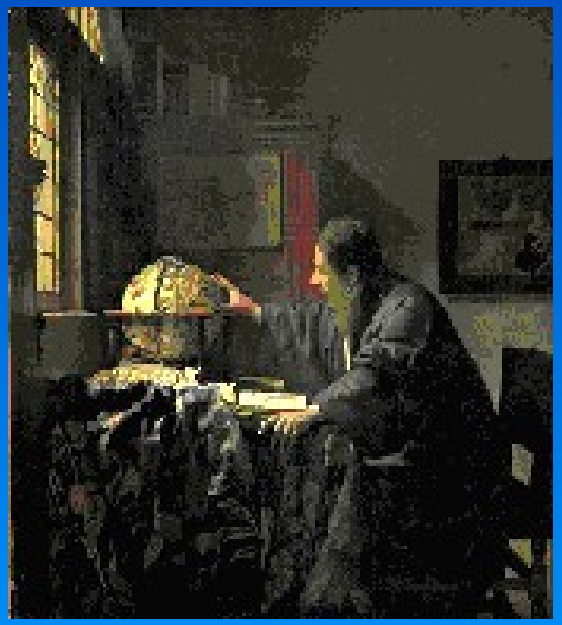
Le Big Bang du XXIième siècle

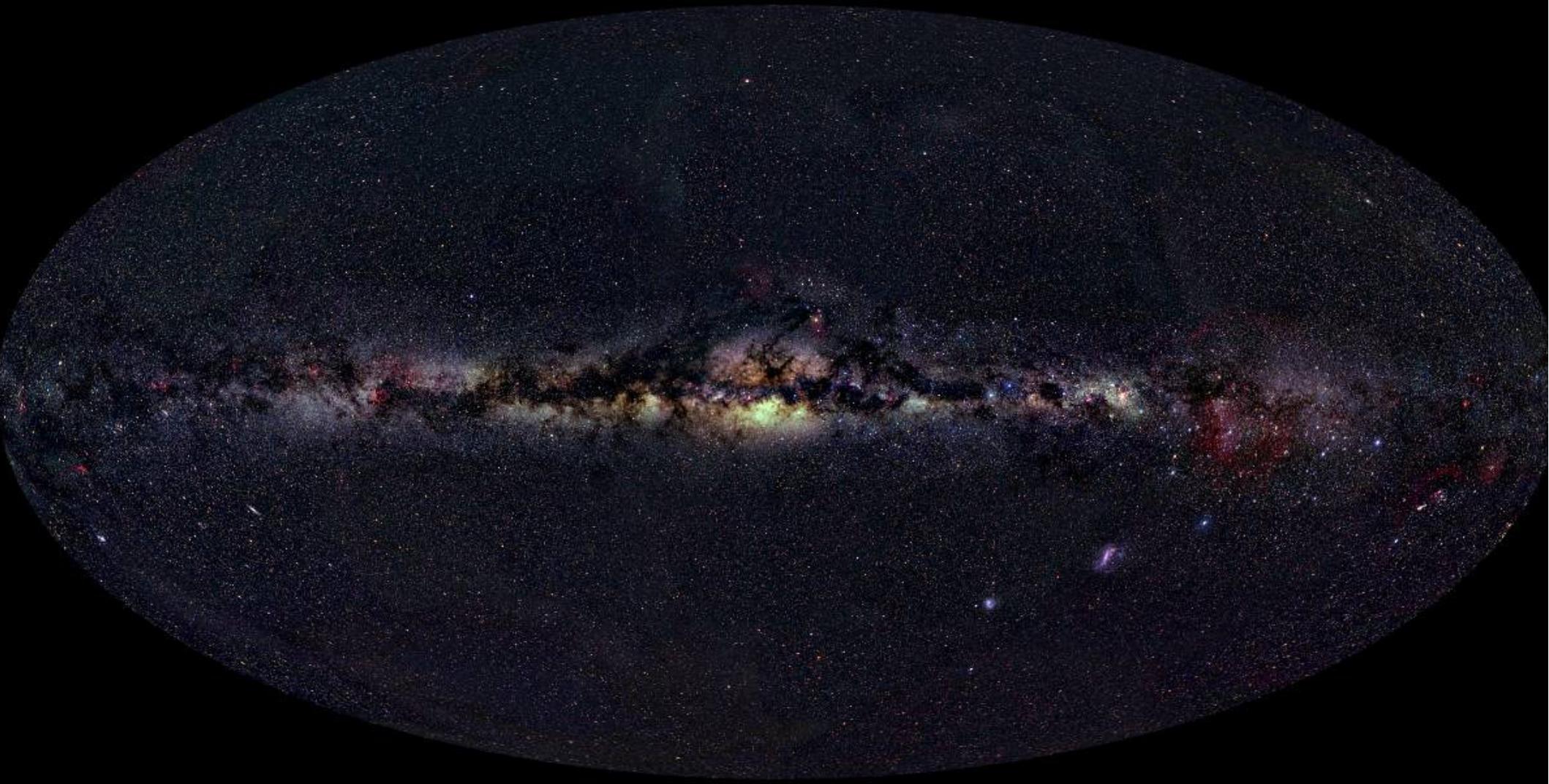
Université de Toulouse

IUF

irap astrophysique & planétologie



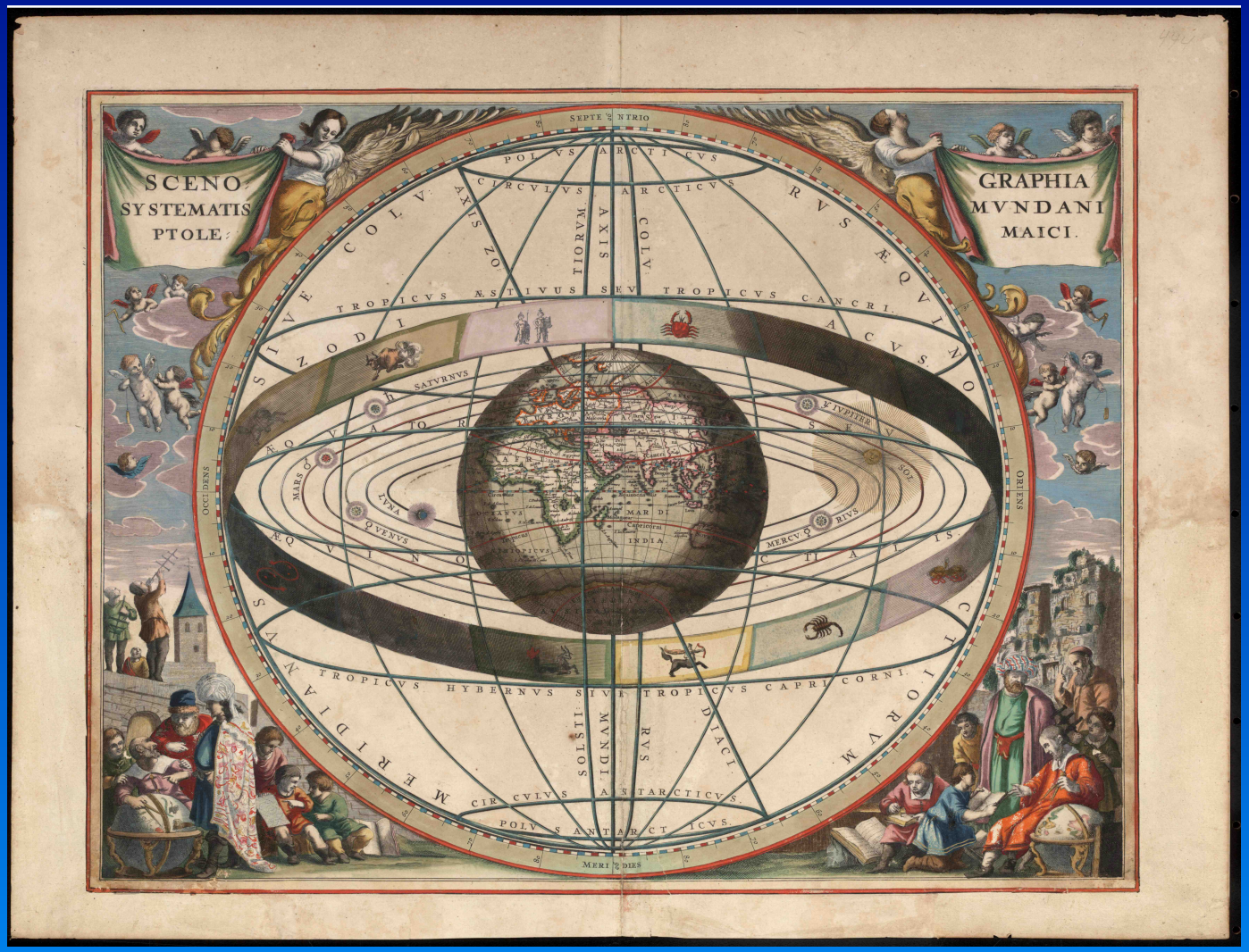
The Deep Sky



© 2000, Axel Mellinger

Nébuleuse d'Andromède: notée par Al Sufi (~950)

Vision du Monde

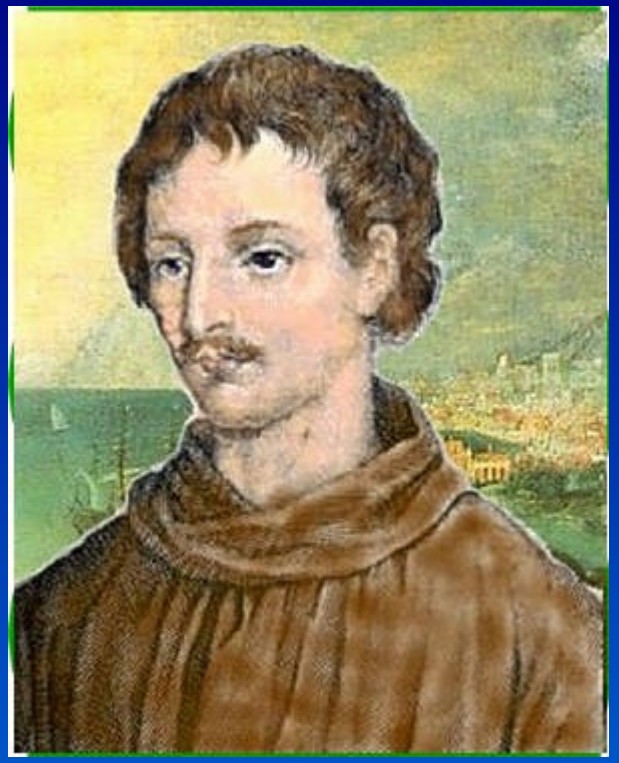


géocentrisme (Aristote...)

Copernic (1473-1543)

La Révolution...

Giordano Bruno



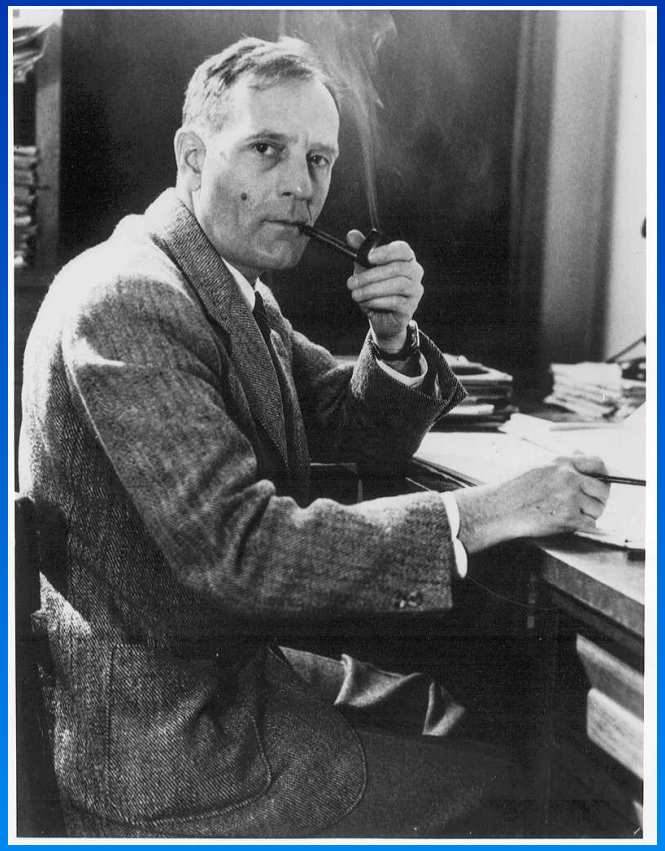
relativité du mouvement

Etoiles = ~ Soleil

Multiplicité des mondes

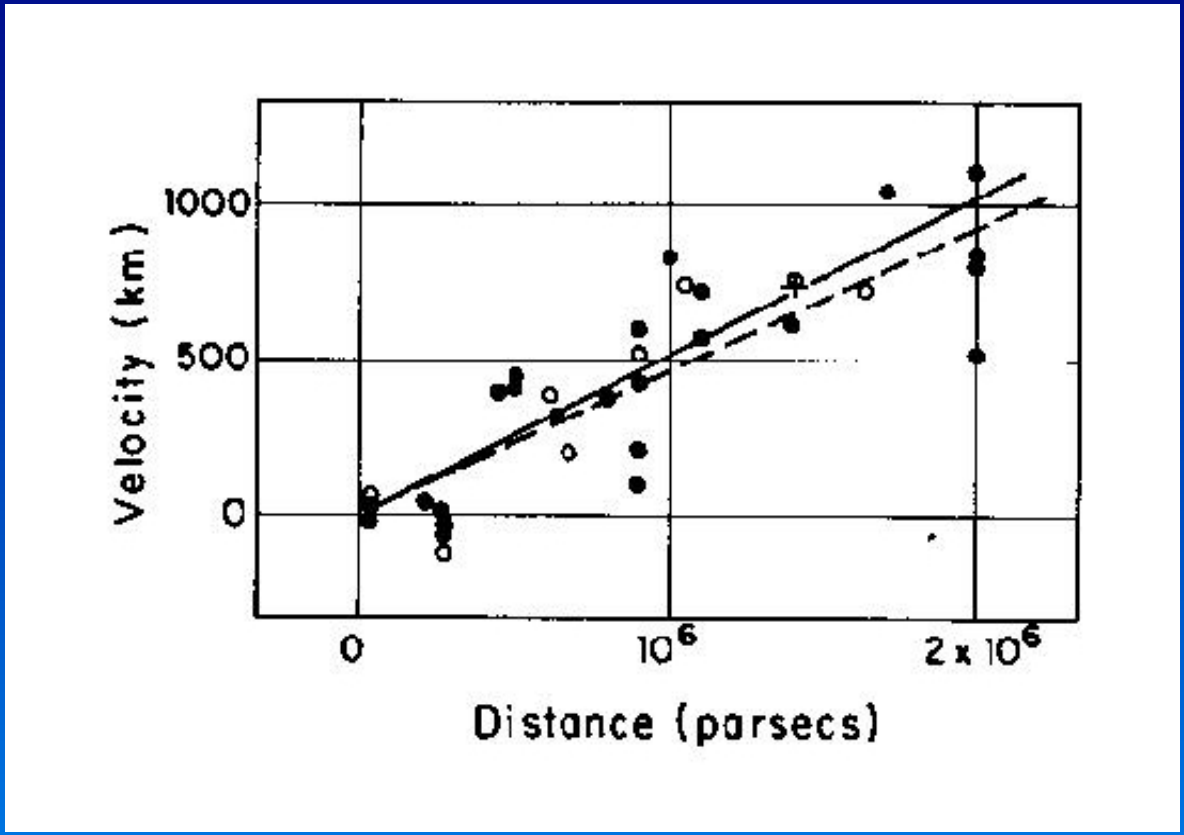
Galilée

Le Grand Débat
(nature des nébuleuses)

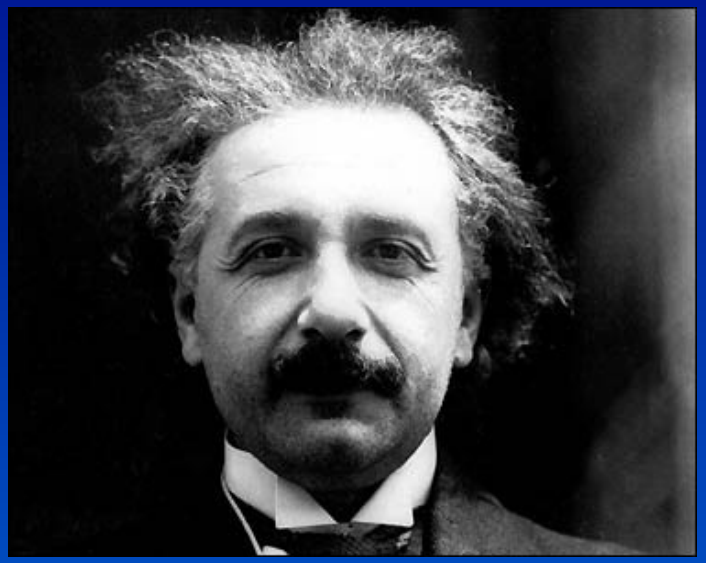


Edwin Hubble (1925)

Diagramme de Hubble:
(1929)



Relativité Générale :

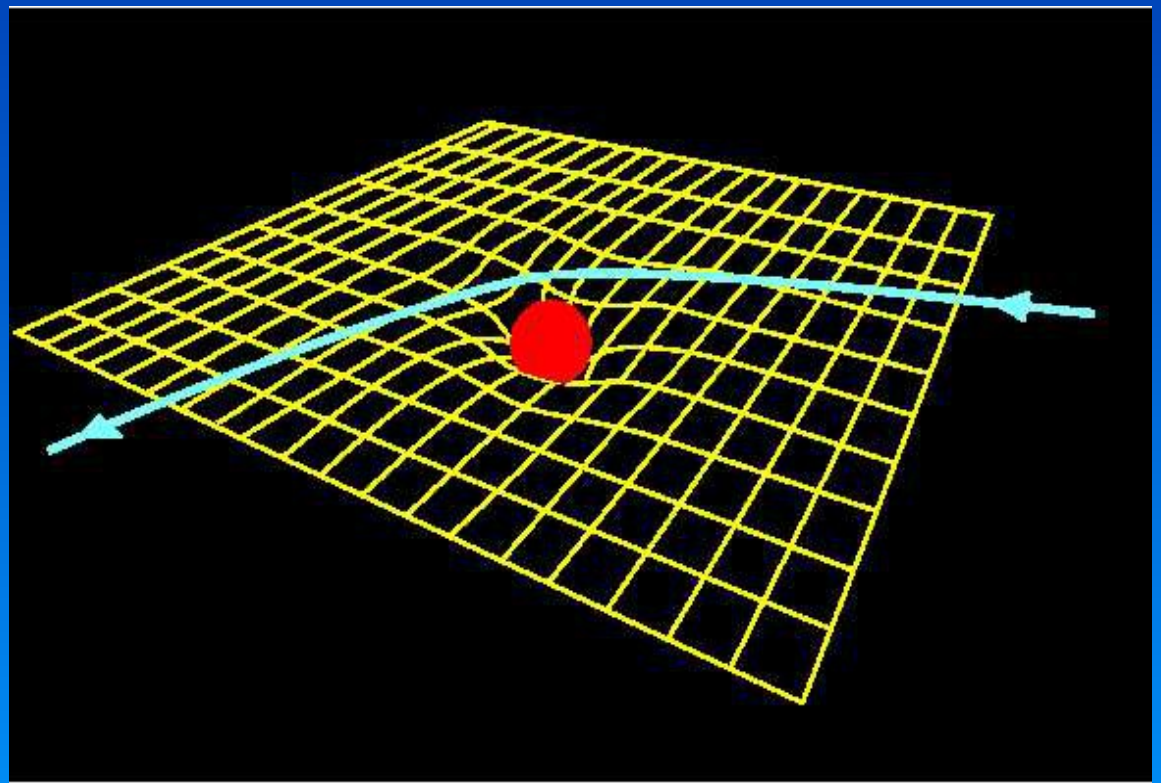


Le monde = espace-temps

Cet espace est courbe

La courbure dépend du contenu!

Relativité Générale :



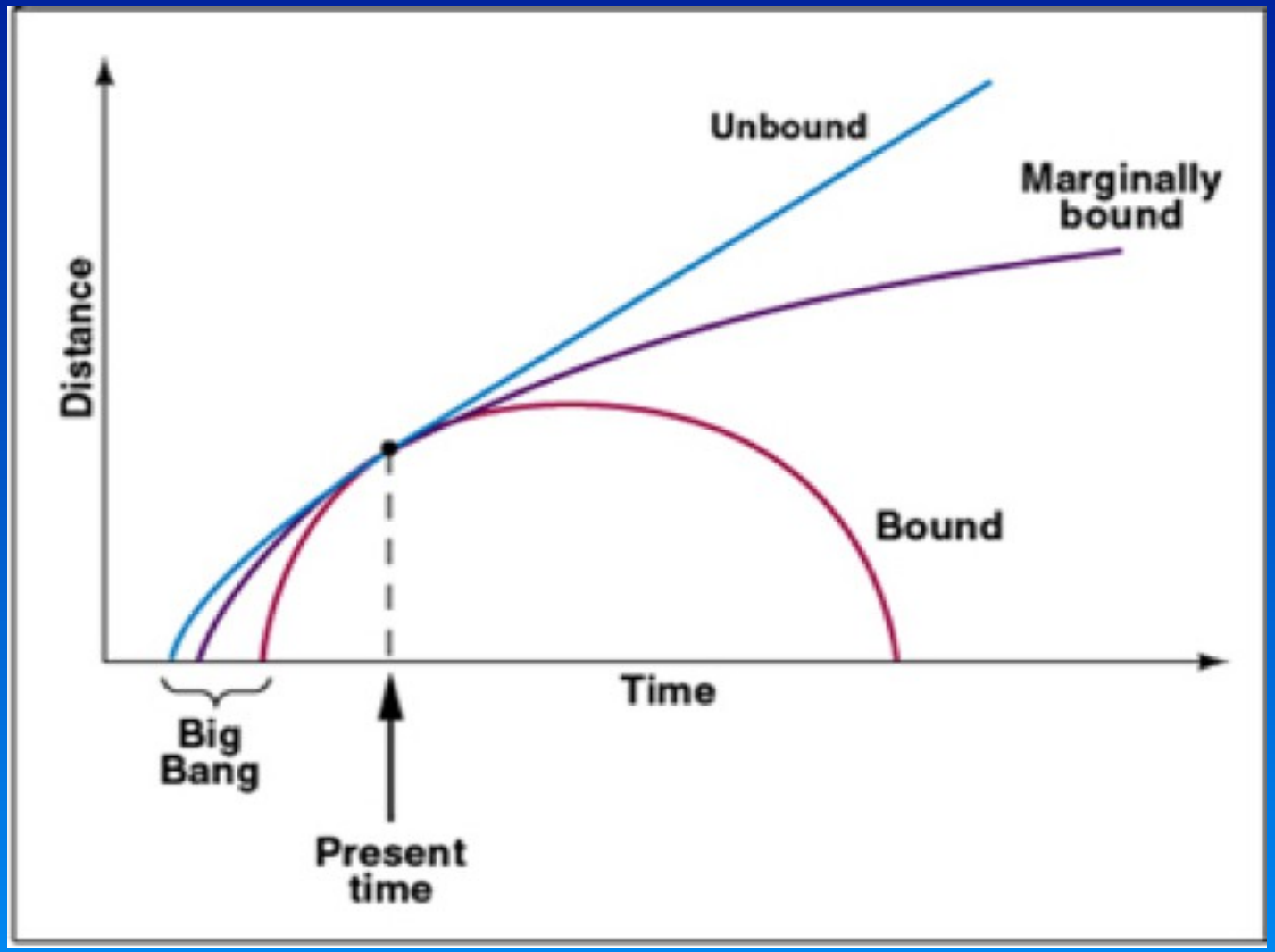
Evolution de l'Univers

Expansion: élan initial

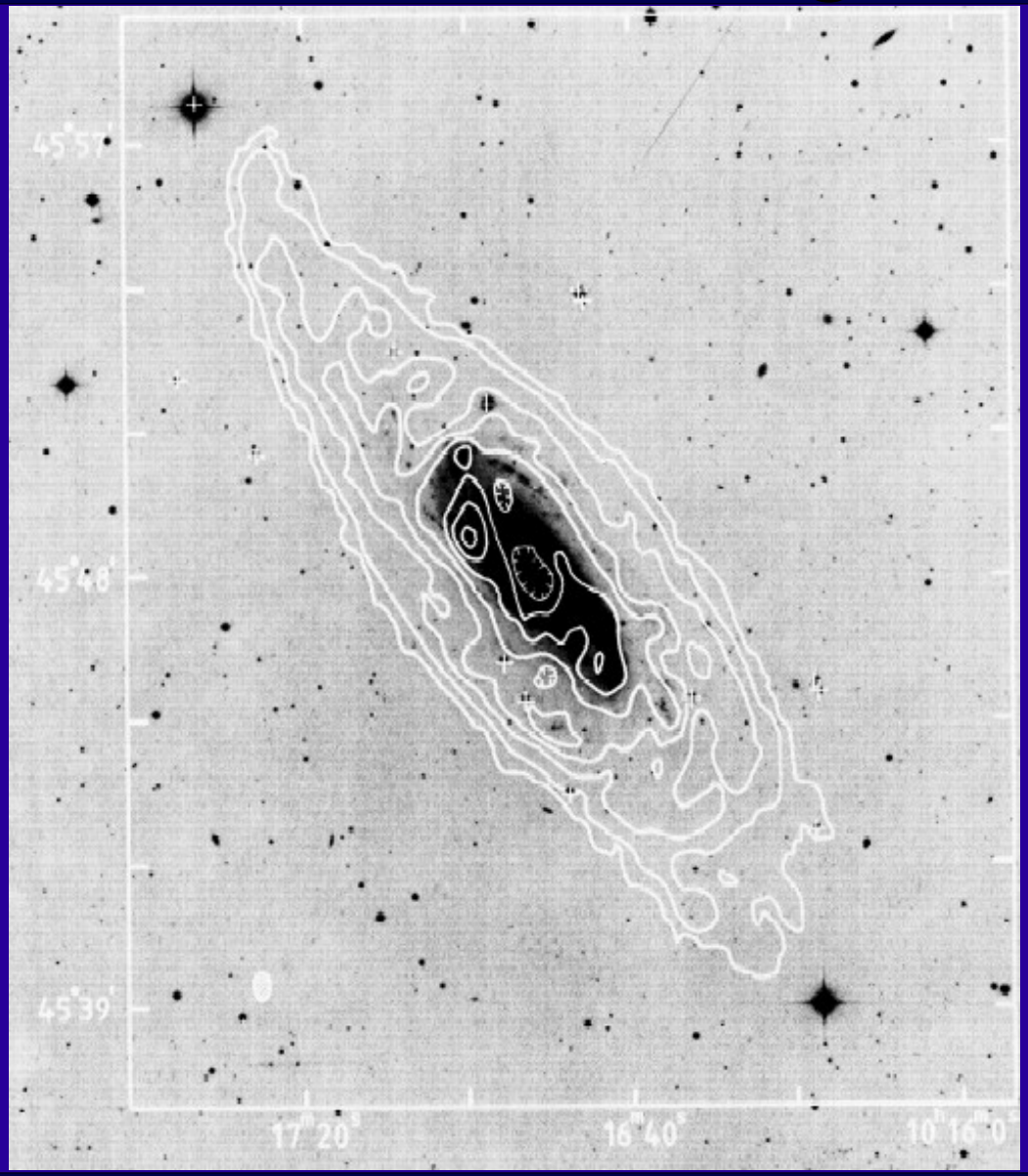
Gravitation:

- La densité de l'univers contrôle son évolution
  → densité critique ρ_c
- Contenu (densité) = géométrie !
- Peser l'univers !

Evolution de l'Univers

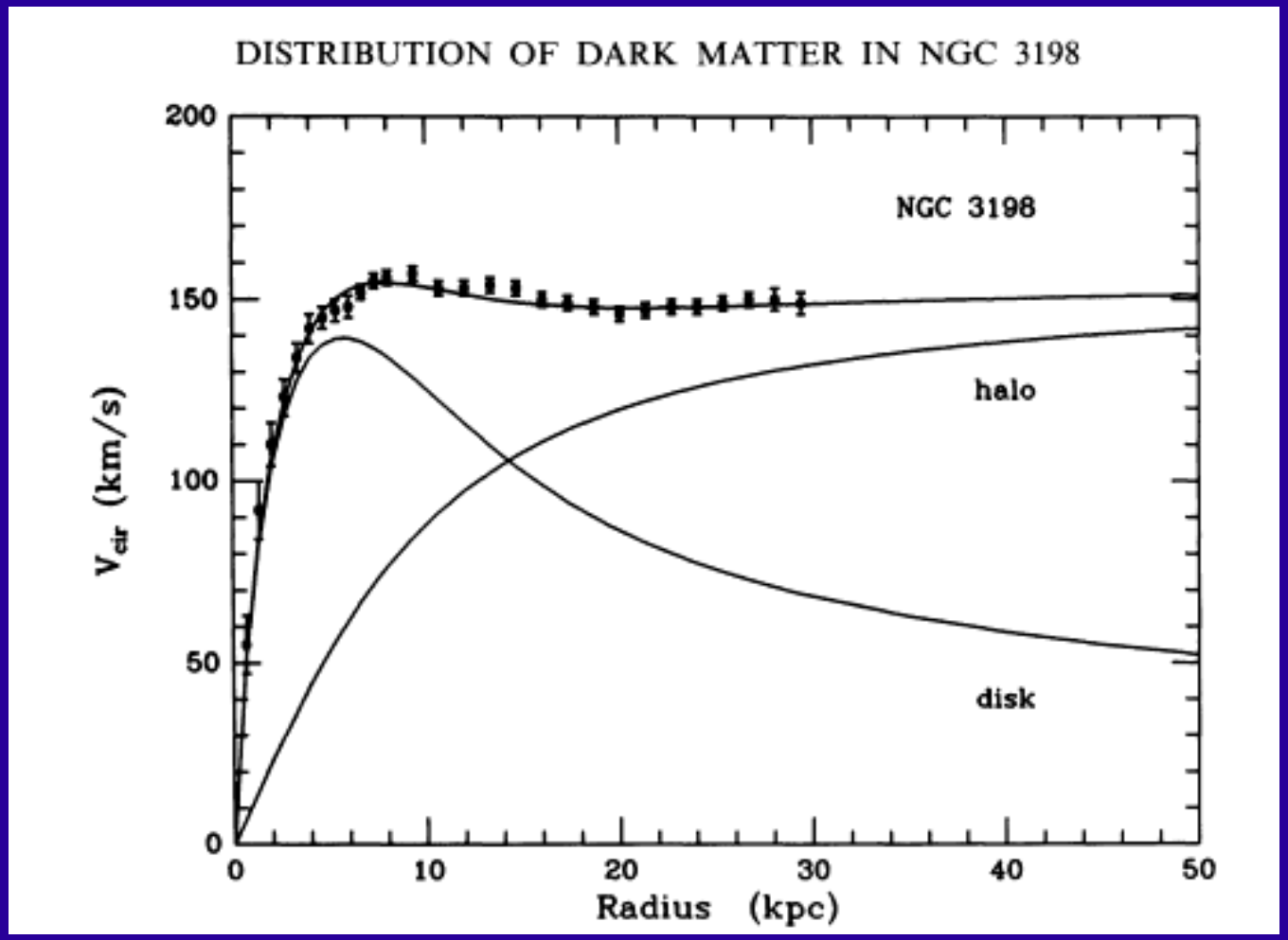


La matière noire dans les galaxies...



NGC3198

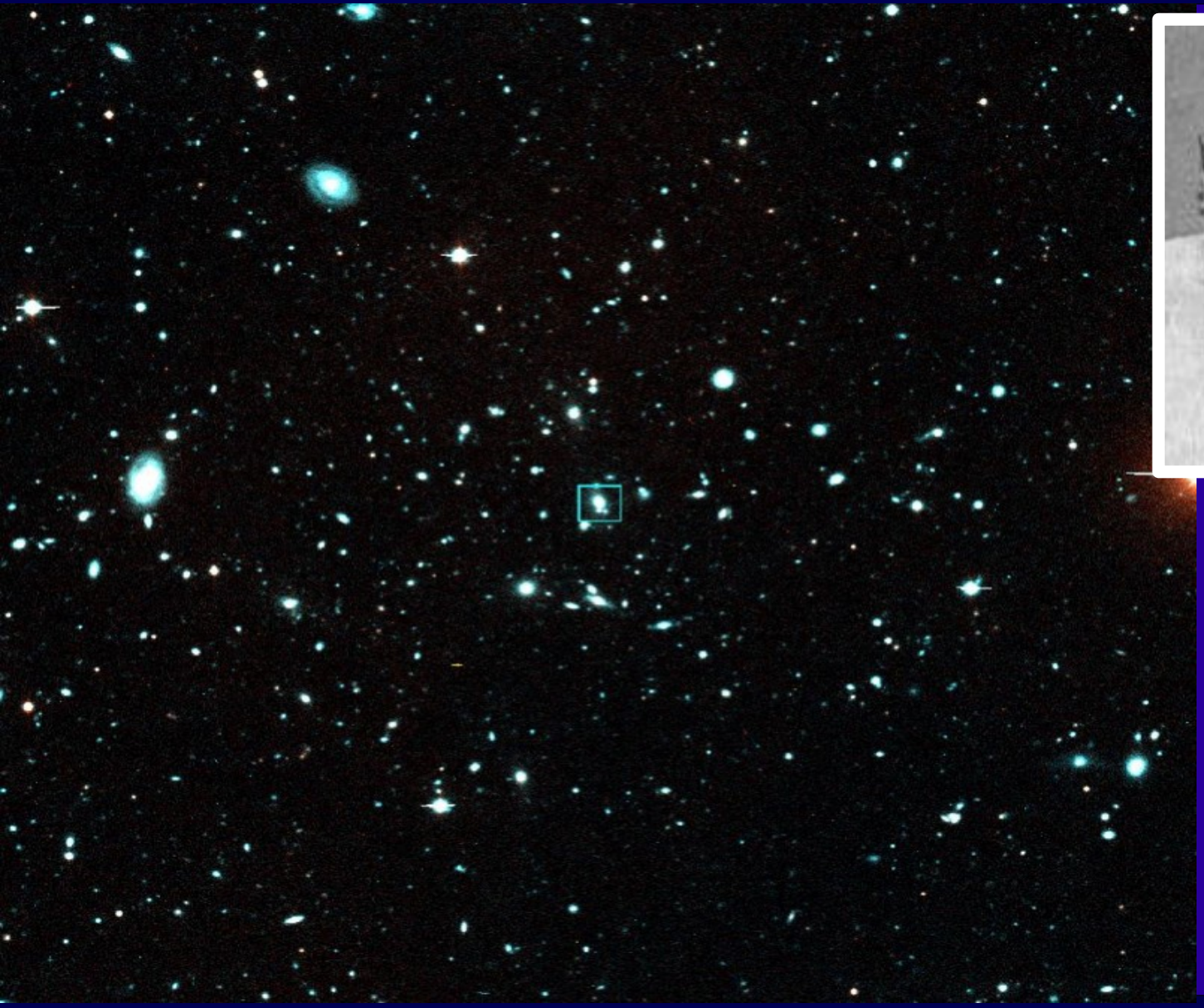
La matière noire dans les galaxies...



$$V^2 = \alpha \frac{GM}{R}$$

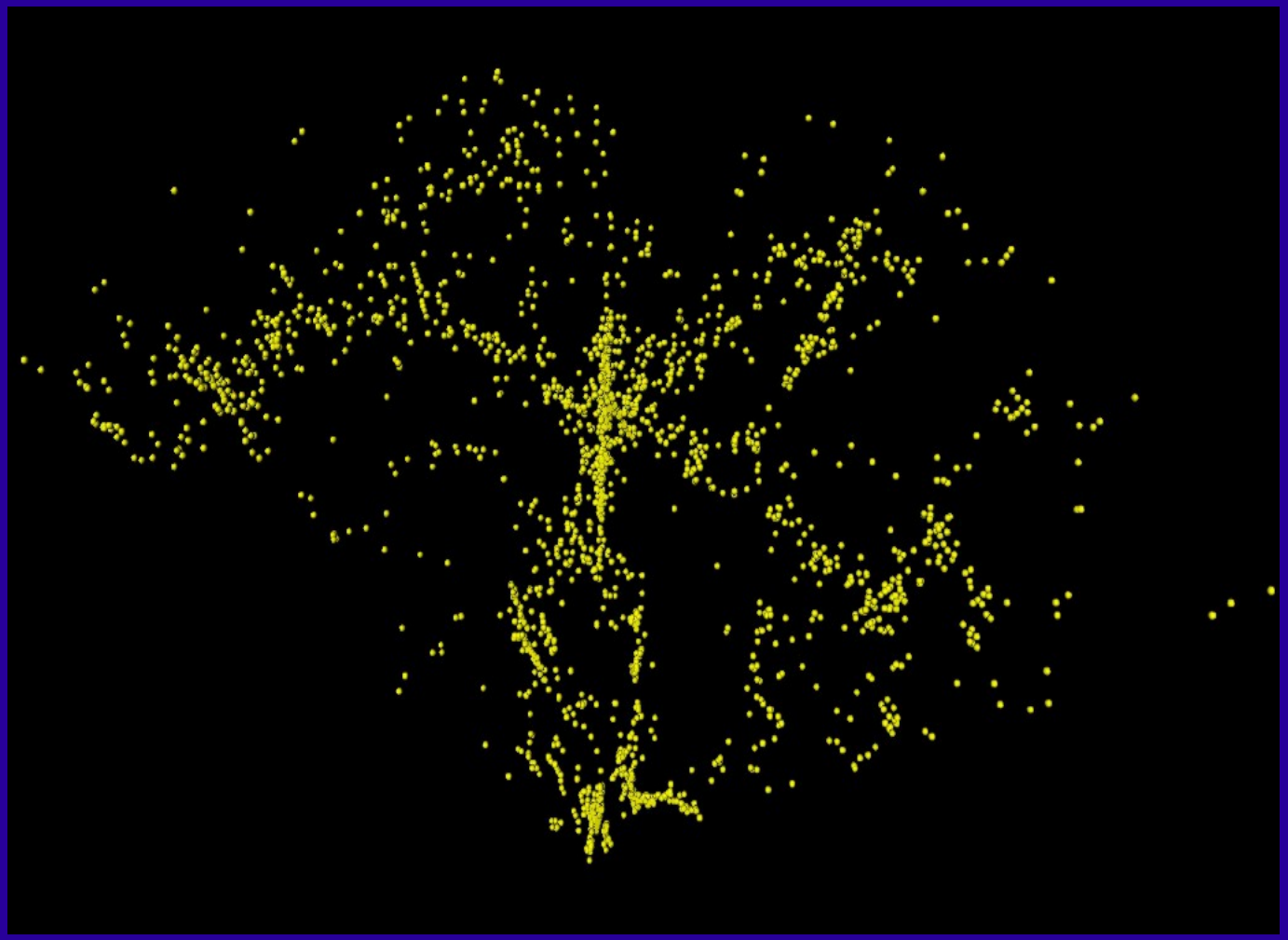
...visualisée par les courbes de rotation.

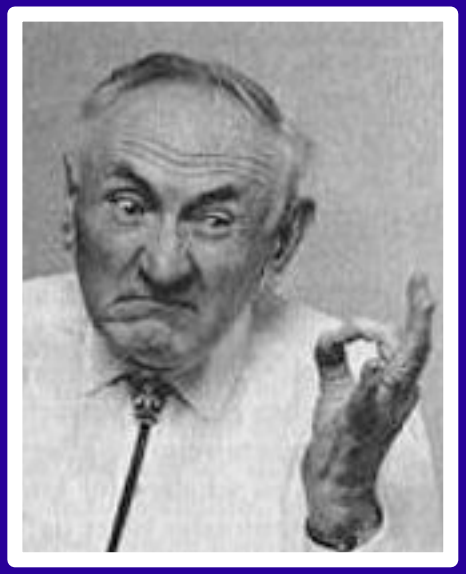
La matière noire dans les amas de galaxies...



...détectée par les vitesses de dispersion.

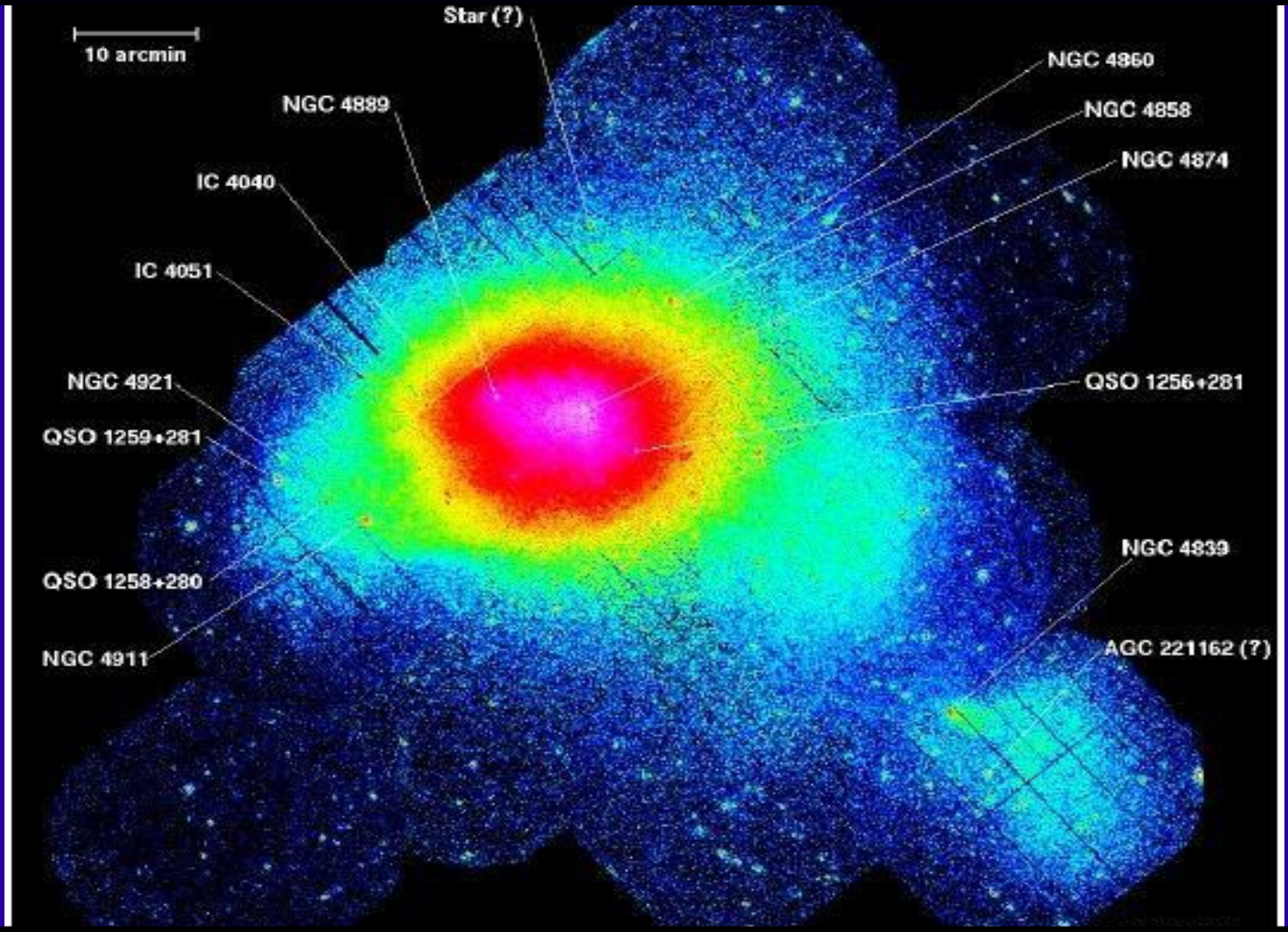
La matière noire dans les amas de galaxies...





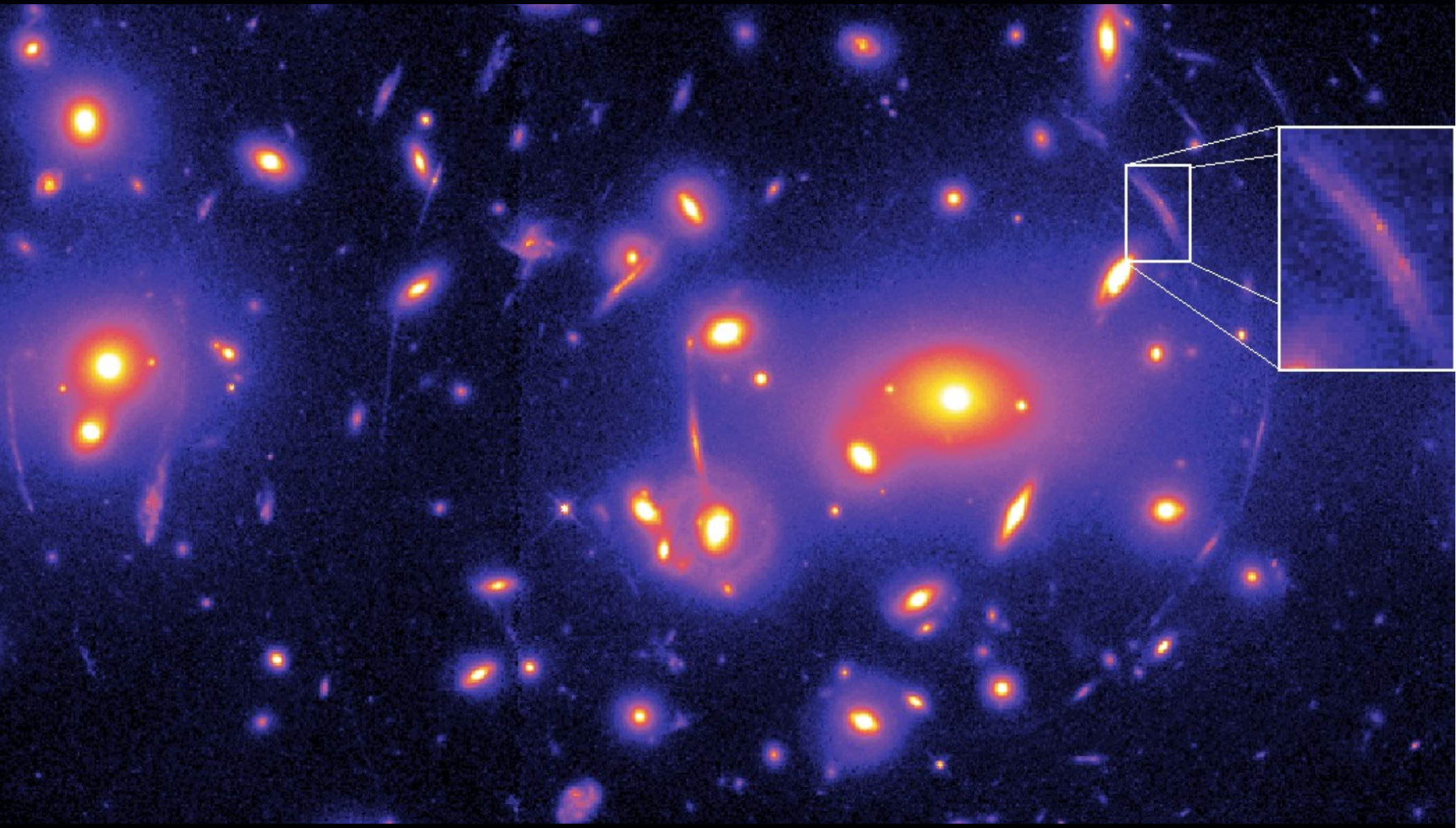
...détectée par les vitesses de dispersion.

La matière noire dans les amas de galaxies...



...visualisée par l'émission de rayons X.

La matière noire dans les amas de galaxies...

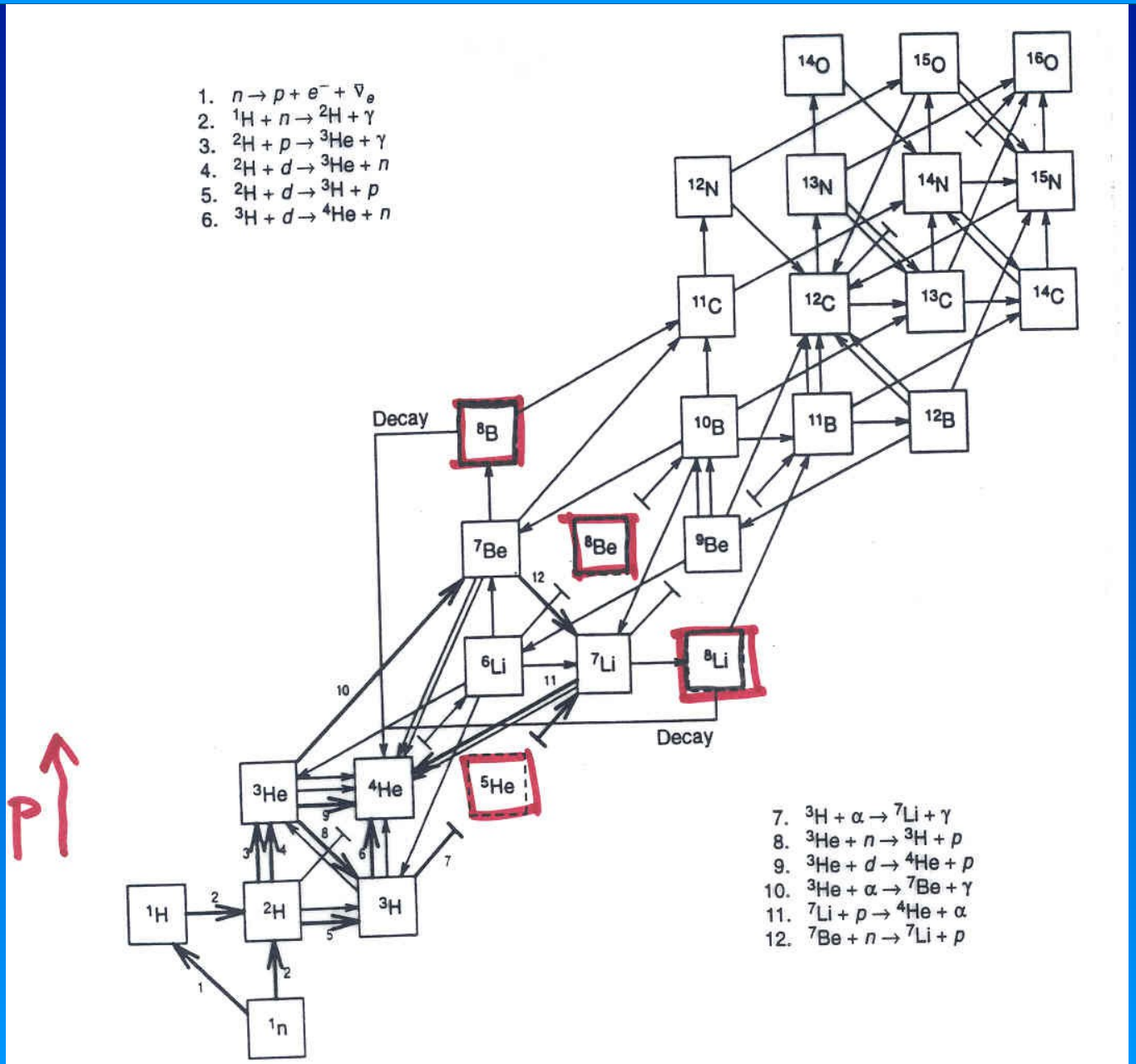


...visualisée par les arcs gravitationnels.

Matière noire, Bilan:

30% de la densité critique

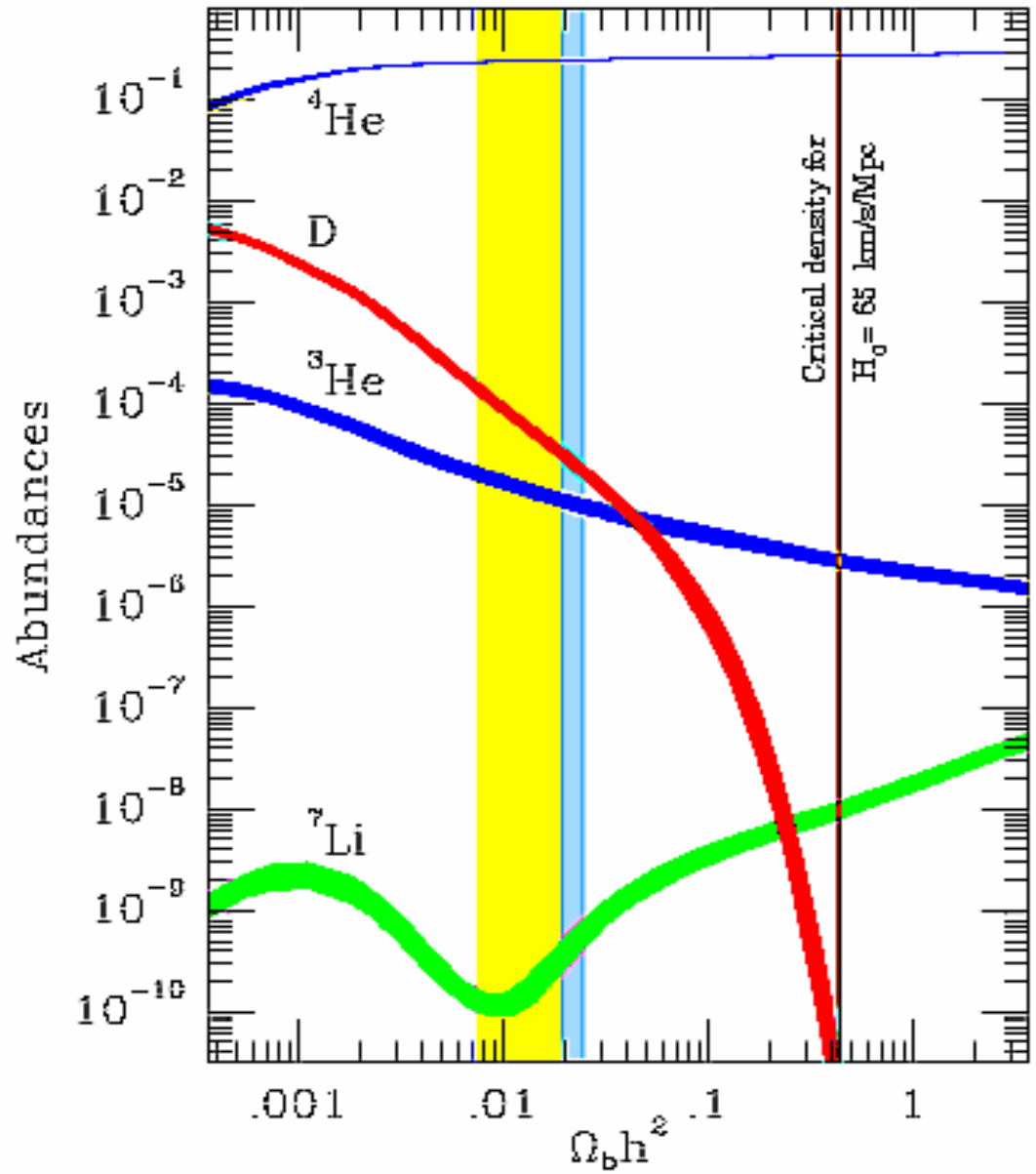
Nucléosynthèse des éléments légers



Nucléosynthèse des éléments légers

Composition chimique de l'Univers:

- ~ 75 % d'Hydrogène
- 25 % d'Hélium 4
- < 1 % d'autres éléments



Matière noire, Bilan:

Atomes: 5%

30% de la densité critique

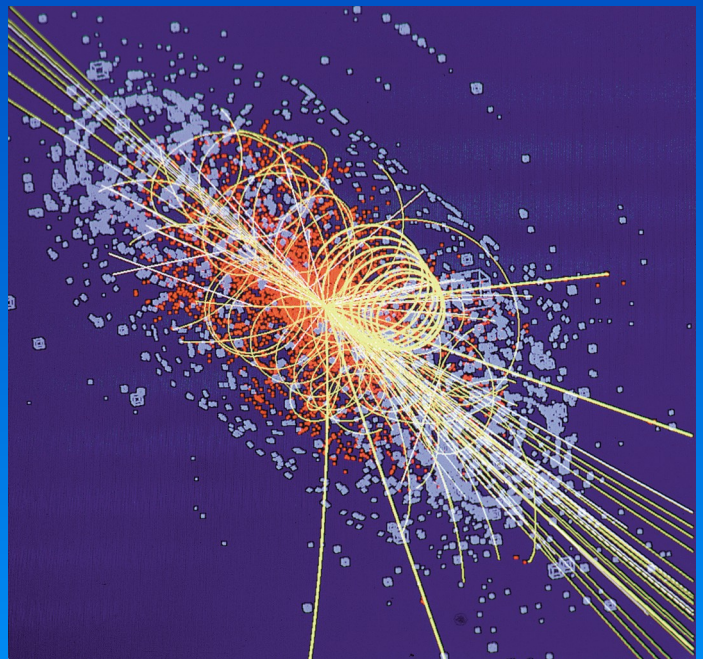
Nature inconnue, non-baryonique

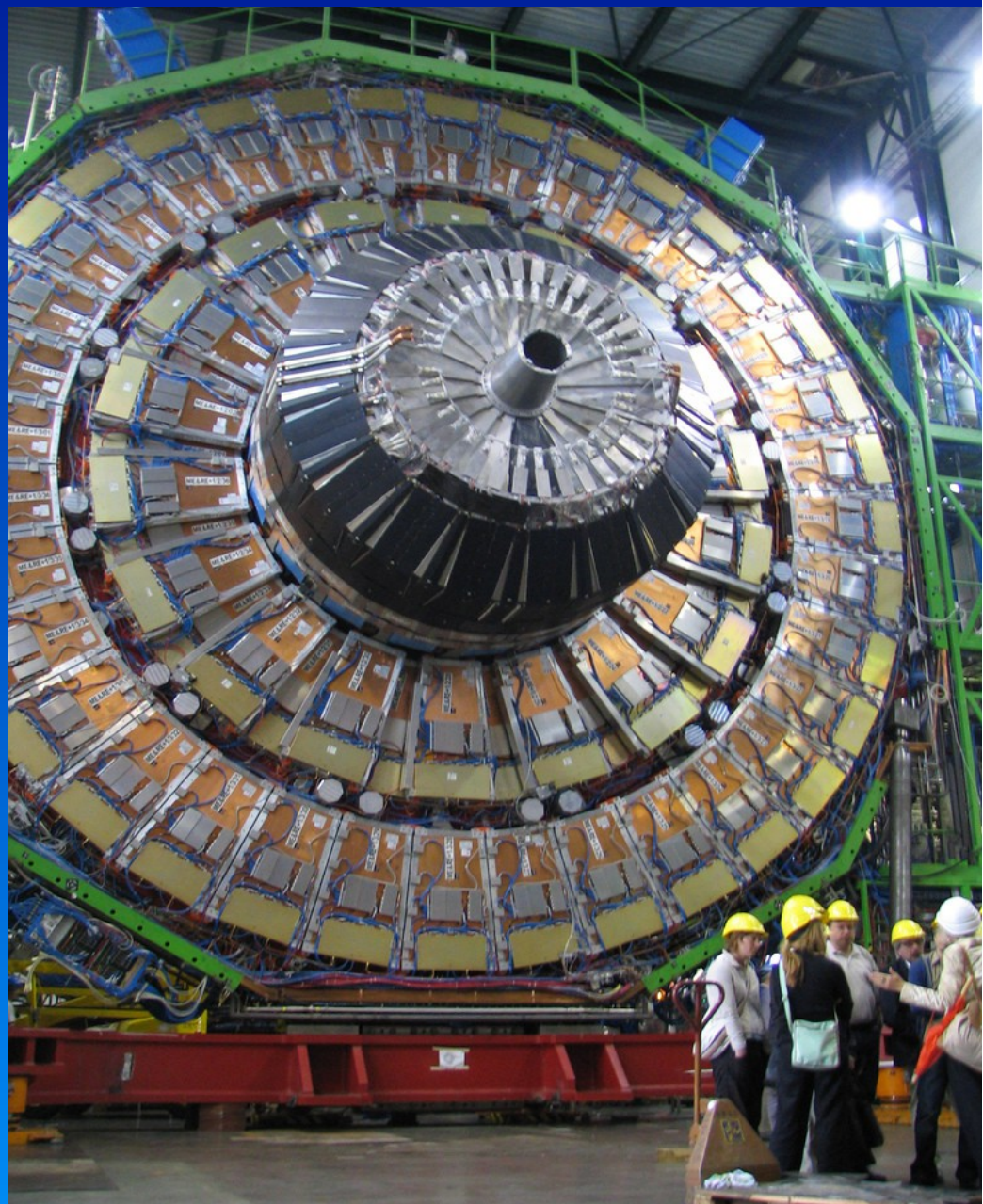
Matière noire non-baryonique :

A trouver dans
cette pièce...

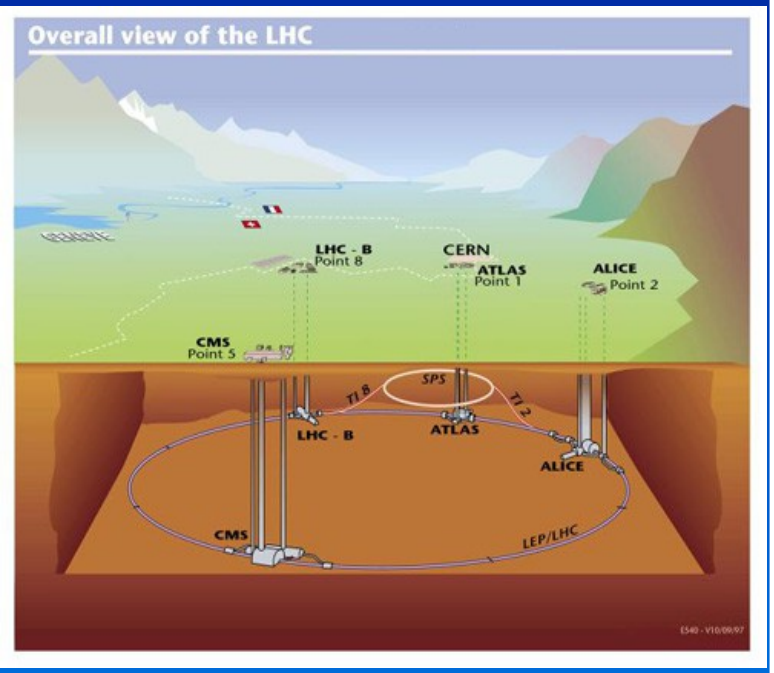
Matière noire non-baryonique :

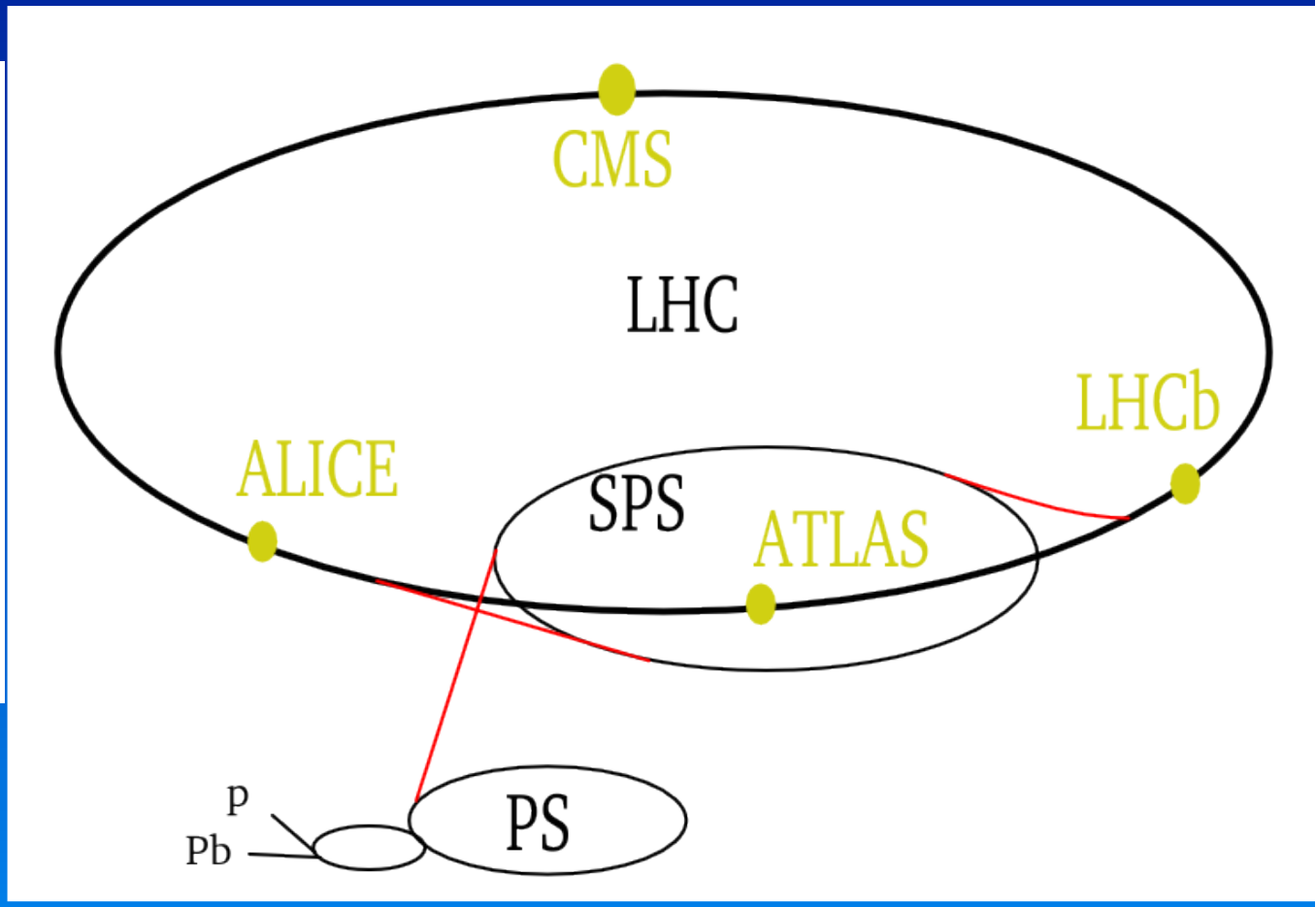
A chercher dans les grands accélérateurs...





Large Hadron Collider:





Prédiction:

L'Univers doit contenir un « rayonnement de corps noir »

Rayonnement de corps noir:

Découverte du fond cosmologique

(Penzias & Wilson1964)

Prix Nobel de physique 1978

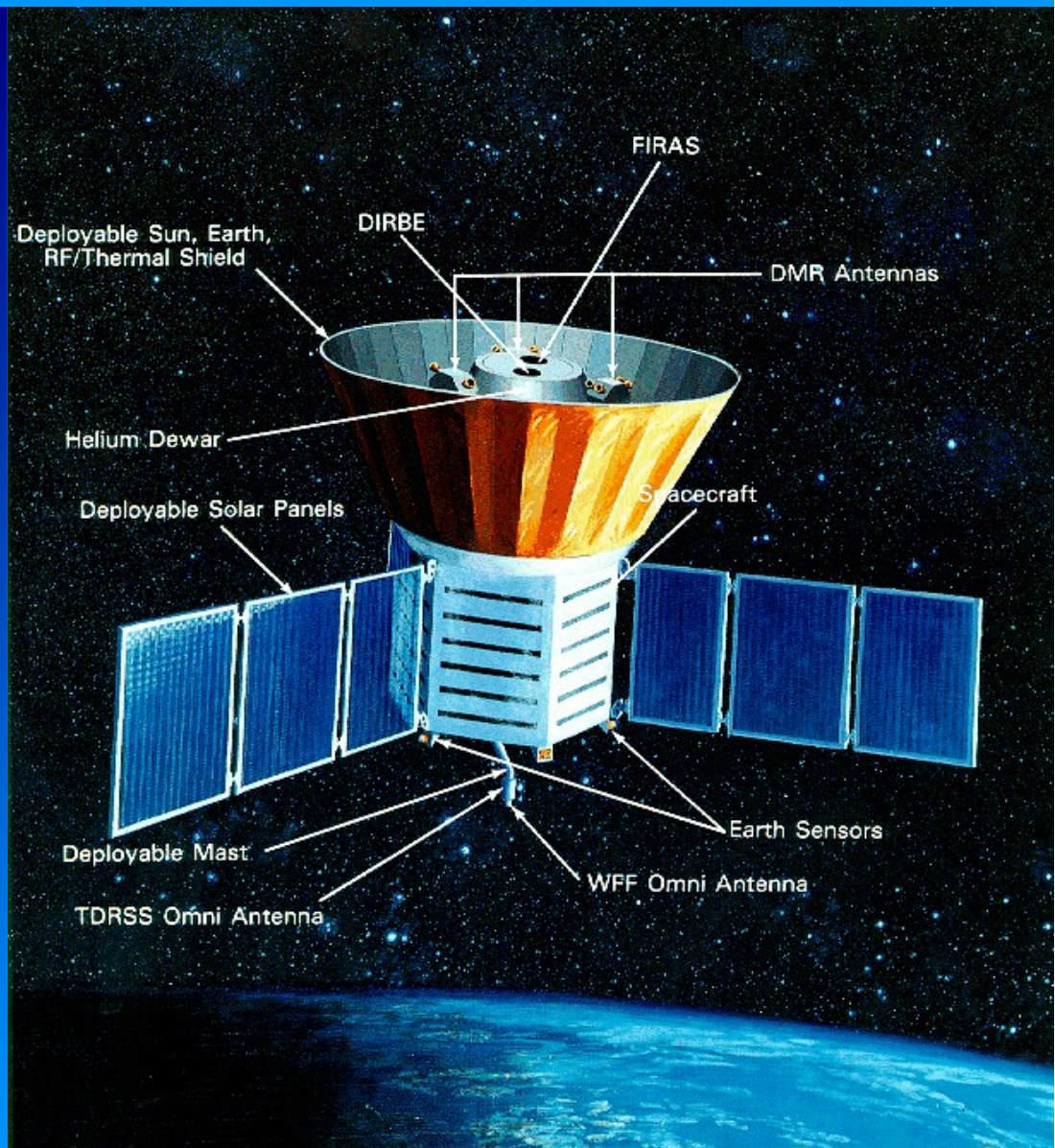
Fond cosmologique

Gène de l'atmosphère

Observations par satellite:

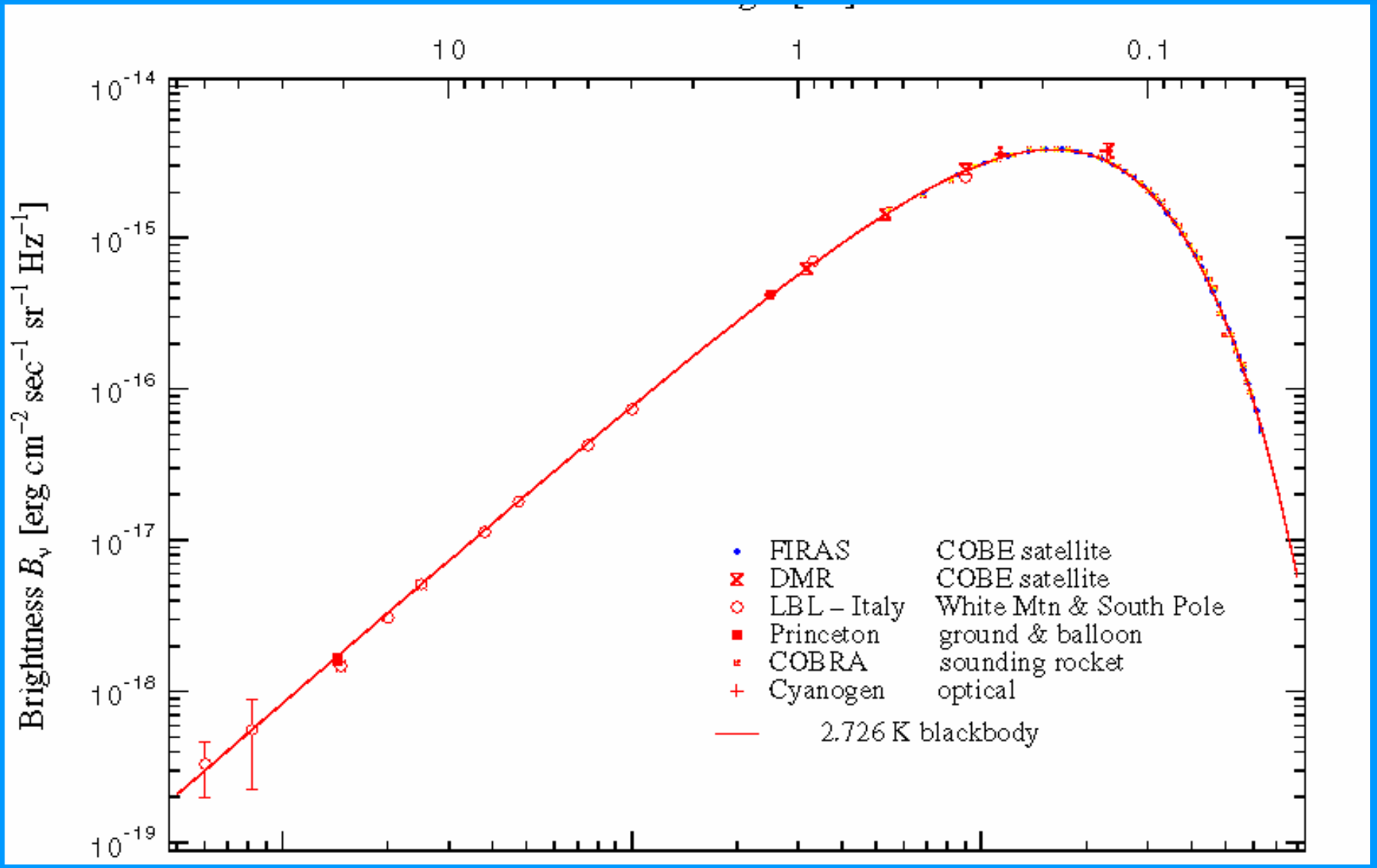
COBE

Spectre de corps noir



Fond cosmologique

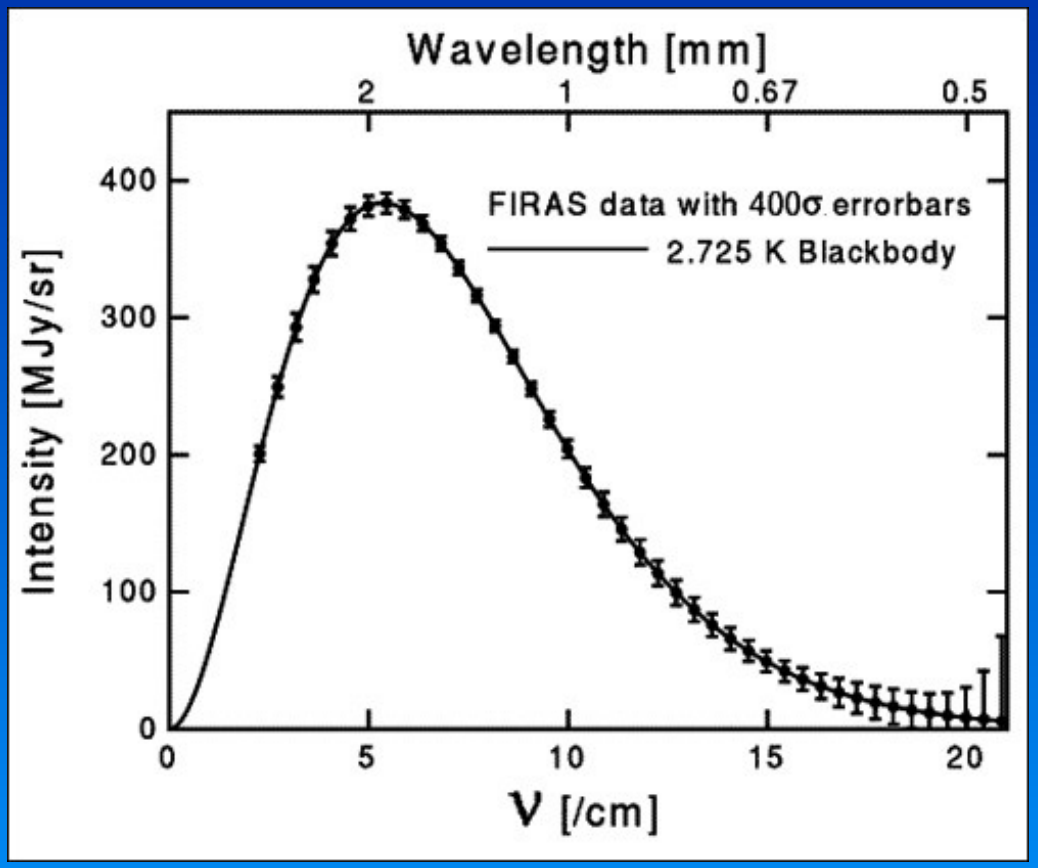
Spectre du fond cosmologique



Fond cosmologique

Spectre du fond cosmologique

Apport de COBE



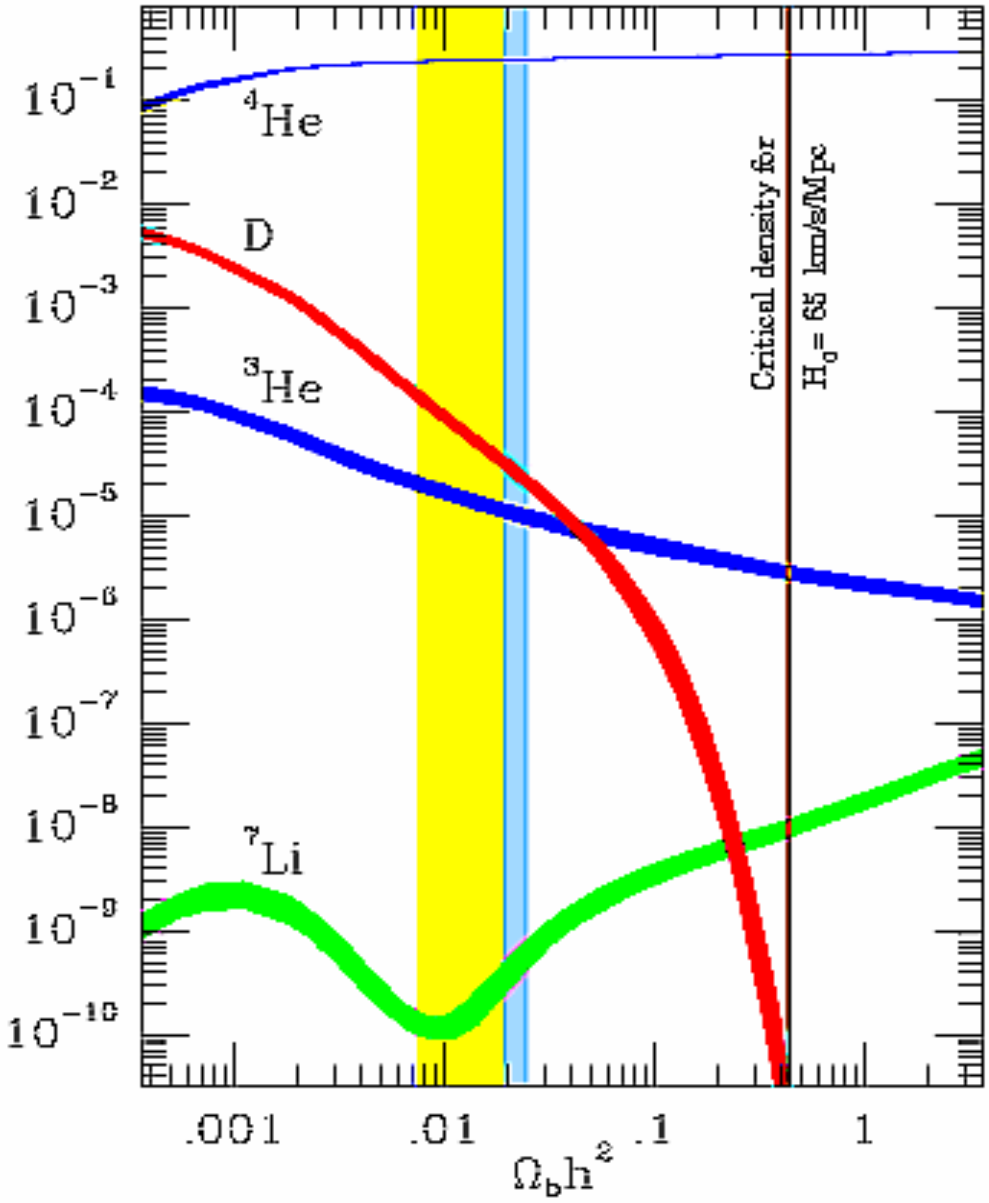
Nucléosynthèse des éléments légers

Composition chimique de l'Univers:

- ~ 75 % d'Hydrogène
- 25 % d'Hélium 4
- < 1 % d'autres éléments

détermine la quantité de matière baryonique:

$\approx 5\% \ \rho_c$

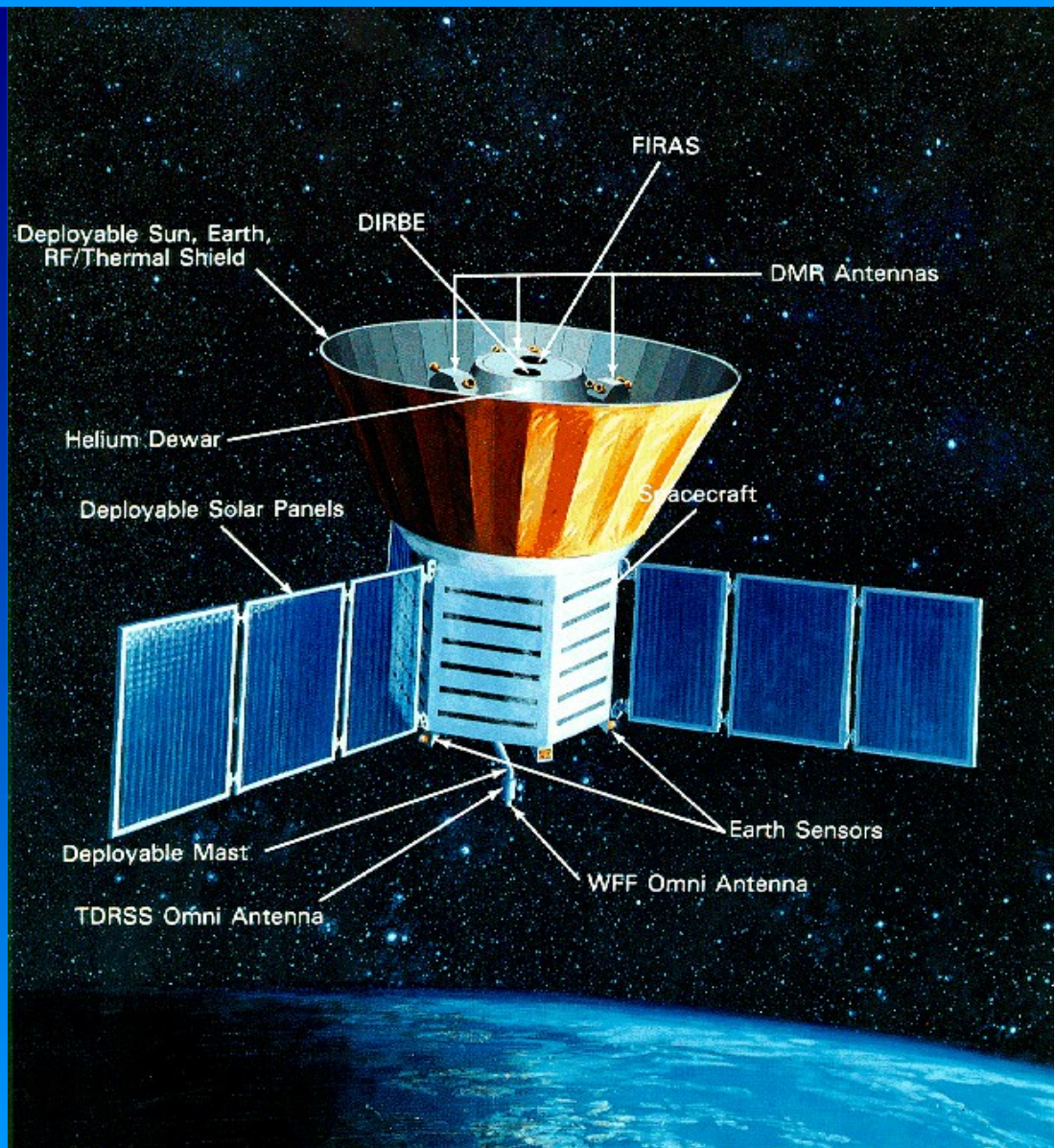


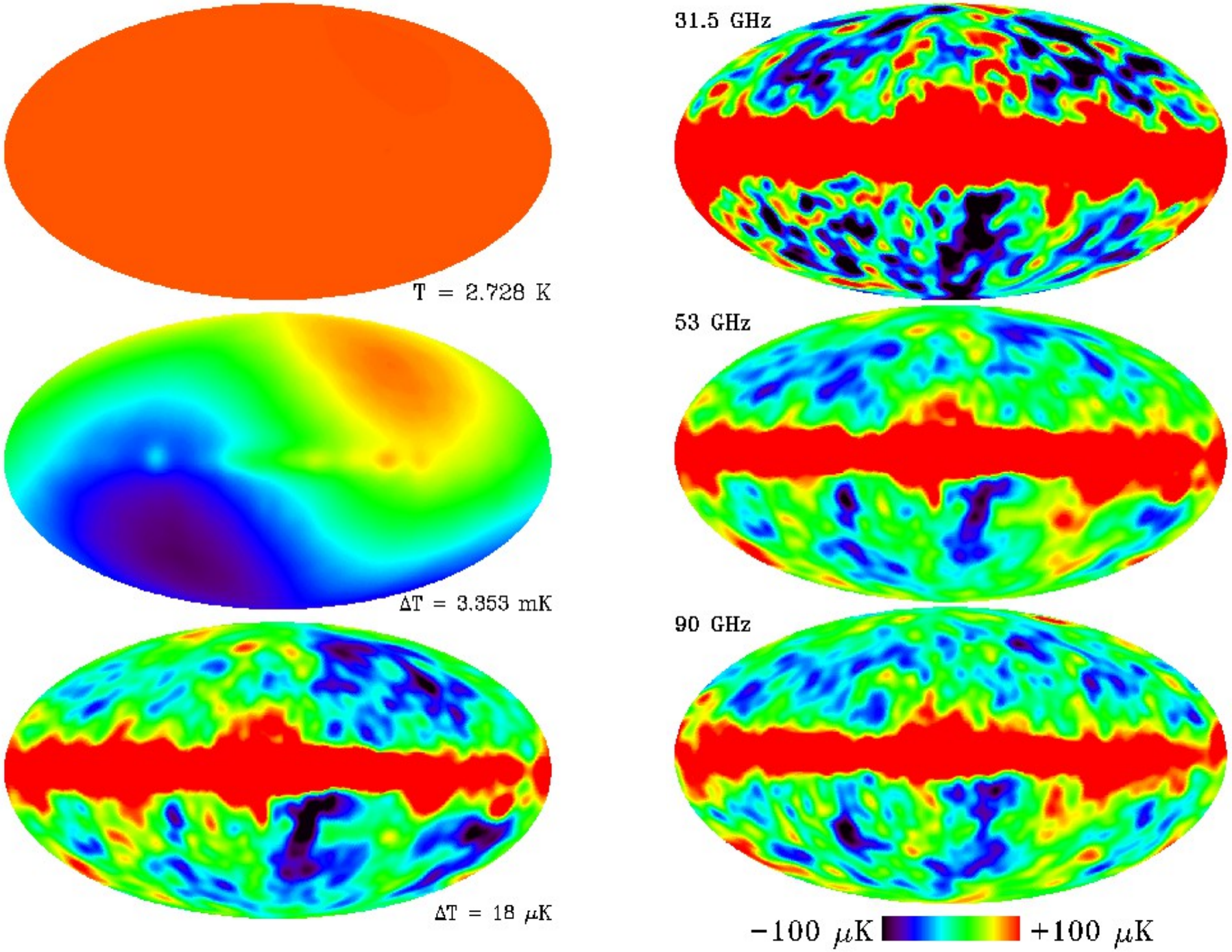
Fond cosmologique

Cartographie du fond cosmologique

(càd le ciel à ~ 1mm)

COBE (1991-1995)




T = 2.728 K
ΔT = 3.353 mK
ΔT = 18 μK
31.5 GHz
53 GHz
90 GHz
−100 μK
+100 μK

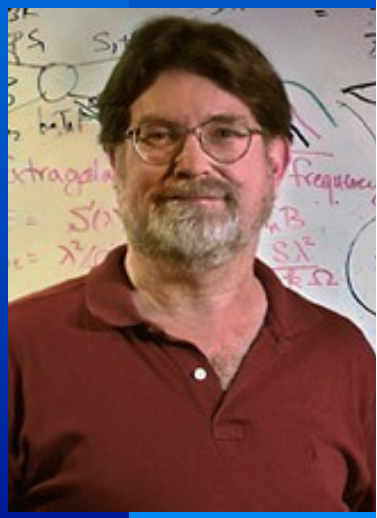
Prix Nobel de physique 2006

FIRAS: Spectre

Big Bang chaud

DMR: Fluctuations primordiales

Image de l'Univers à 350 000 ans

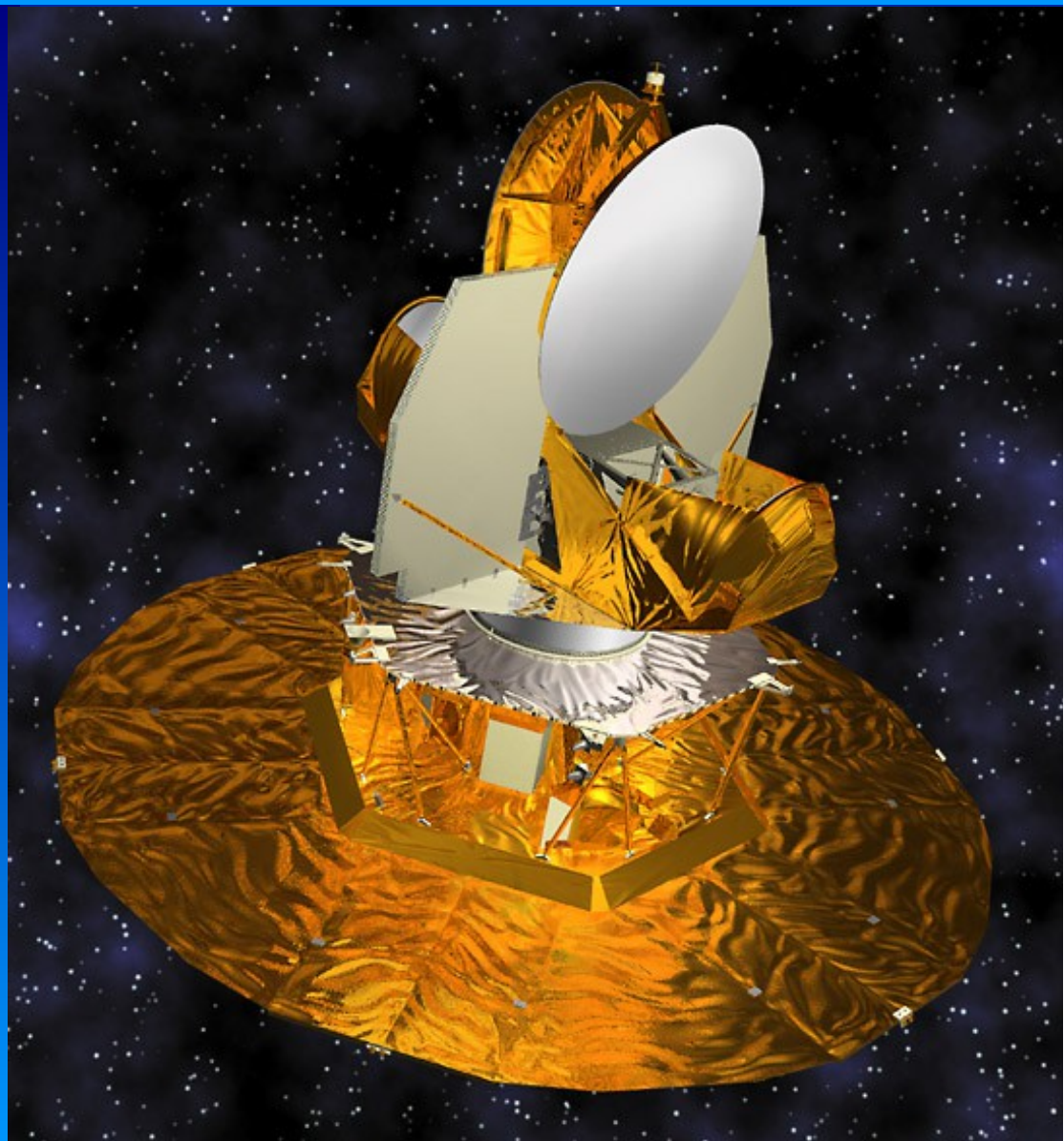


Fond cosmologique

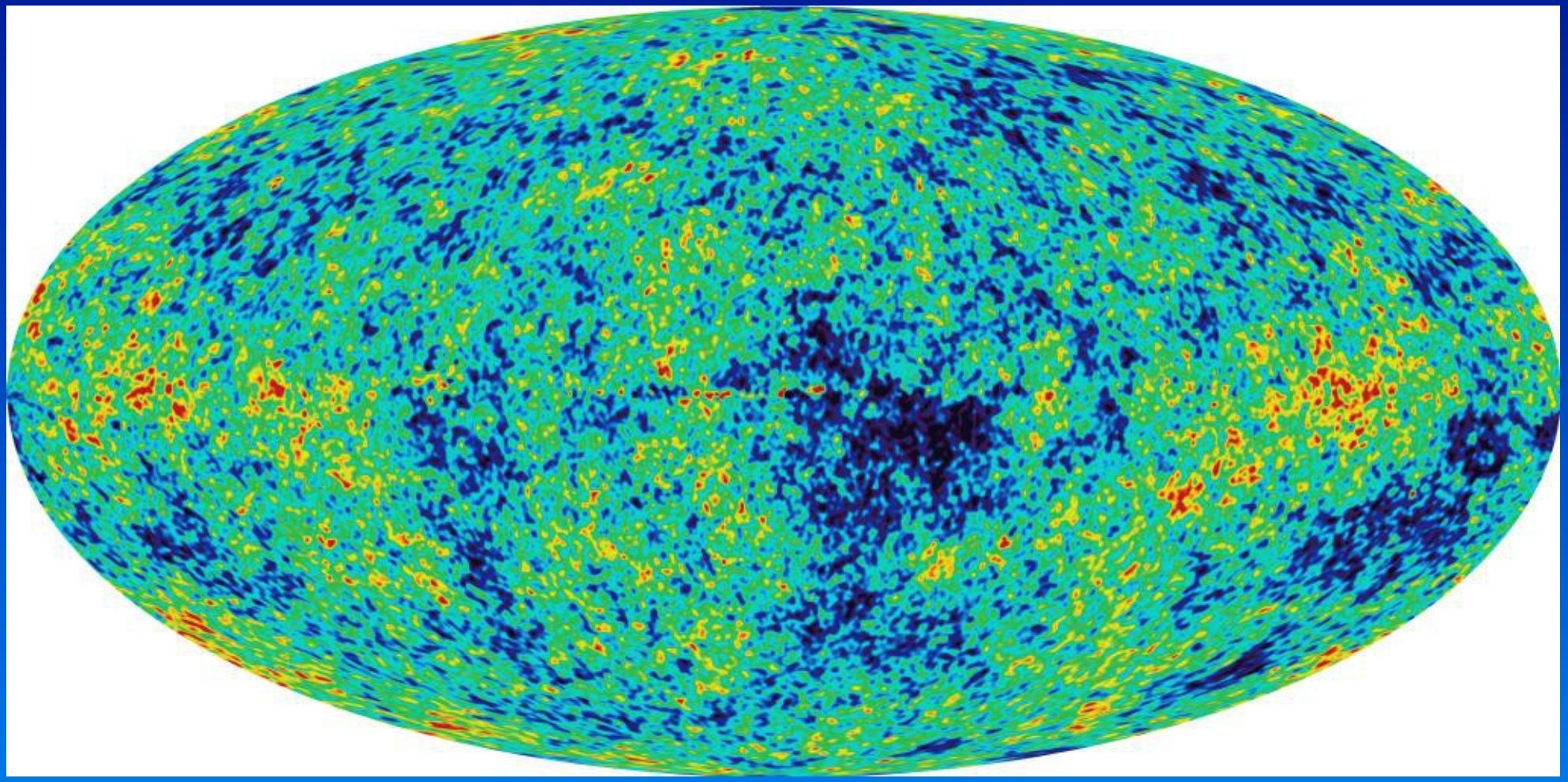
WMAP (NASA)

(2001-2010)

Image de l'univers



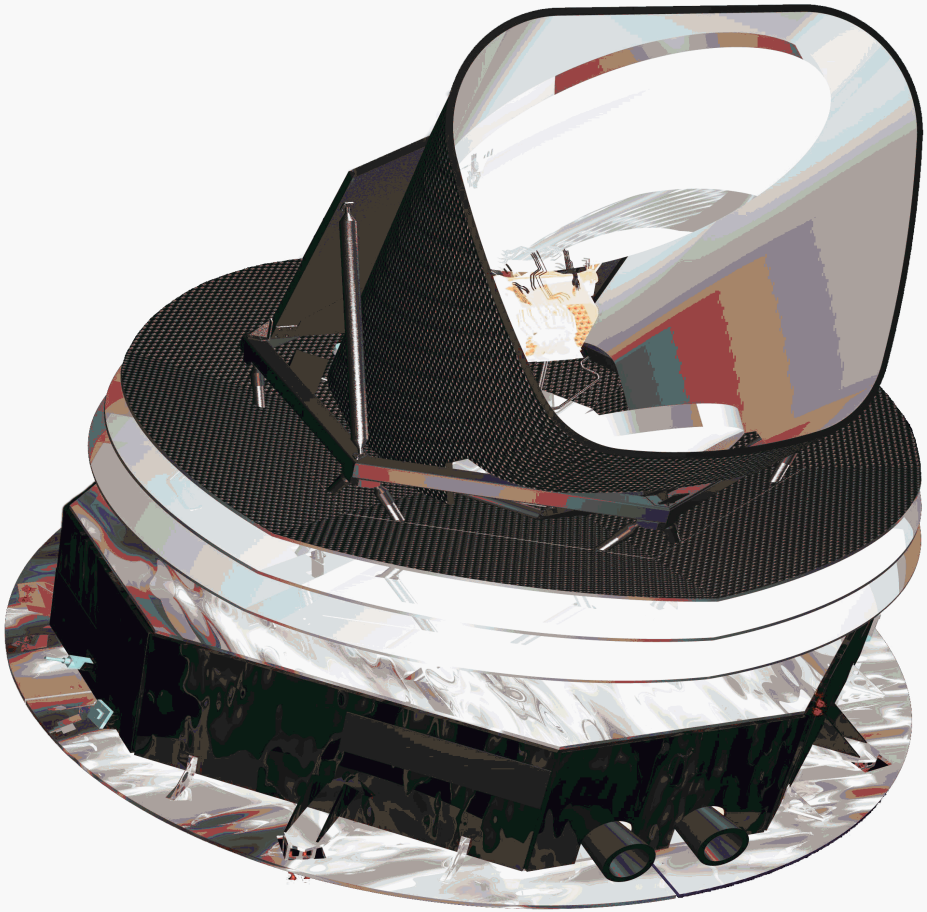
CMB



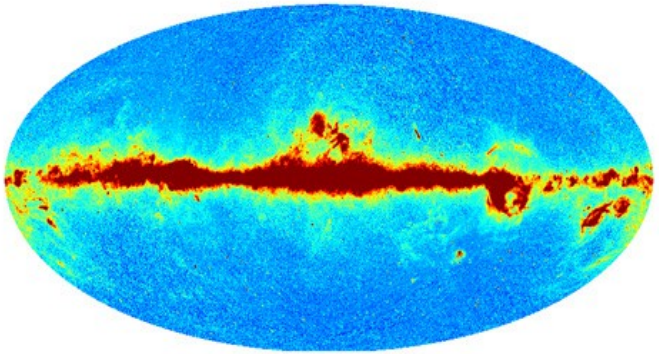
Fond cosmologique

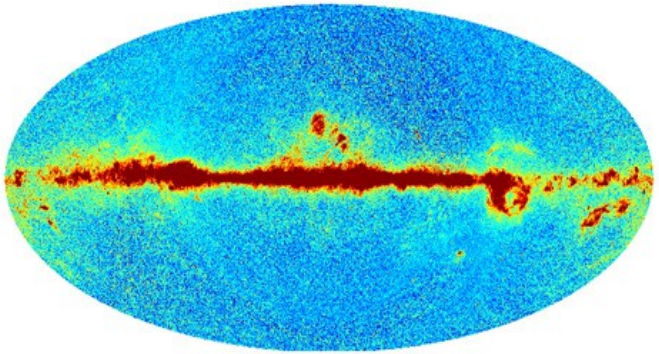
Planck (ESA)

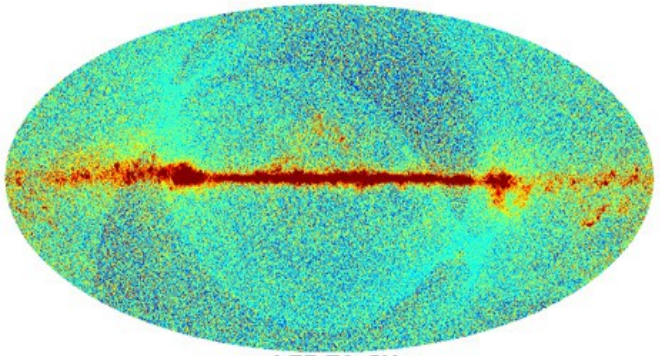
(2009-2013)

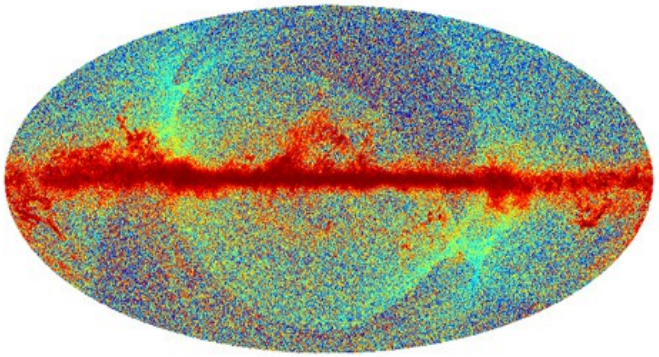


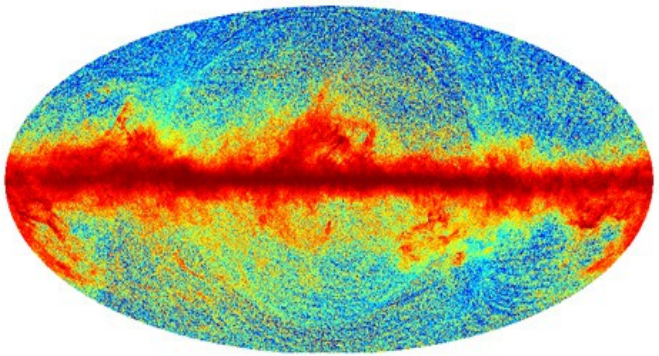
Planck all-sky foreground maps

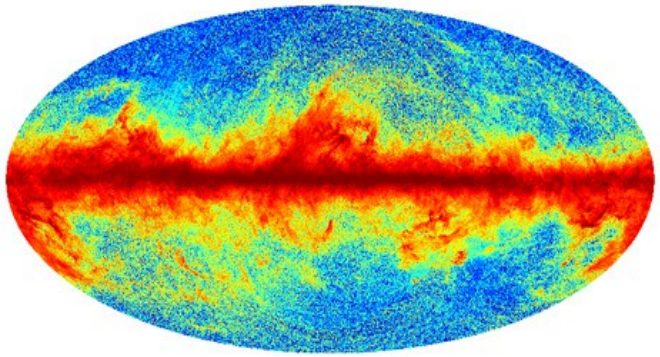

LFI 30 GHz

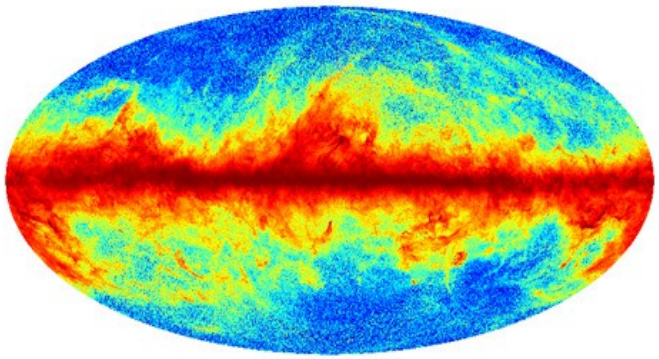

LFI 44 GHz

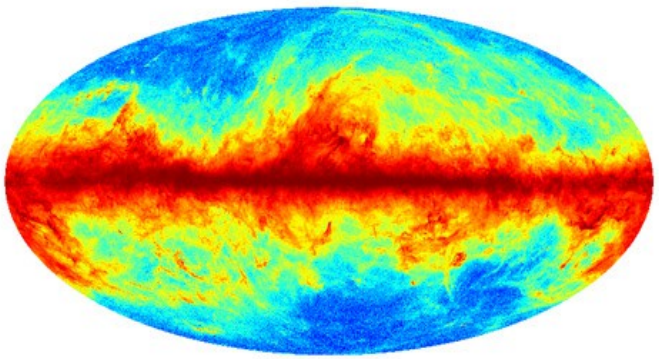

LFI 70 GHz

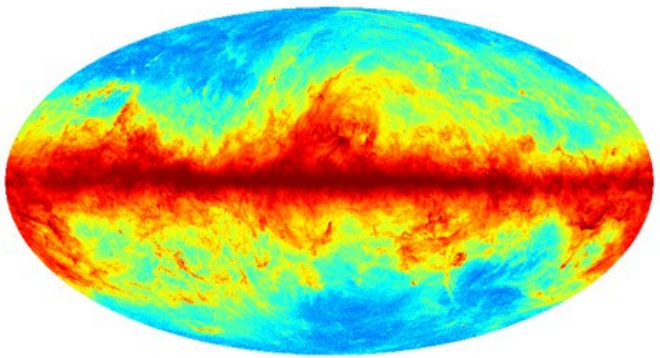

HFI 100 GHz


HFI 143 GHz

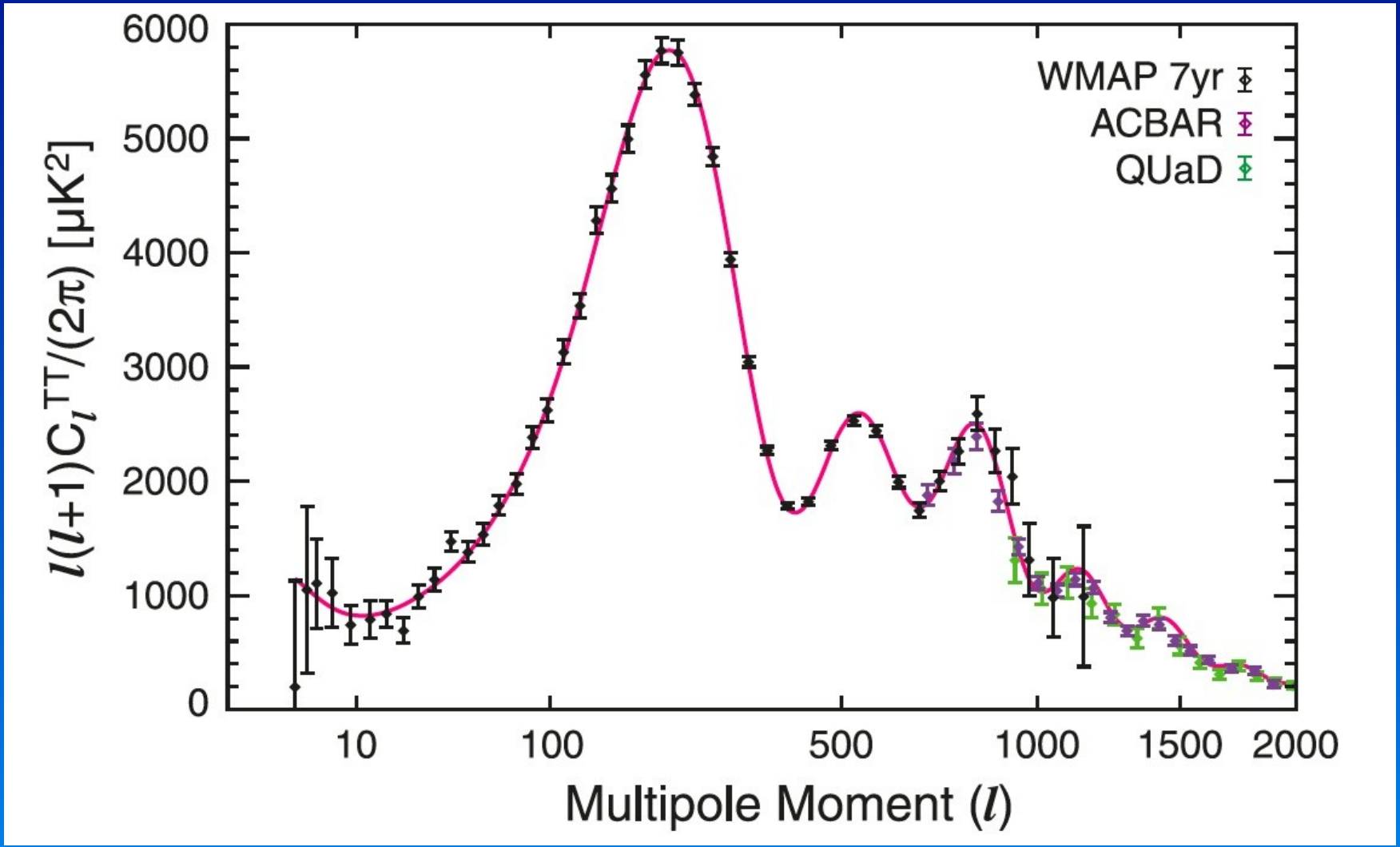

HFI 217 GHz


HFI 353 GHz


HFI 545 GHz


HFI 857 GHz

CMB

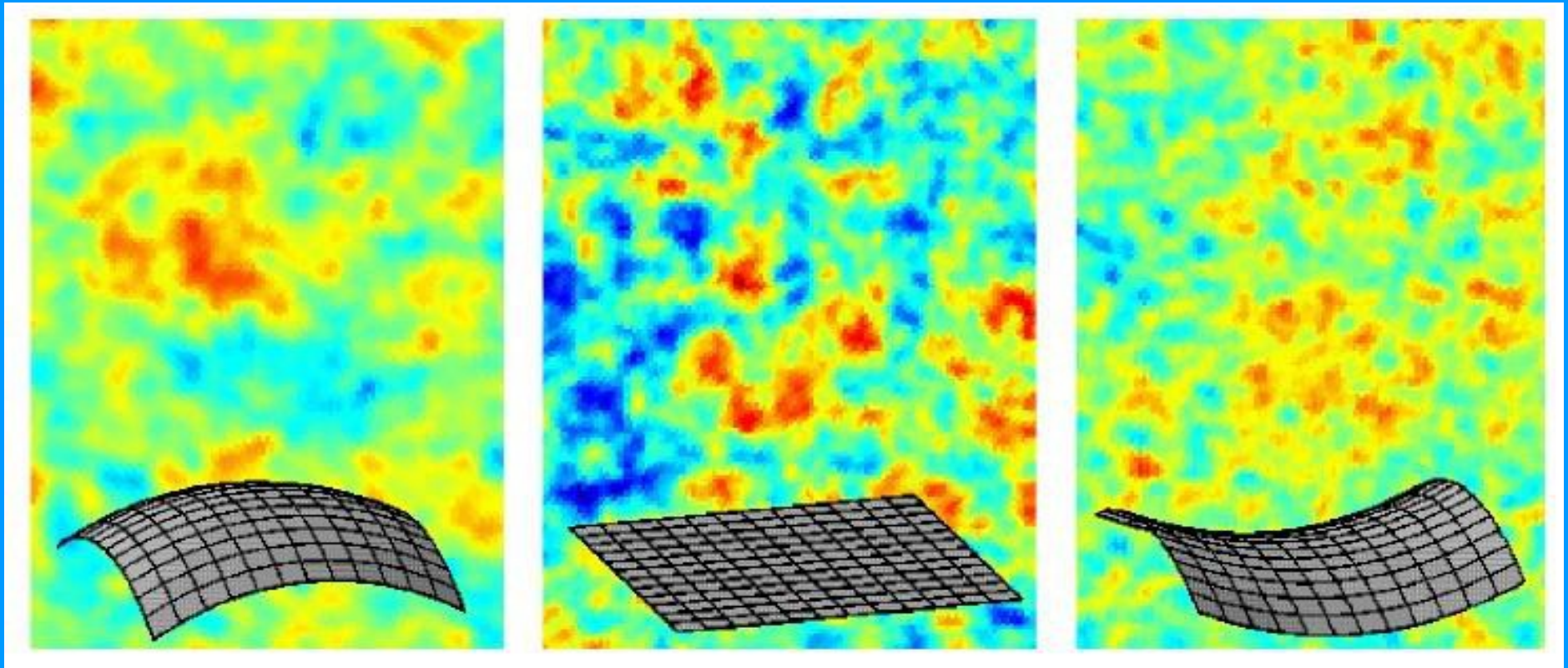


➔ Espace ≈ plat...

Fond Cosmologique

Mesure de la courbure de l'espace:

L'espace est à peu près plat!



Cosmologie
&
Physique fondamentale

Modèle du Big Bang:

- Lois de la physique appliquées à l'univers
- Relativité générale
- Les trois piliers du Big Bang

Lien entre physique des hautes énergies et Cosmologie

Vers la nouvelle physique...

Asymétrie matière-antimatière

- Donnée d'observation: il n'y a pas d'antimatière dans l'univers...
- Pourquoi ?
- Proposition de Andrei Sakharov

Les Trois conditions de Sakharov

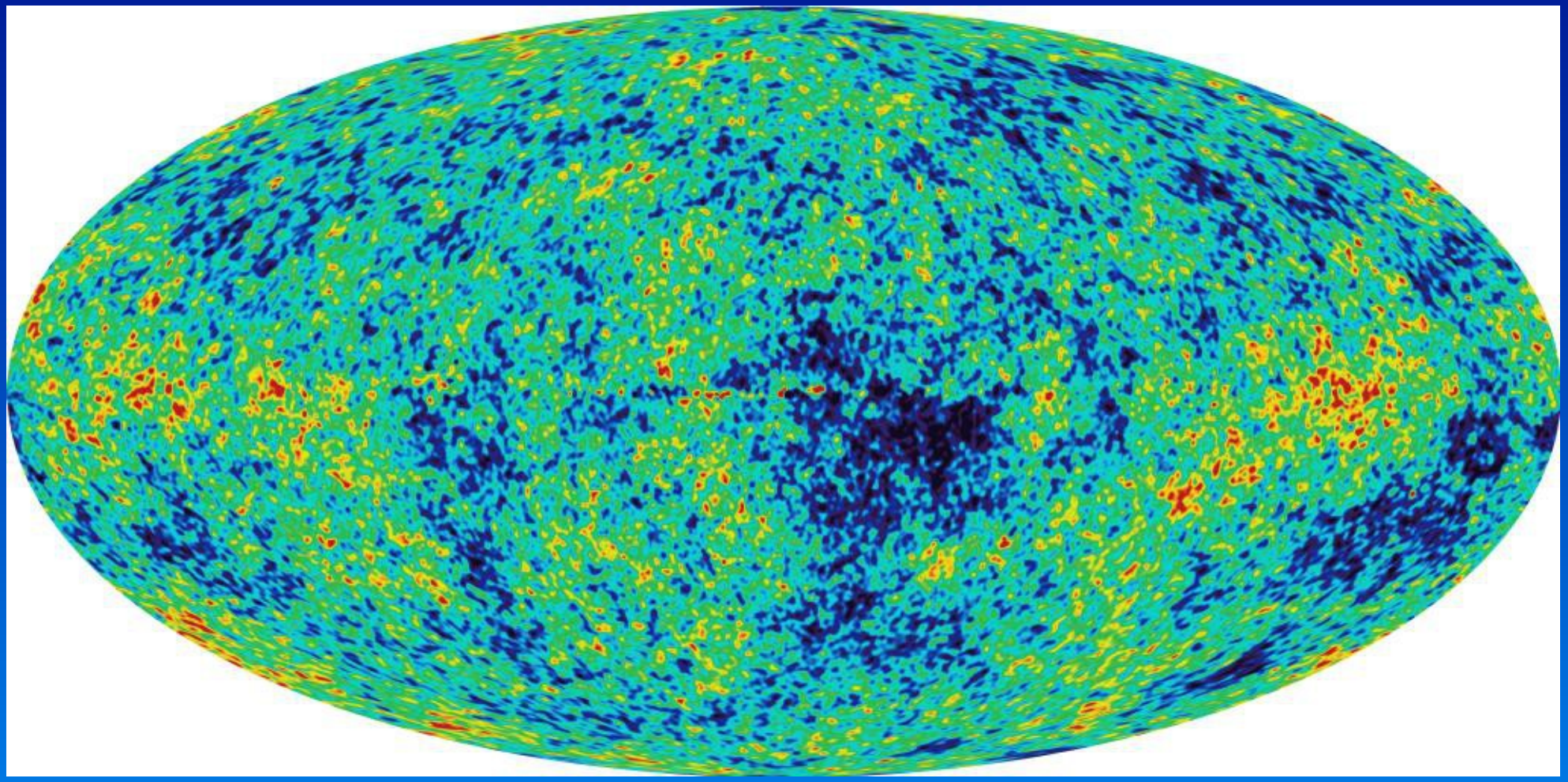
- **Violation de CP...**
- **Violation du nombre baryonique**
- **Situation hors équilibre**

quand l'univers était âgé de 10^{-32} s

Fond cosmologique

Voir l'univers à t = 370 000 ans a.b.b....

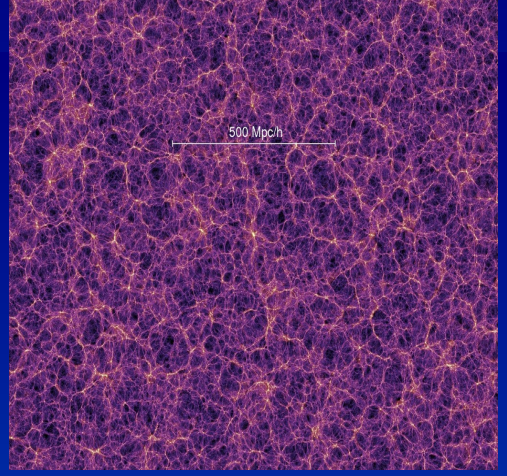
CMB

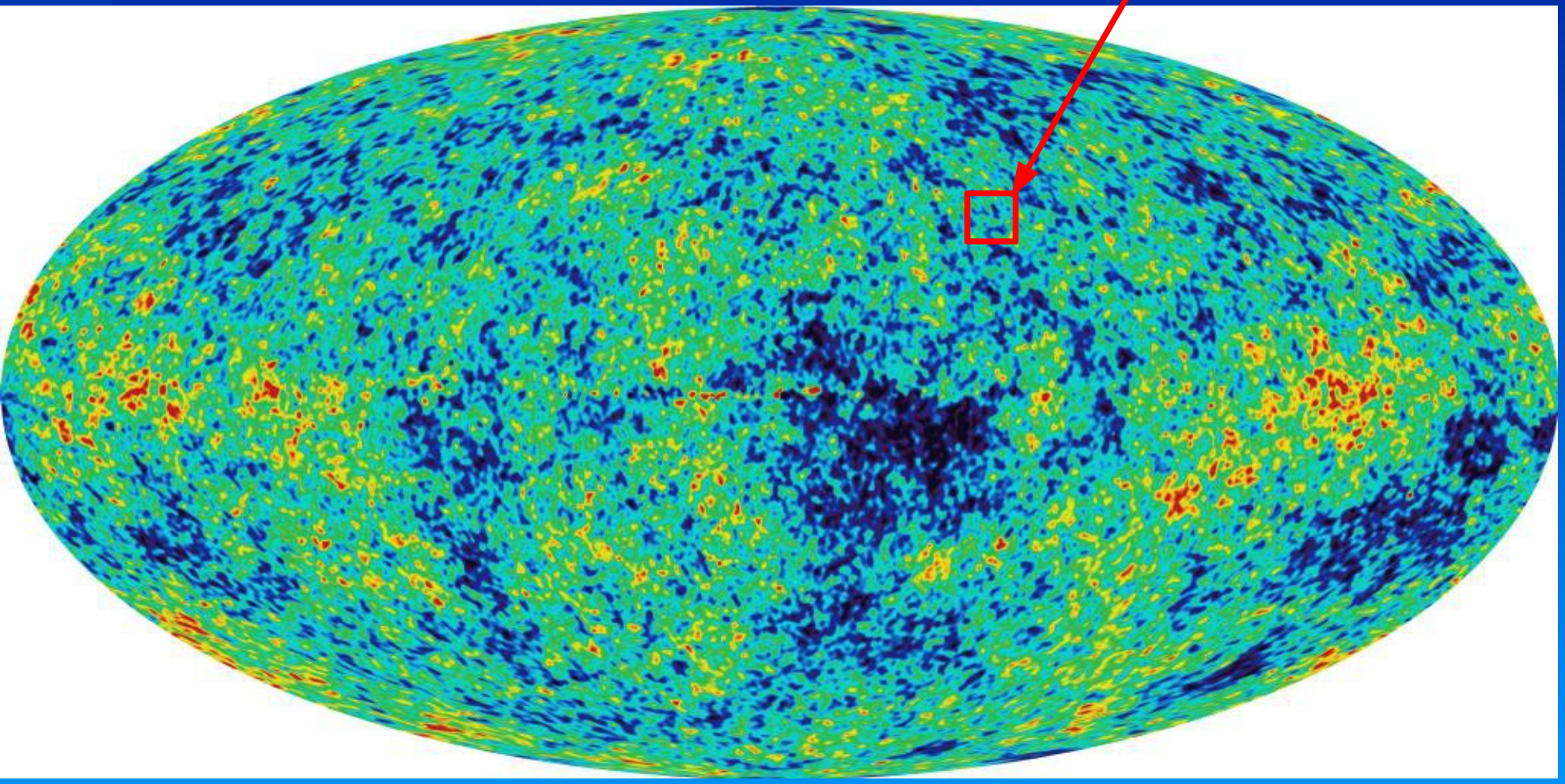


Nouvelle question:

Origine des fluctuations ?

Problème de la taille de l'horizon





Solution:
(~ 1980)

Phase d'inflation quand l'univers est agé de $\sim 10^{-33}$s

Fournit un mécanisme possible d'explication

Inflation.

- $R(t) \propto \exp(Ht)$
- origine => transition de phase où l'énergie du vide domine (provisoirement).

Une des prédictions de l'inflation

univers = plat

donc densité critique.

Matière noire, Bilan:

30% de la densité critique

Mesure de la courbure de l'espace:

L'espace est à peu près plat...

donc:

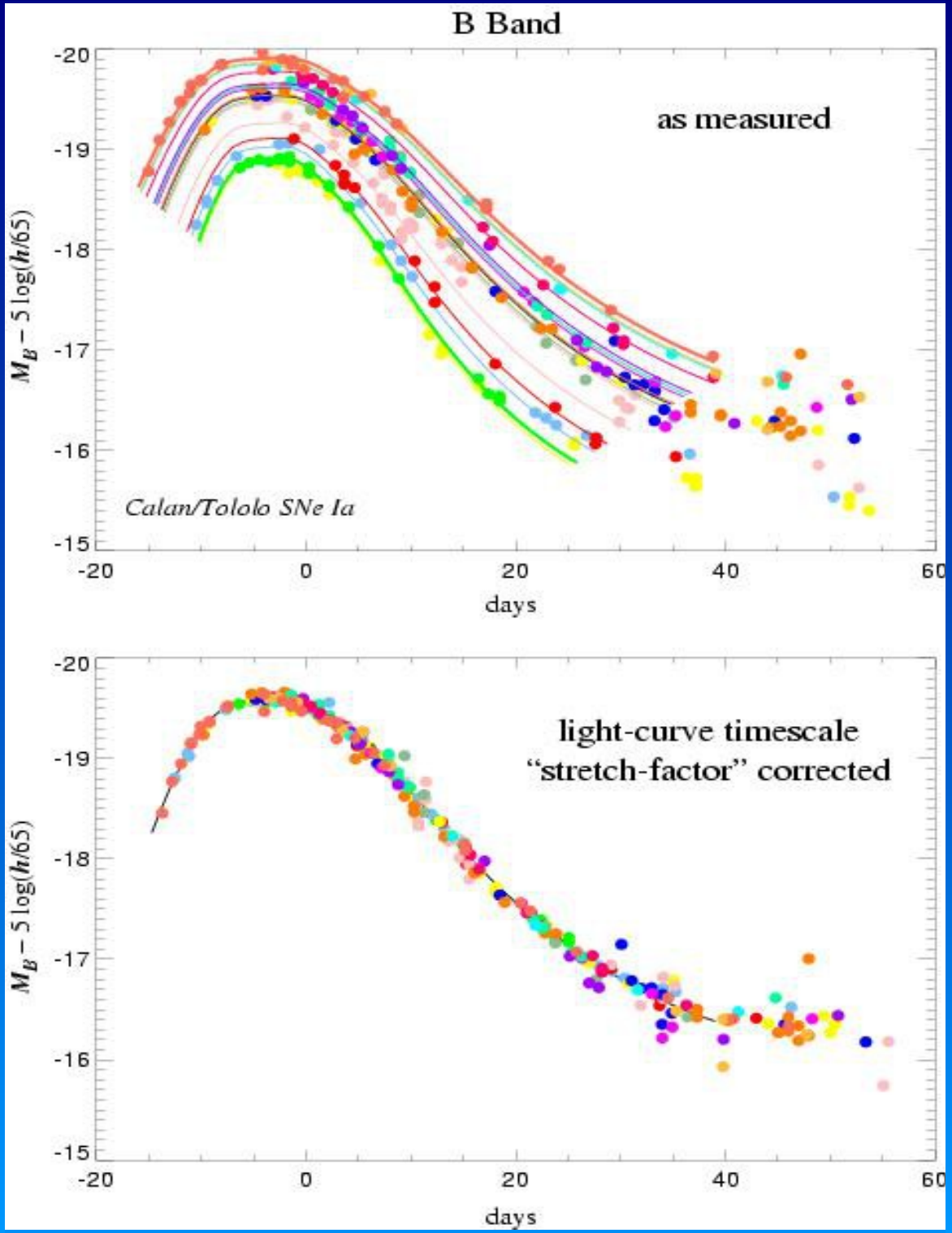
$\rho \approx \rho_c$

Mais matière noire $\approx 1/3\rho_c$

???

Supernovae

proches



Chandelles

Standards

Supernovae lointaines:
Détection

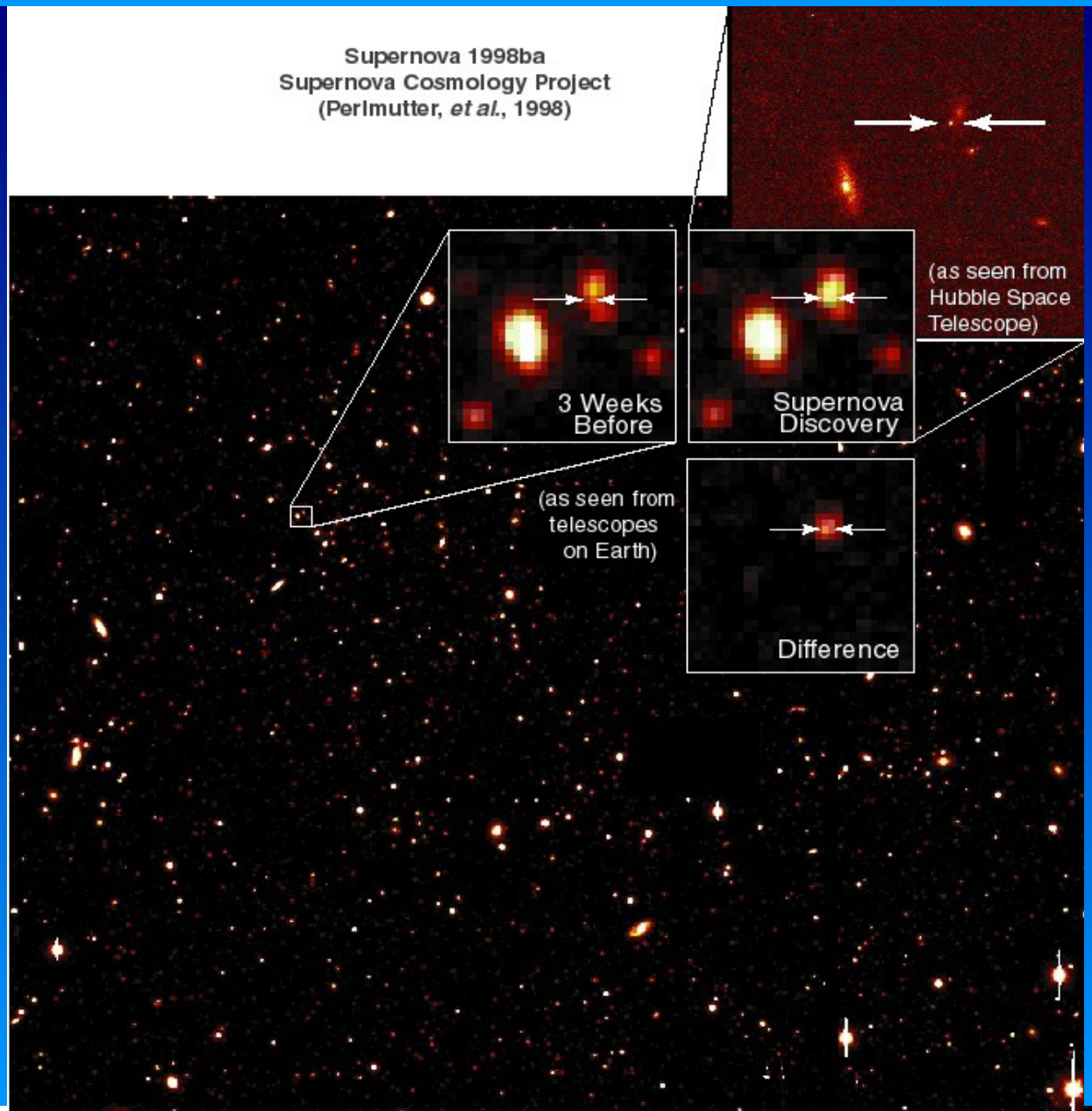
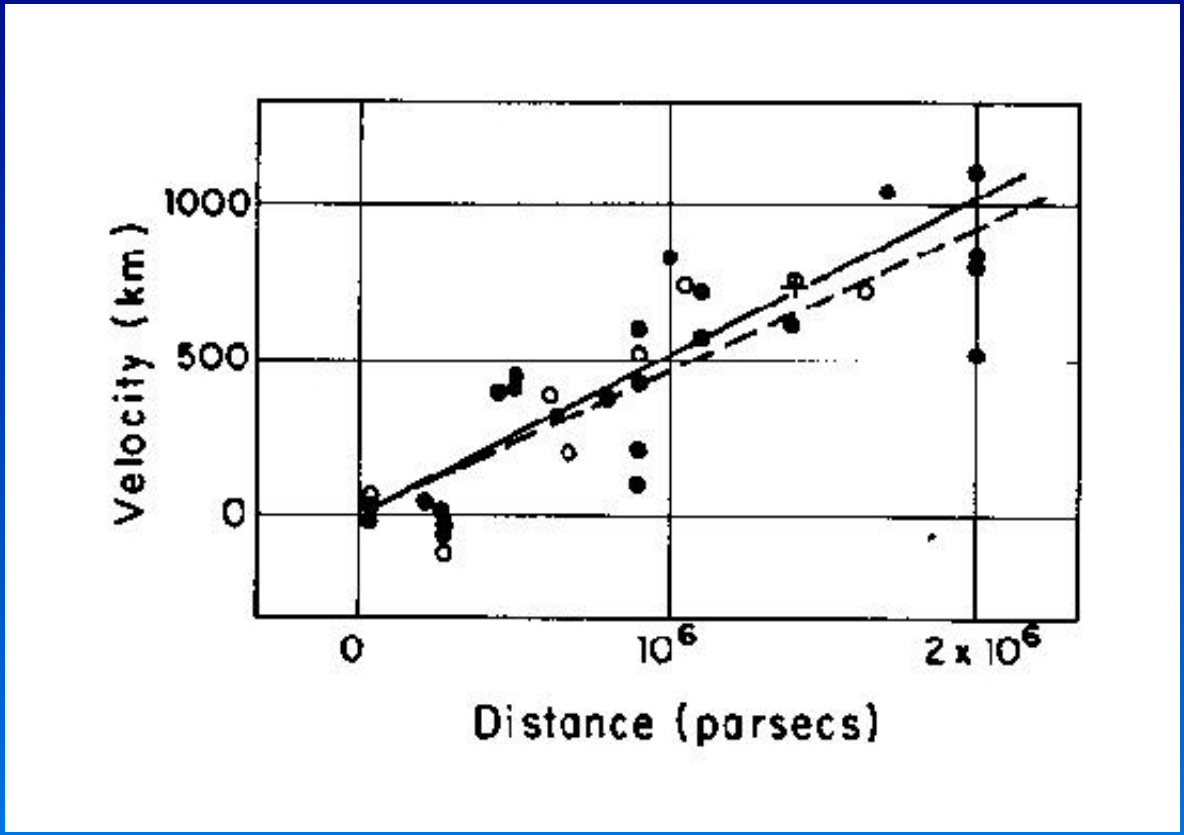
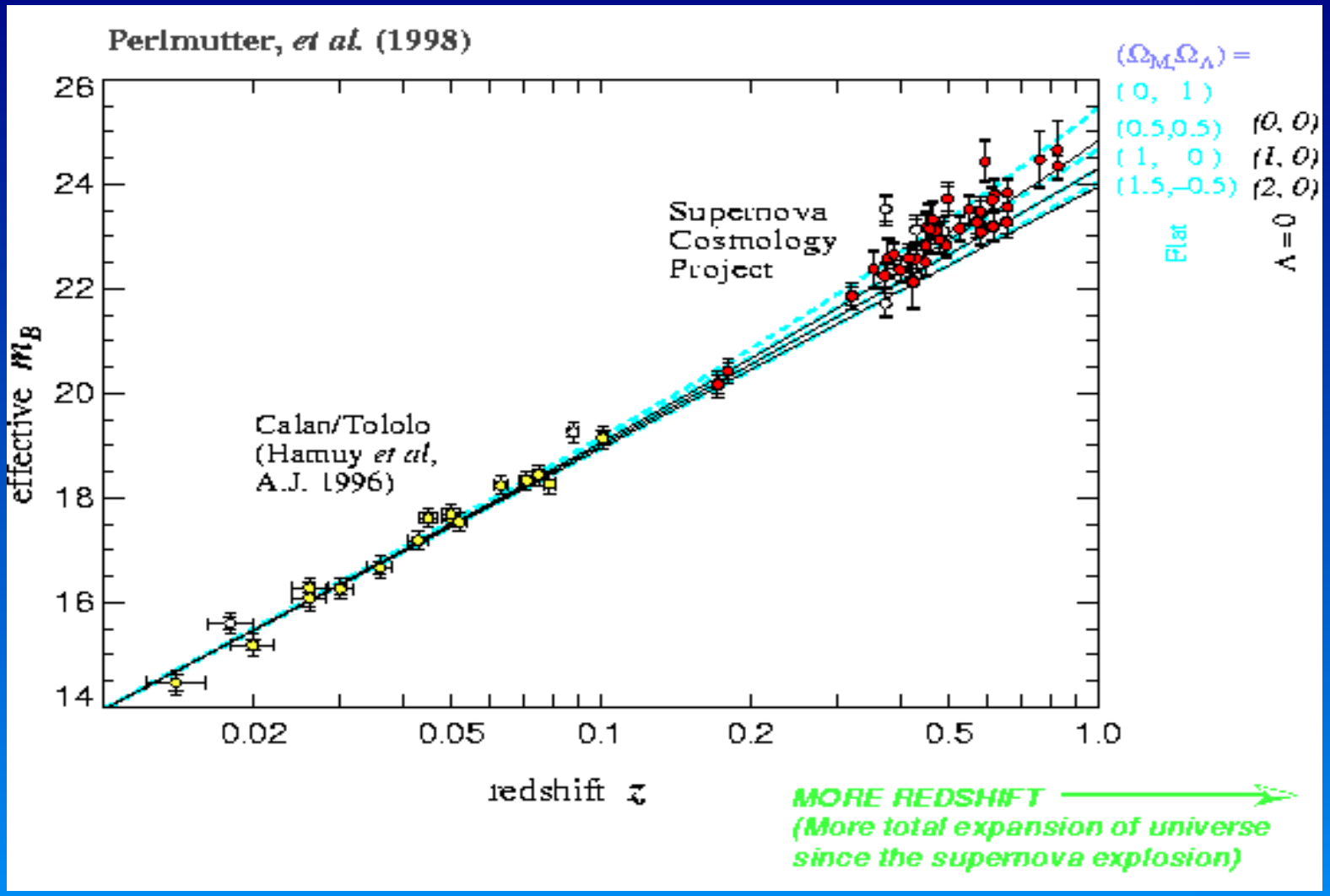


Diagramme de Hubble:
(1929)



Supernovae lointaines:
Diagramme de Hubble



Evolution de l'Univers

Expansion: élan initial

Gravitation:

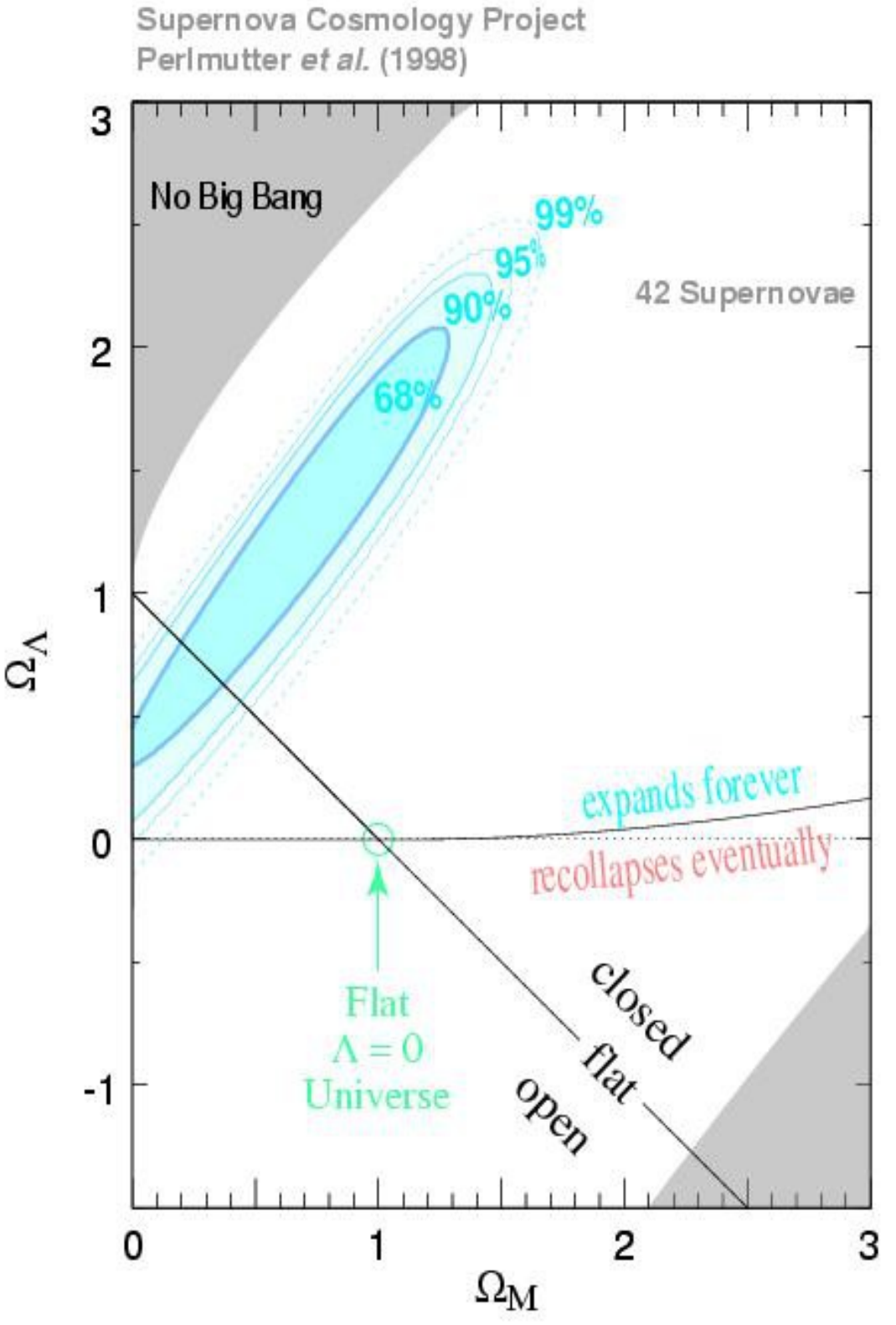
- **La densité de l'univers contrôle son évolution**
- **Contenu (densité) = géométrie !**
- **Le vide peut contribuer à cette densité!**
  (c'est aussi la constante cosmologique).

Supernovae distantes:

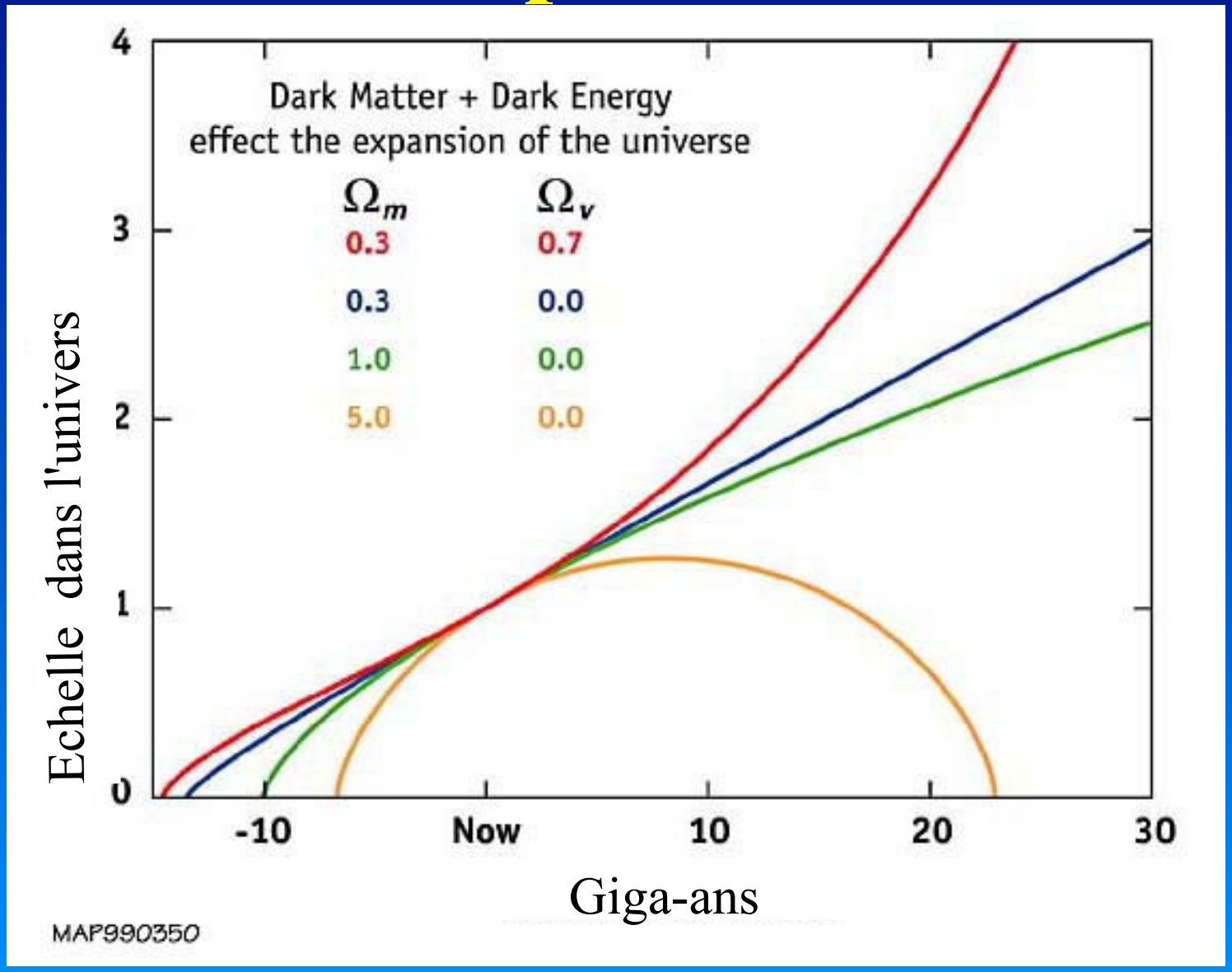
Conclusion

L'univers est accéléré...

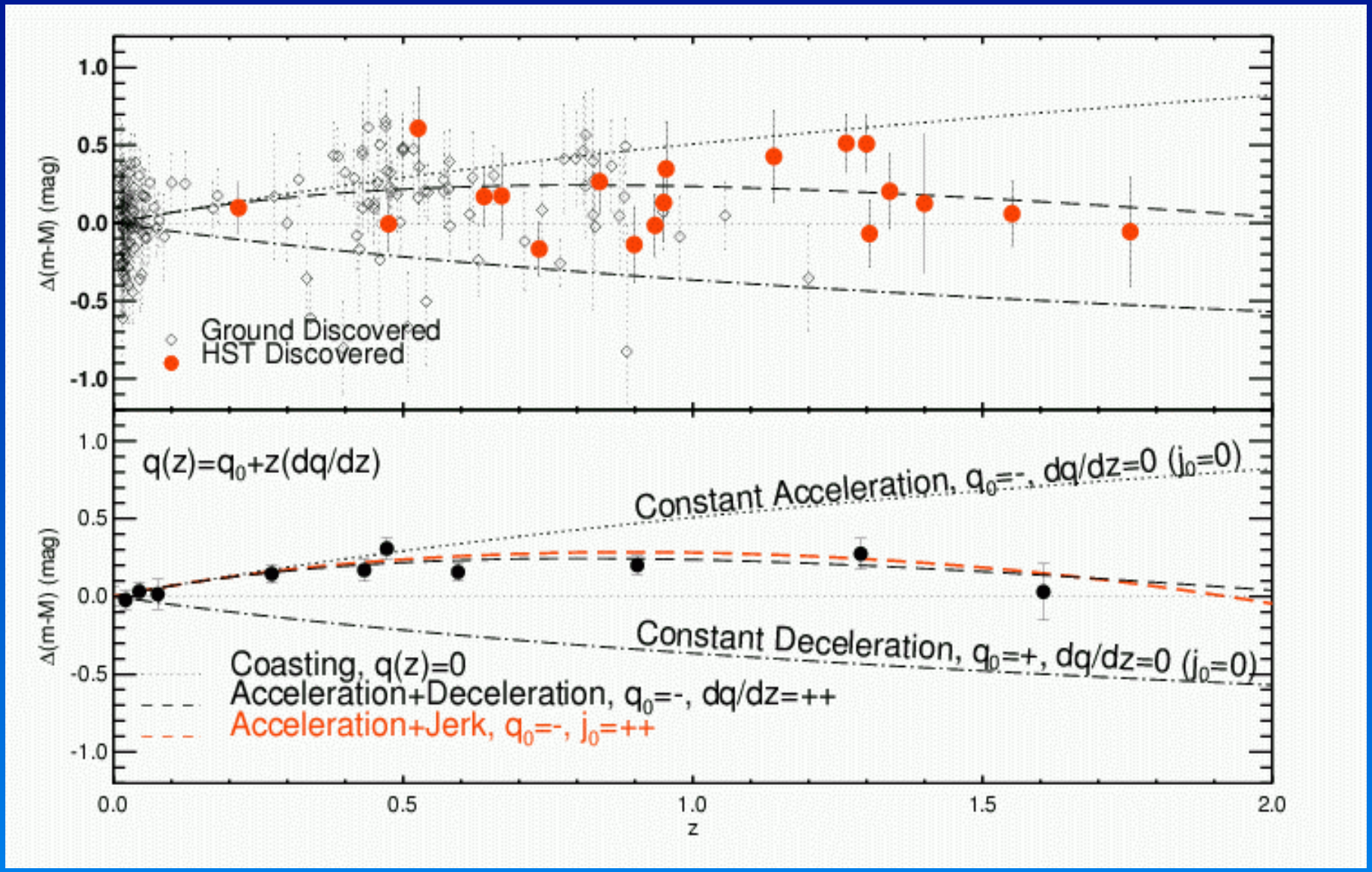
La
gravitation à l'échelle de
l'univers est répulsive!



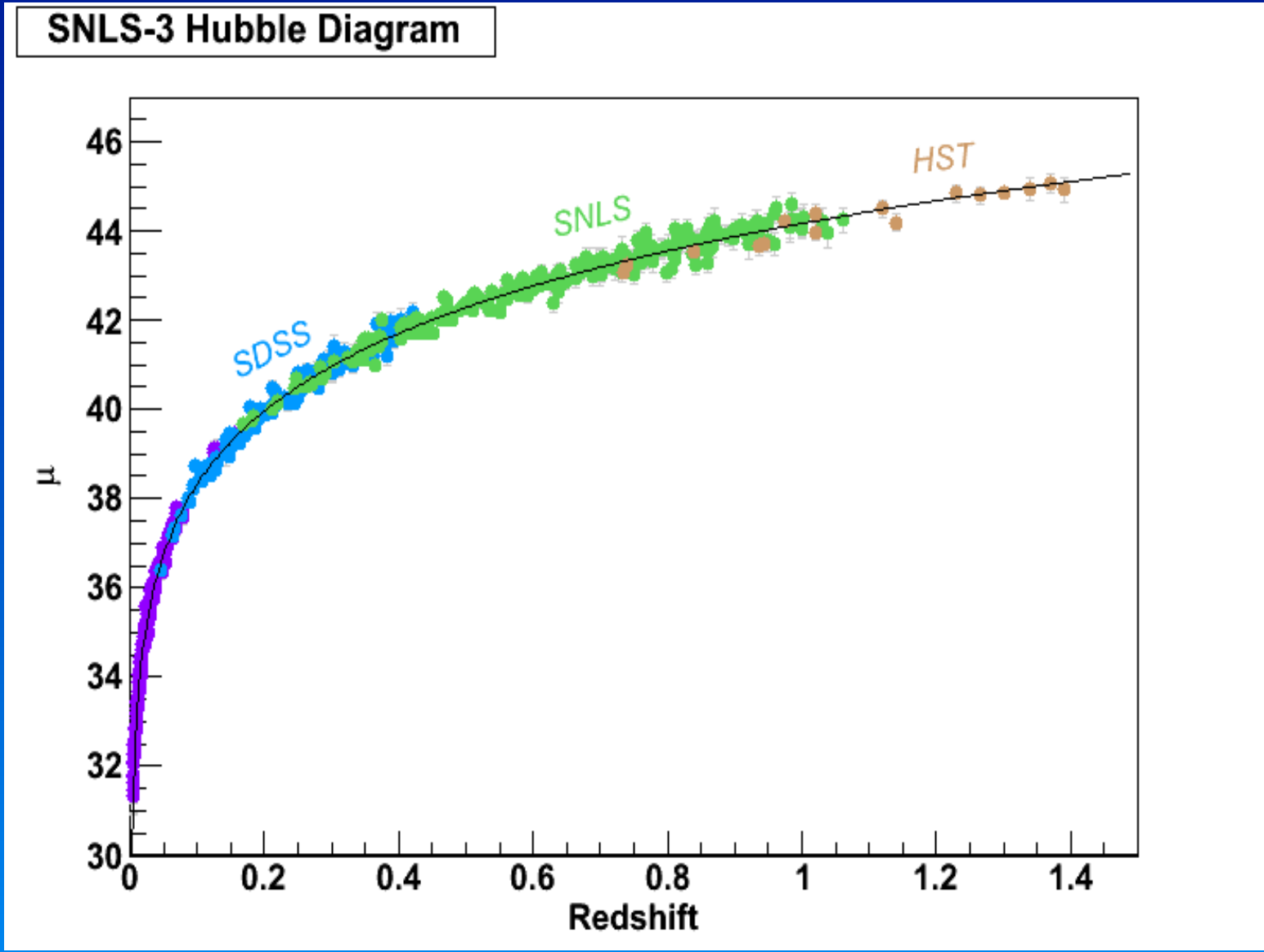
L'expansion


Dark Matter + Dark Energy
effect the expansion of the universe
Ω_m
Ω_v
0.3
0.7
0.3
0.0
1.0
0.0
5.0
0.0
4
3
2
1
0
-10
Now
10
20
30
Echelle dans l'univers
Giga-ans
MAP990350

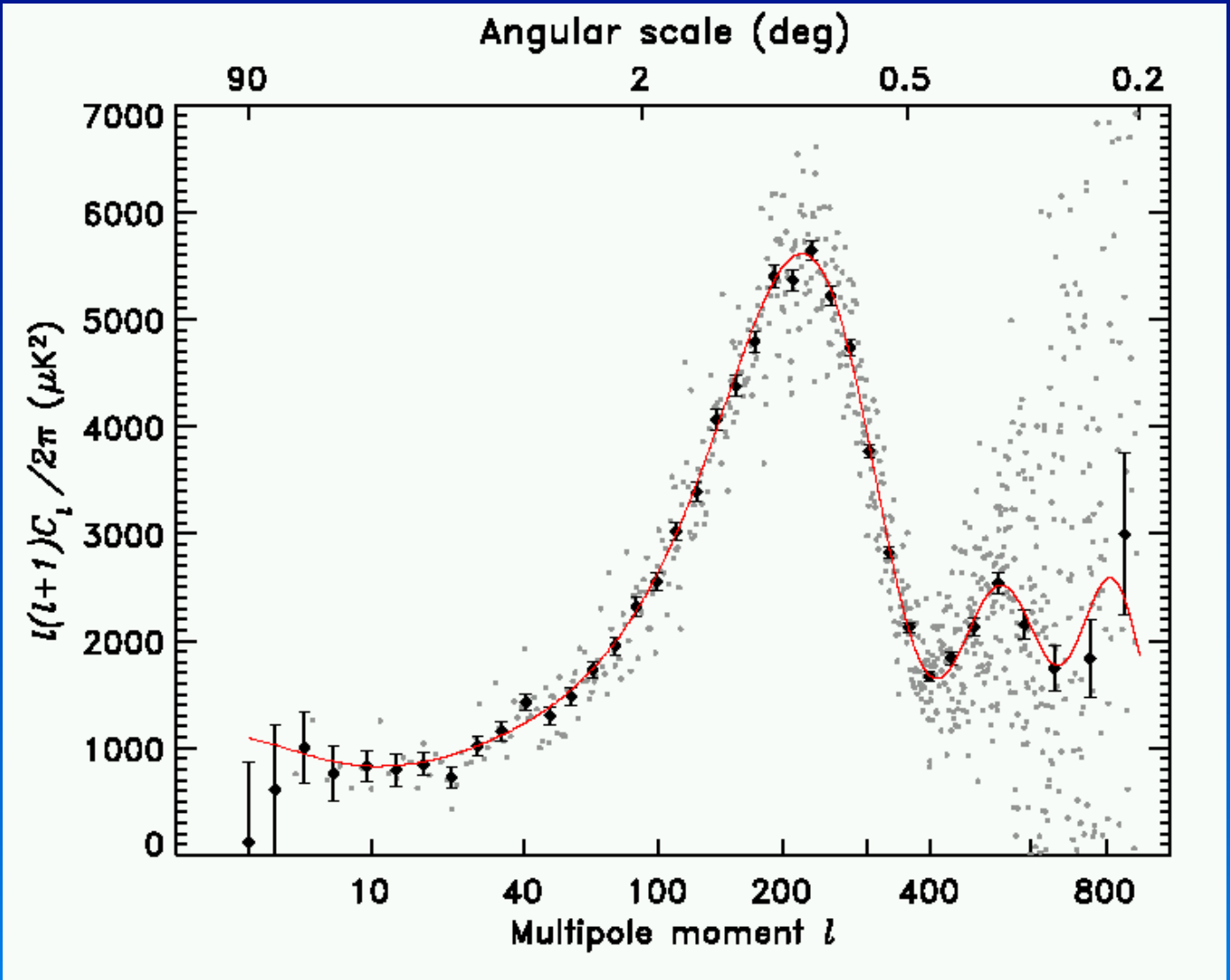
Toujours plus loin ...



Toujours plus ...

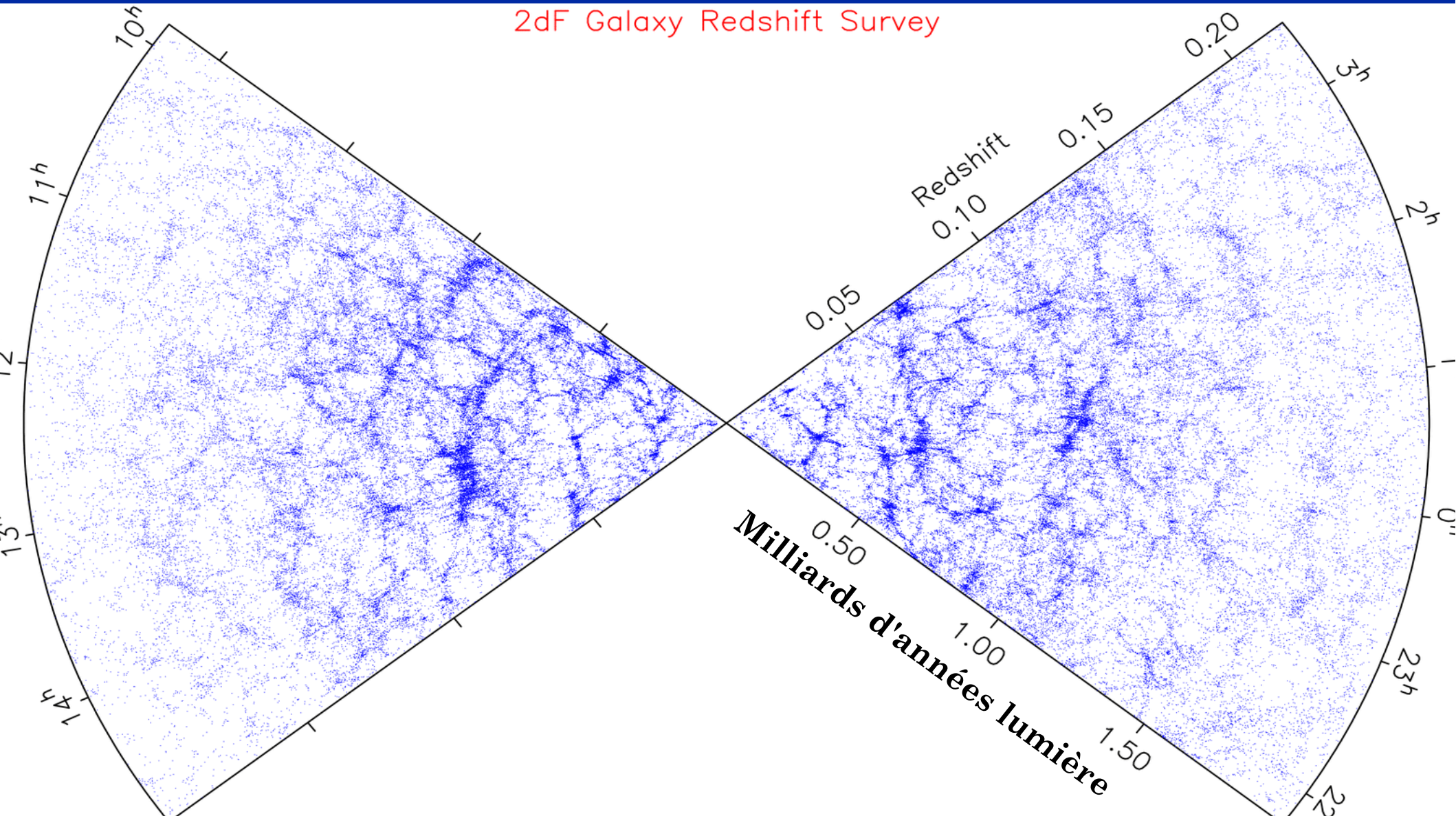


CMB



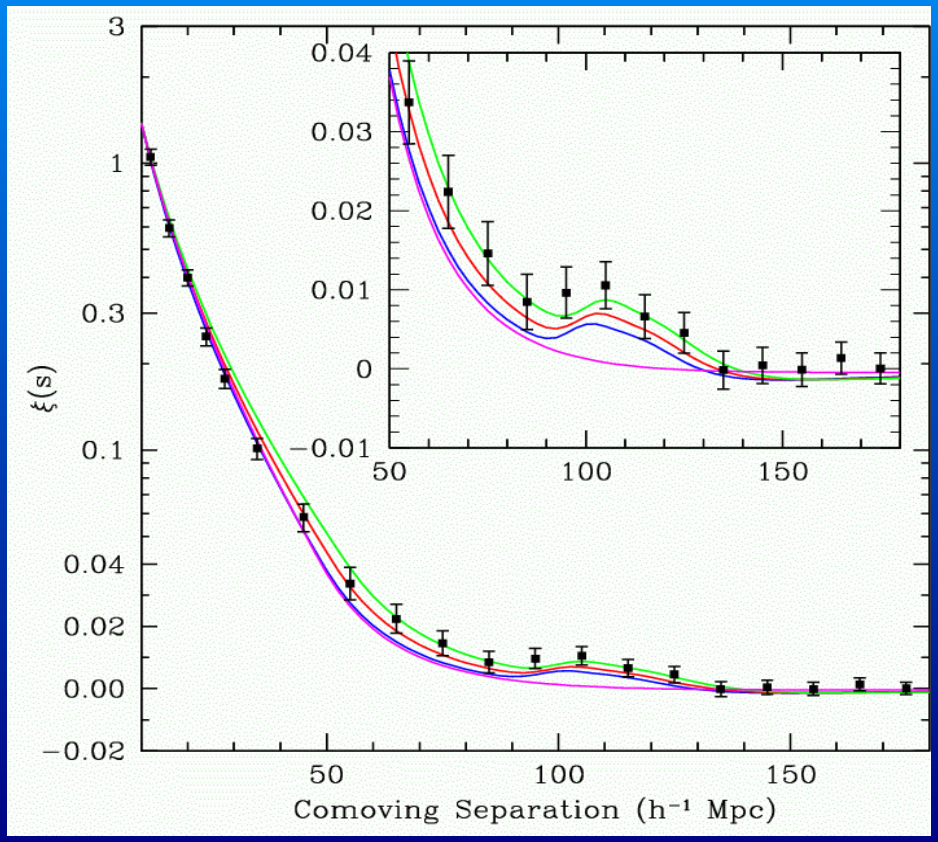
➔ univers avec Énergie noire...

Structure de l'univers à grande échelle



Fonction de corrélation à grande échelle

SDSS (2005)



Prix Nobel de physique 2011

Mise en évidence de l'accélération de l'expansion

Interprétation?

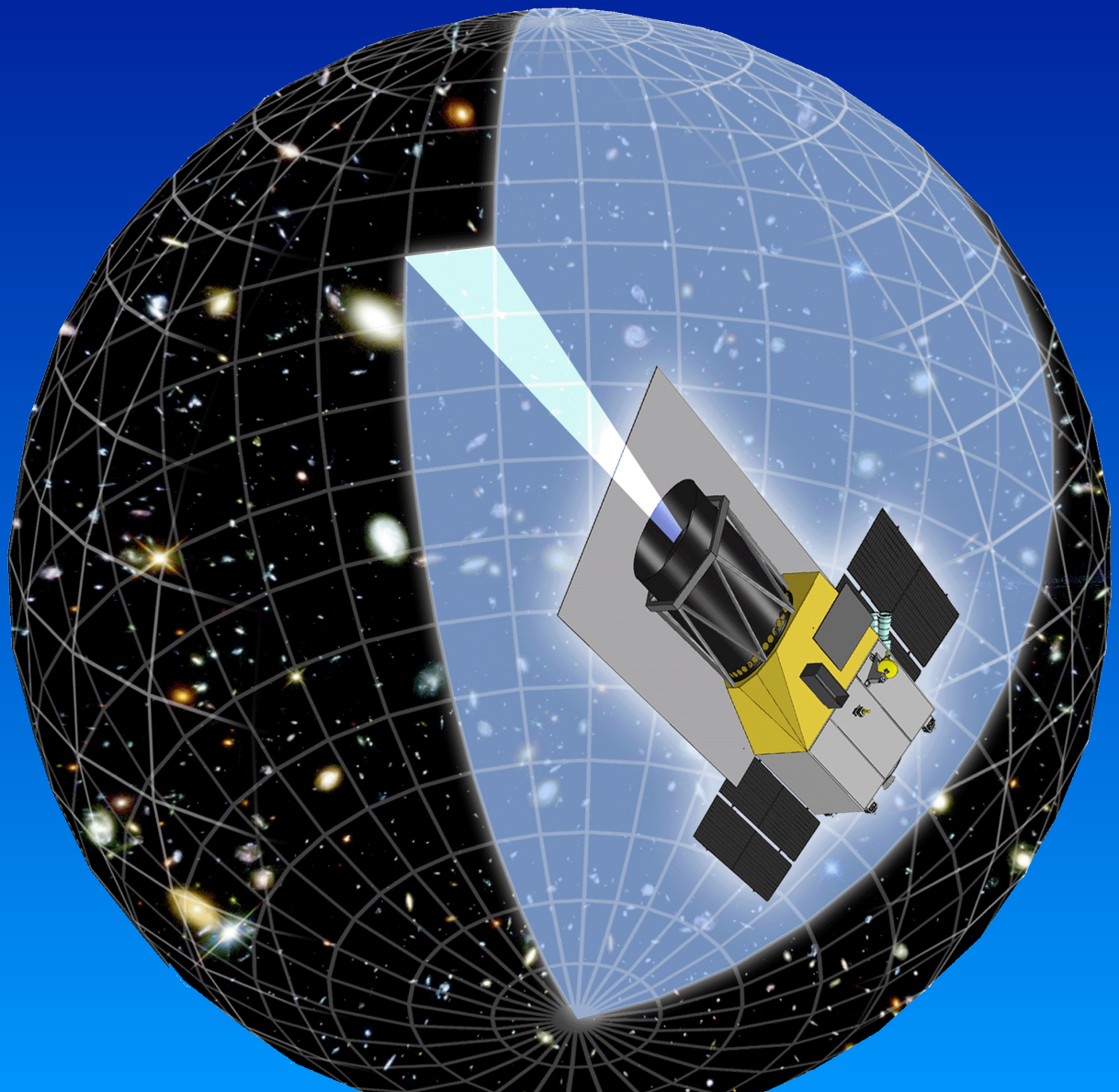
Constante cosmologique d'Einstein...
= densité du vide

Backreaction :
effet NL des inhomogénéités

Nouveau champ scalaire
(Quintessence, Chameleon, ...)

Révision de la RG ?
Nouveau Lagrangien
Dimensions supplémentaires...

Sélection du projet de satellite EUCLID



http://www.euclid-ec.org/

Conclusion

Nouvelles certitudes:

- Nouveaux éléments en physique:

-nouvelle physique à haute énergie

-matière noire non-baryonique

- géométrie ~ plane de l'univers ↔ Inflation

Conclusion

Nouvelles questions:

- Nature de la matière noire

- «énergie noire»

nouveau mystère de la physique moderne