

# De l'eau lourde à la matière noire

# Les « faits » cosmologiques

- 1 – La nuit est « noire » (Olbers – E. Poe)
- 2 – Les galaxies « s'enfuient » avec une vitesse proportionnelle à leur distance (Hubble – 1929)
- 3 – L'Univers contient partout un rayonnement micro onde de 2,7 K (Penzias et Wilson – 1965)
- 4 – Le deutérium est présent dans l'eau et dans le spectre d'objets « jeunes » comme des QSO à grand redshift

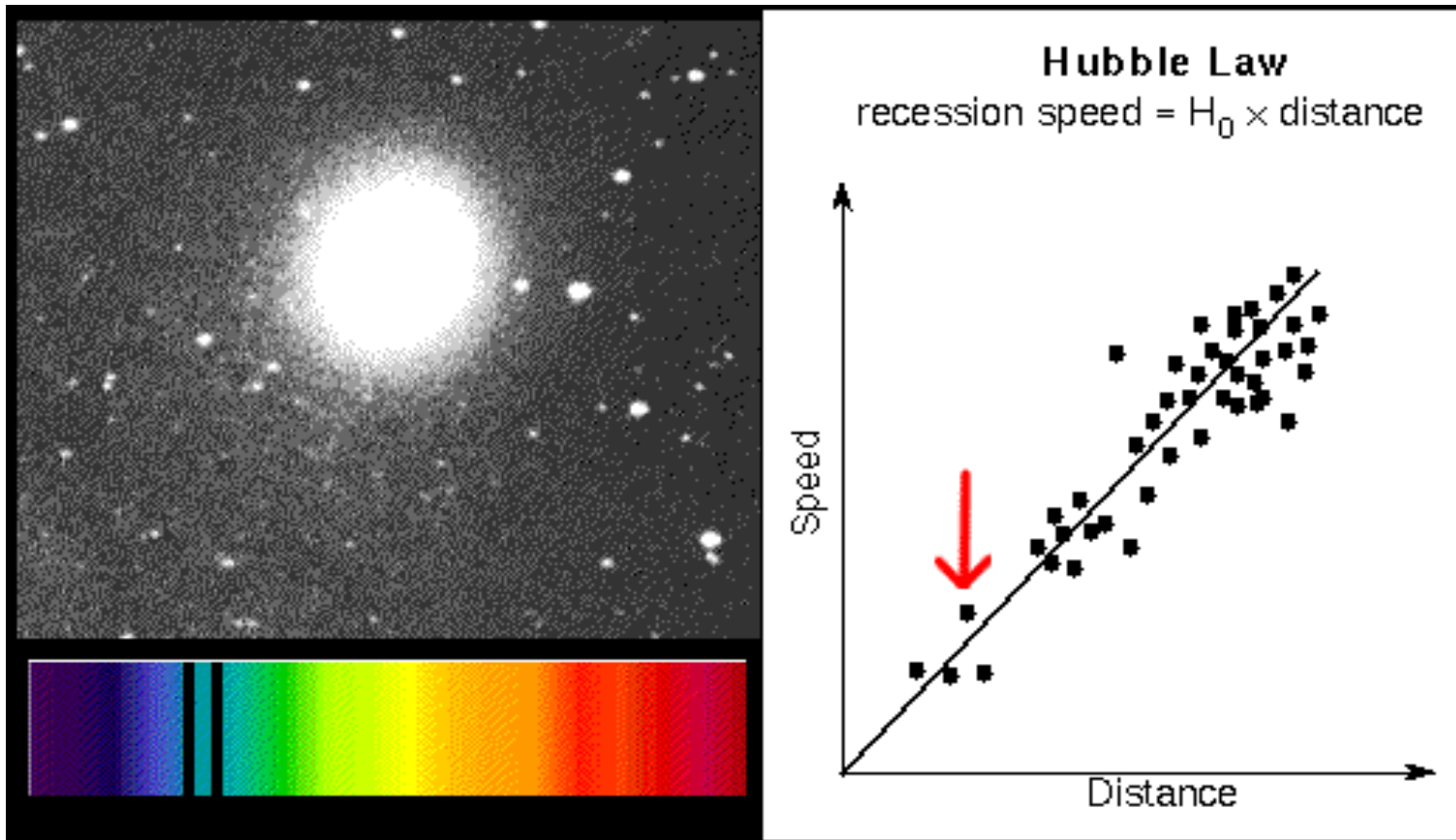
# Mgr Georges Lemaître (1894 – 1966)



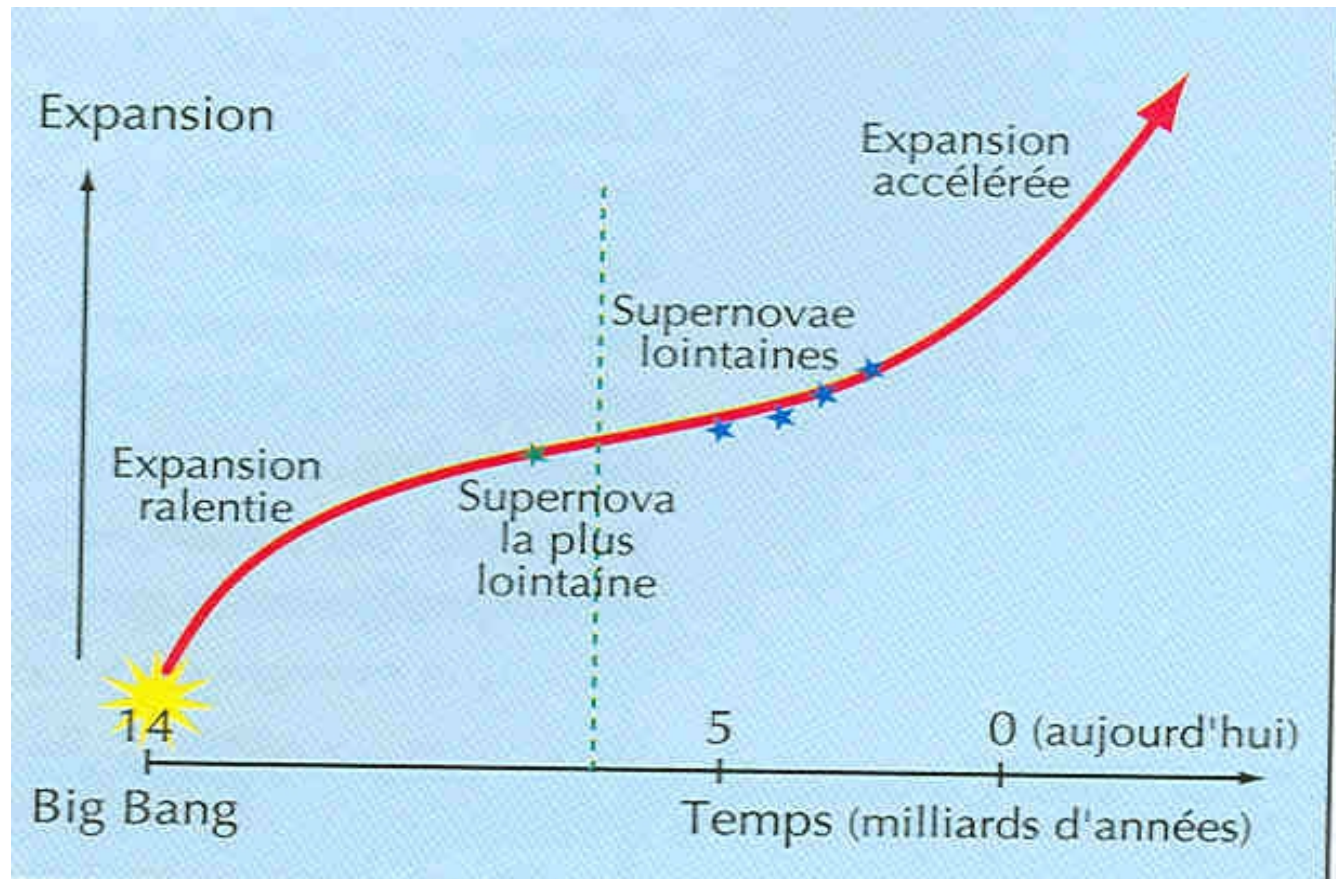
# Edwin Hubble (1889 – 1953)



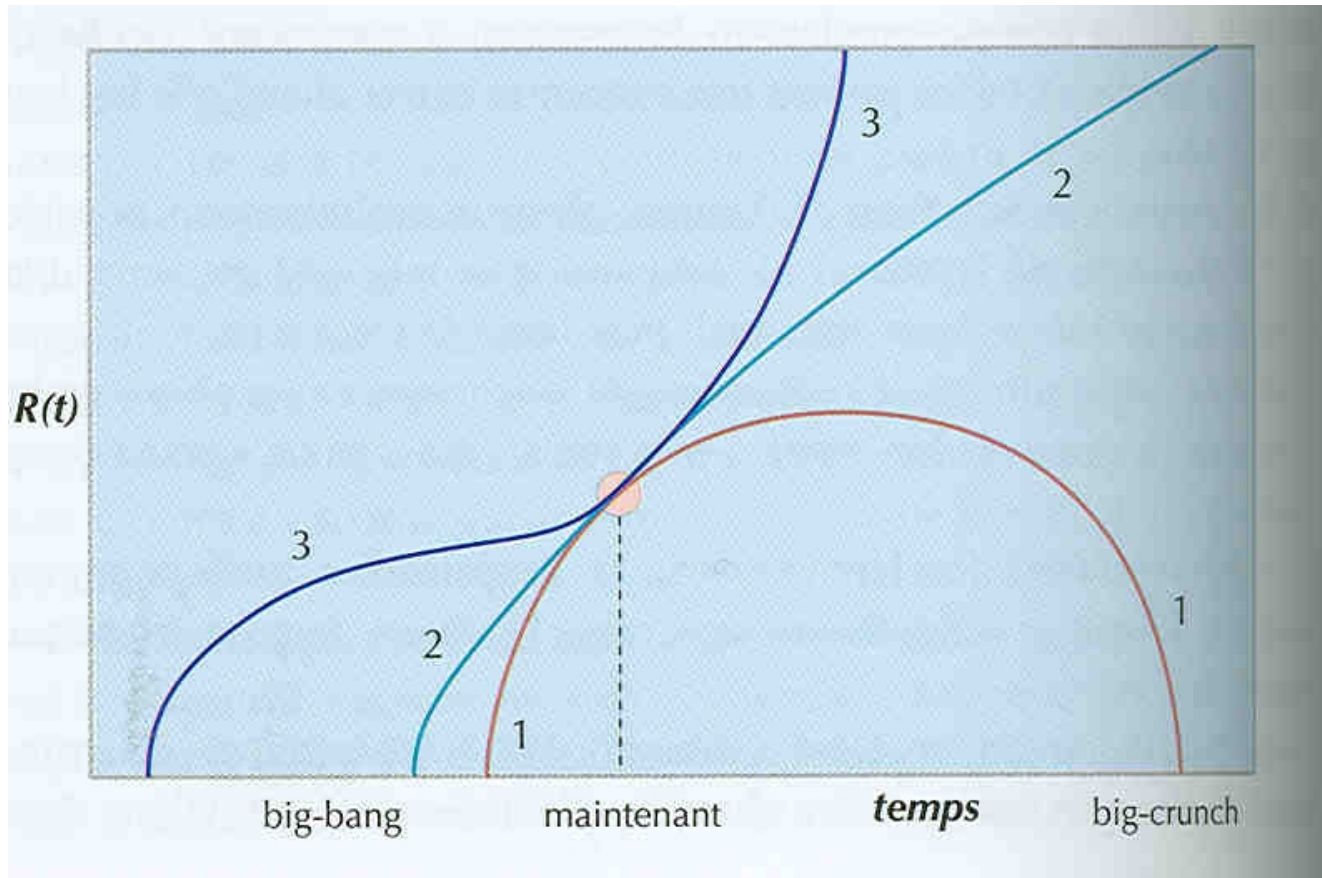
# L'effet Doppler appliqué aux galaxies



# Les supernovae lointaines et l'accélération de l'expansion de l'Univers



# L'évolution de l'Univers suivant sa densité totale de « matière énergie »





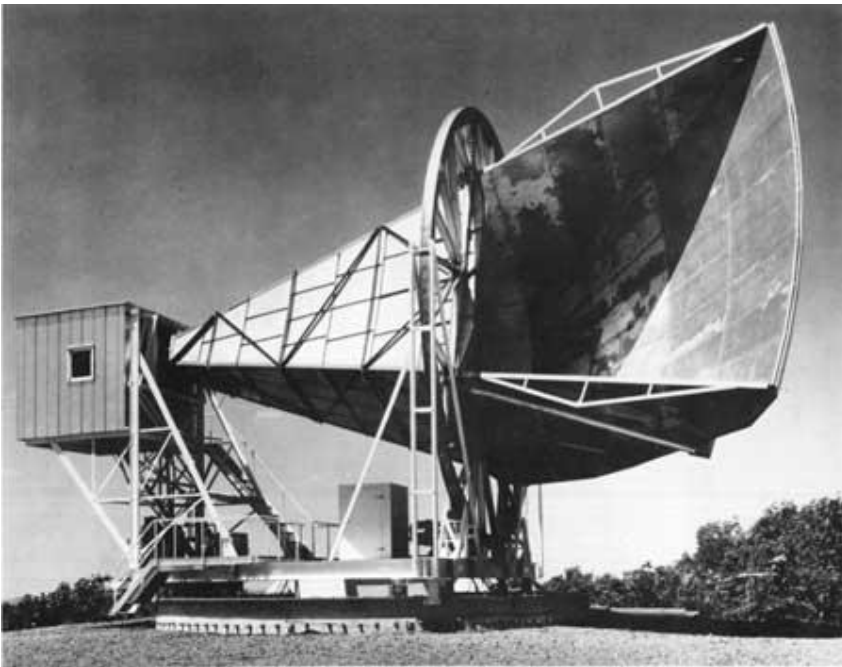
# George Gamow (1904 – 1968)



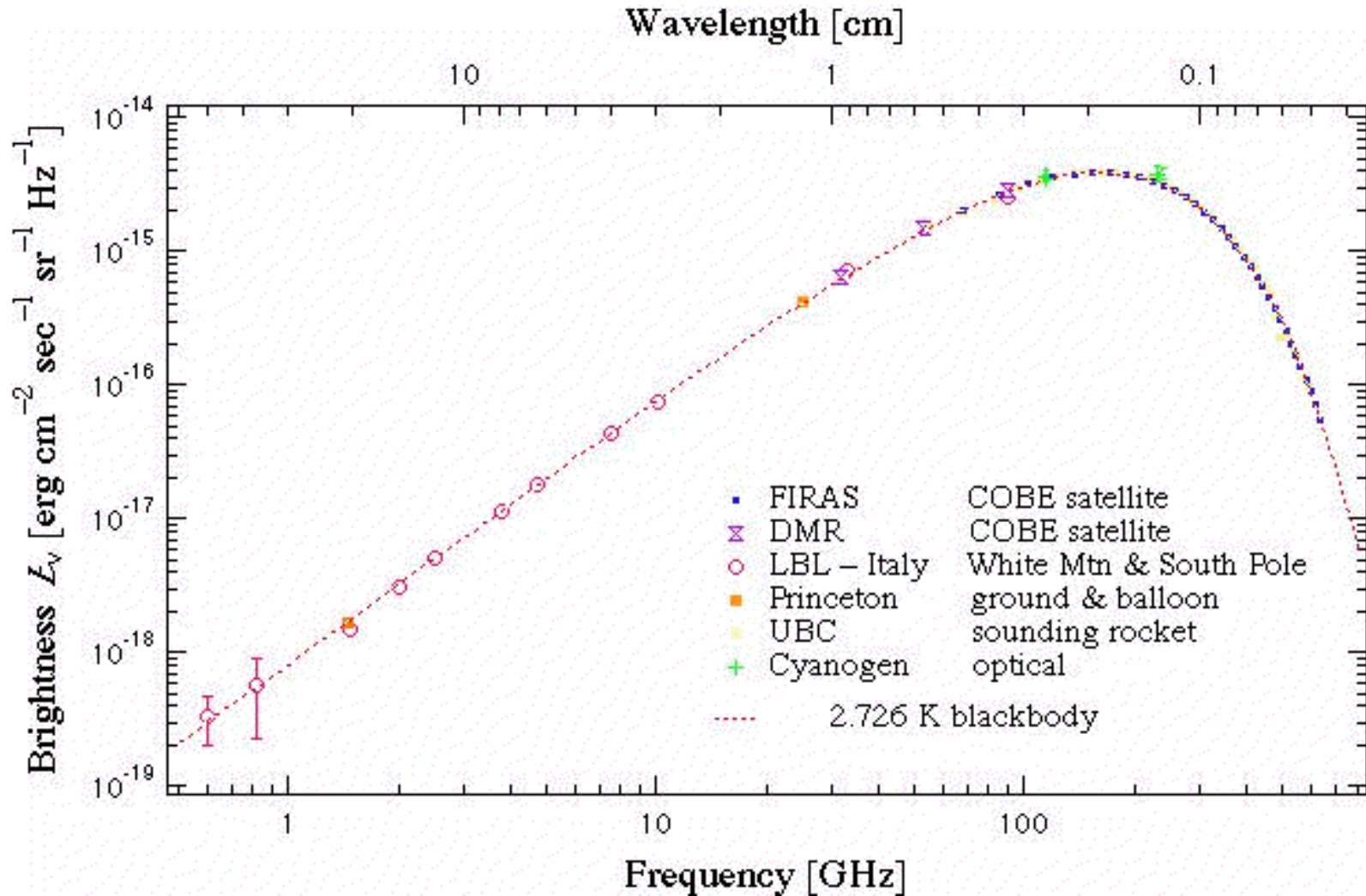


# La « saga » du Rayonnement diffus cosmologique à 2,7K

# La découverte fortuite du Rayonnement cosmologique en 1965 par Penzias et Wilson

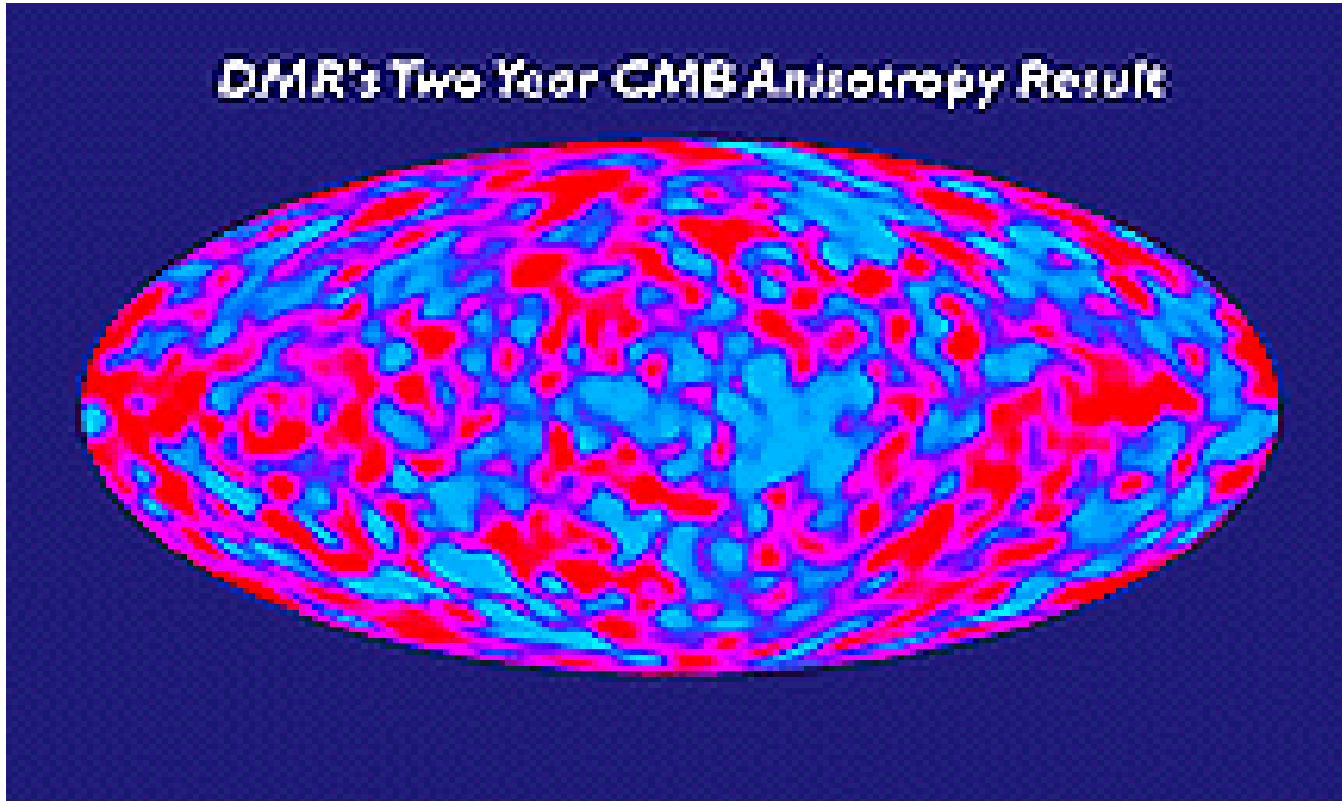


# Le rayonnement « cosmologique »

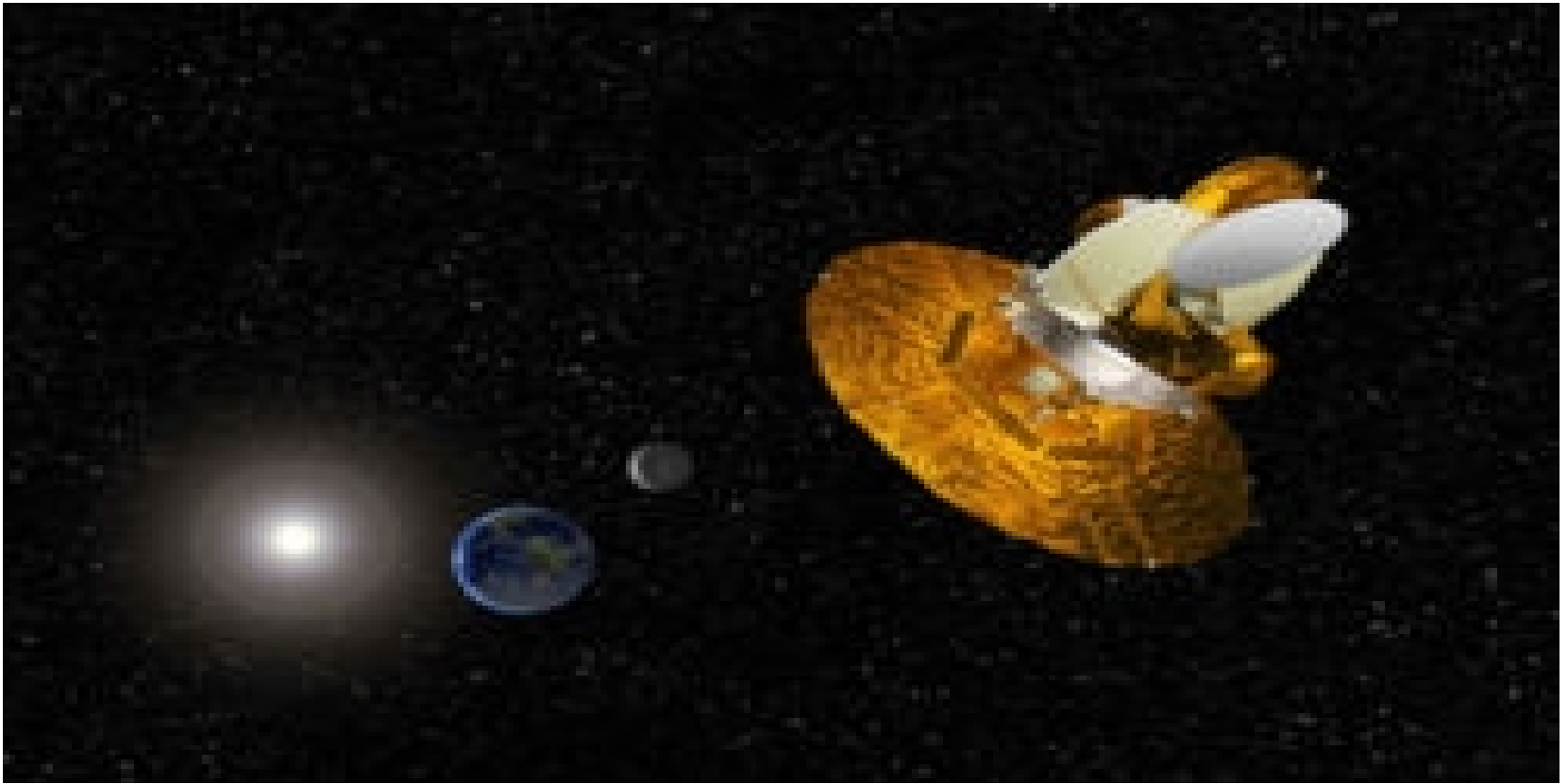




# Irrégularités du fond diffus COBE (1992)



# Le satellite WMAP (2001 - )

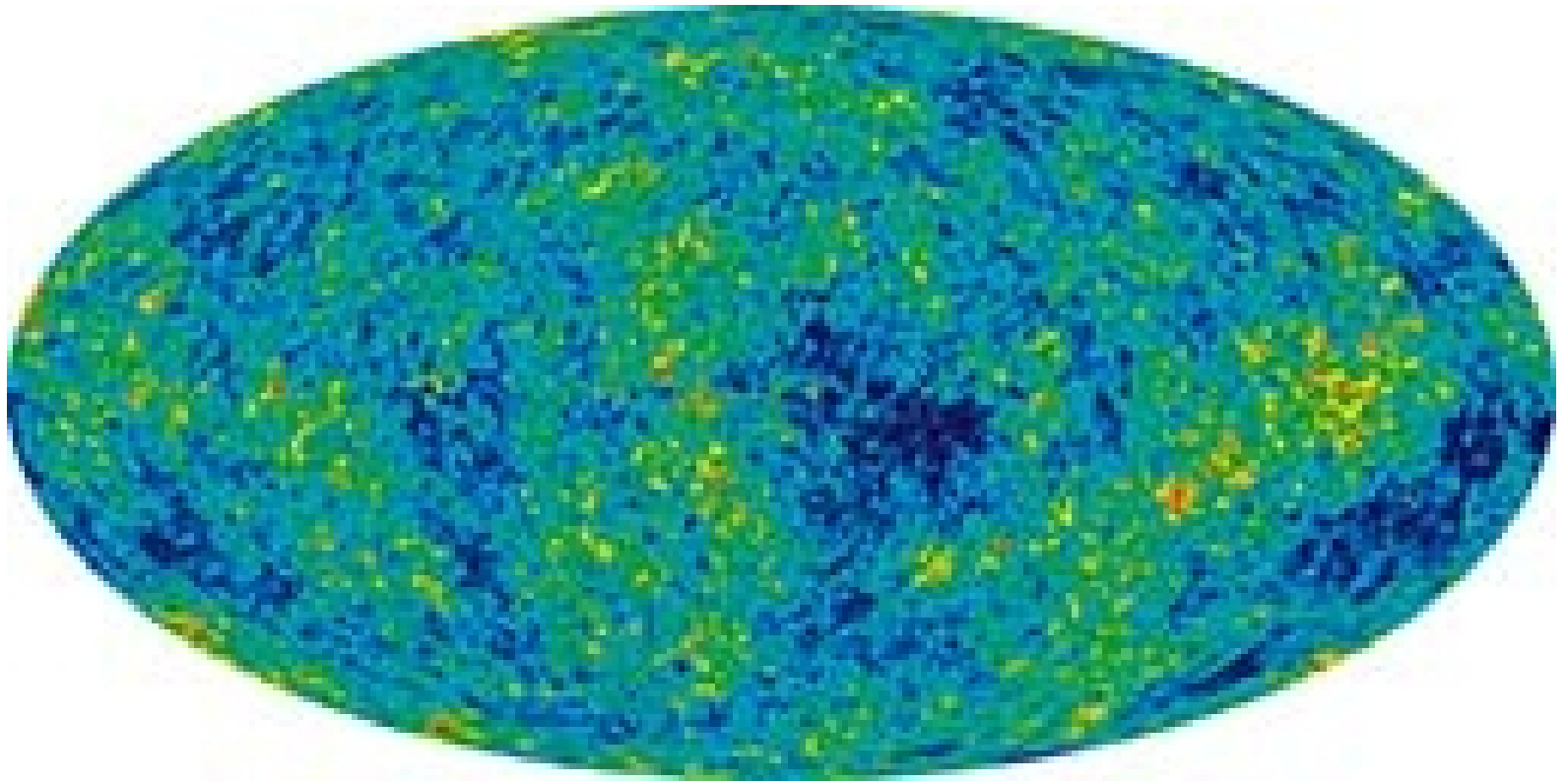


# Les anisotropies du fond micrométrique « cosmologique »

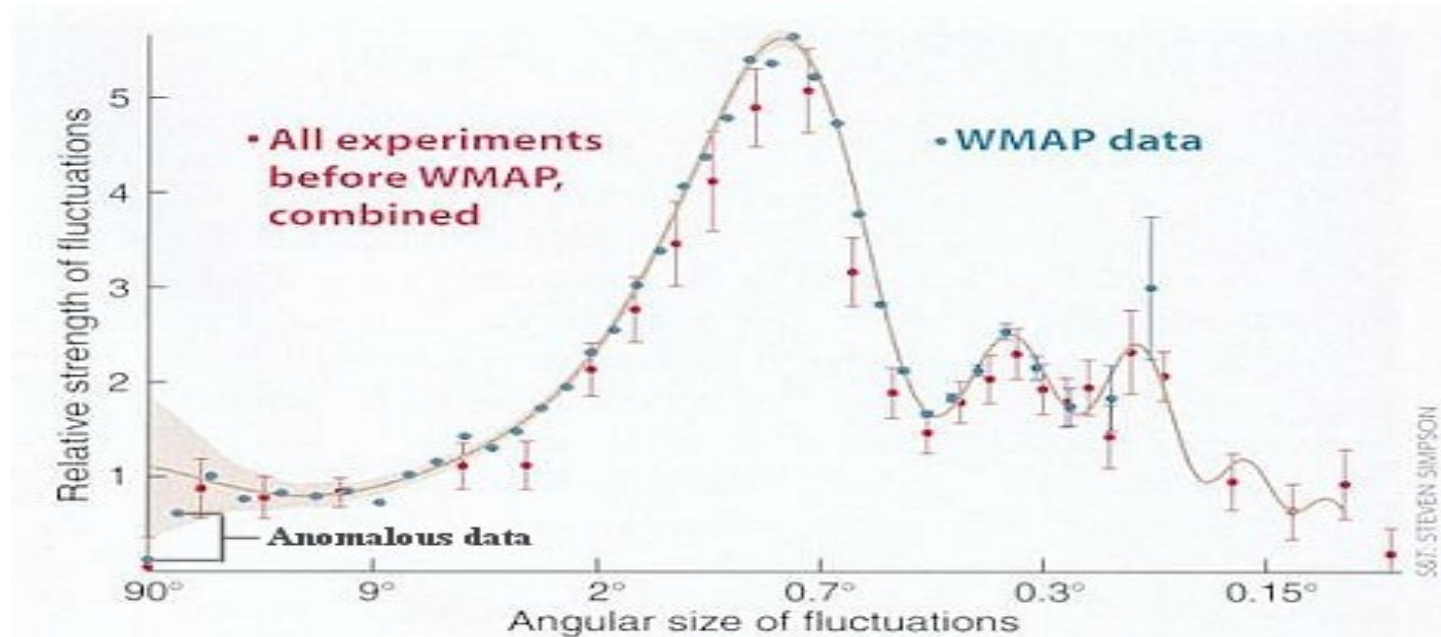
- Jusqu'en 1990, anisotropie  $< 10^{-4}$
- Satellite COBE (1992) – anisotropie =  $3 \times 10^{-5}$  (mais résolution  $7^\circ$ )
- Satellite WMAP (2001) même résultat mais résolution = 10 minutes arc. On peut en déduire la répartition énergie – matière de l'Univers



# Irrégularités du fond diffus WMAP (2001)

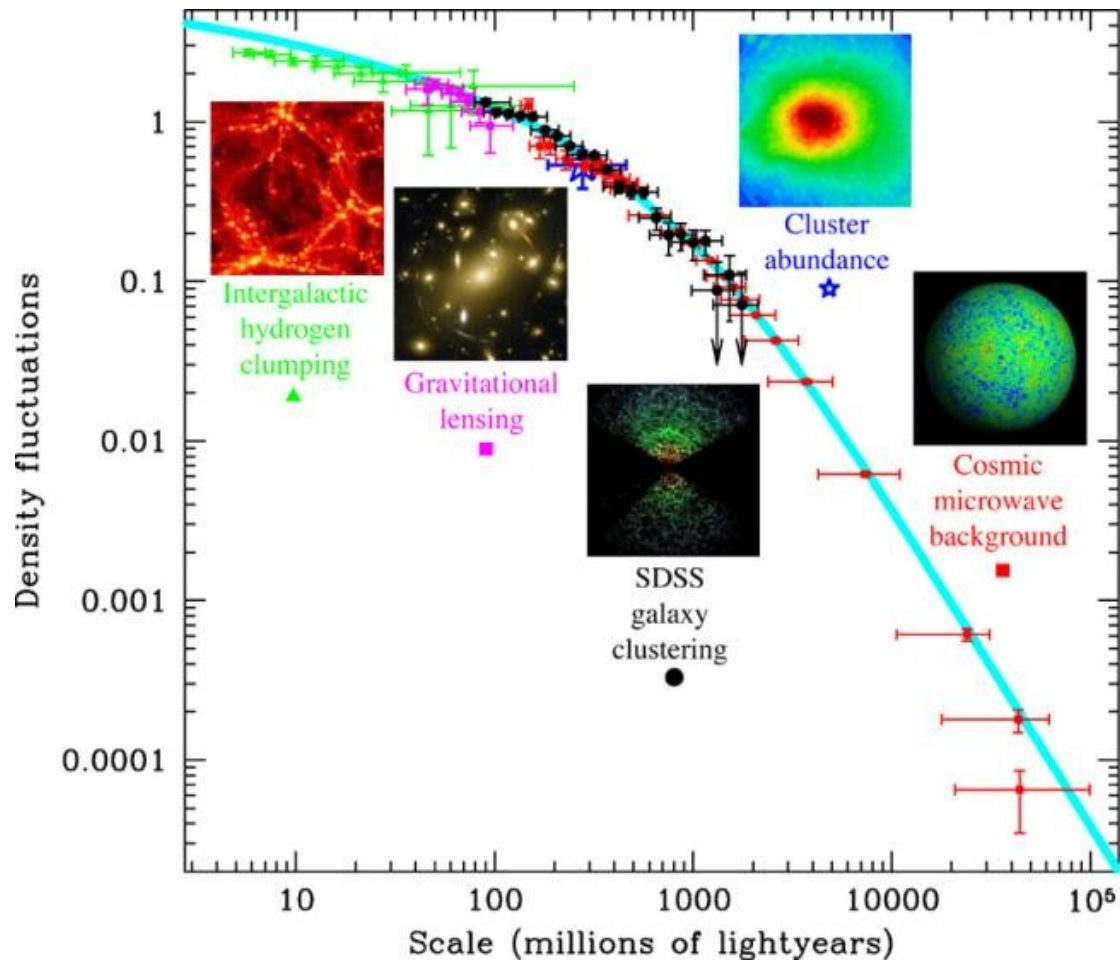


# Le spectre des fluctuations du rayonnement à 2,7K

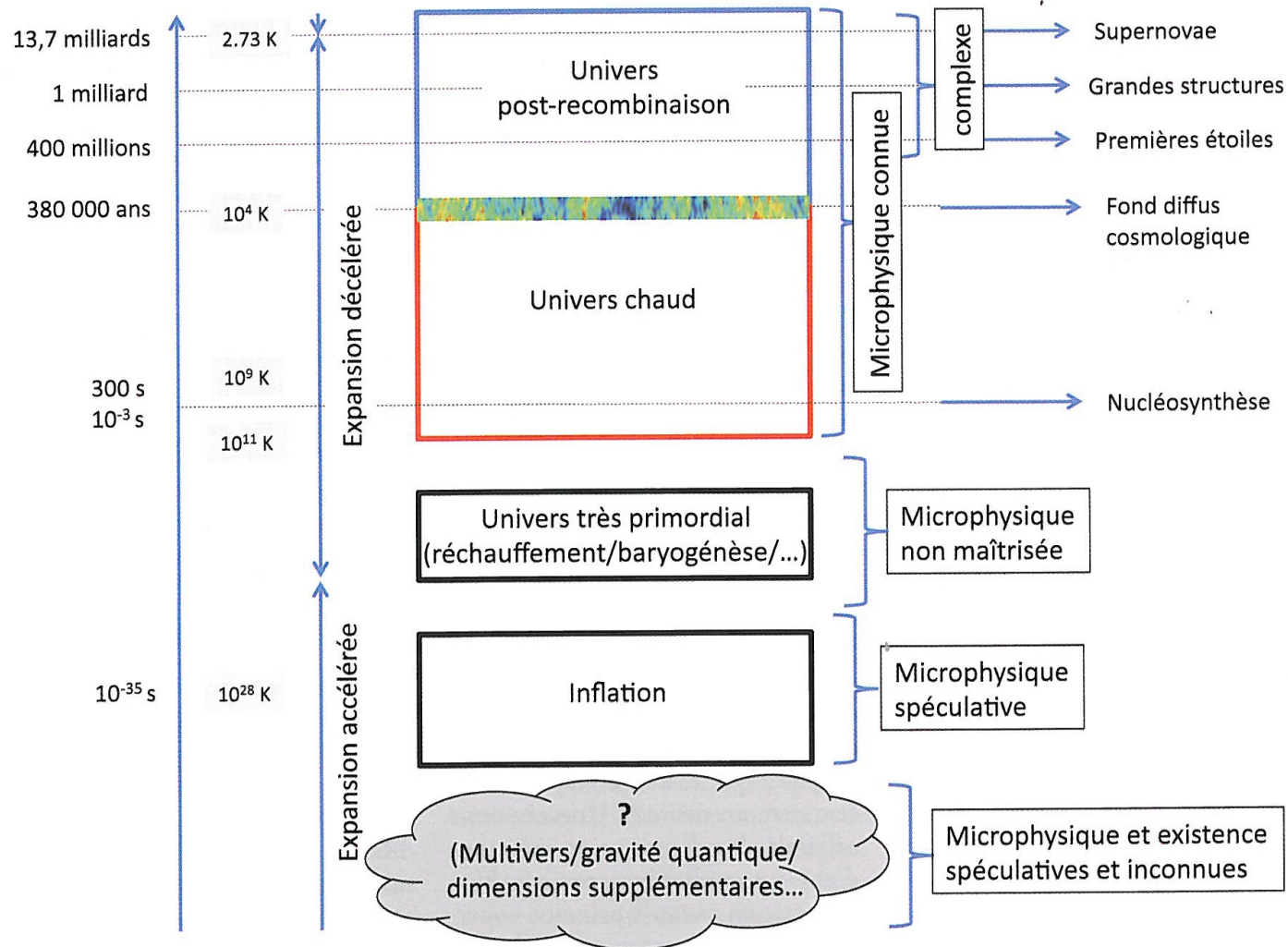


The most revealing display of the ripple data is a “power spectrum” showing how strong the ripples are at each size (dots with error bars). The observed power spectrum can be compared to the predictions made by different theoretical models of the universe; the solid line is the model that best fits the WMAP data (the tan areas reflect uncertainty in the model’s predictions). By tweaking basic cosmic parameters, the model can be fine-tuned to match the data.

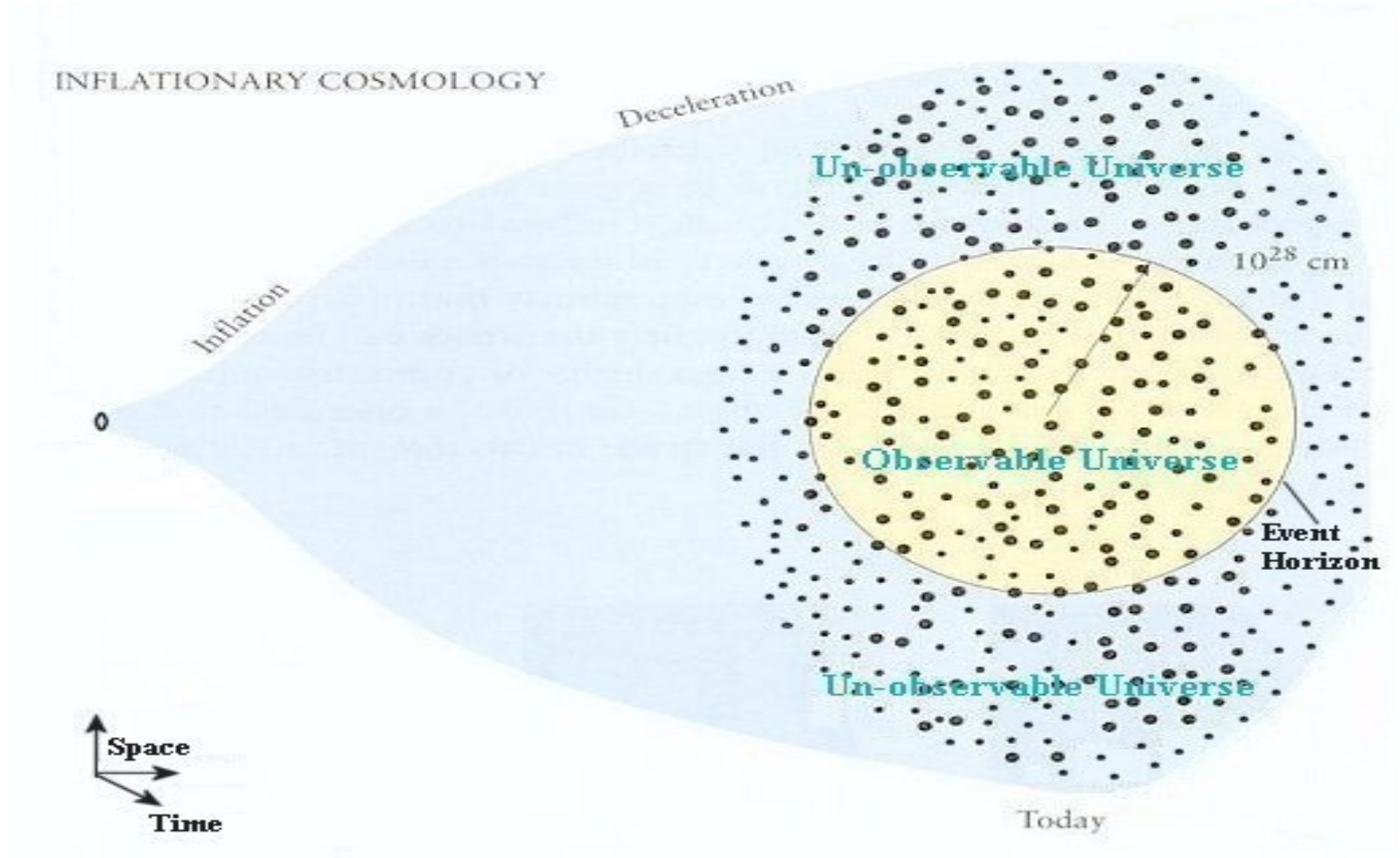
# Les échelles de fluctuations de densité de matière



# Une brève histoire de l'Univers



# « L'inflation de l'Univers »

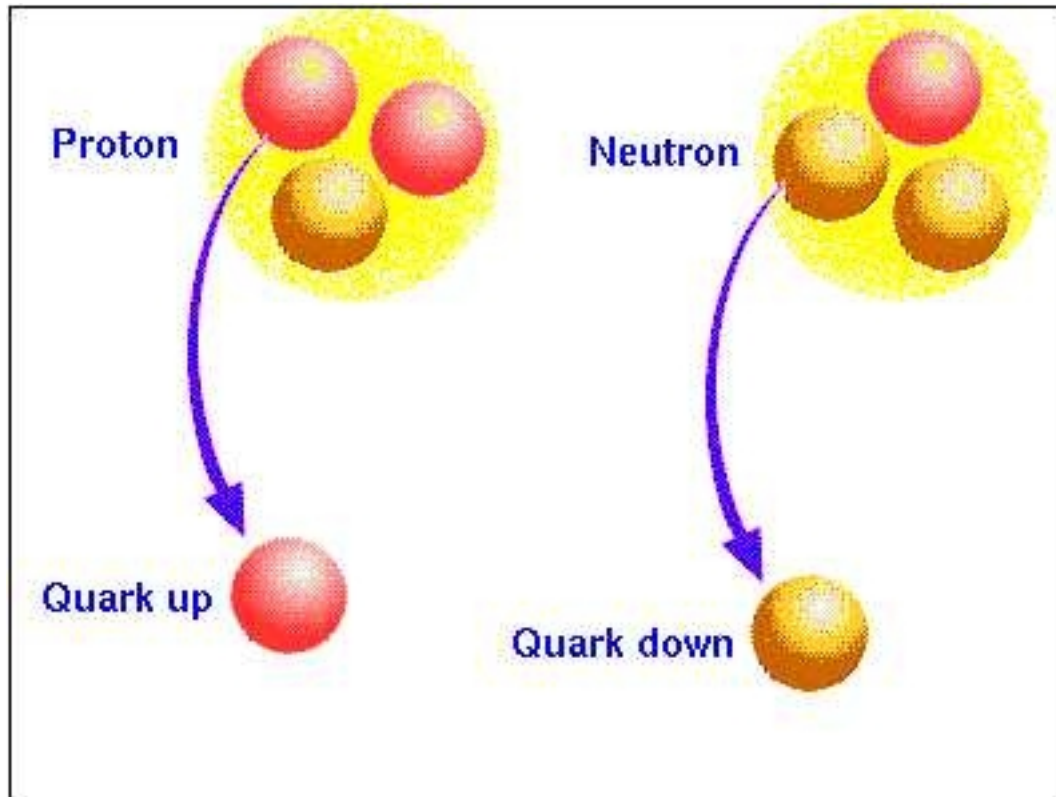


# Le modèle standard des particules

Famille	Quarks		Leptons	
1	-1/3 5 → 15 MeV down	d +2/3 2 → 8 MeV up	-1 0,511 MeV électron	0 <15 eV neutrino-e $\nu_e$
2	-1/3 100 → 300 MeV étrangereté	s +2/3 1,3 GeV charme	-1 106 MeV muon	0 <0,17 MeV neutrino-mu $\nu_\mu$
3	-1/3 4,3 GeV beauté	b +2/3 182 GeV top	-1 1,78 GeV tau	0 <24 MeV neutrino-tau $\nu_\tau$



# La structure d'un proton et d'un neutron





# Le rapport neutron / proton (I)

- Quand T est supérieur à 10 milliards K

$$n + e^+ \leftrightarrow p + \bar{\nu}_e$$

$$n \leftrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

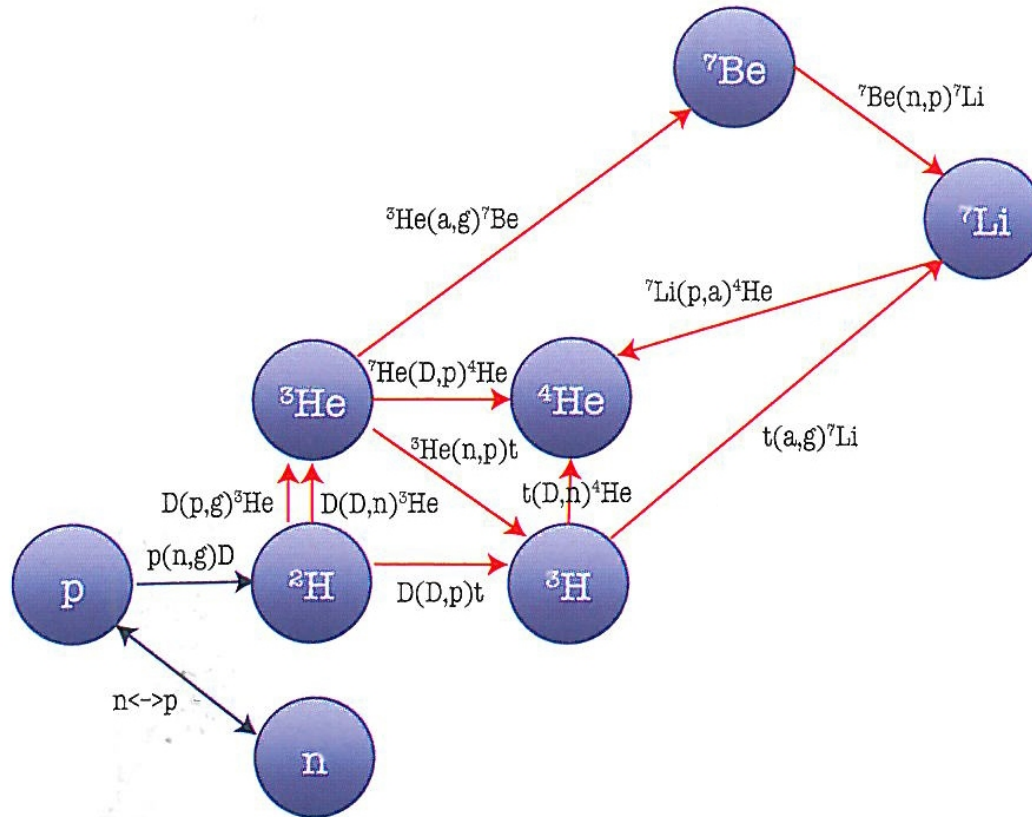
$$n + \nu_e \leftrightarrow p + e^-$$

# Le rapport neutron /proton (II)

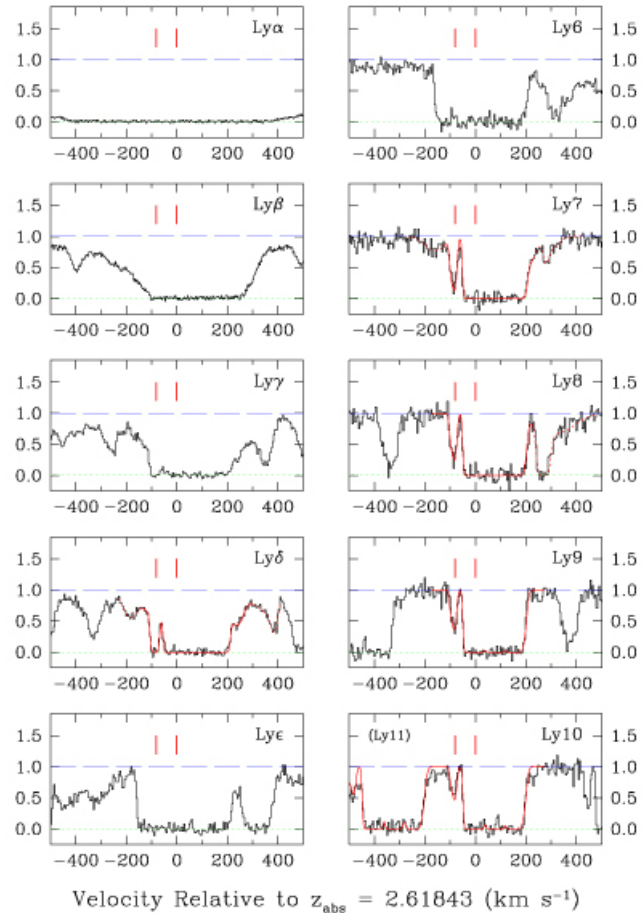
- Le rapport neutron/proton est donné par l'équation de Boltzmann.
- $n/p = 1/7$  à  $T = 10^9$  K

$$\frac{n_p}{n_n} = e^{-\frac{E_p - E_n}{kT}} = e^{-\frac{\Delta mc^2}{kT}}$$

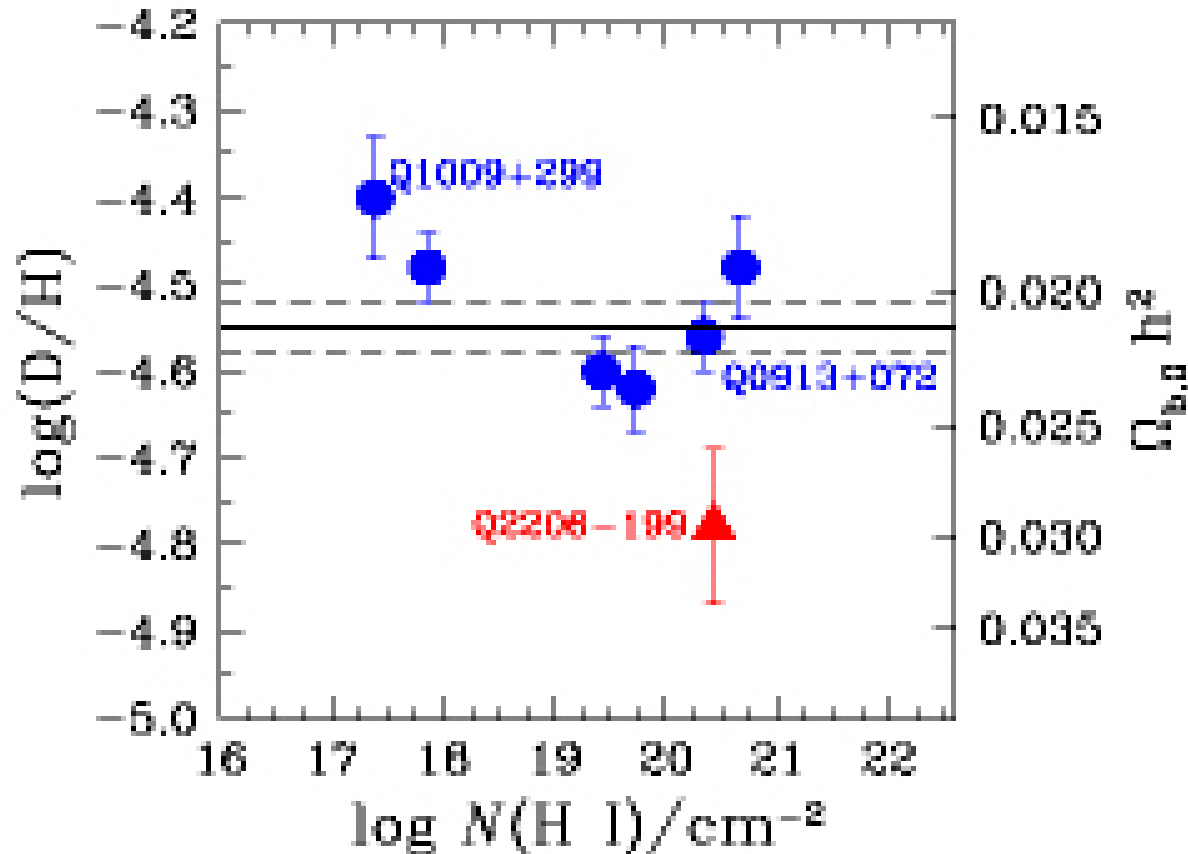
# Les cycles de réactions



# Spectres Lyman de QSO à grand redshift



# Abondances de deutérium dans QSO à grand redshift

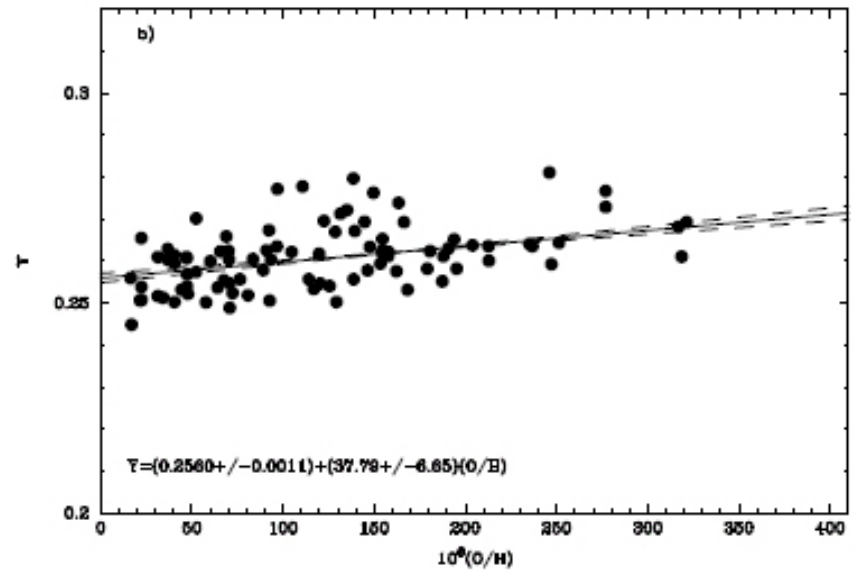
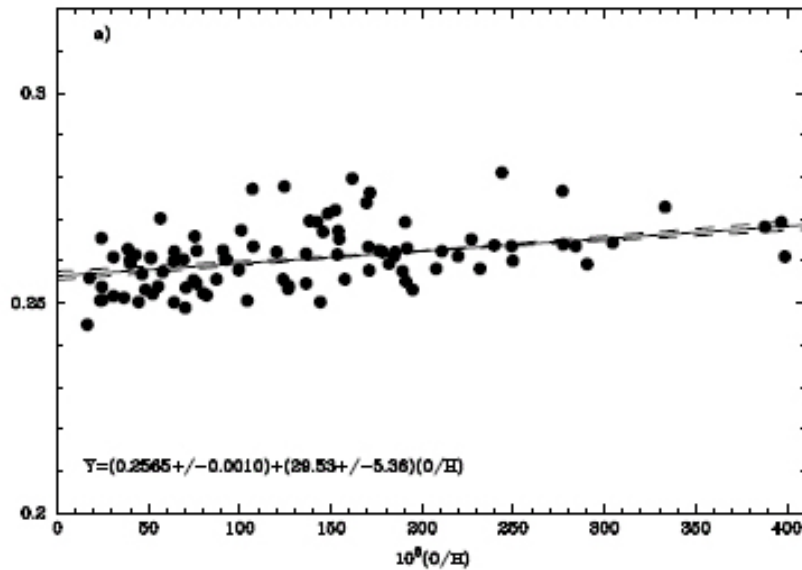


# Estimations de $Y_p$ (Olive 1995)

Table 1. Linear Fits for  $Y$  vs.  $O/H$ .

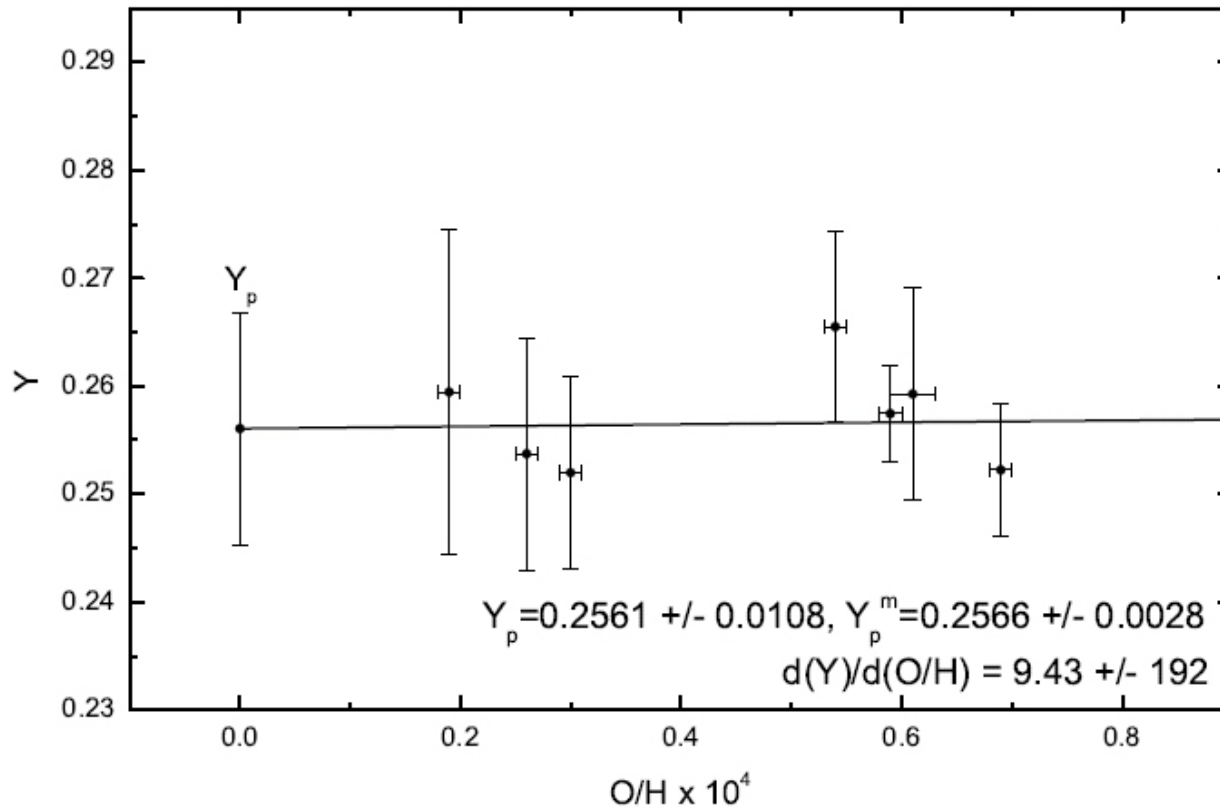
Set	# Regions	$r$	$\chi^2/dof$	$Y_P$	$10^{-2} \times \text{slope}$	$Y_P^{2\sigma}$
All	49	0.56	0.78	$.234 \pm .003$	$1.14 \pm 0.24$	0.239
1st cut	41	0.51	0.61	$.232 \pm .003$	$1.38 \pm 0.36$	0.238
-outliers	34	0.45	0.70	$.232 \pm .003$	$1.39 \pm 0.38$	0.238
2nd cut	21	0.41	0.64	$.229 \pm .005$	$2.37 \pm 1.13$	0.238
-outliers	19	0.40	0.70	$.229 \pm .005$	$2.42 \pm 1.15$	0.238
C	22	0.35	0.71	$.232 \pm .003$	$1.58 \pm 0.54$	0.238

# Aver, Olive, Skillman (2010)

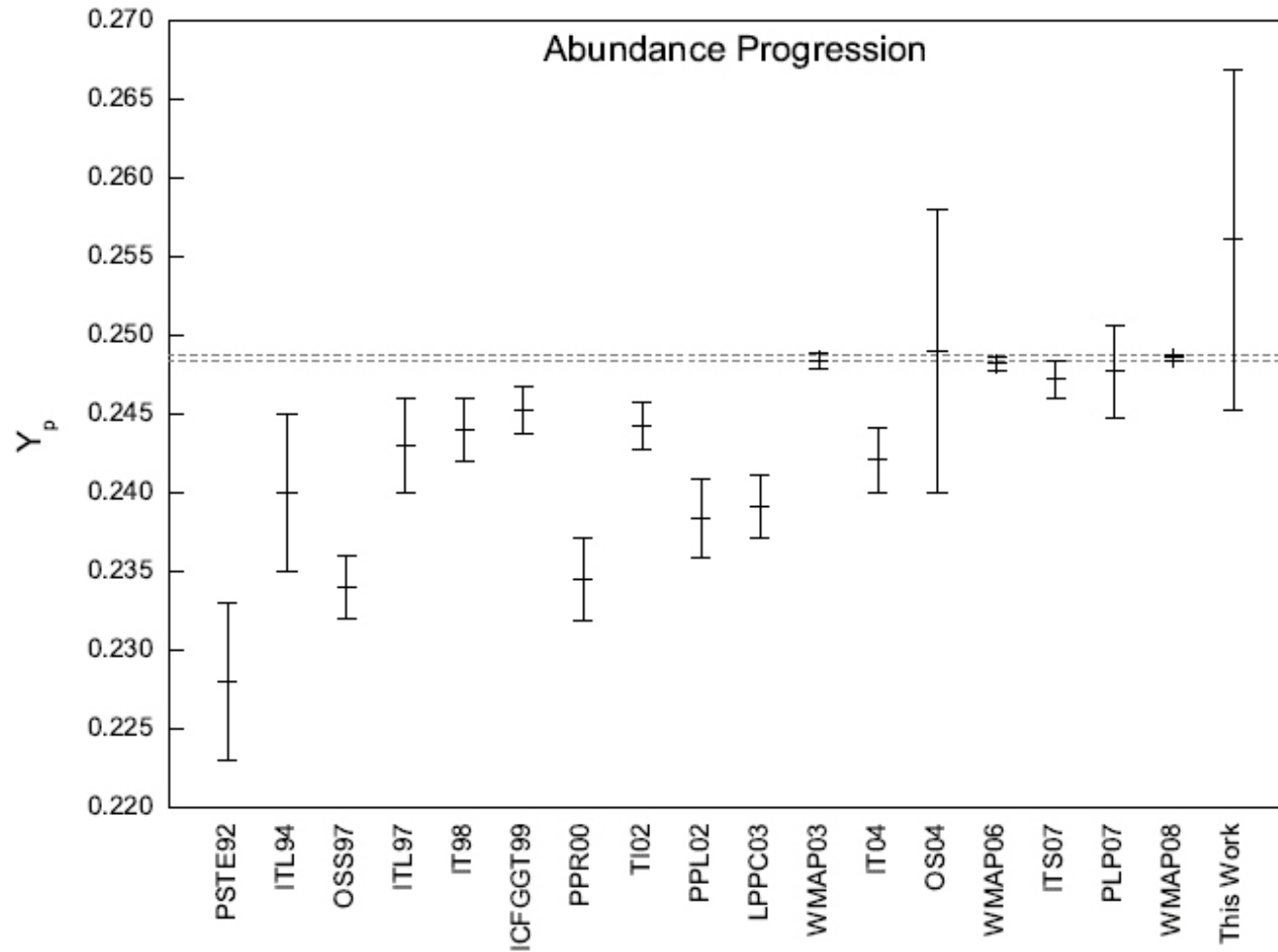




# Aver, Olive, Skillman (2010)



# Aver. Olive. Skillman (2010)



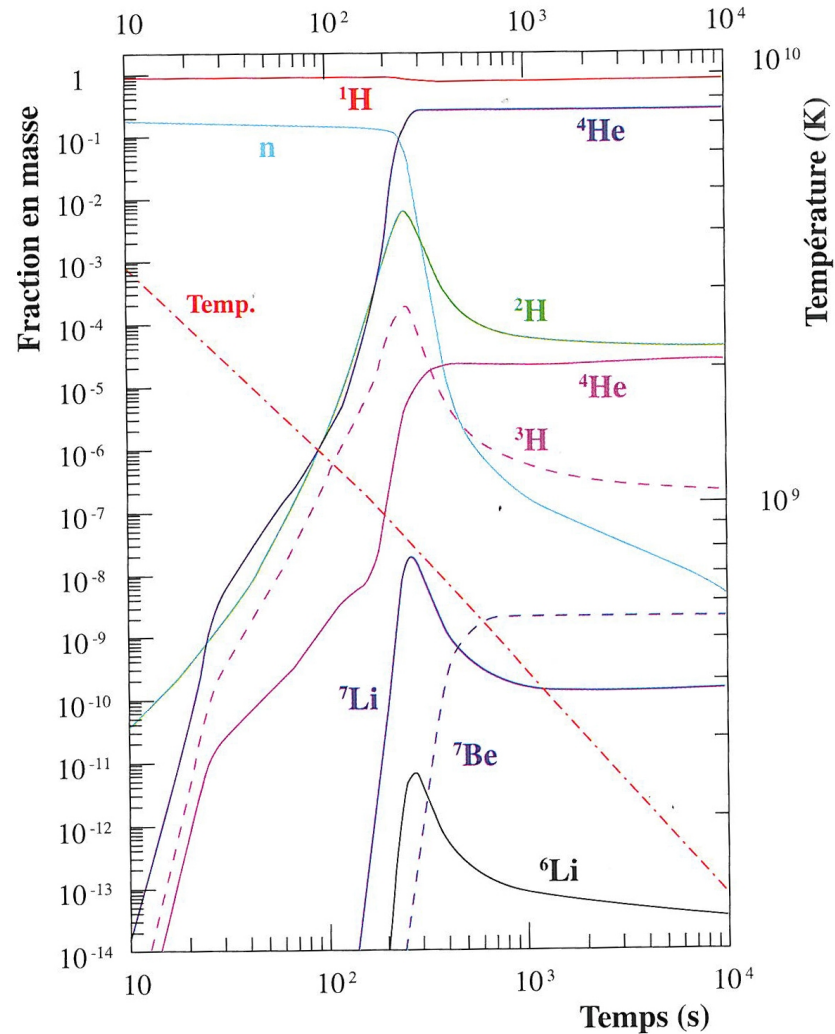
# Lithium 7

- Les étoiles de population I ont une abondance en lithium qui varie de  $10^{-10}$  à  $10^{-9}$  d'une étoile à l'autre
- Pour les étoiles de population II, F. et M. Spite ont montré l'existence d'un « plateau » à  $10^{-10}$  en 1982

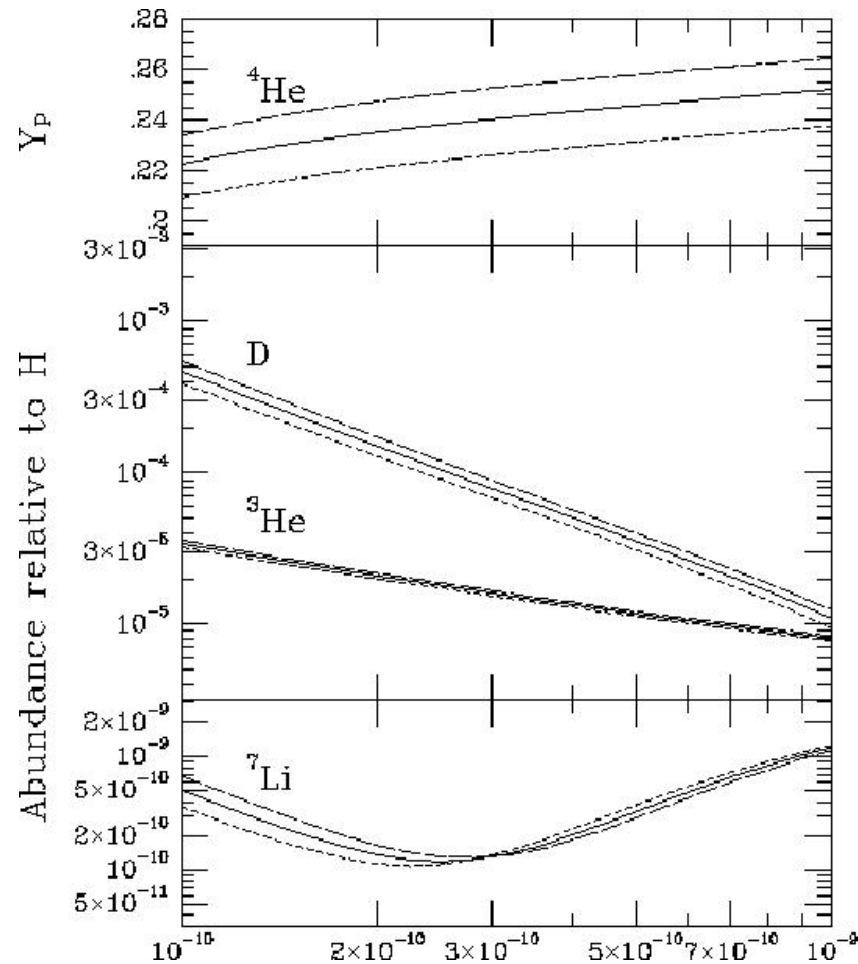
# Valeur des abondances primordiales

- $D \times 100\,000 = 2,5 + \text{ou} - 0,2$
- $He3 \times 100\,000 = 1 + \text{ou} - 0,07$
- $Y = 0,2485 + \text{ou} - 0,0005$
- $Li7 \times 10 \text{ v } 10 = 4,3 + 0,7 \text{ ou} - 0,6$

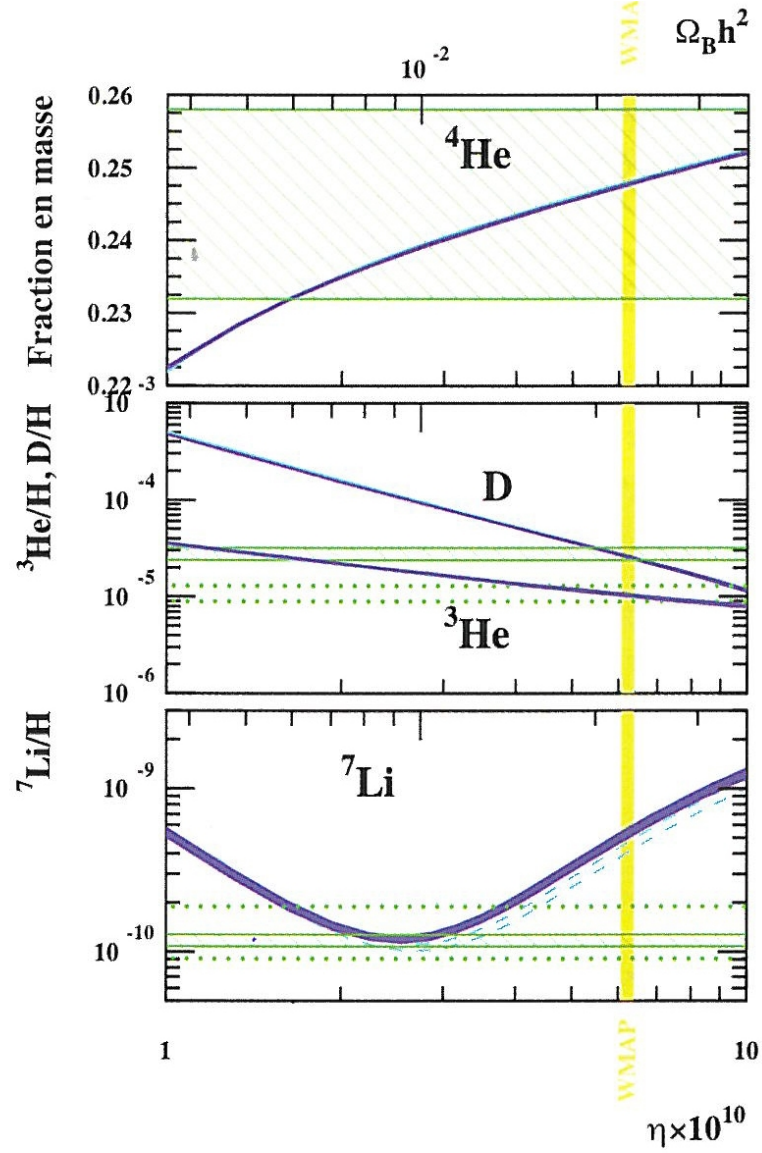
# La nucléosynthèse primordiale en fonction du temps



# La nucléosynthèse primordiale



# Comparaison entre calculs et observations





# Les développements récents

- La matière observable est distribuée de façon très inhomogène (1986)
- A partir de l'analyse de la composition de la matière en éléments très légers, on en déduit que la matière « atomique » ne représente que 3% environ du contenu « matériel » de l'Univers : conclusion : existence de matière « sombre » non nucléaire (1980)

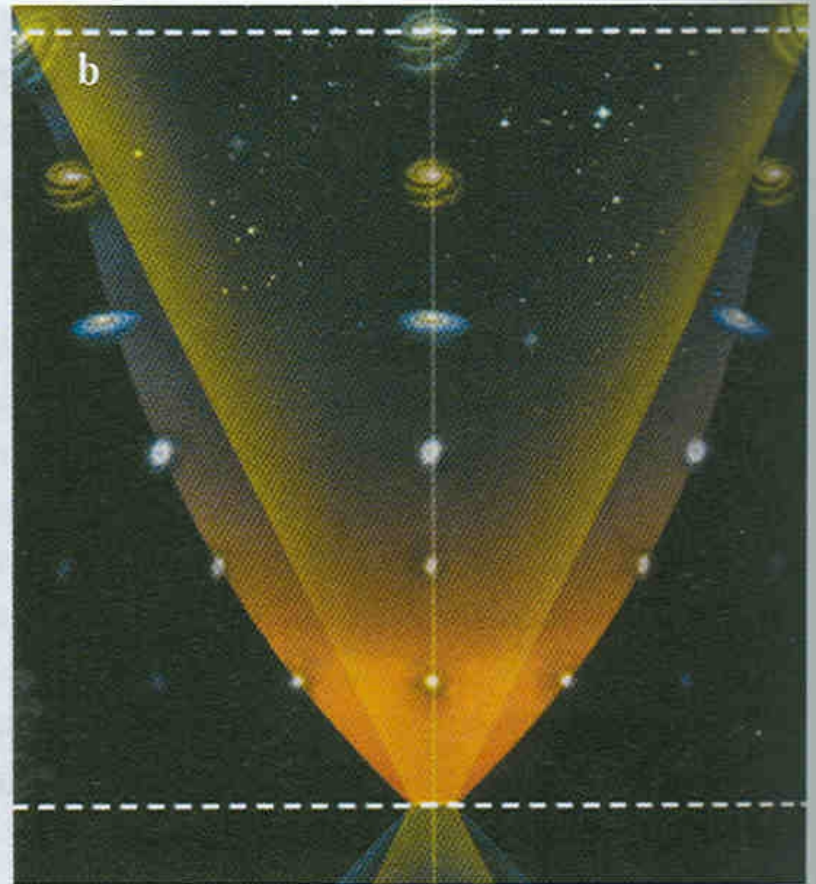
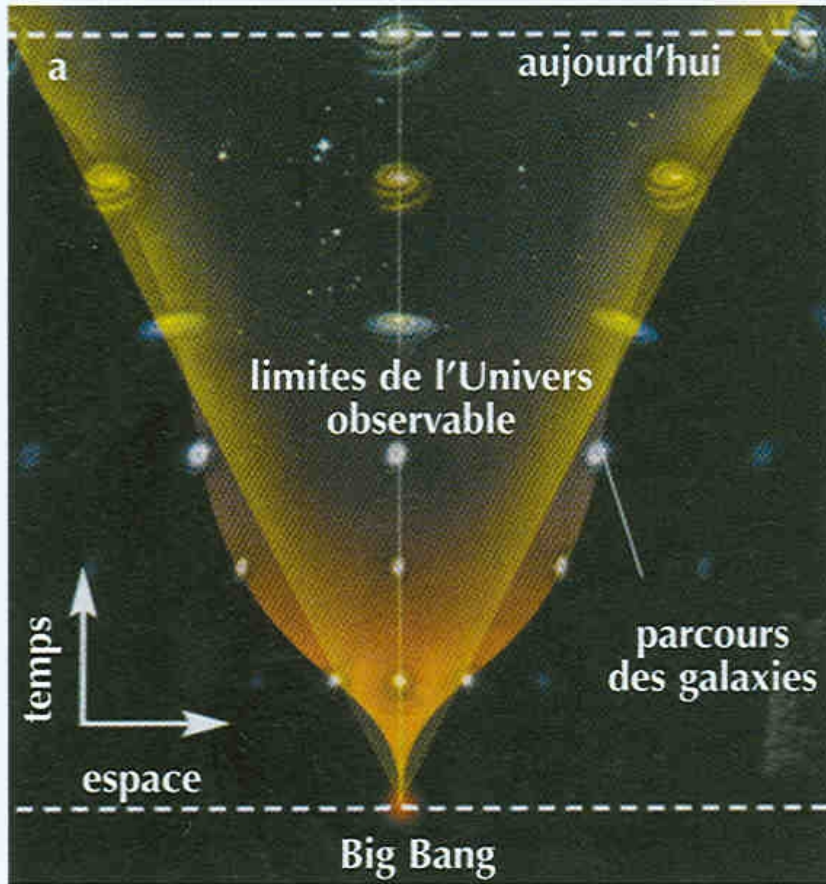
# Les résultats concernant les caractéristiques de l'Univers

- L'Univers est « plat » : sa densité (énergie – matière) = la densité « critique »
- 70 % d'énergie « primordiale »
- 27 % de matière « noire »
- 3 % de matière atomique
- Age de l'Univers : 13,7 milliards d'années

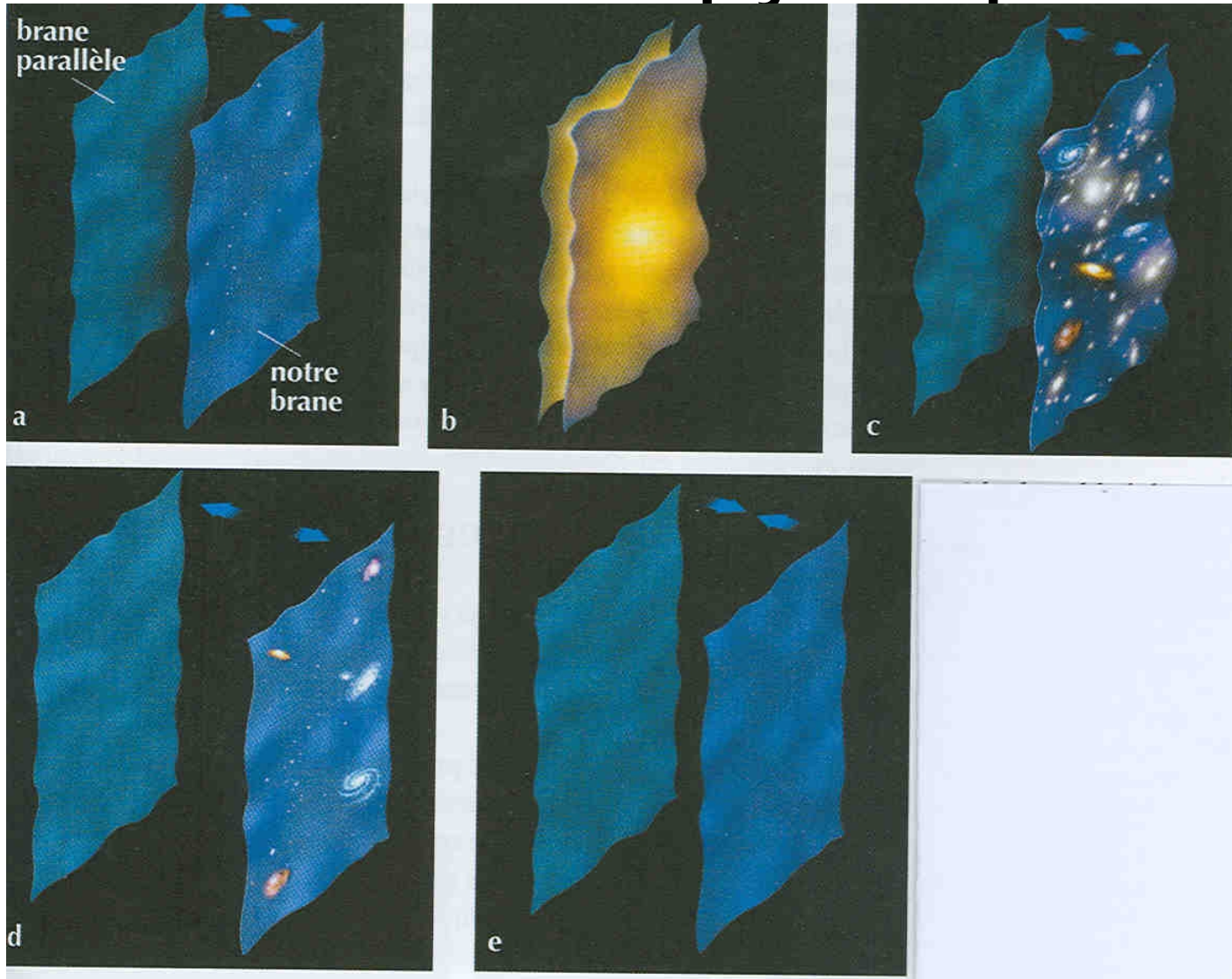
# Une brève histoire de l'Univers

- L'ère « particulaire » dure environ 1 sec et se termine par l'existence d'un gaz très chaud et dense constitué de nucléons, d'électrons et de neutrinos.
- L'ère « nucléaire » dure 3 minutes : naissance du deutérium, de l'hélium et du lithium 7
- L'ère « plasma » dure 300 000 ans et se termine par la « recombinaison » qui se produit quand le gaz se refroidit à une température inférieure à 10 000 K
- Nous sommes dans l'ère « stellaire » ou « galactique »

# Deux visions du commencement

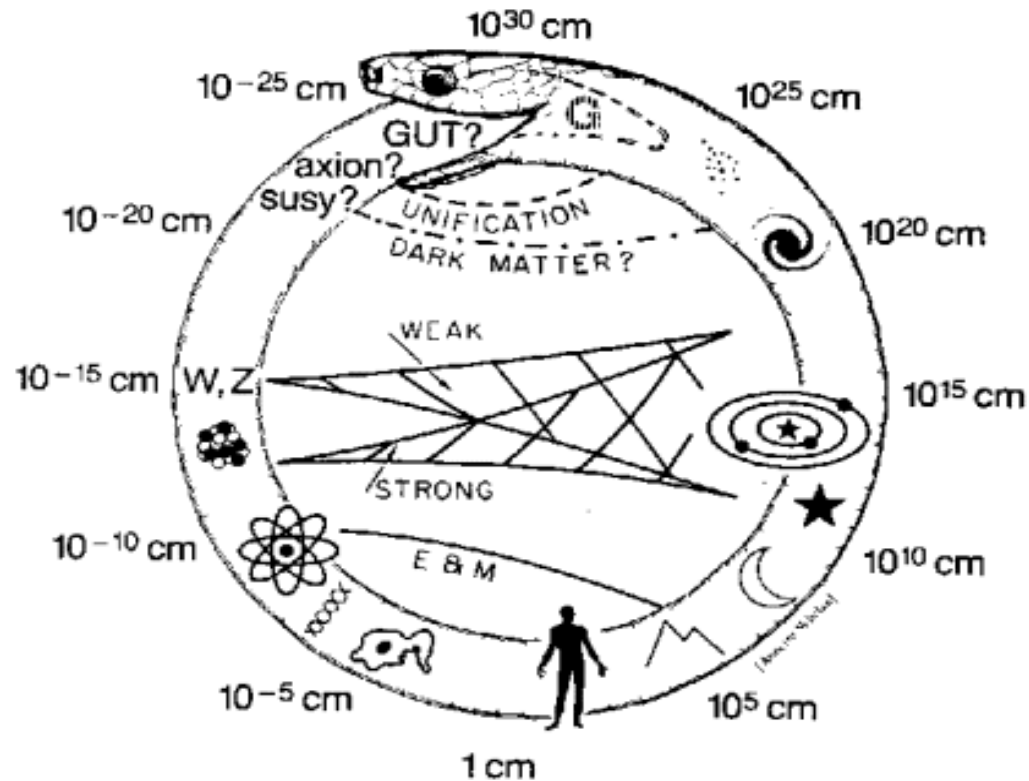


# L'Univers « ekpyrotique »



# L'avenir de la cosmologie

# Le « serpent » cosmique ou la nécessaire alliance de la physique des particules et de l'astronomie des grandes structures



- Les expériences du LHC (Large Hadron Collider) du CERN vont peut être permettre de détecter la particule constituant l'essentiel de la « matière noire non nucléaire »
- On va chercher à détecter au sol (LIGO ou VIRGO) ou dans l'espace (LISA) les ondes gravitationnelles qui ont été émises à différentes époques « originelles »



# Le satellite Planck de l'ESA (14 Mai 2009)

