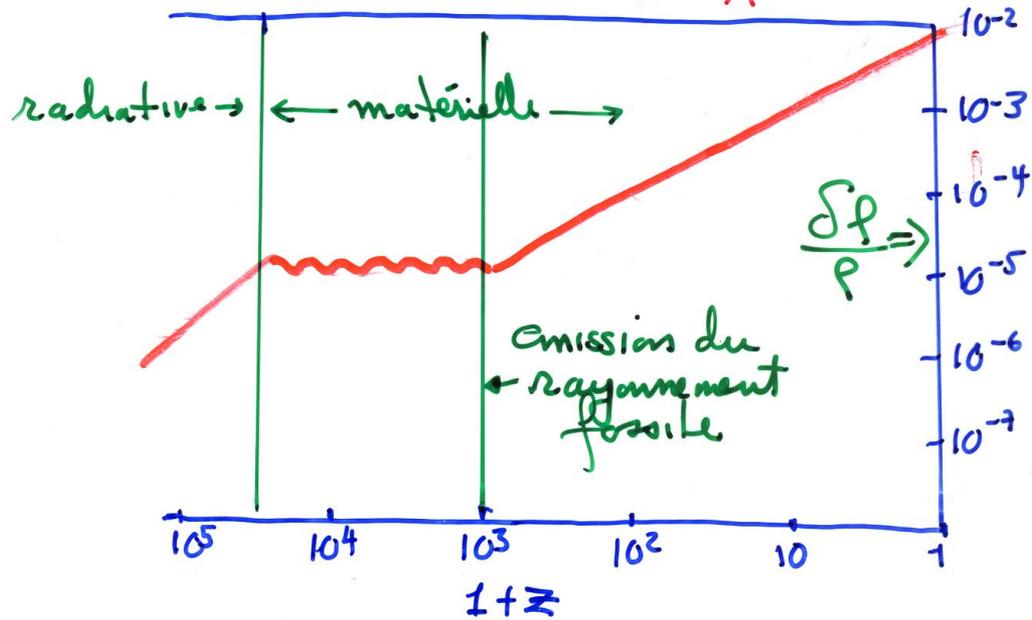




© CNRS/IA2/NIC/Colombi-Meller

Matière nucléaire  $\Omega_b^v = 0.02$ .  
 Croissance d'une surdensité.  $\Omega_m \approx 0.3$ .  
 (sans matière sombre).

$$\frac{\delta \rho}{\rho} \propto \frac{T_{ini}}{T_f} \propto \frac{(1+z)_{ini}}{(1+z)_f} \approx \frac{1000}{100}$$



Croissance insuffisante

# Neutron-Proton Ratio

