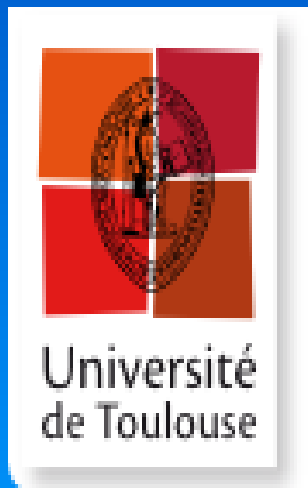
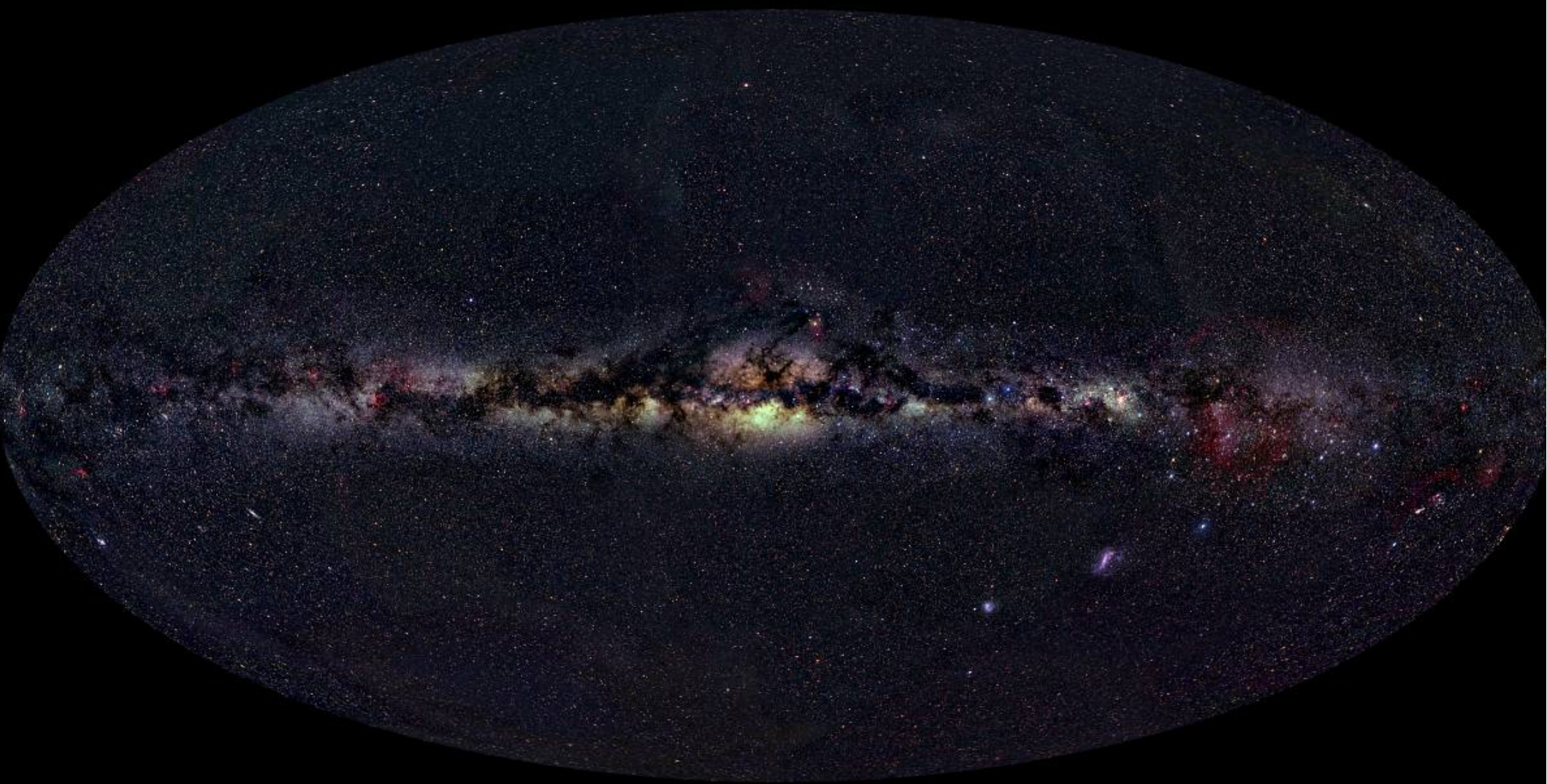


Matière noire et Énergie noire après Planck.



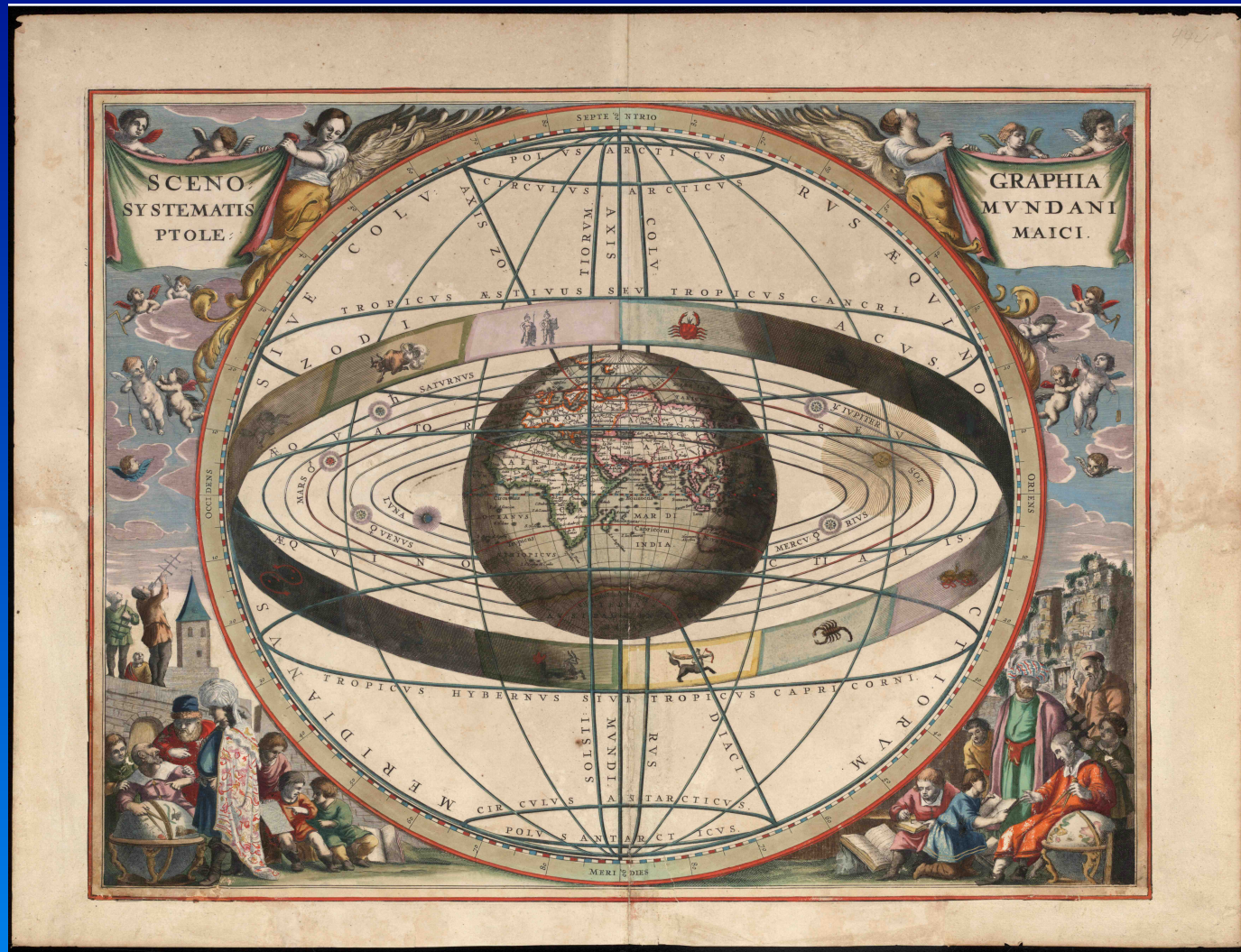
The Deep Sky



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

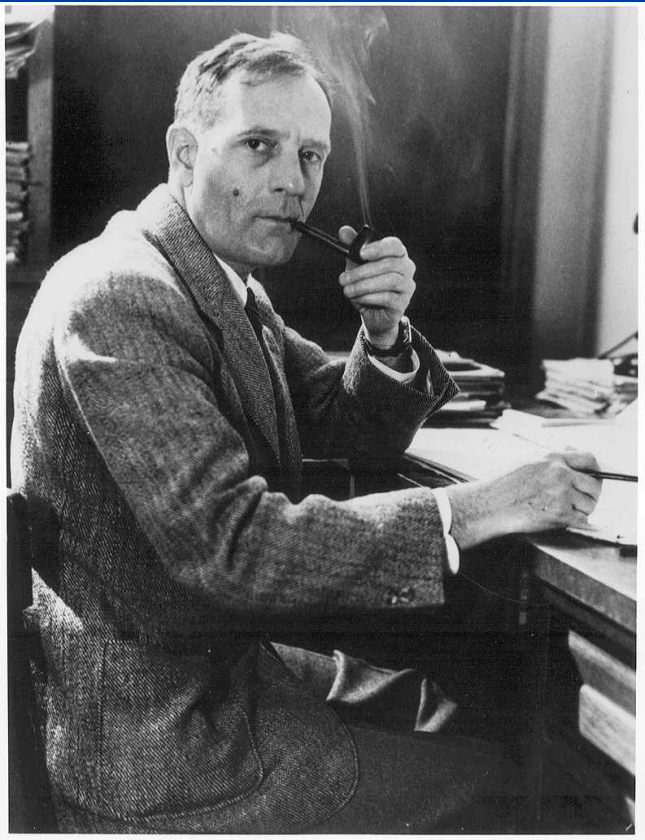
Multiplicité des mondes

Galilée



Le Grand Débat

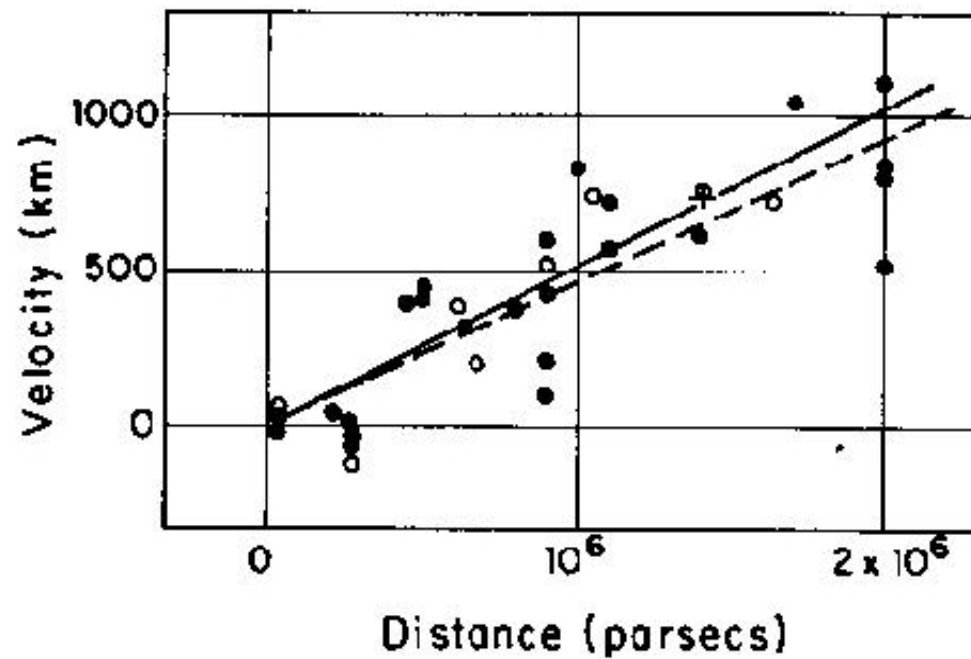
(nature des nébuleuses)



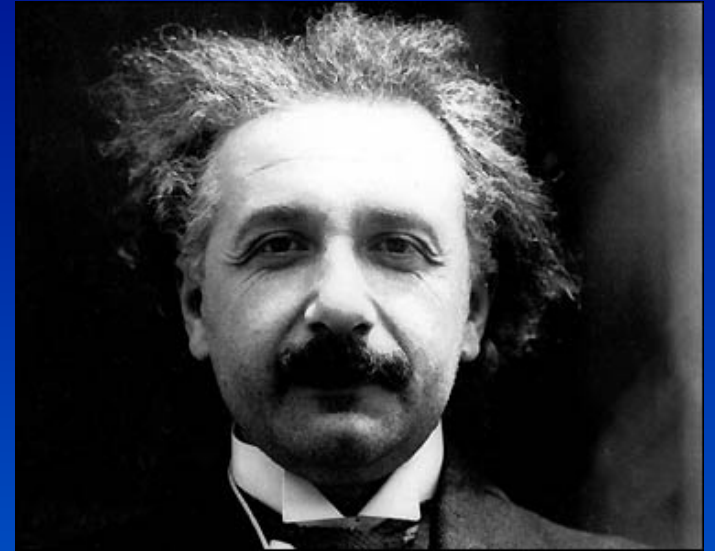
Edwin Hubble (1925)



Diagramme de Hubble: (1929)



Relativité Générale :

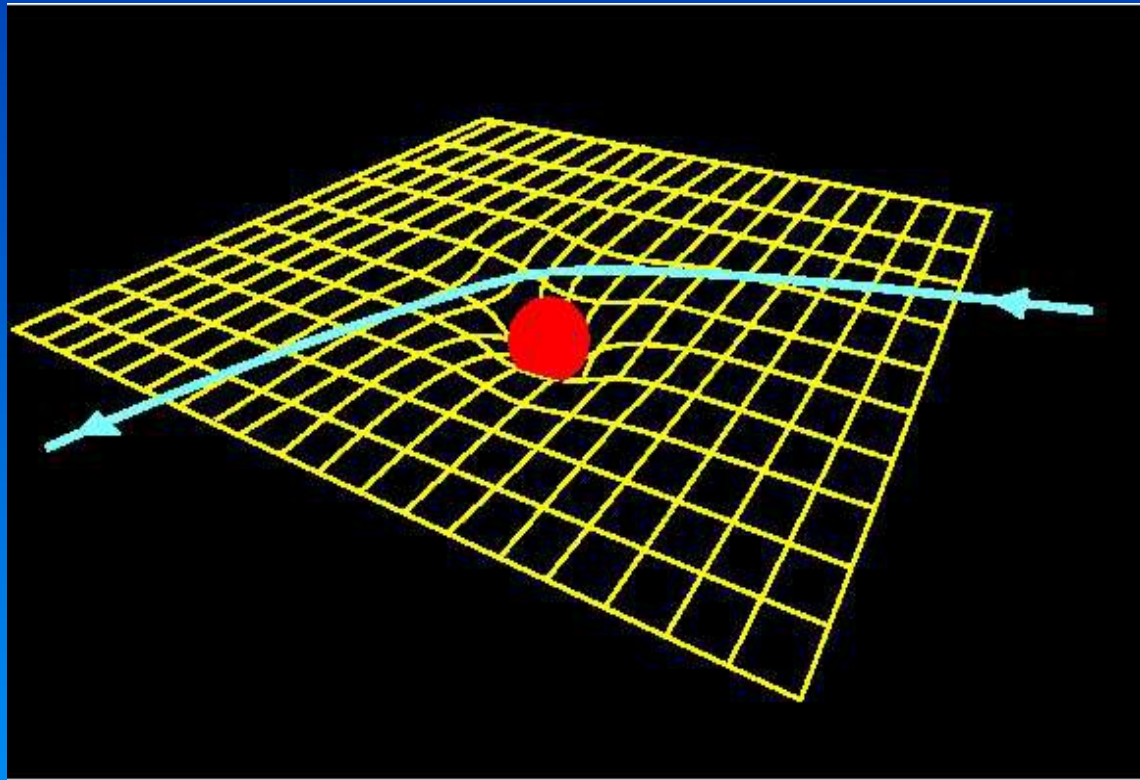


Le monde = espace-temps

Cet espace est courbe

La courbure dépend du contenu!

Relativité Générale :



Evolution de l'Univers

Expansion: élan initial

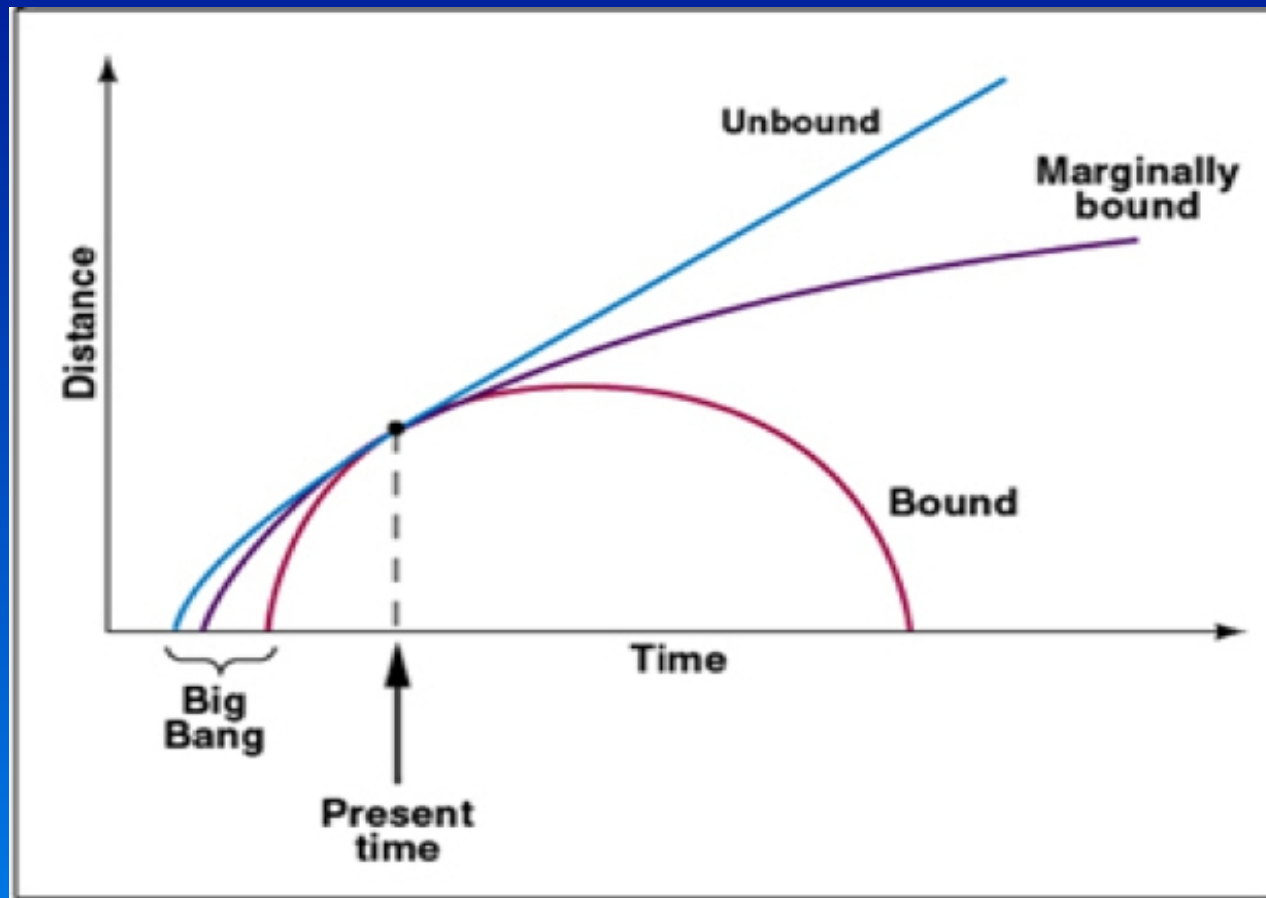
Gravitation:

➤ La densité de l'univers contrôle son évolution
→ densité critique ρ_c

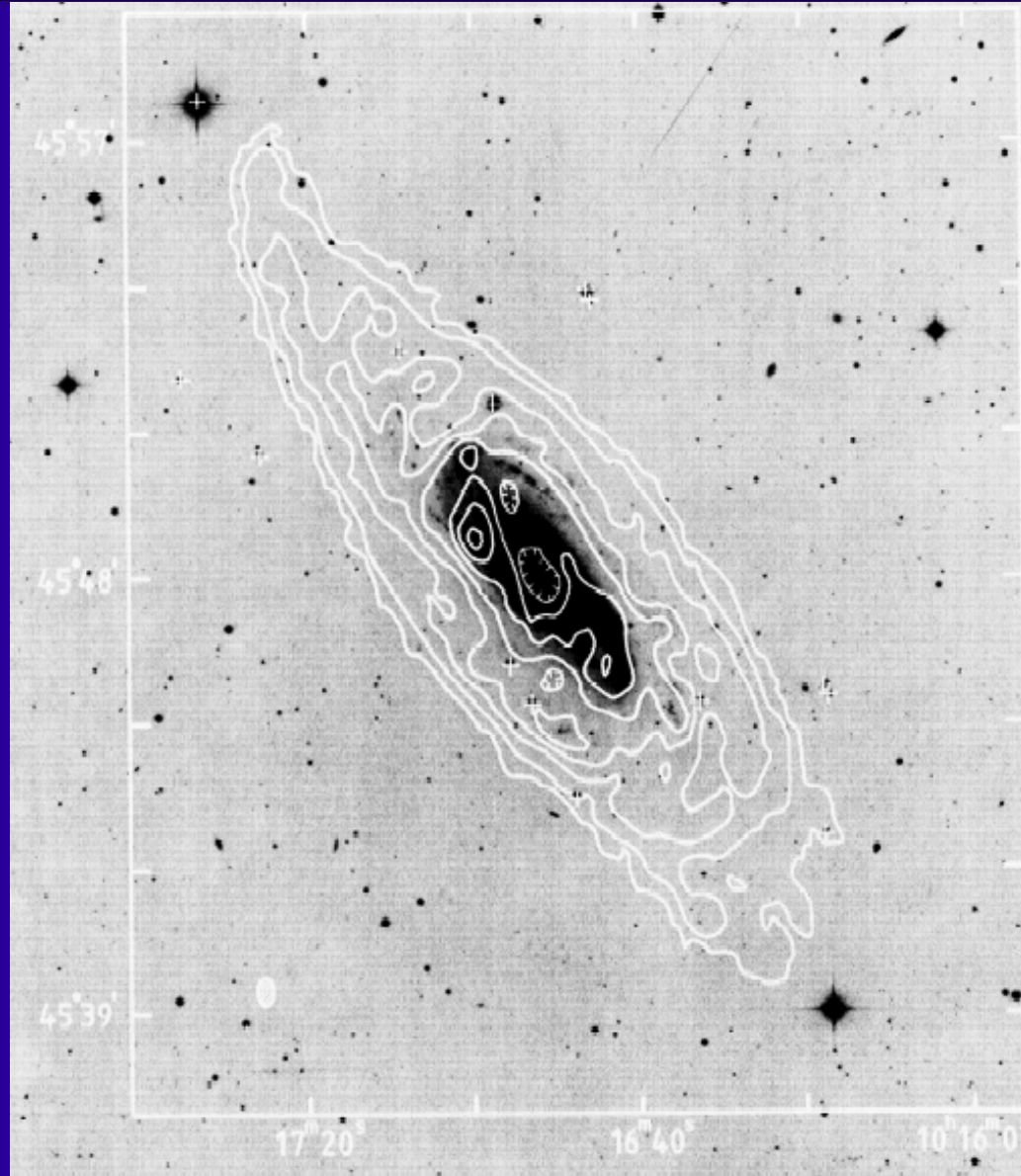
➤ Contenu (densité) = géométrie !

➤ Peser l'univers !

Evolution de l'Univers

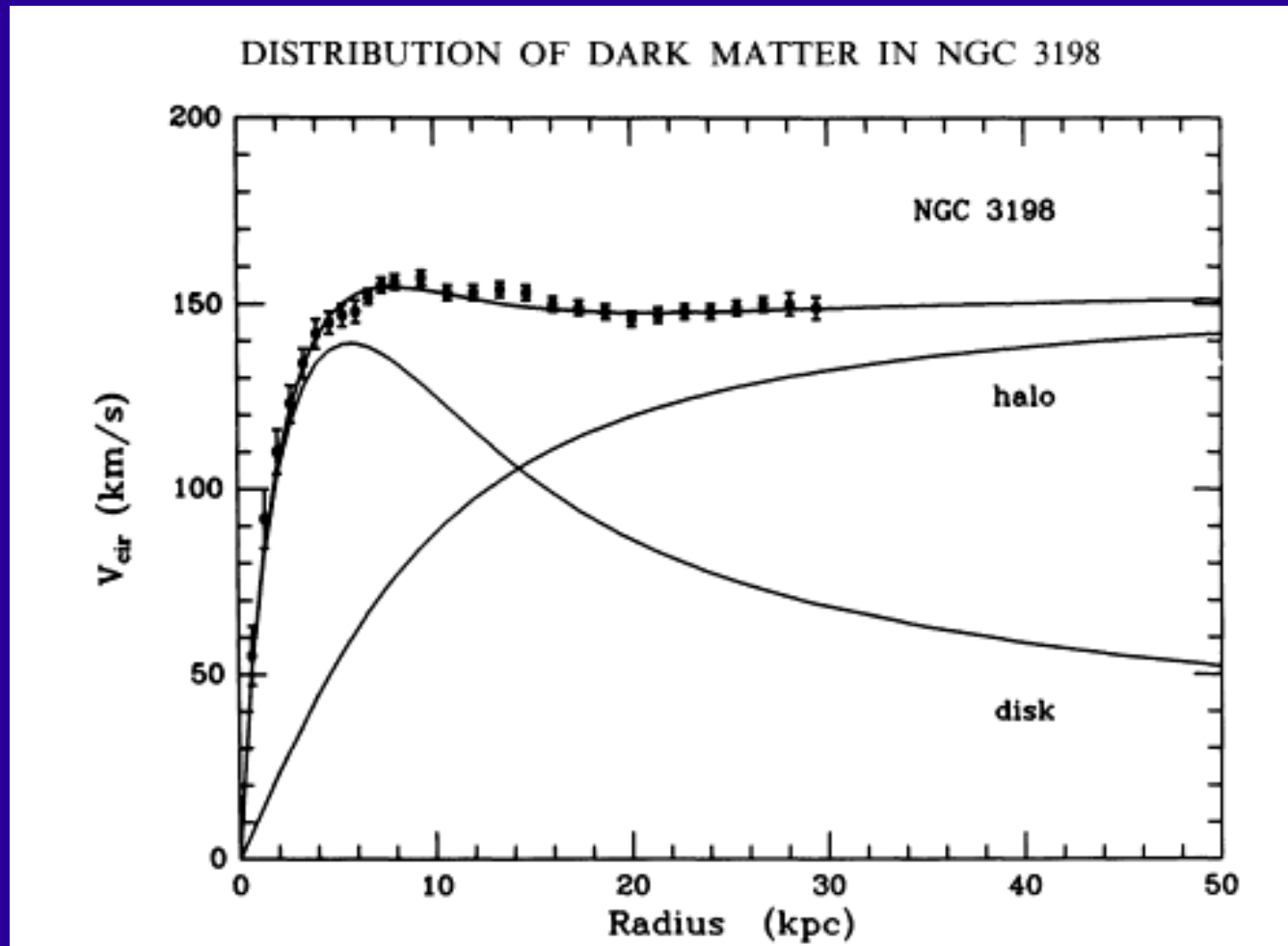


La matière noire dans les galaxies...



NGC3198

La matière noire dans les galaxies...



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

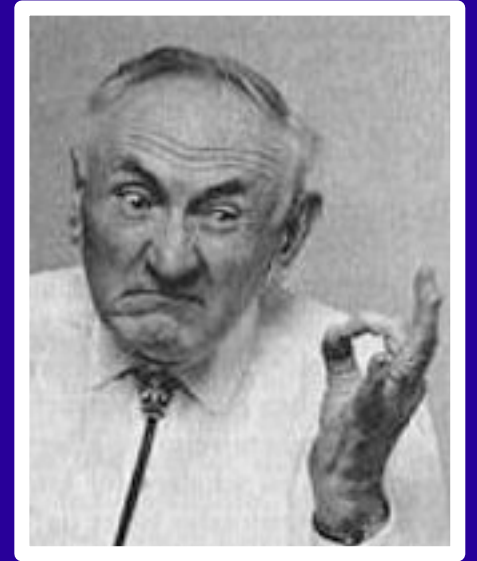
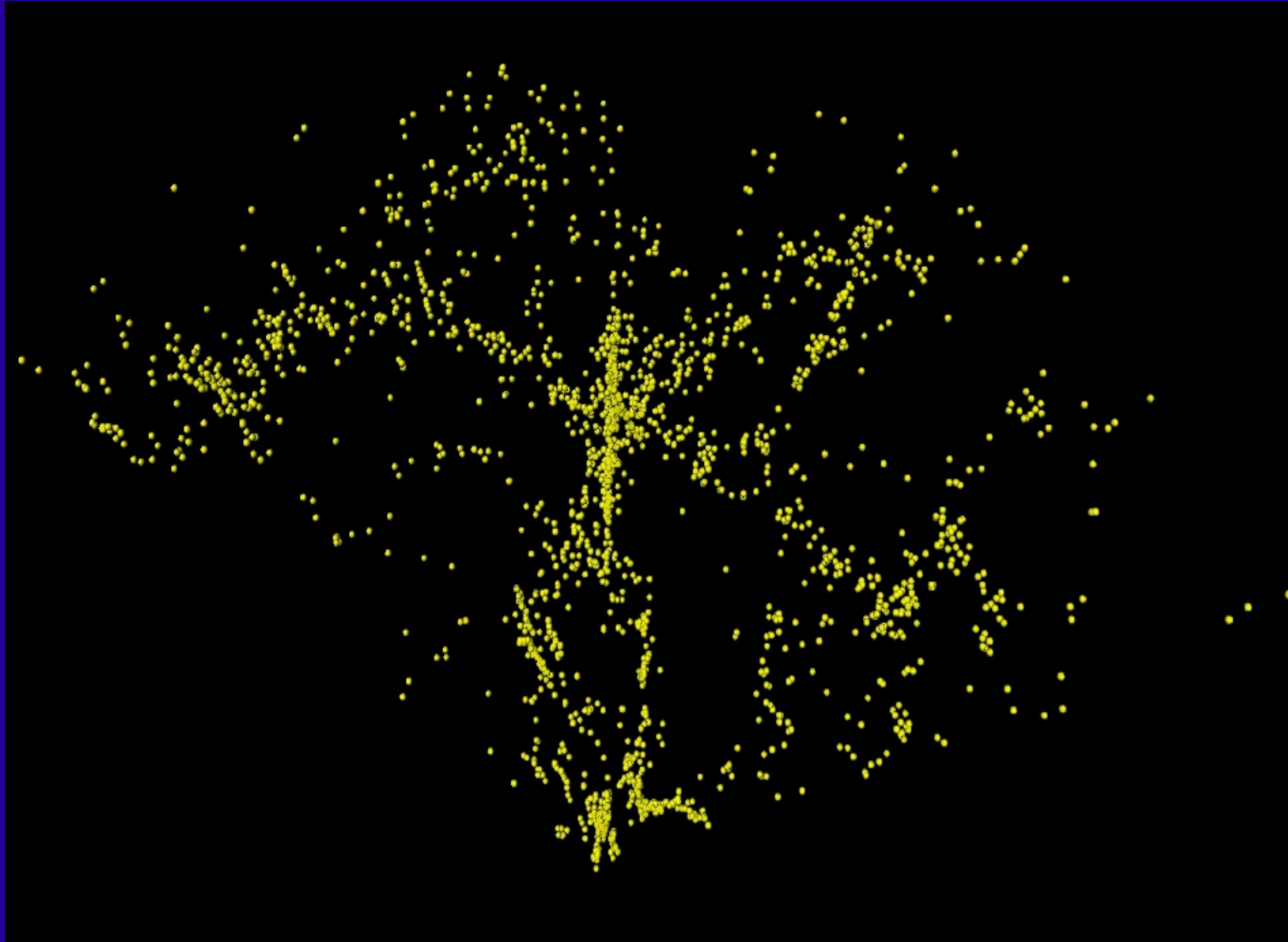
...visualisée par les courbes de rotation.

La matière noire dans les amas de galaxies...



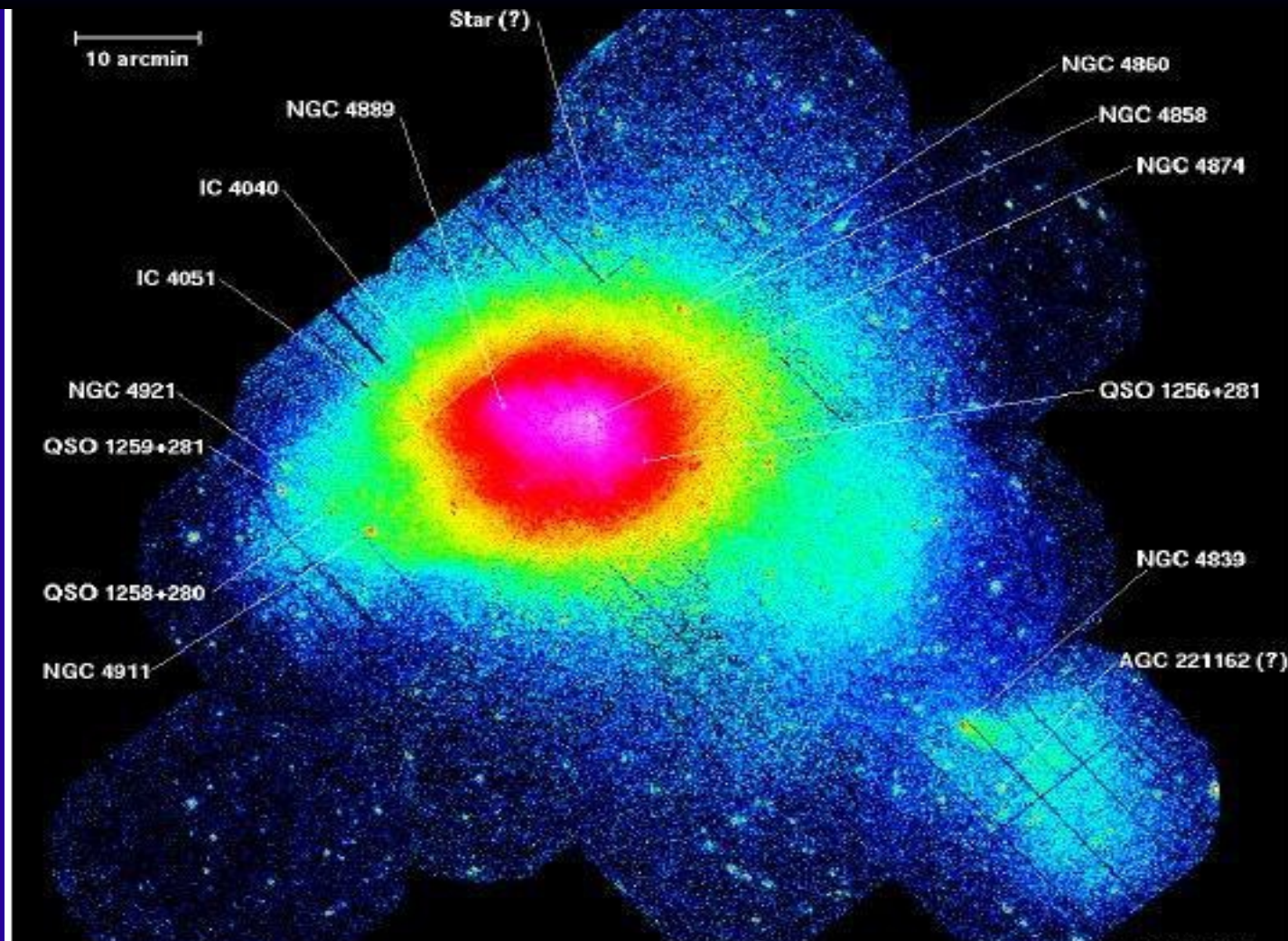
...détectée par les vitesses de dispersion.

La matière noire dans les amas de galaxies...



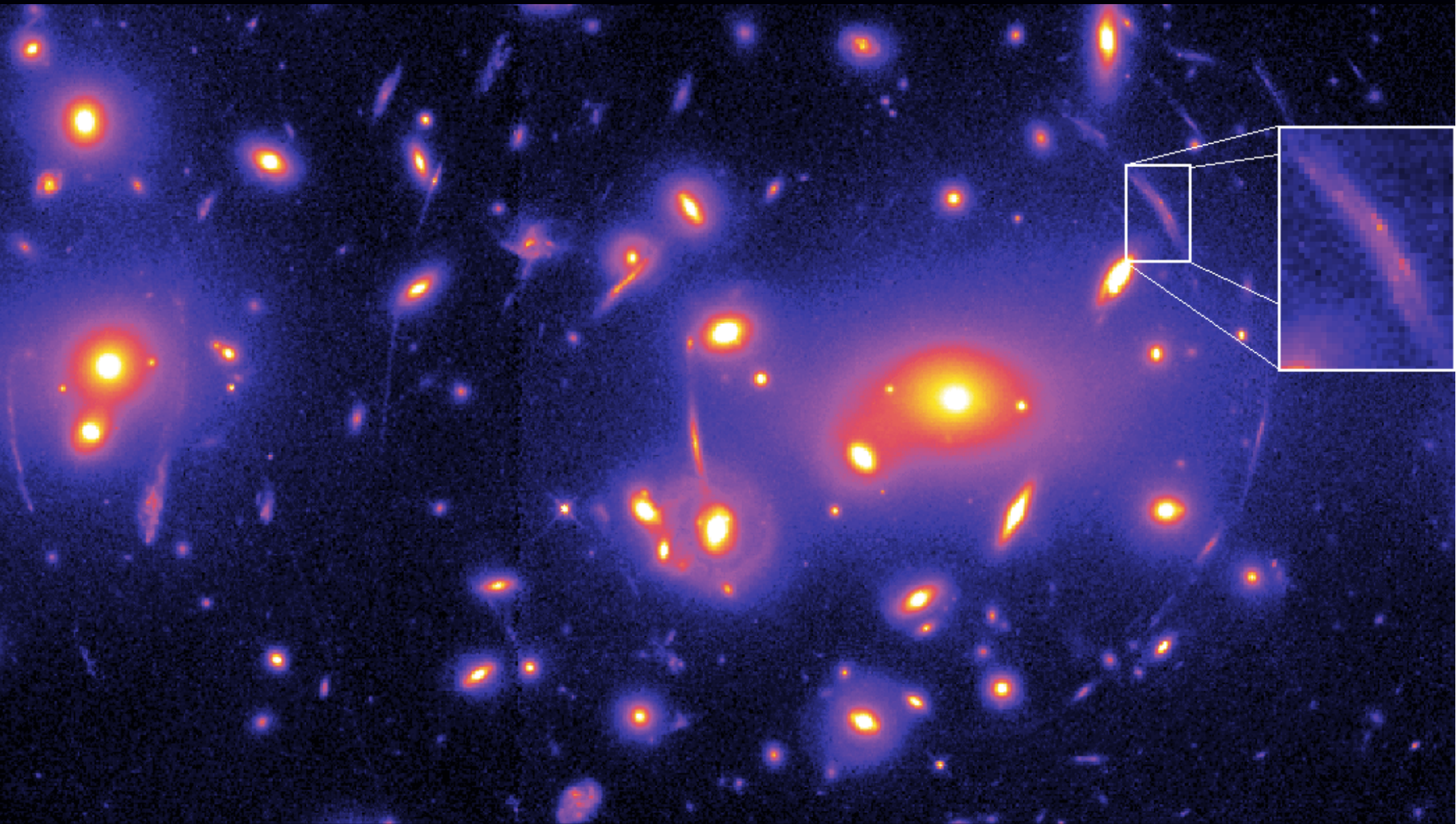
...détectée par les vitesses de dispersion.

La matière noire dans les amas de galaxies...



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

La matière noire dans les amas de galaxies...

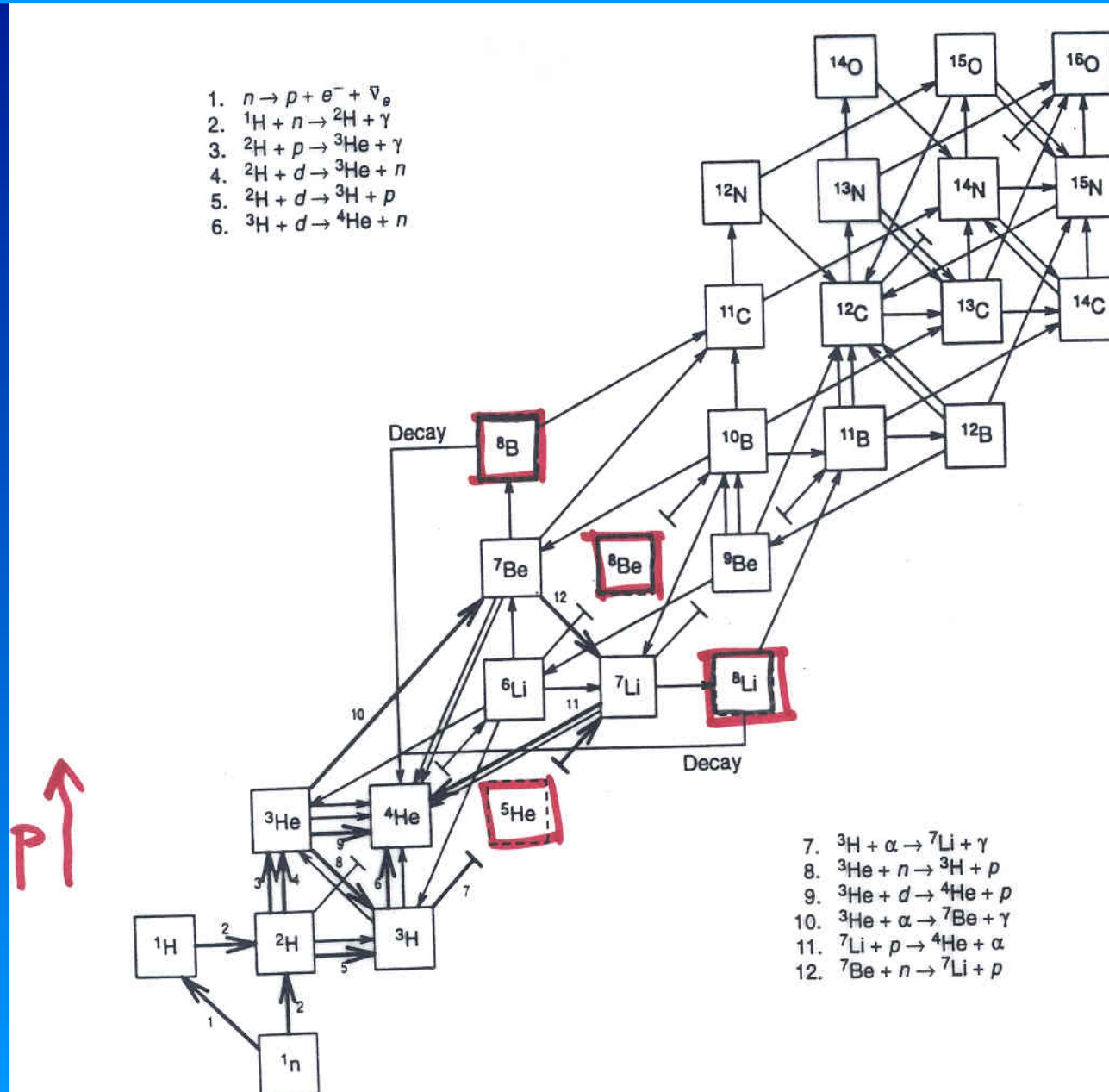


...visualisée par les arcs gravitationnels.

Matière noire, Bilan:

30% de la densité critique

Nucléosynthèse des éléments légers

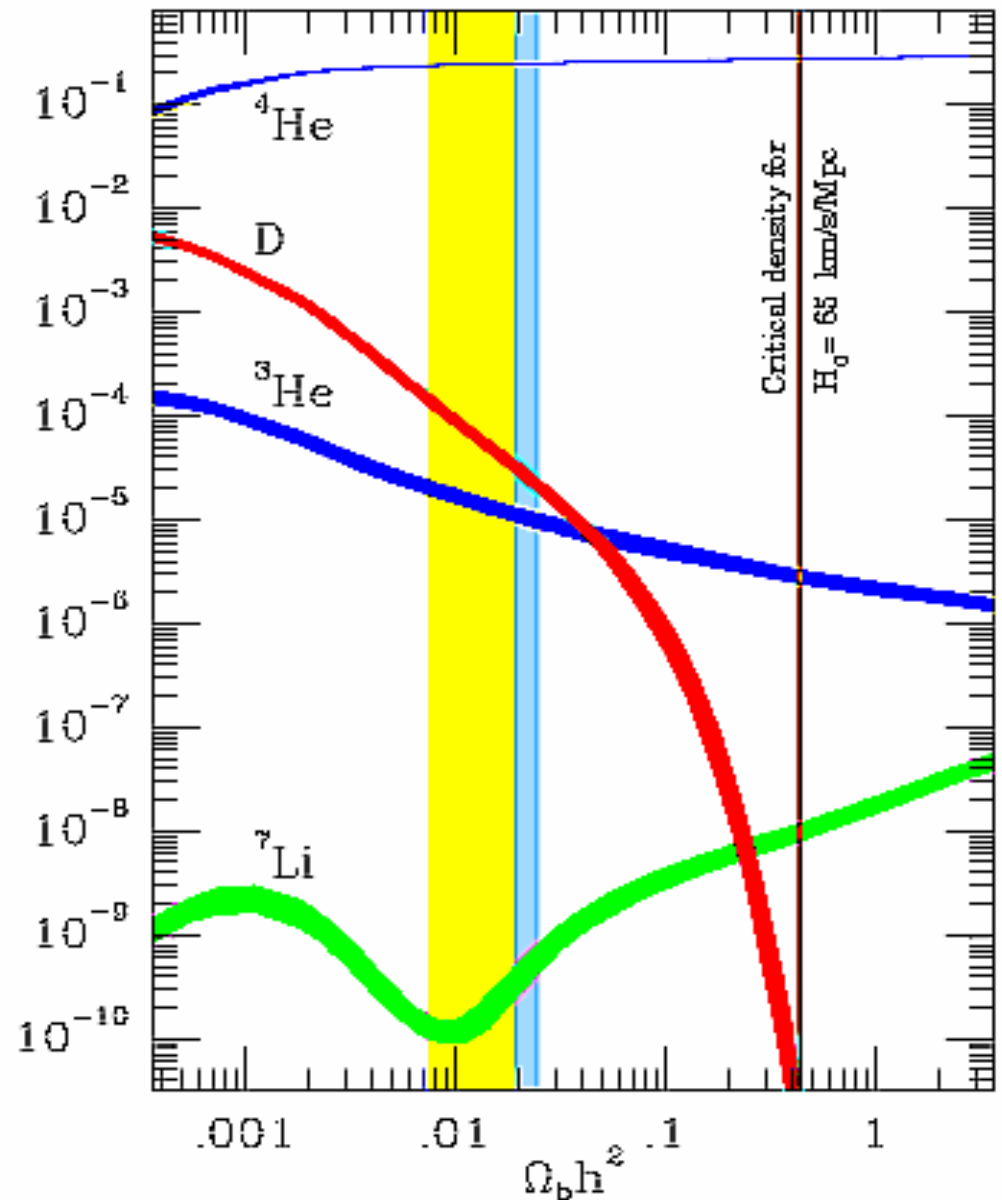


Nucléosynthèse des éléments légers

Composition chimique de l'Univers:

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

détermine la quantité de
matière baryonique:
 $\approx 5\% \rho_c$



Matière noire, Bilan:

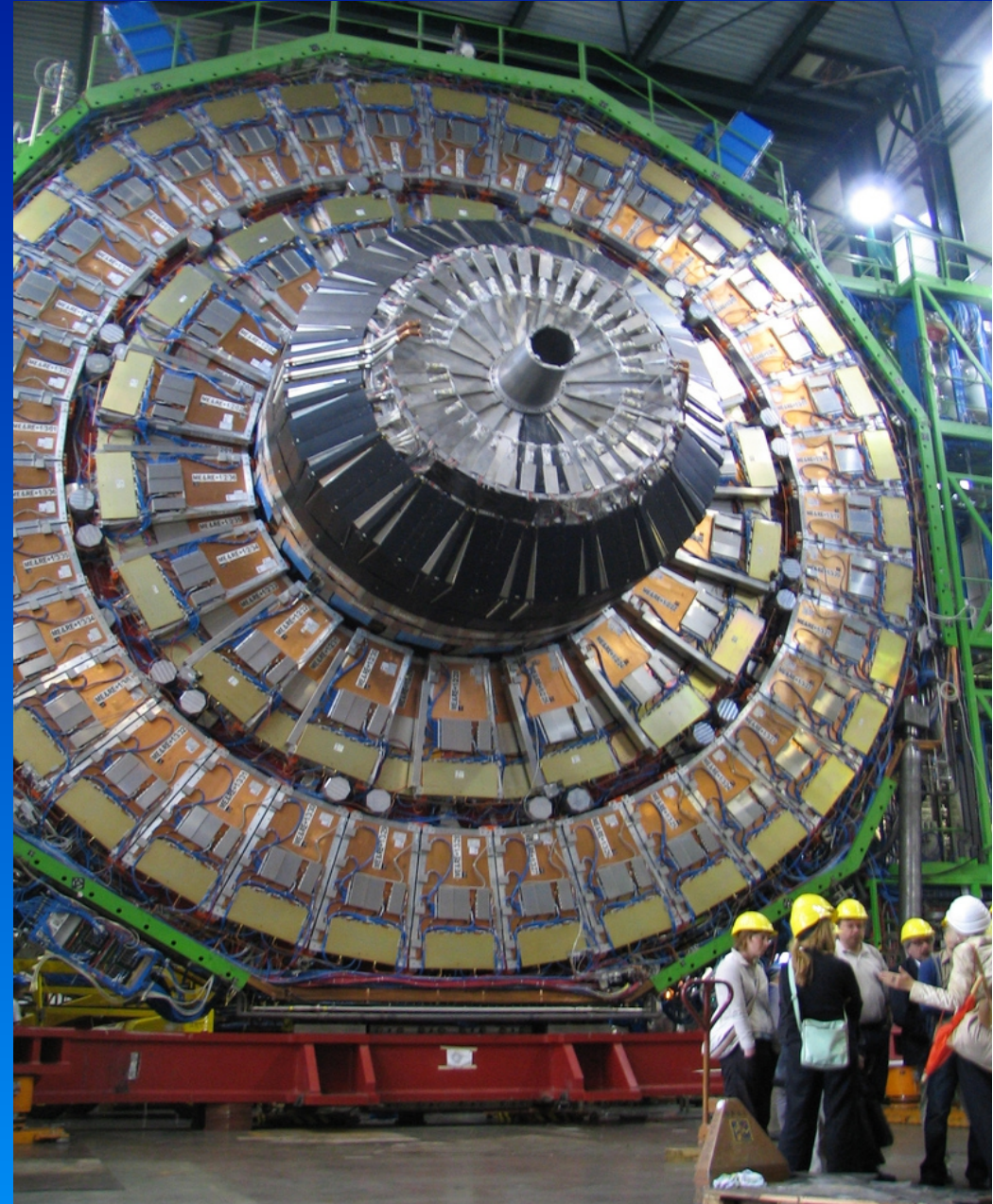
Atomes: 5%

30% de la densité critique

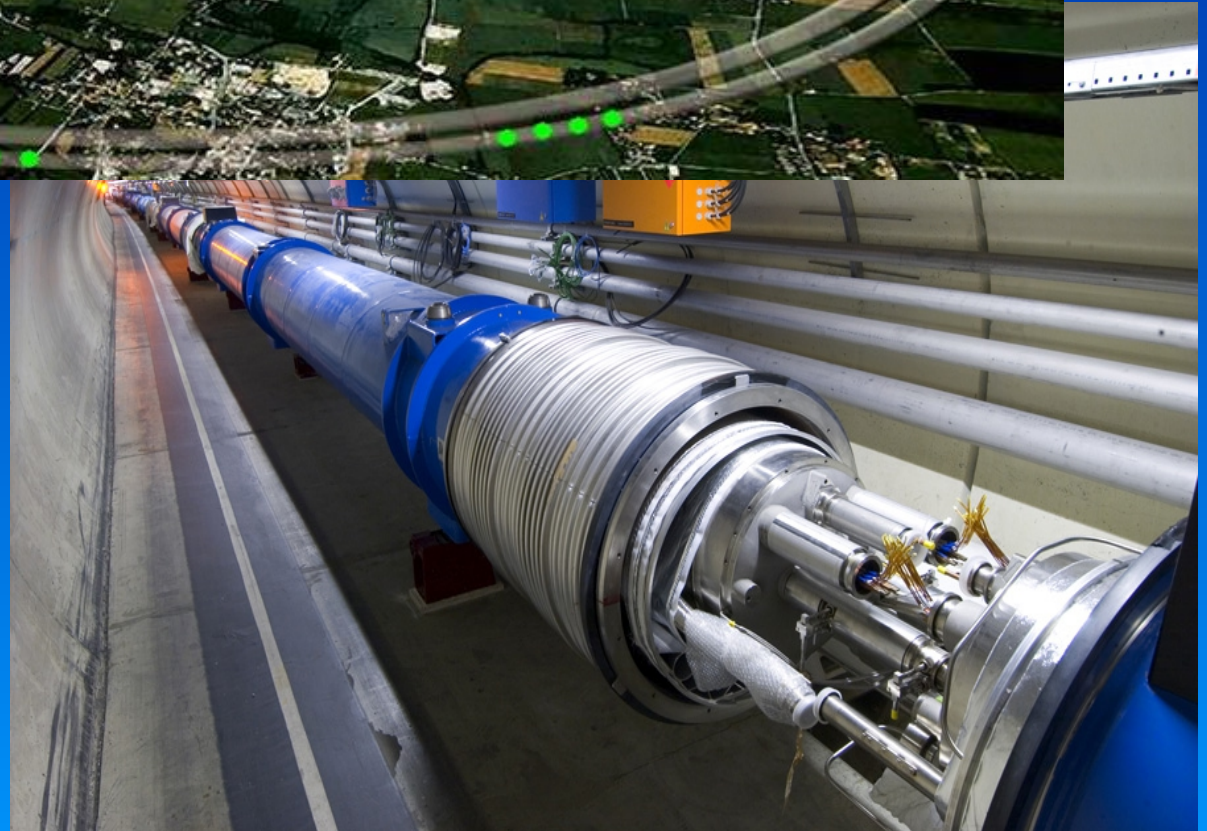
Nature inconnue, non-baryonique

Matière noire non-baryonique :

A chercher dans
les grands
accélérateurs...



Large Hadron Collider:

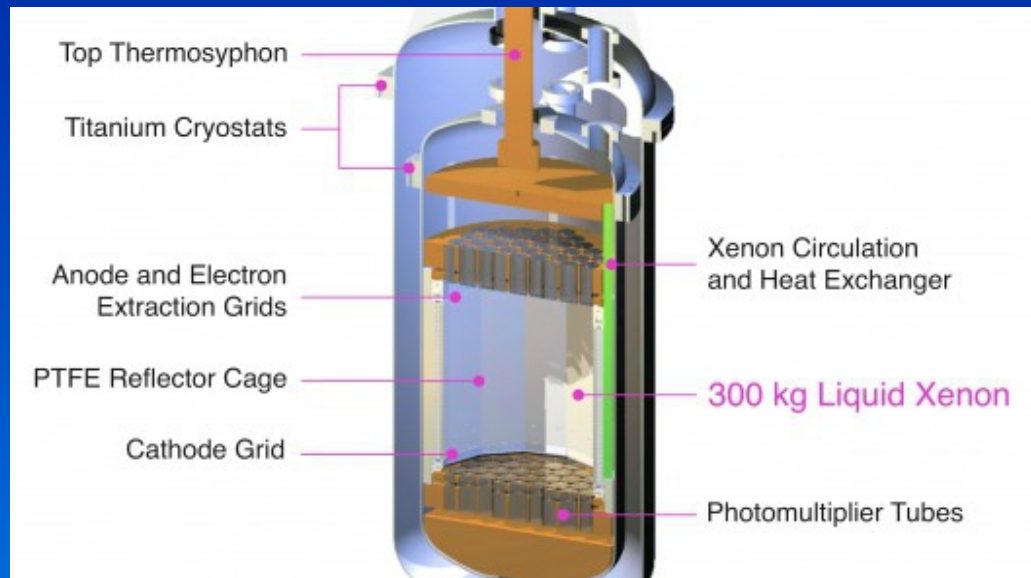


Matière noire non-baryonique :

A trouver dans
cette pièce...

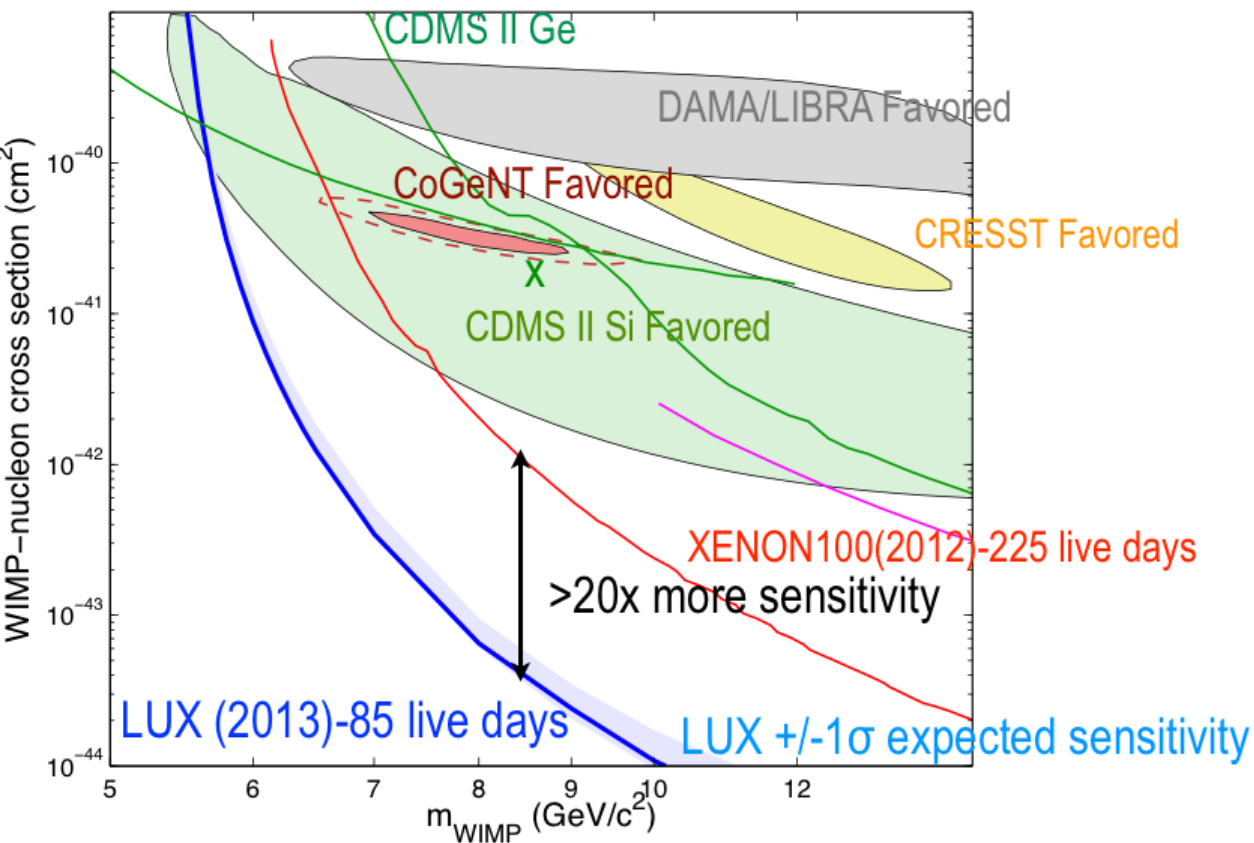


Matière noire non-baryonique :

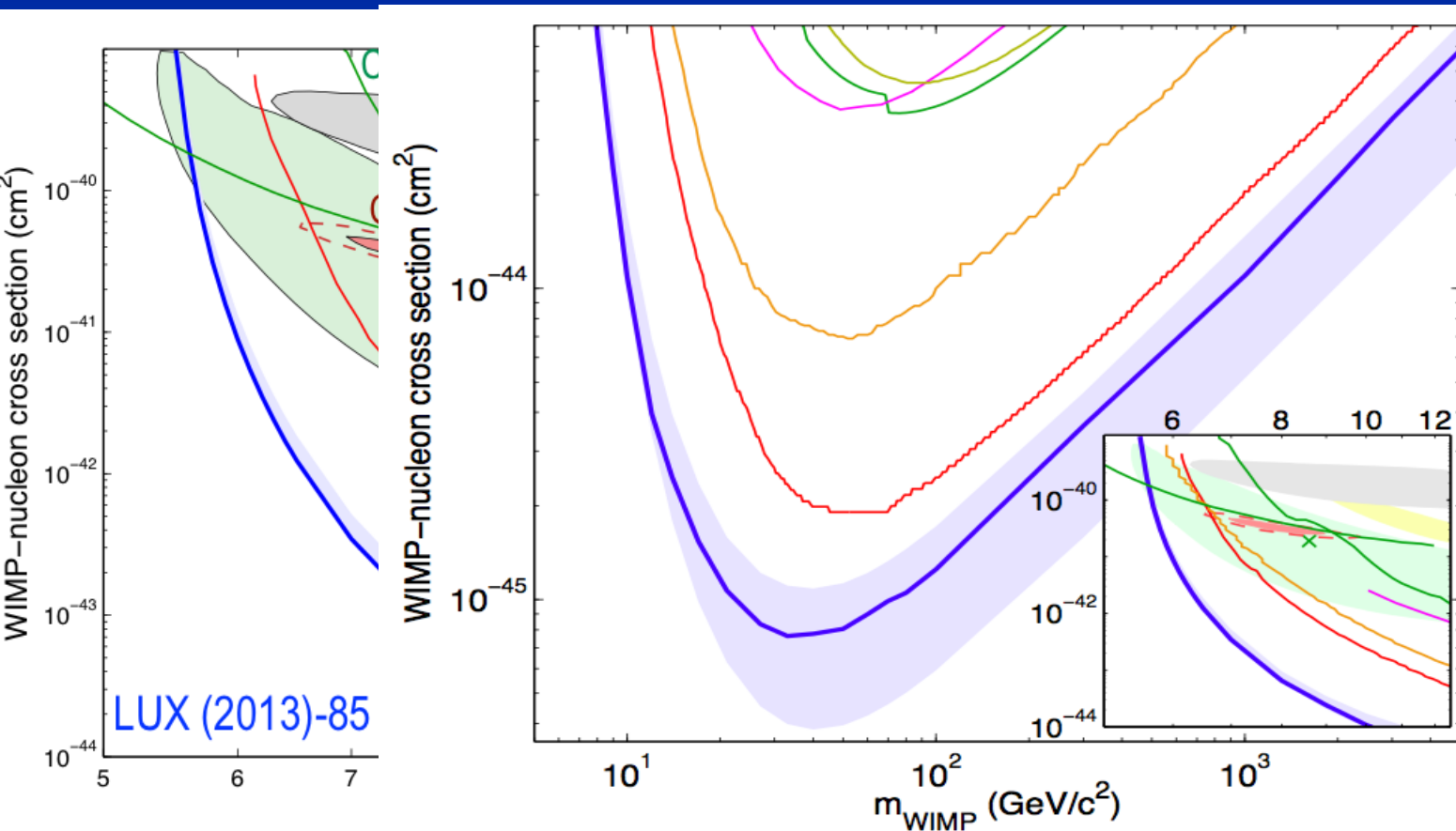


Octobre 2013

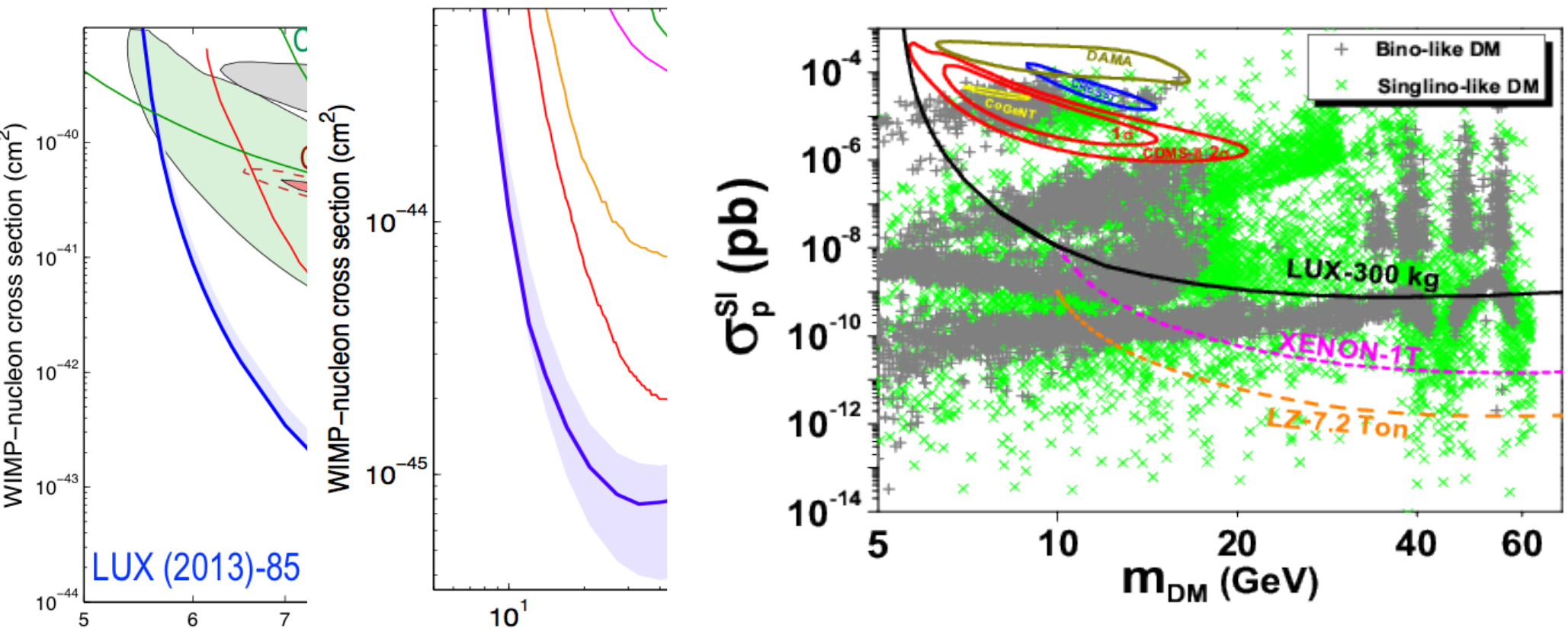
Matière noire non-baryonique :



Matière noire non-baryonique :



Matière noire non-baryonique :



Prédiction:

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

Rayonnement de corps noir:



Découverte du fond cosmologique

(Penzias & Wilson 1964)



Prix Nobel de physique 1978

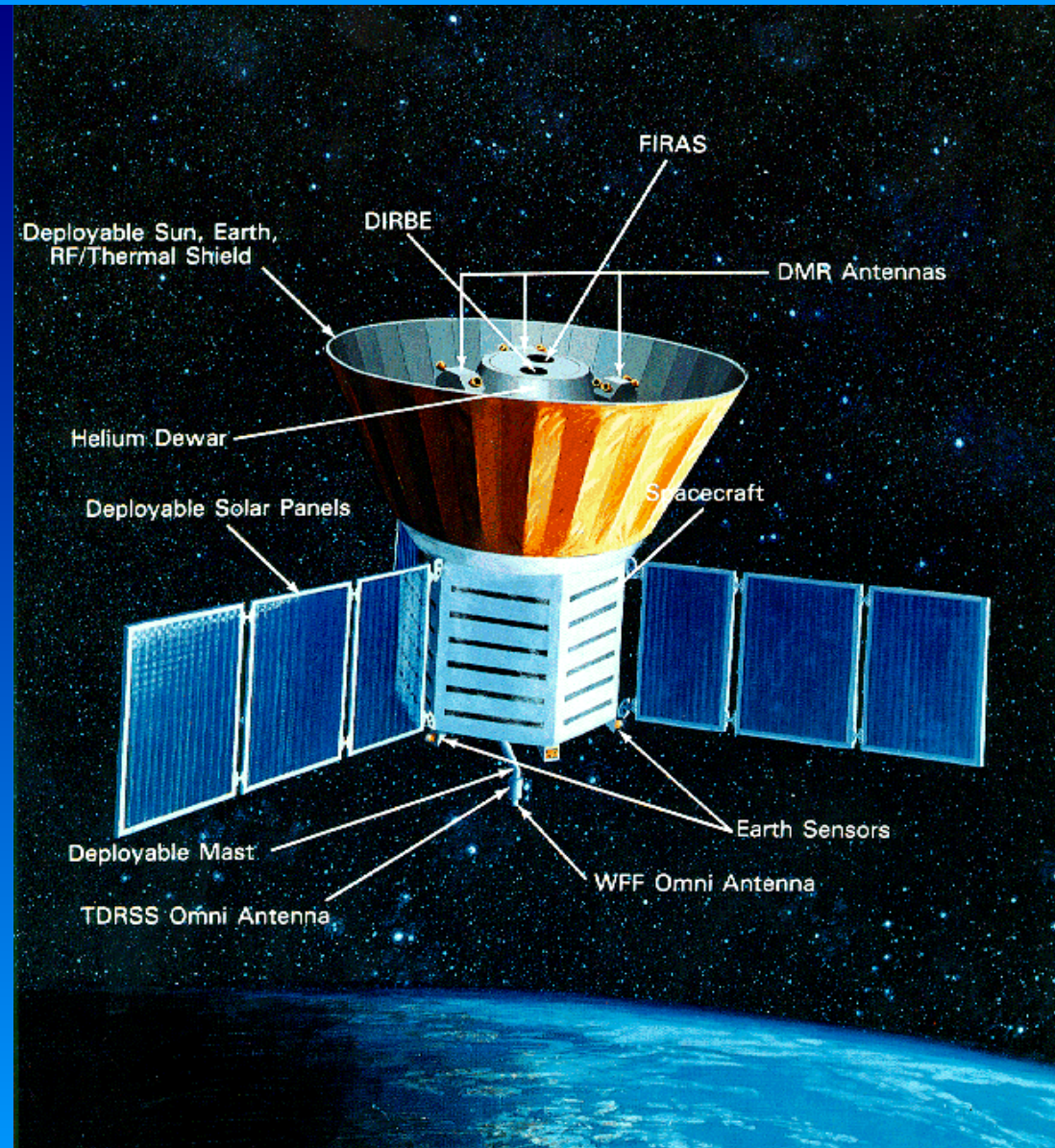
Fond cosmologique

Gène de l'atmosphère

Observations par satellite:

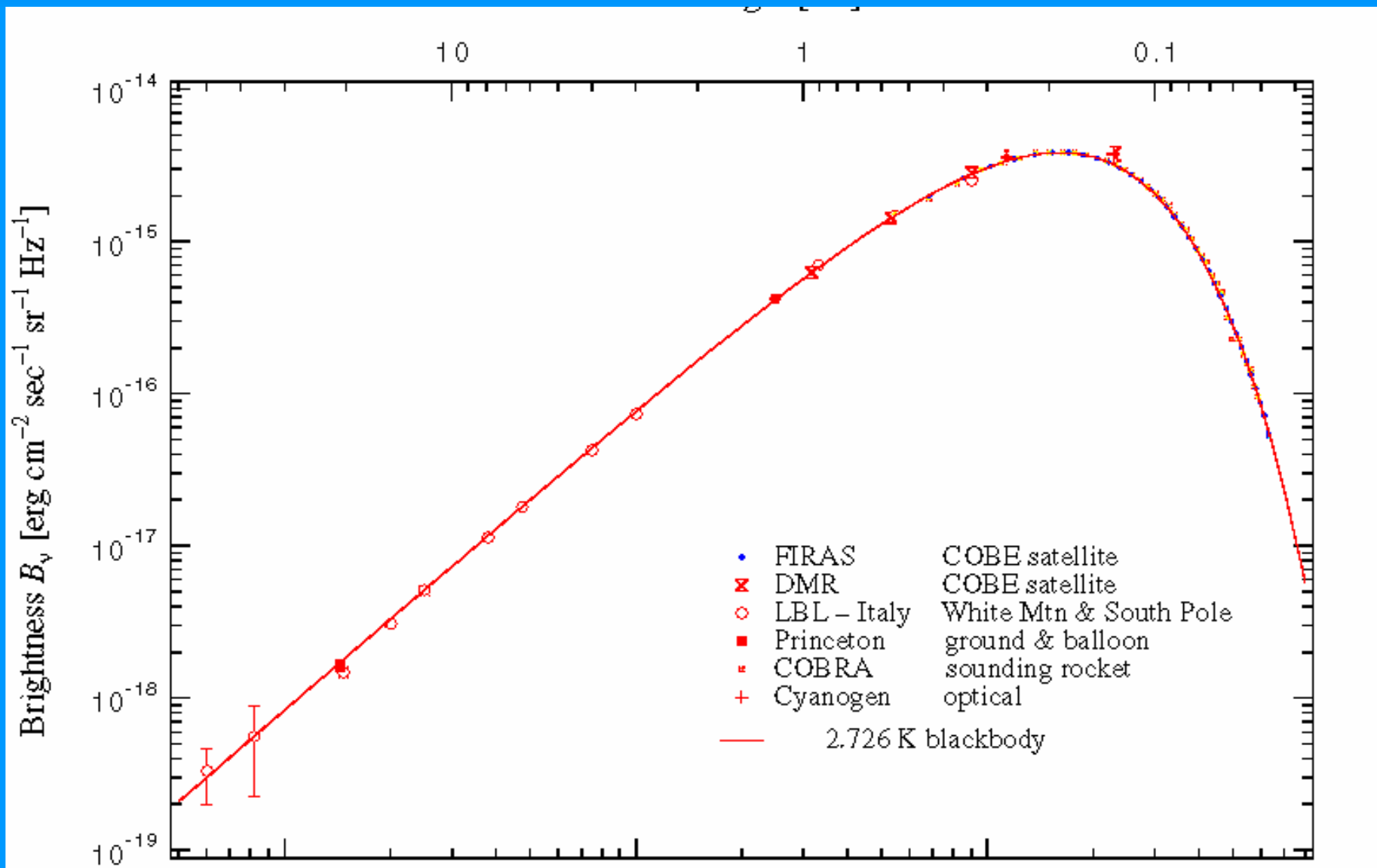
COBE

Spectre de corps noir



Fond cosmologique

Spectre du fond cosmologique



Les 3 piliers du Big Bang

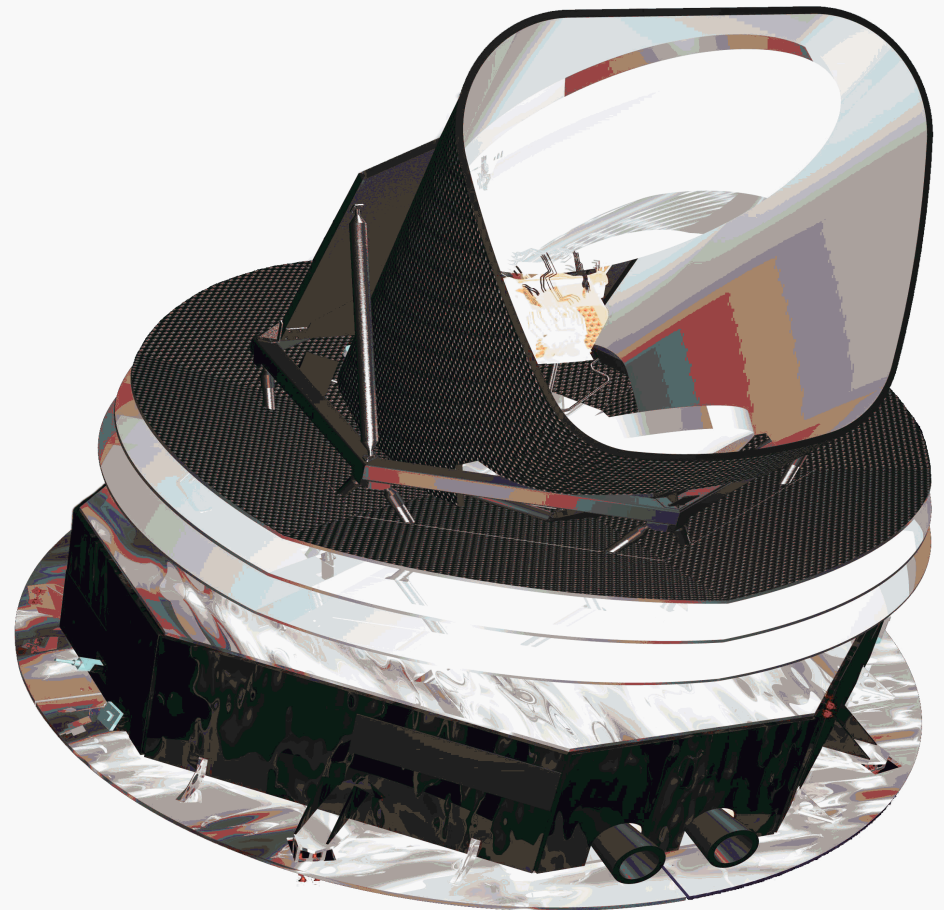
- ♣ L'expansion de l'univers
- ♣ La nucléosynthèse des éléments légers
- ♣ Le fond cosmologique et son spectre

Physique enseignée en Master à l'université...

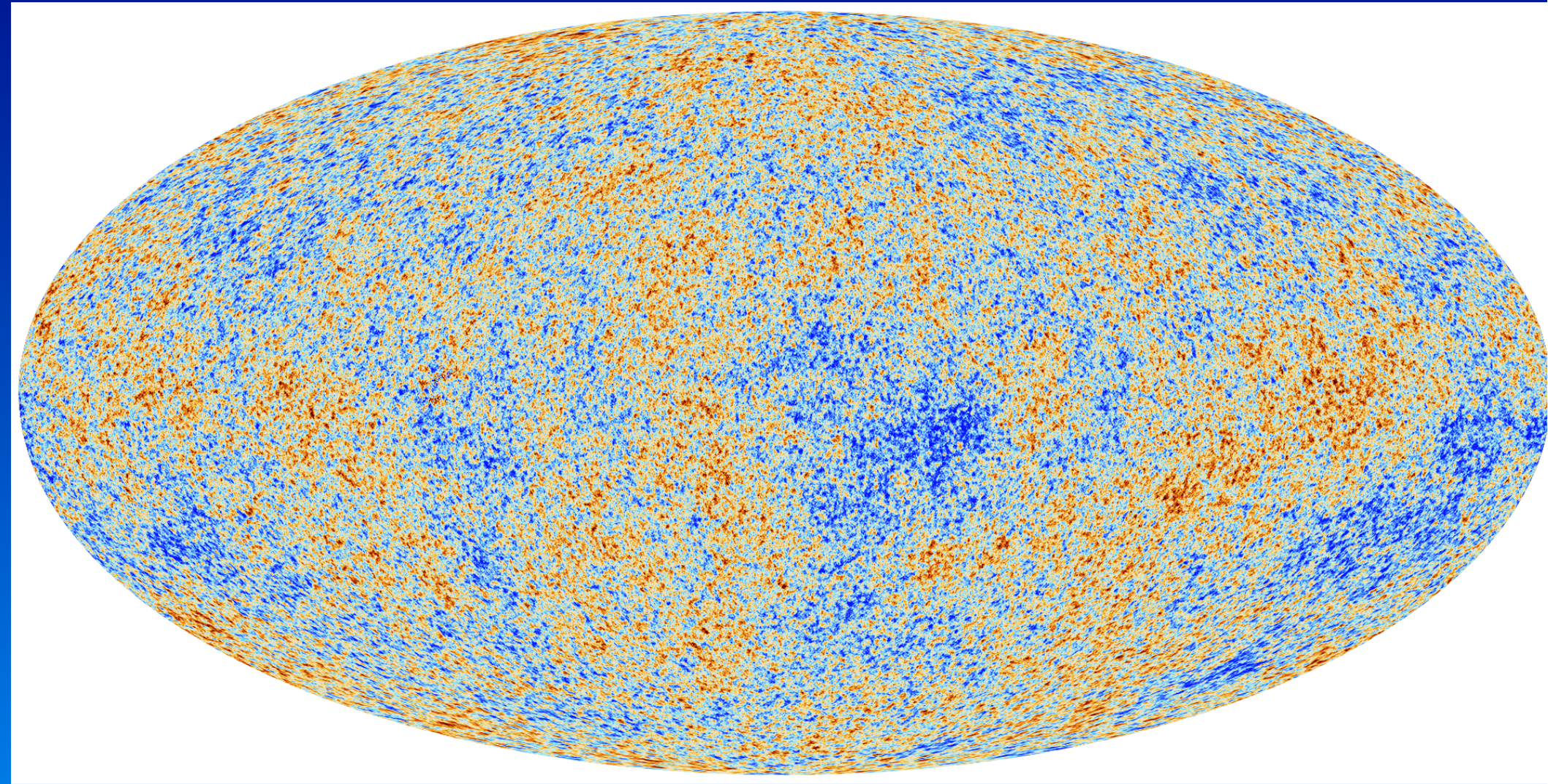
Fond cosmologique

Planck (ESA)
(2009-2013)

ALCATEL



CMB

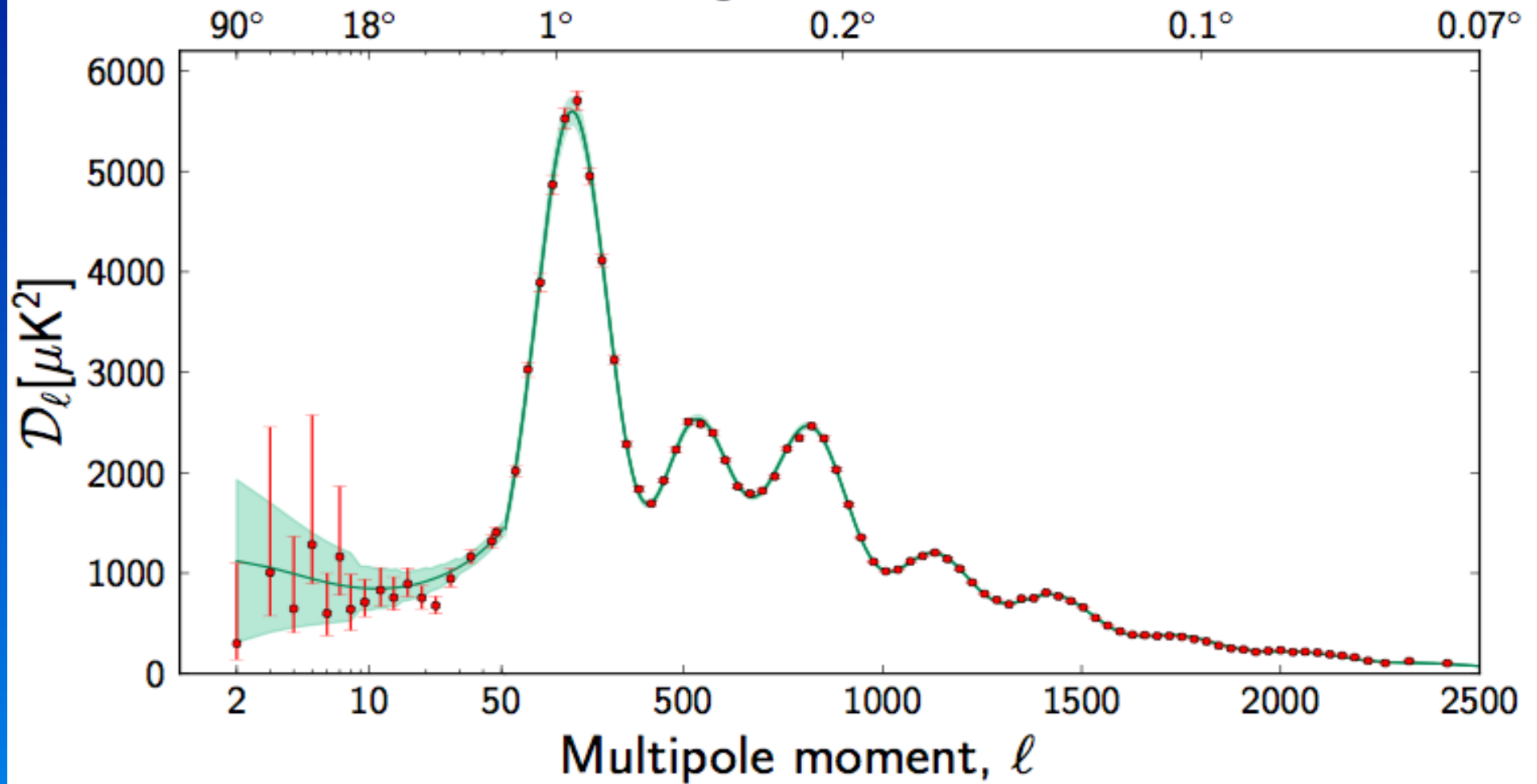


PLANCK

CMB

Planck Collaboration: The *Planck* mission

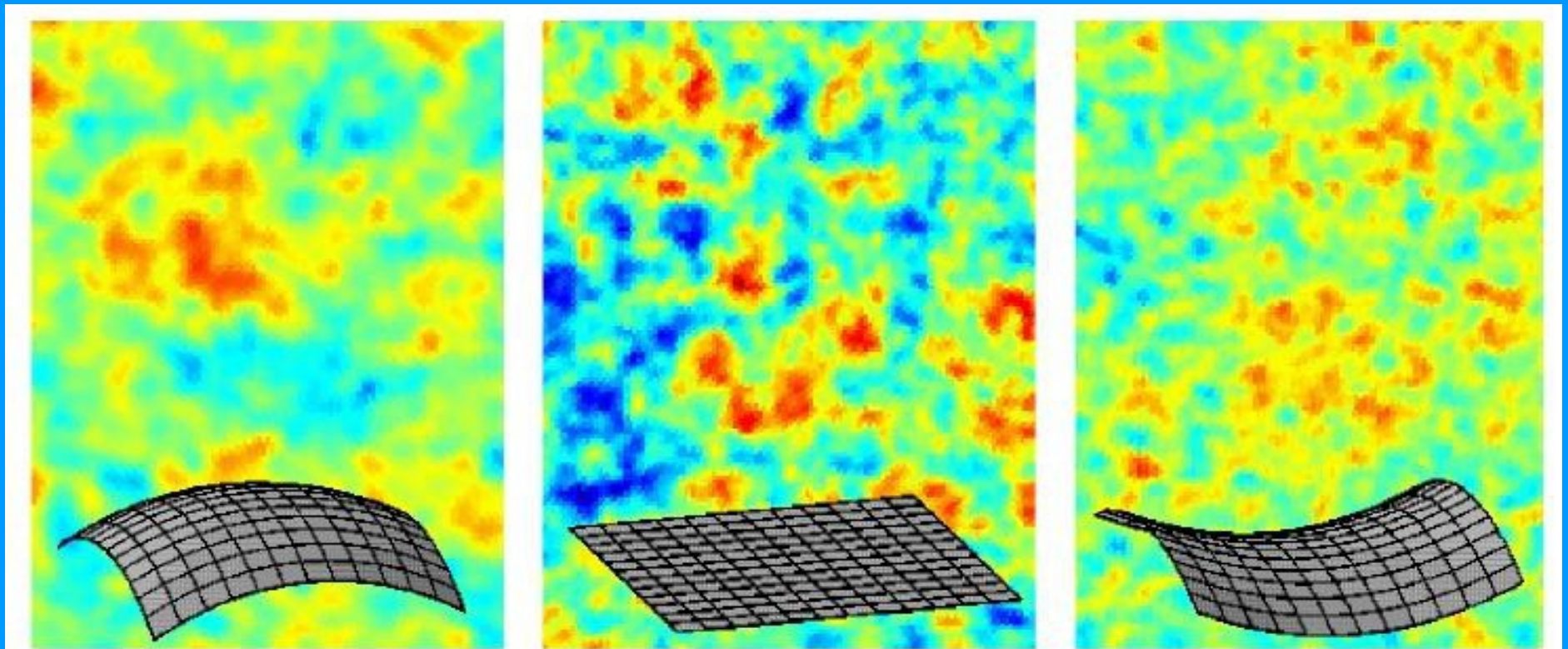
Angular scale



Fond Cosmologique

Mesure de la courbure de l'espace:

L'espace est à peu près plat!



Mesure de la courbure de l'espace:

L'espace est à peu près plat...

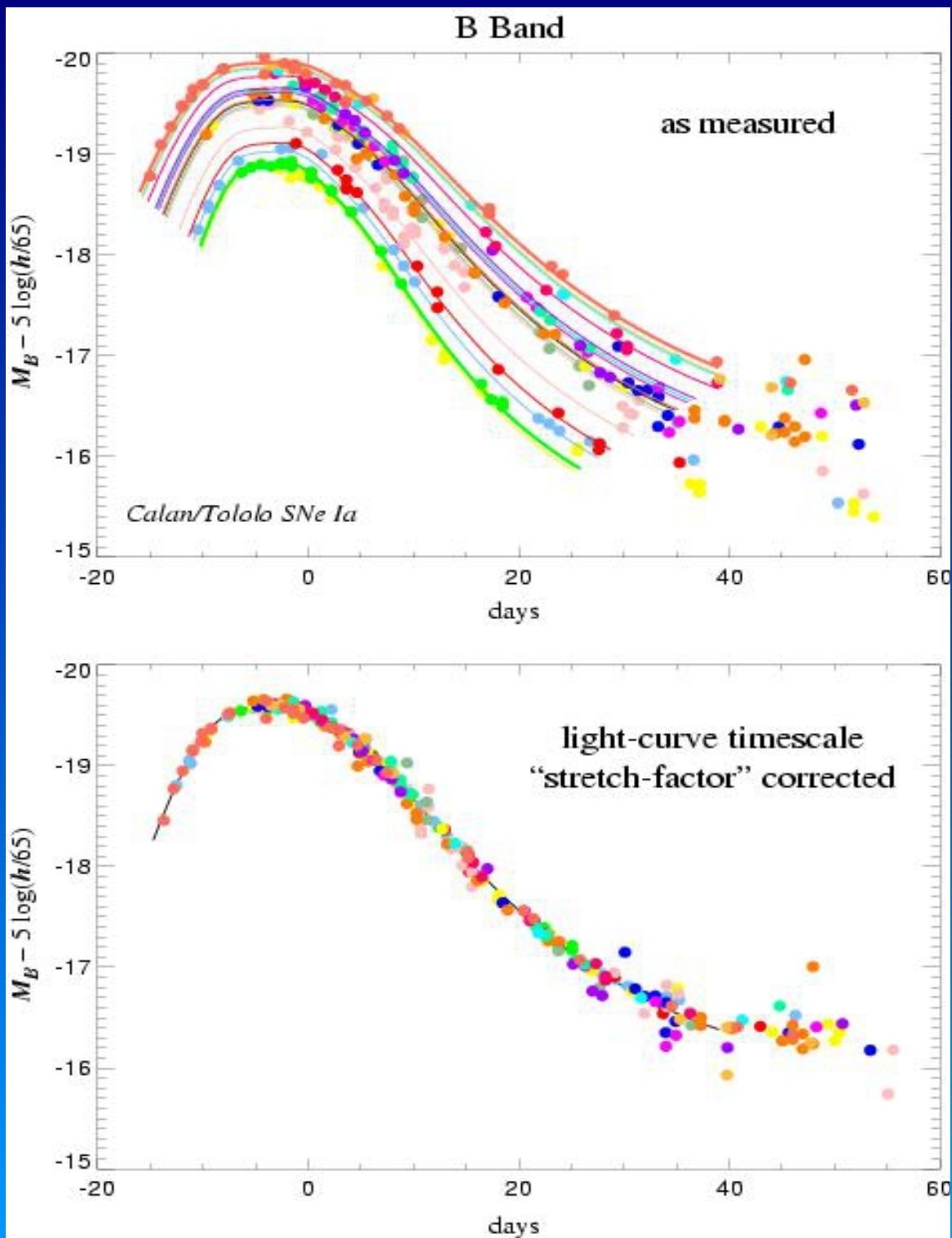
donc:

$$\rho \approx \rho_c$$

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

???

Supernovae properties



Candle standards

Supernovae lointaines:

Détection

Supernova 198ba
Supernova Cosmology Project
(Perlmutter, *et al.*, 1998)

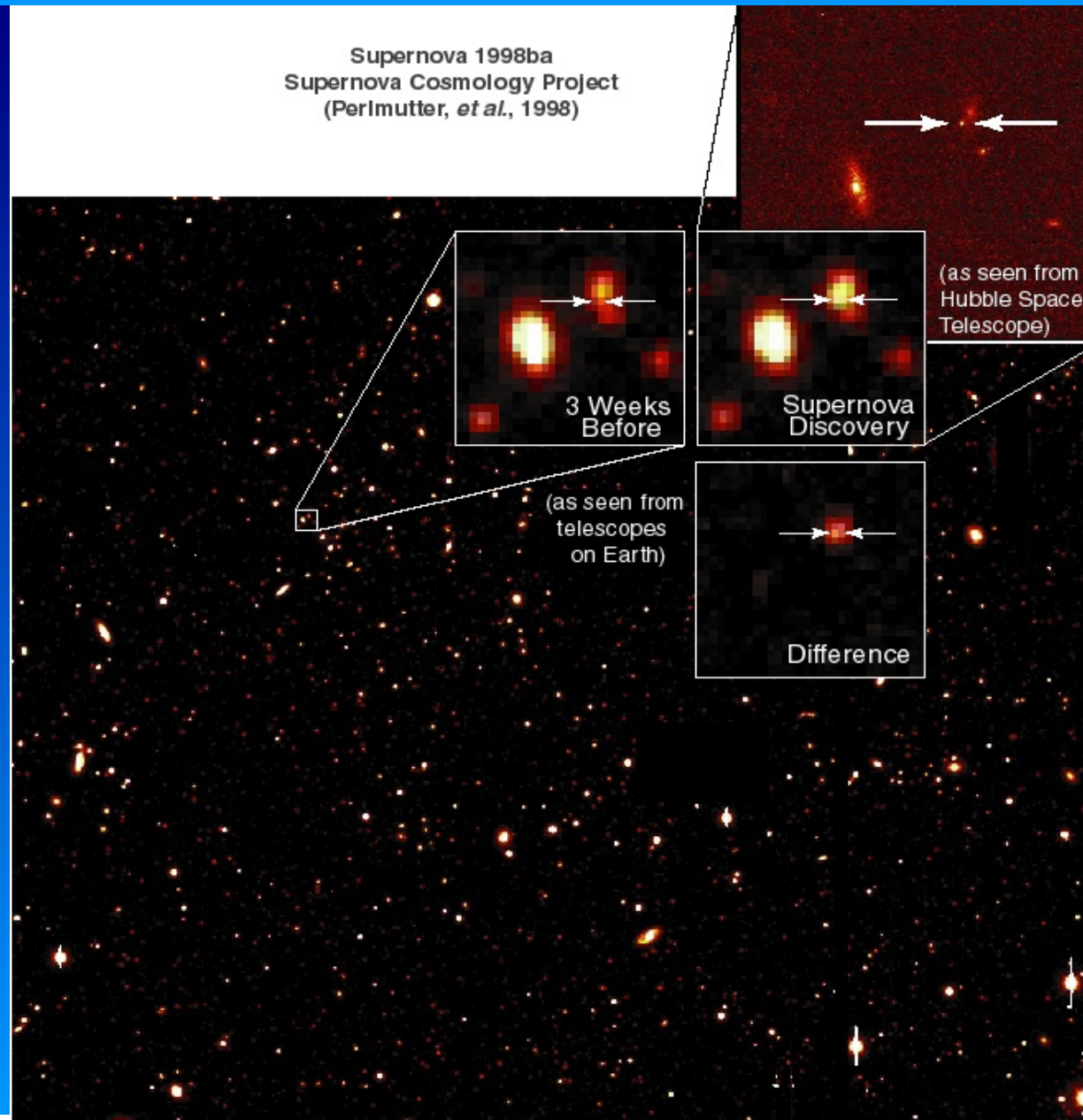
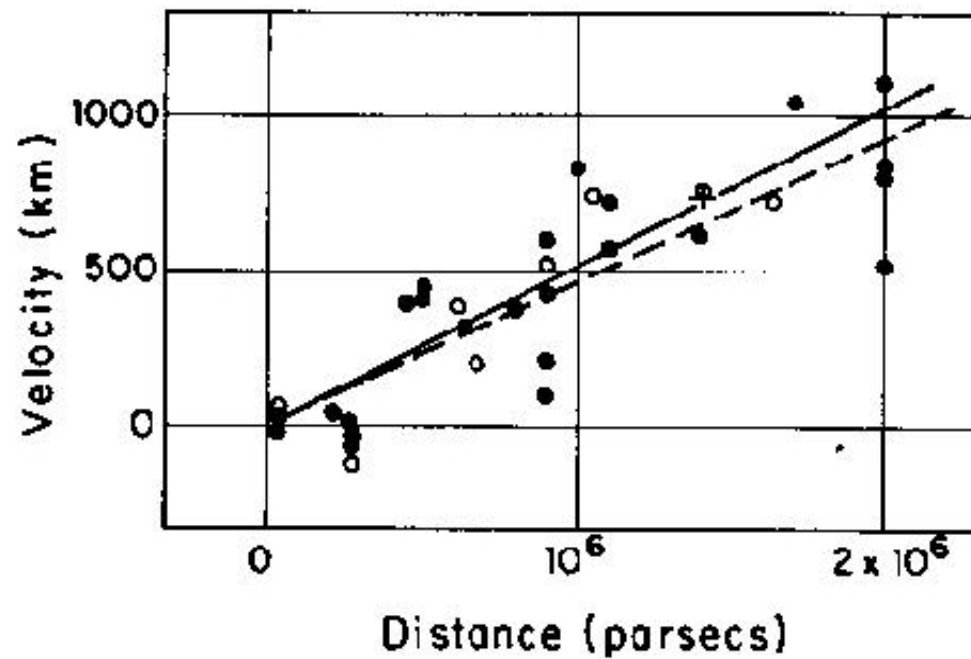
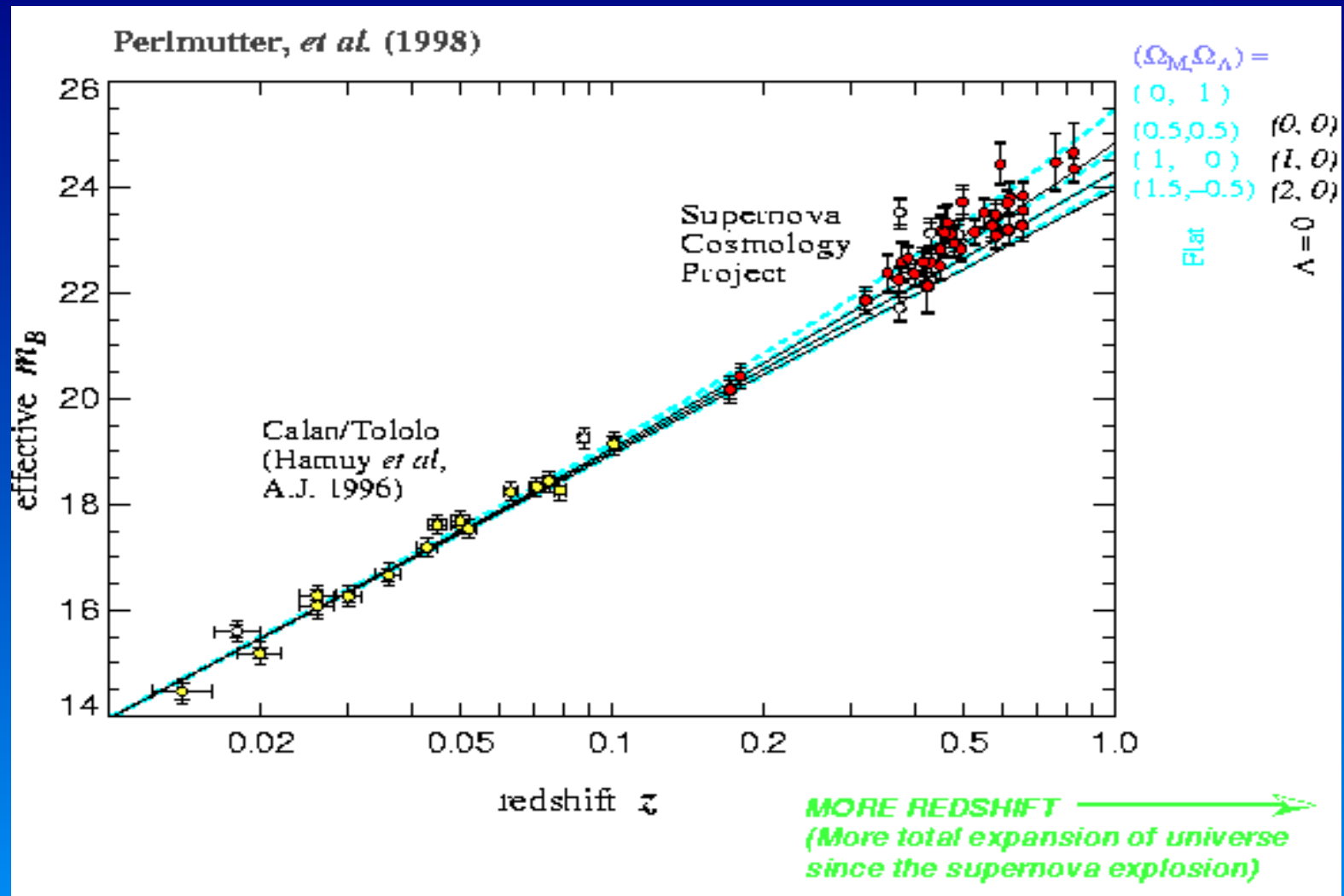


Diagramme de Hubble: (1929)



Supernovae lointaines:

Diagramme de Hubble



Evolution de l'Univers

Expansion: élan initial

Gravitation:

⇒ **La densité de l'univers contrôle son évolution**

Interprétation?

Source de la gravitation chez Einstein :

énergies

Et le vide ?

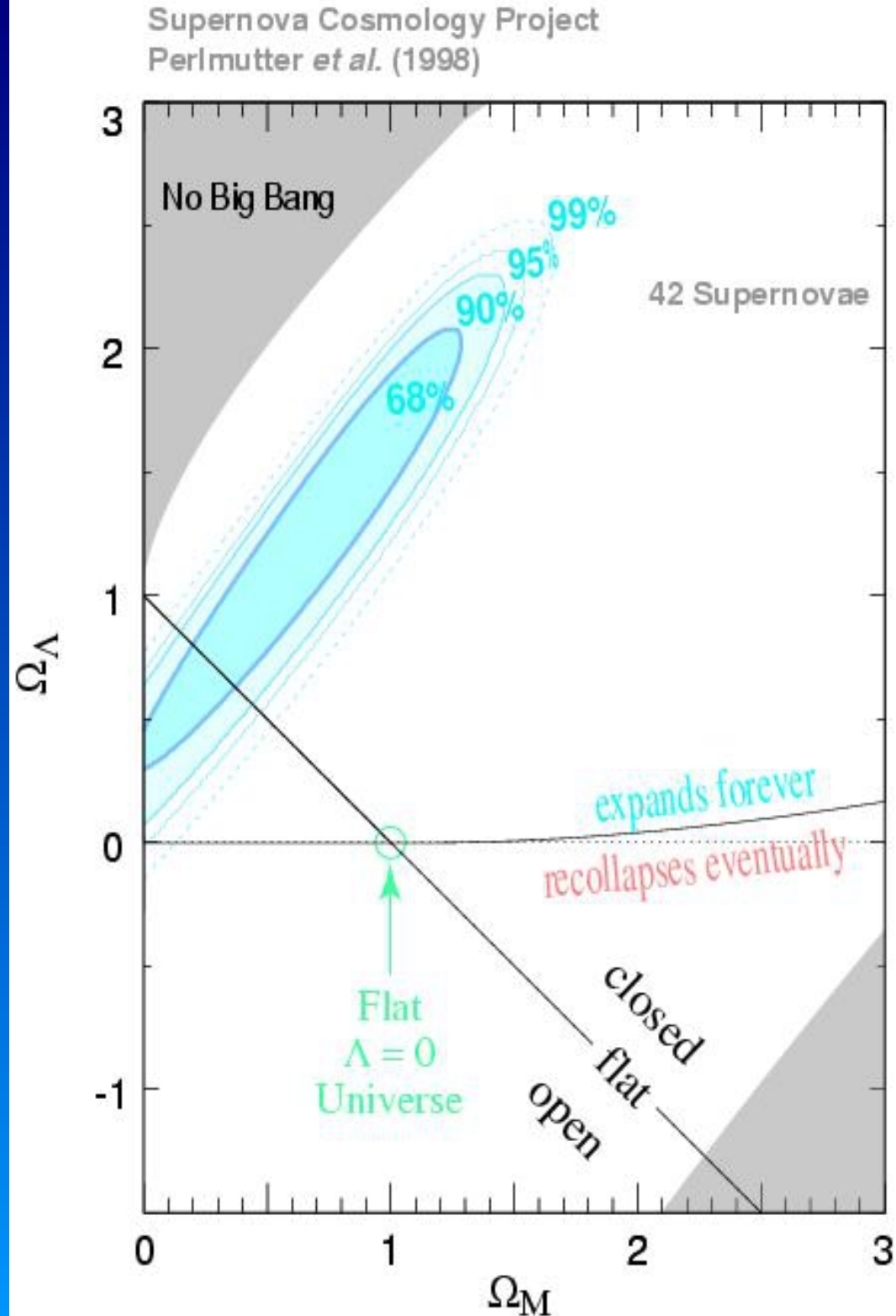
Le vide = la constante cosmologique

Supernovae distantes:

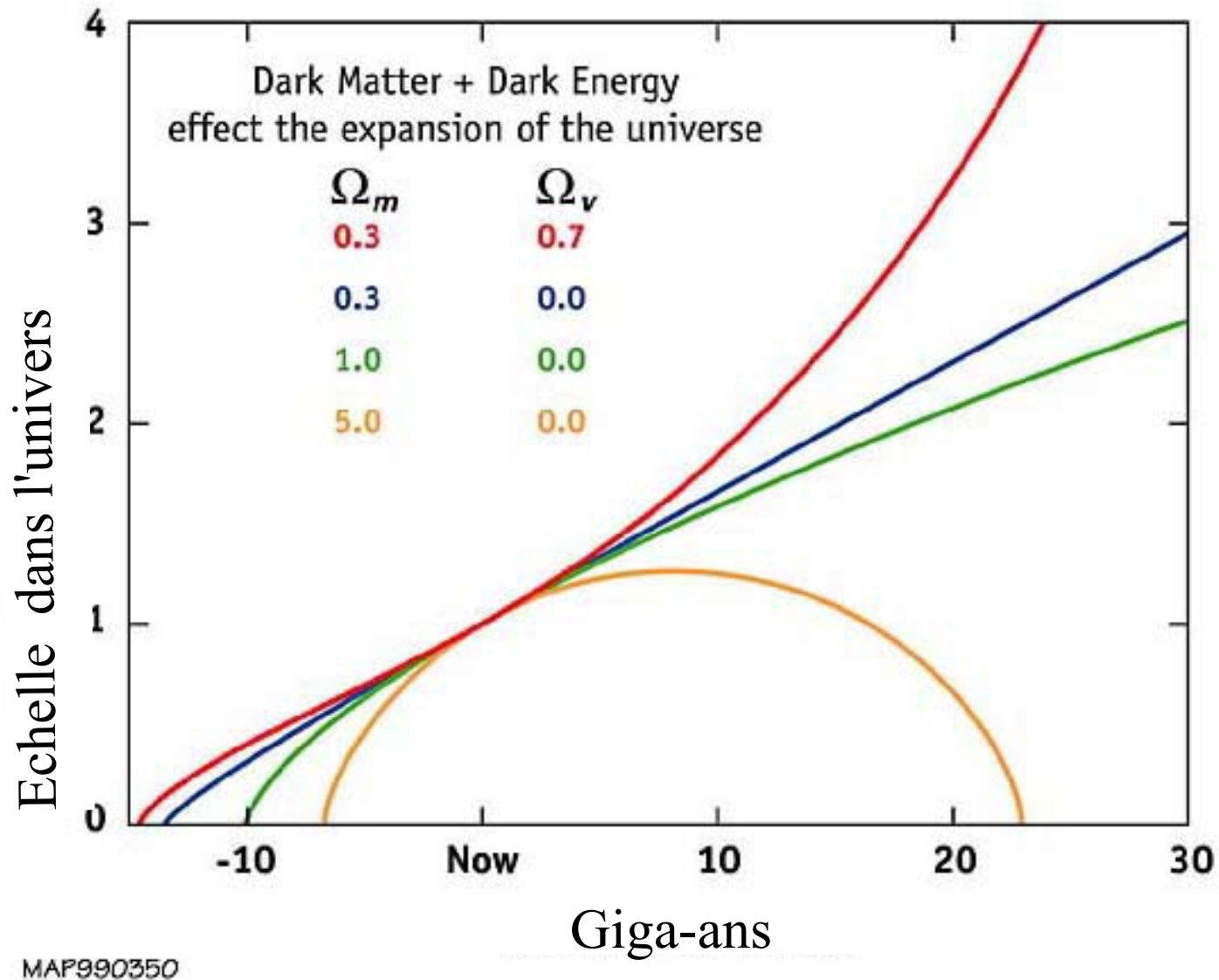
Conclusion

L'univers est accéléré...

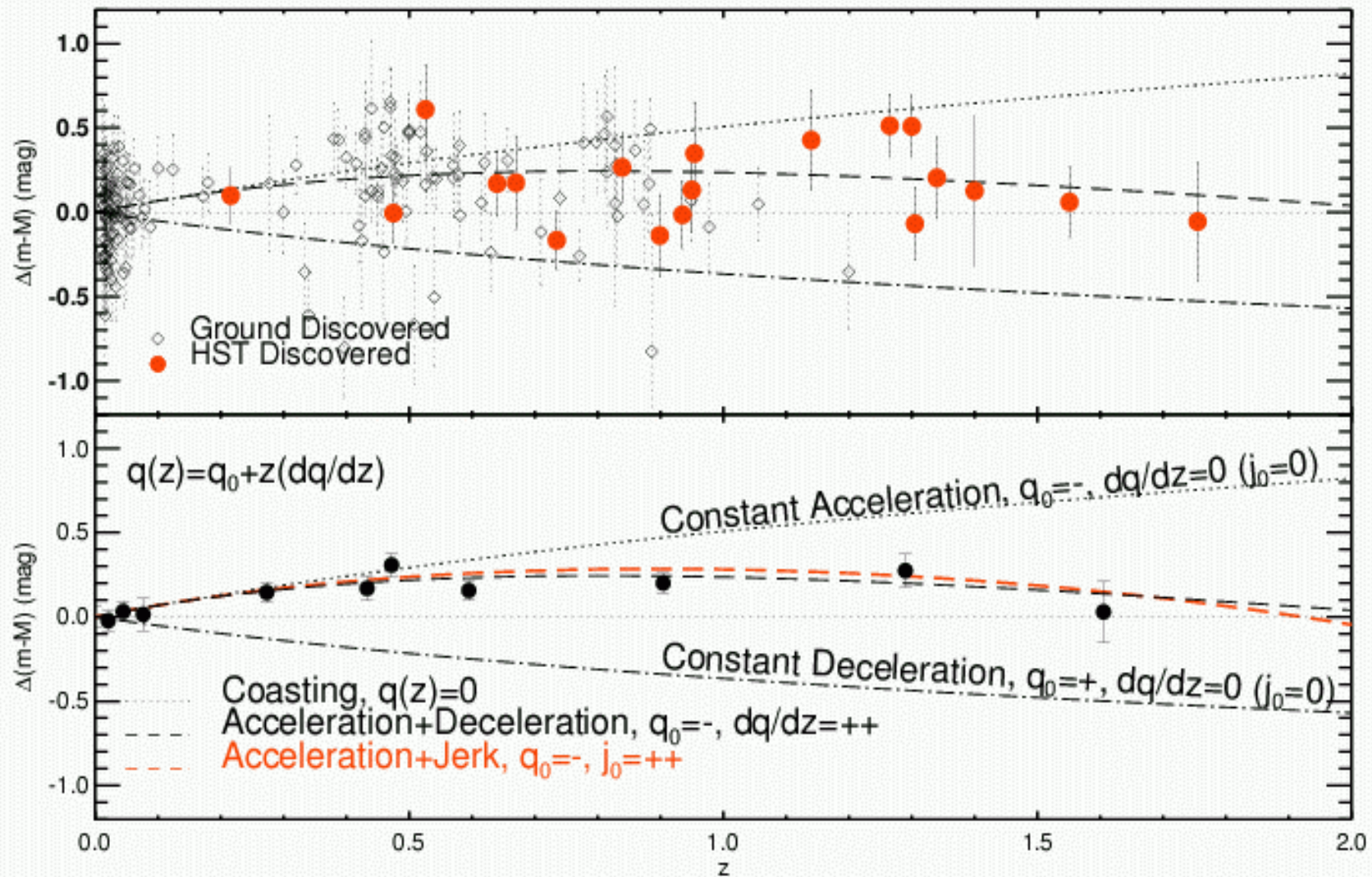
La
gravitation à l'échelle de
l'univers est répulsive!



L'expansion

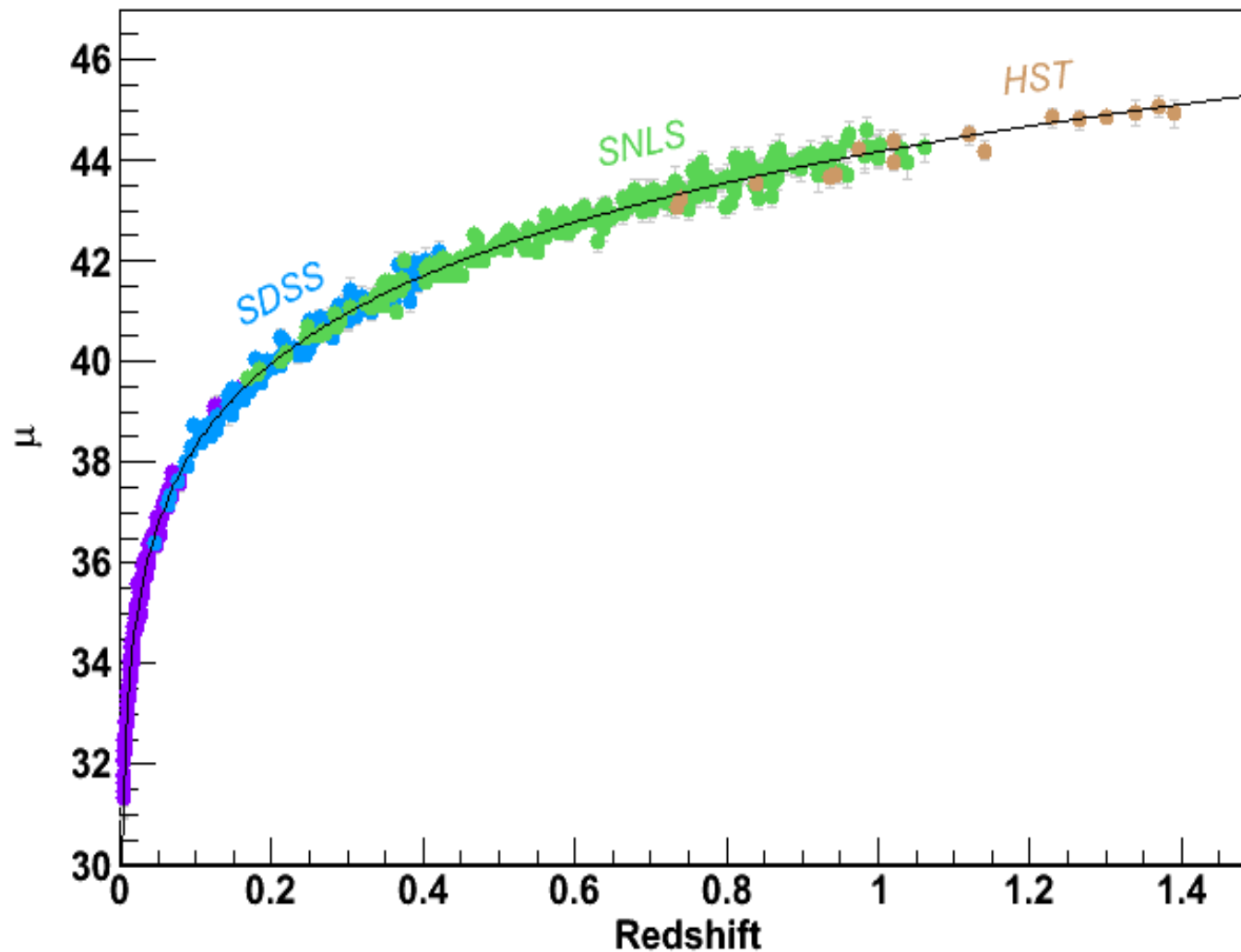


Toujours plus loin ...

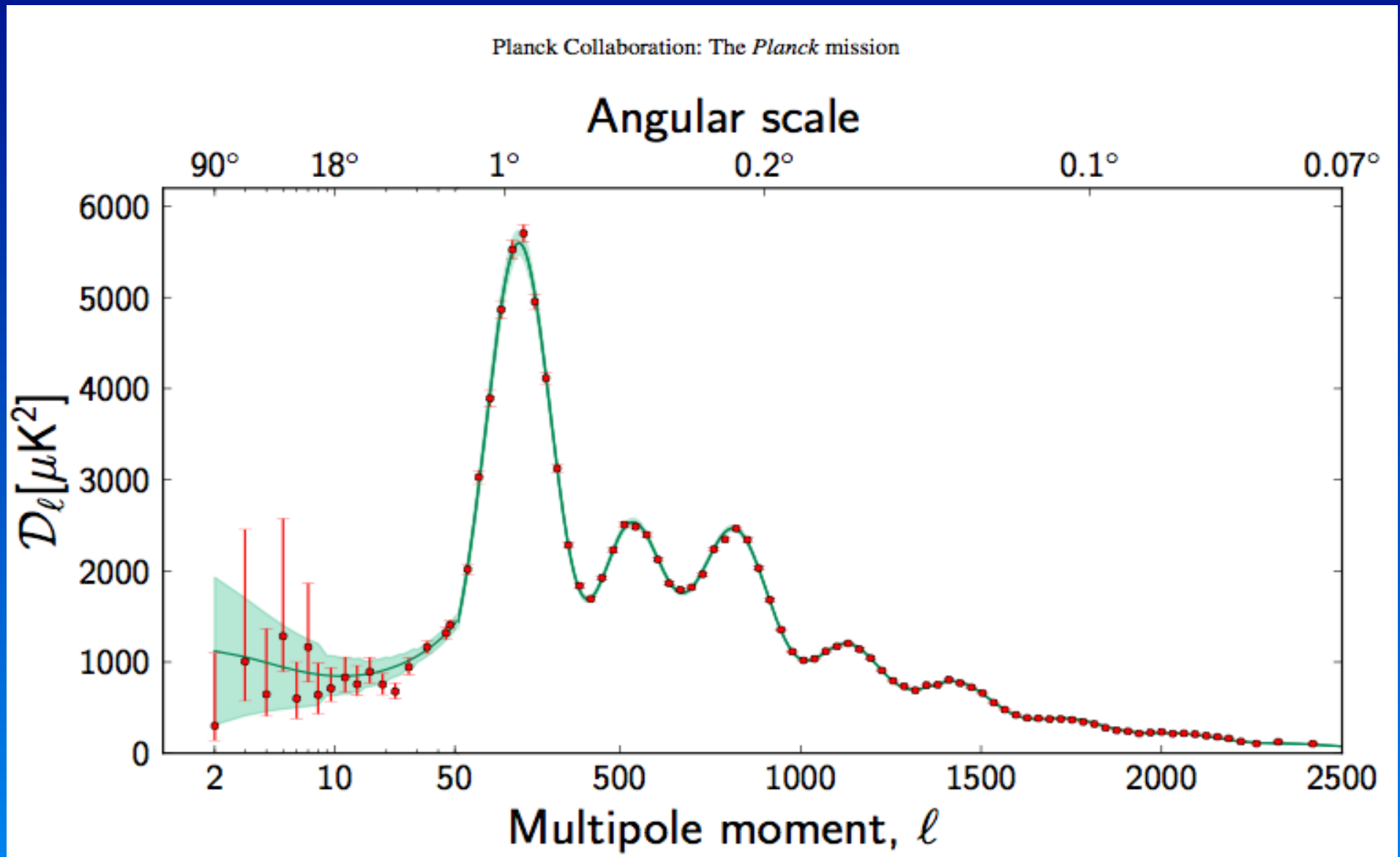


Toujours plus ...

SNLS-3 Hubble Diagram

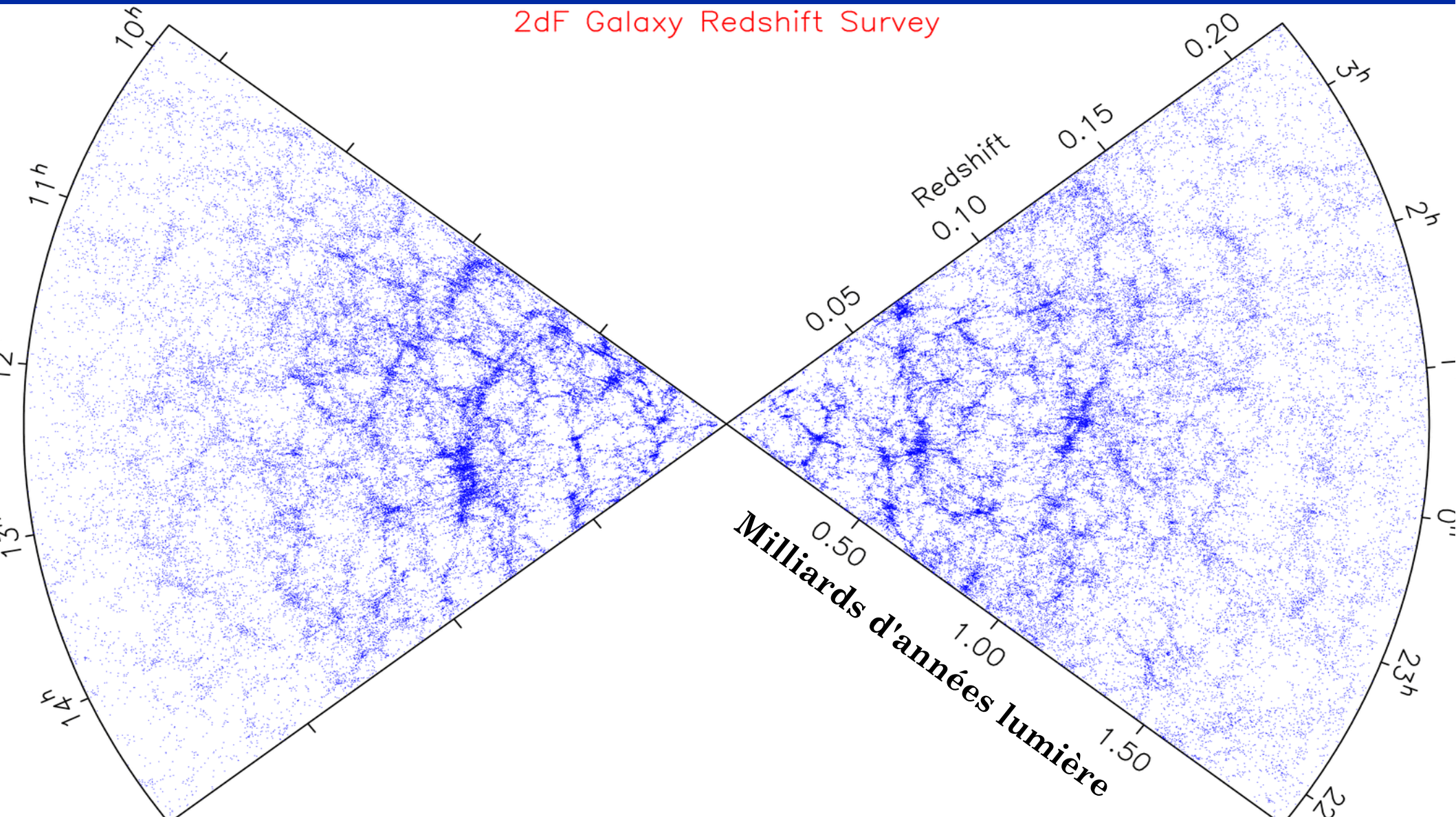


CMB



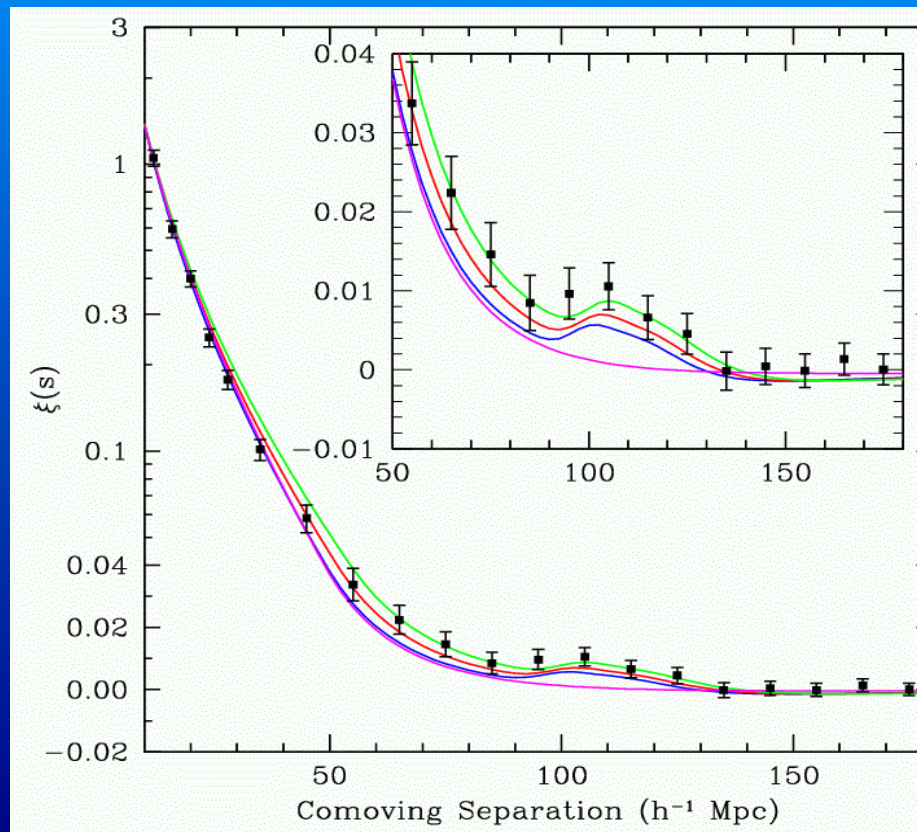
→ univers avec Énergie noire...

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

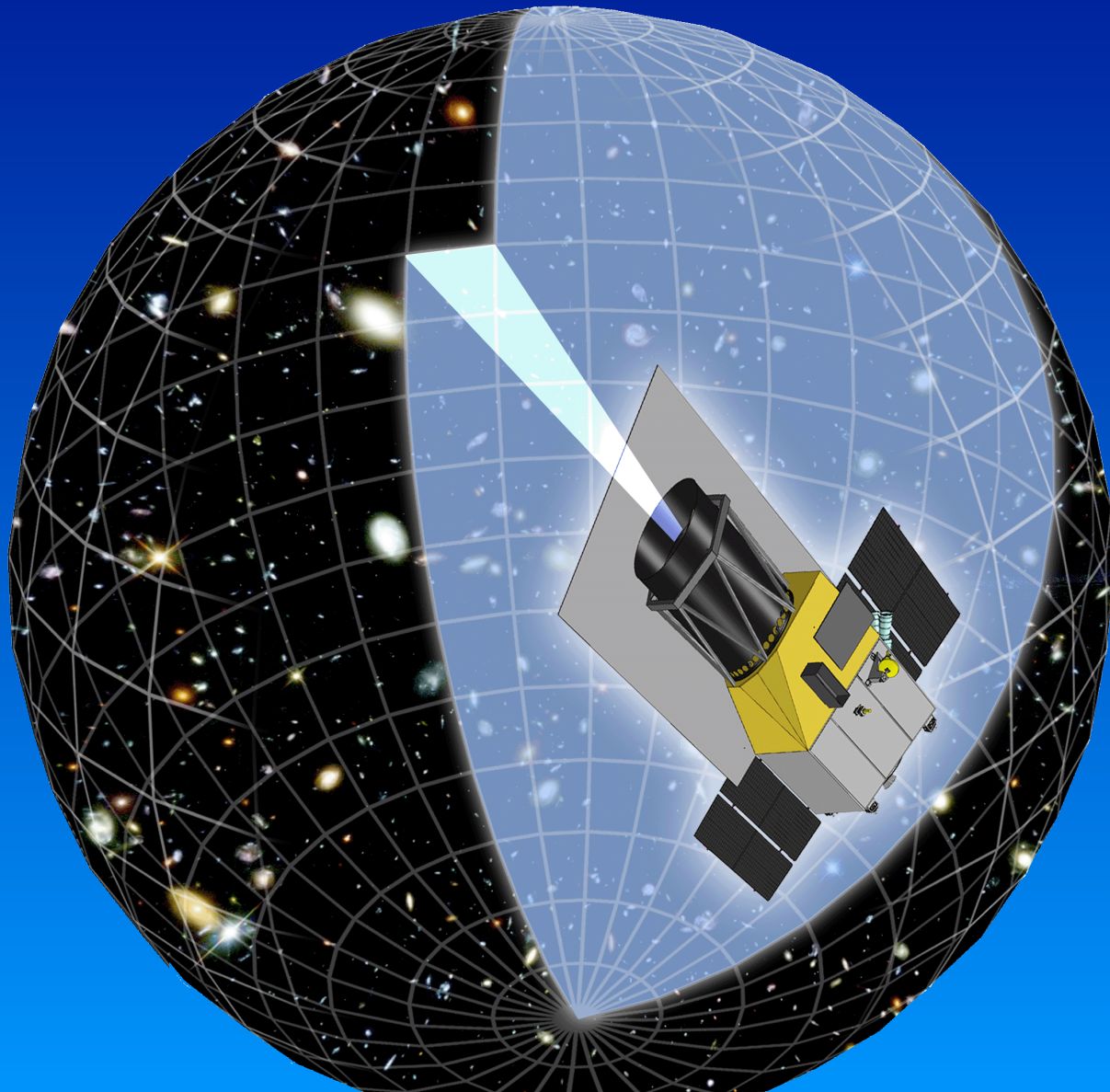
Backreaction :
effet NL des inhomogénéités

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

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

Sélection du projet de satellite EUCLID

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

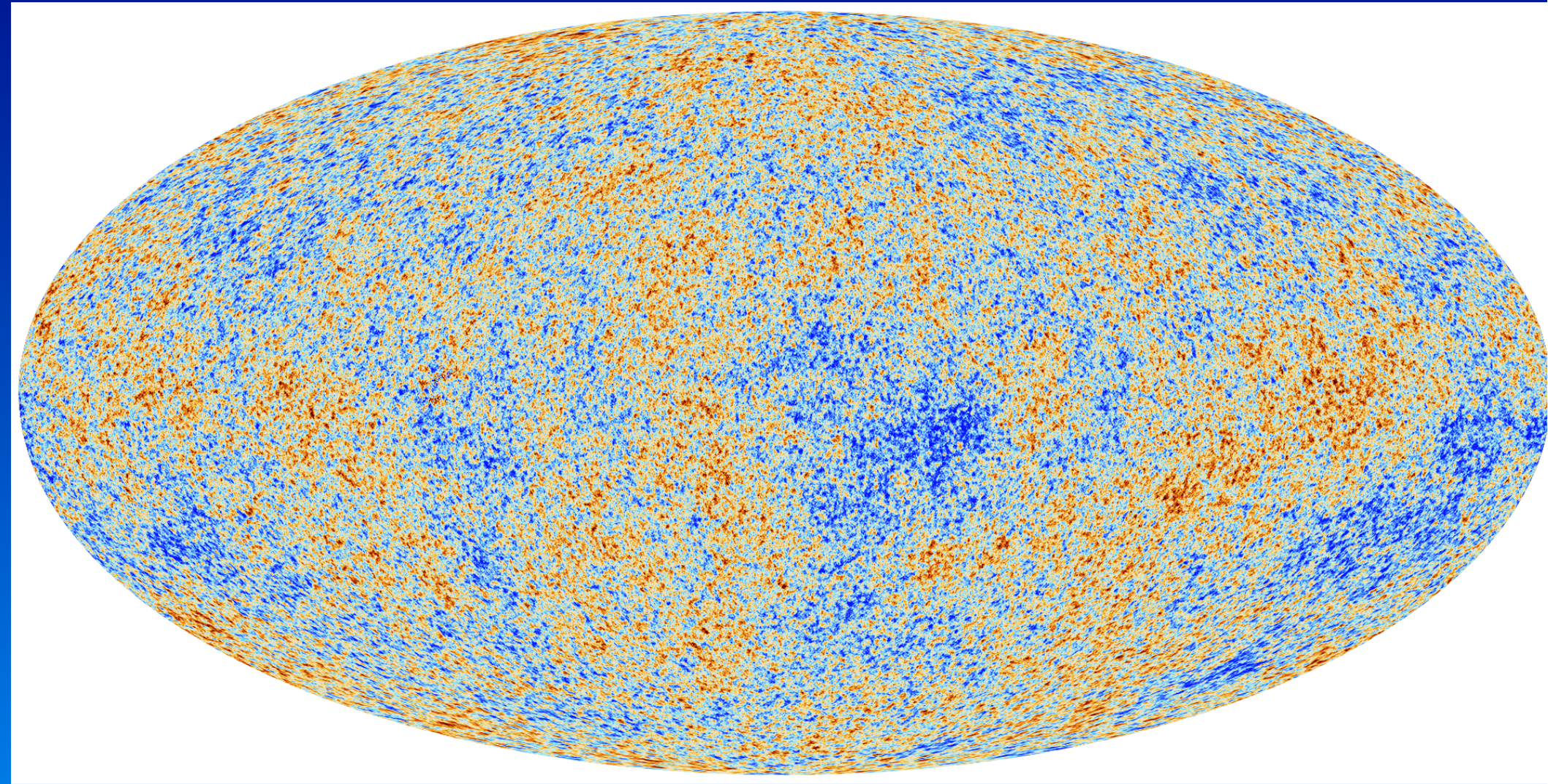


Sélection du projet de satellite EUCLID



NASA/ESA/MASSEY

CMB

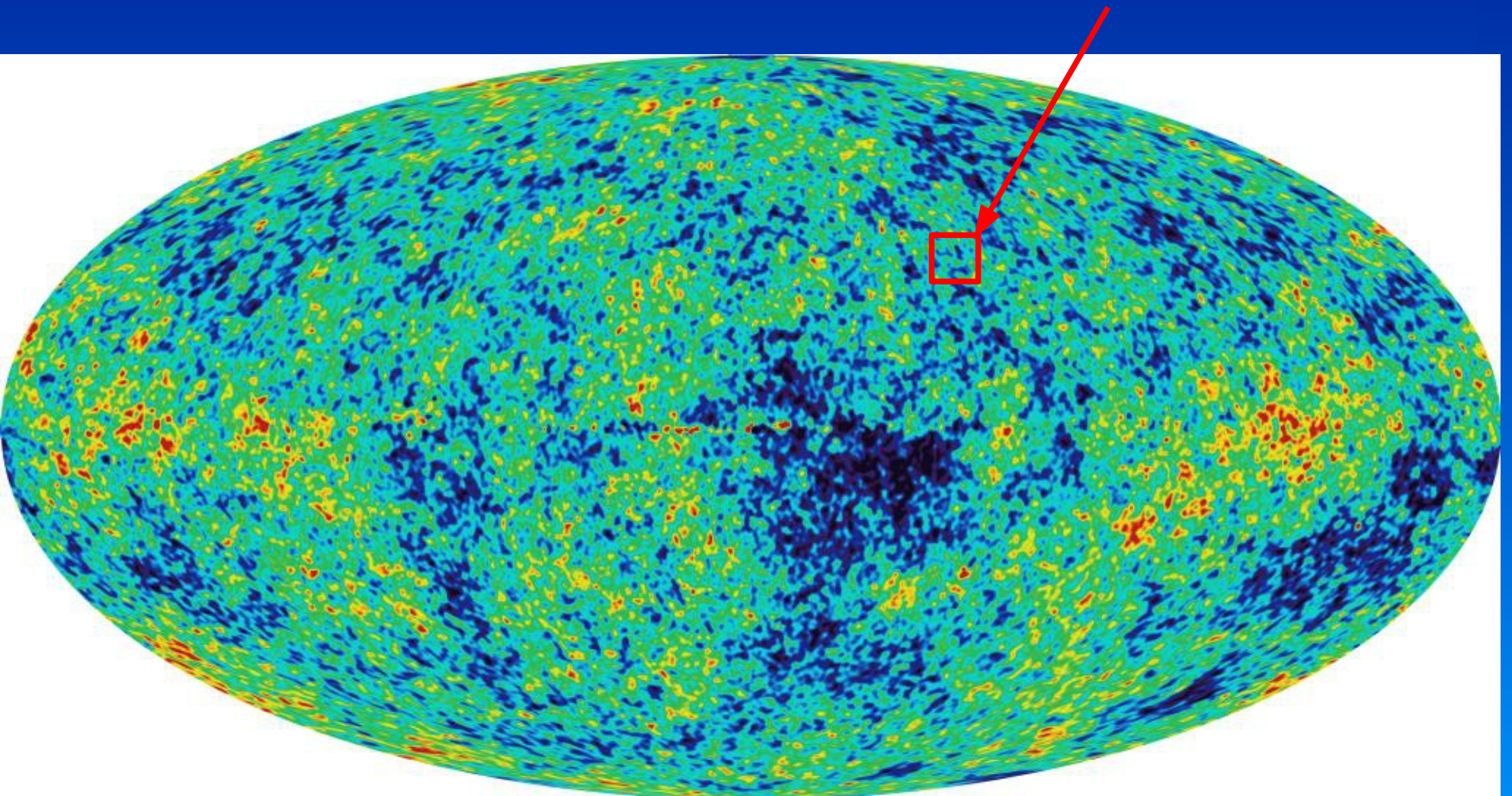
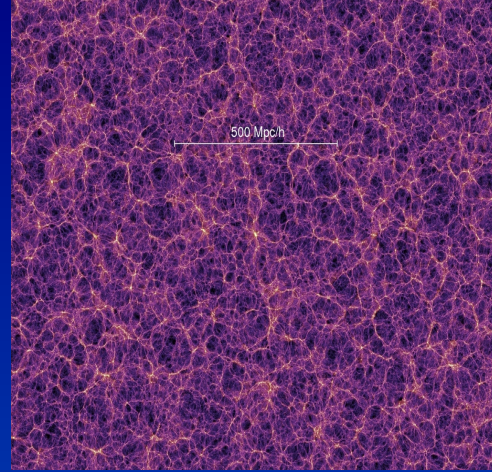


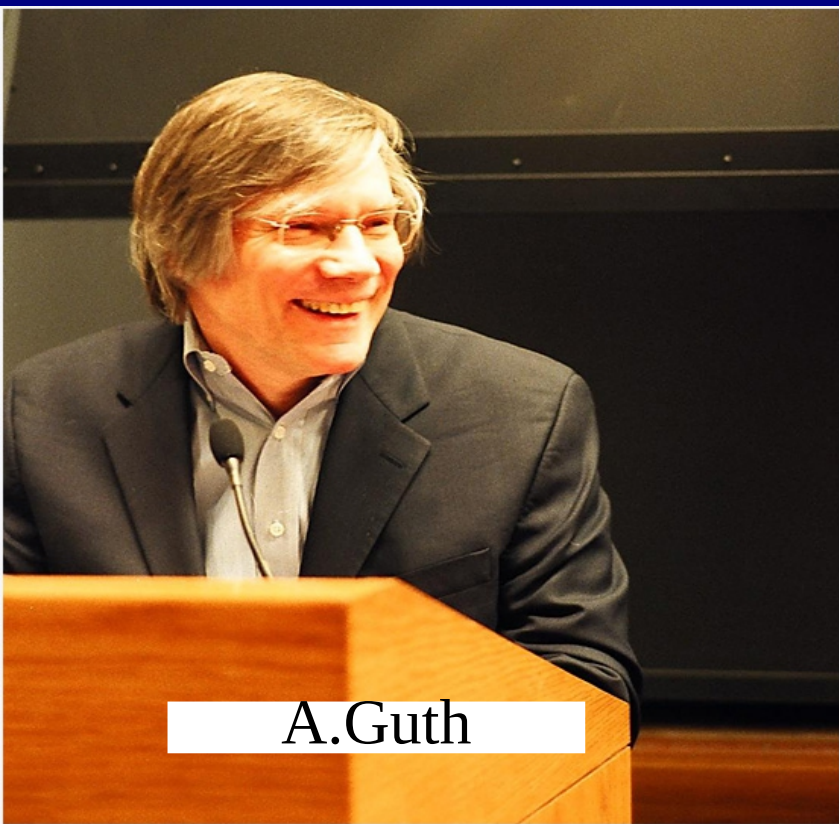
PLANCK

Nouvelle question:

Origine des fluctuations ?

Problème de la taille de l'horizon





Solution:
(1981)

Phase d'inflation quand
l'univers est âgé de $\sim 10^{-33}$ s
(c-à-d un millionième de milliardième de
milliardième de milliardième de seconde...)

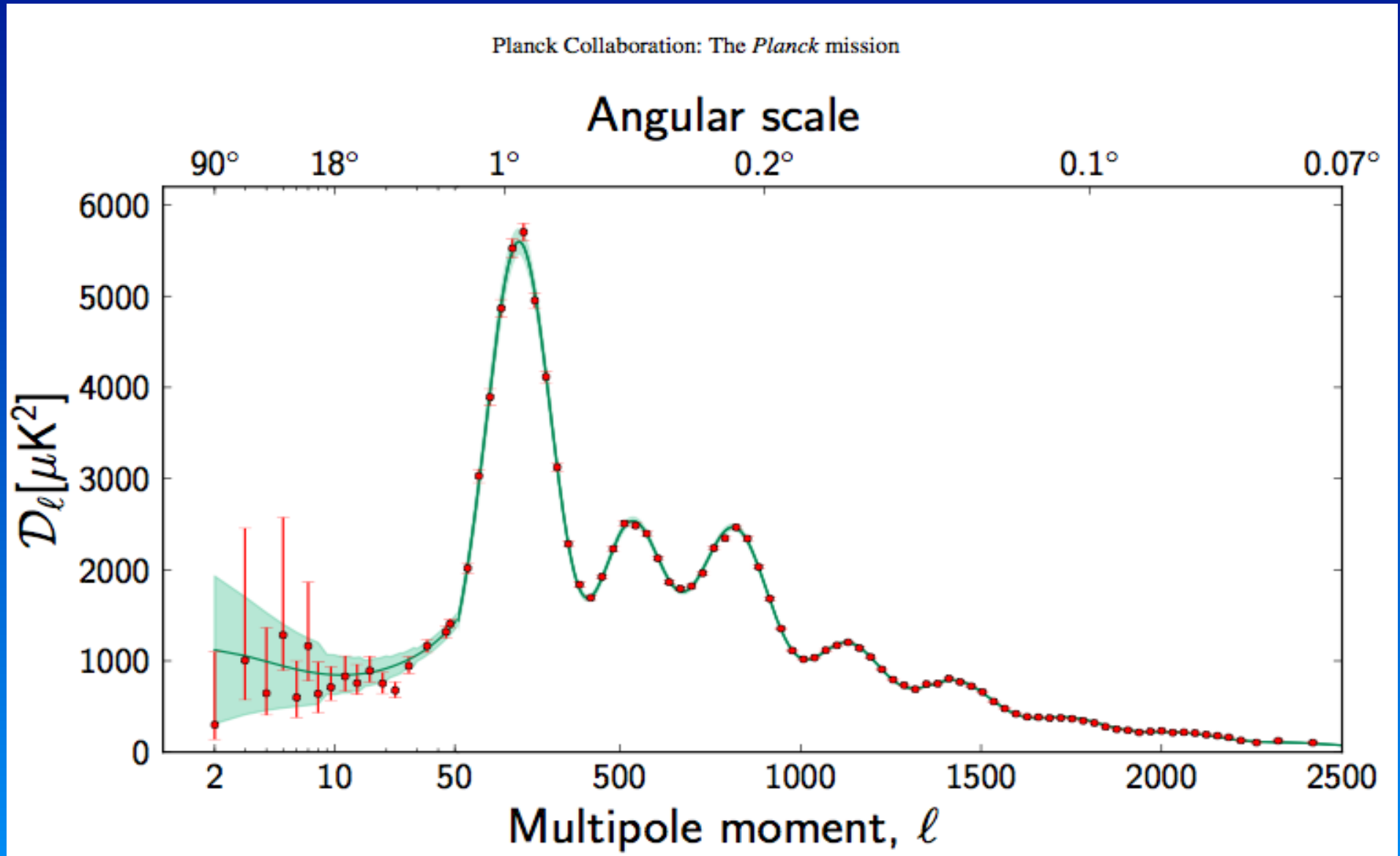
$E \sim 10^{15} \text{ GeV}$ (LHC : 10^4 GeV)

Fournit un mécanisme possible d'explication

Modèle prédictif!

- univers = plat
 - densité = densité critique
 - fluctuations primordiales...
- caractéristiques spécifiées
(forme = « spectre »)

CMB



Planck

Modèle prédictif!

- univers = plat
 - densité = densité critique
 - fluctuations primordiales...
- caractéristiques spécifiées
(forme = « spectre »)
- } ✓
- } ✓

Prédiction spécifique :

Inflation produite par des
fluctuations quantiques

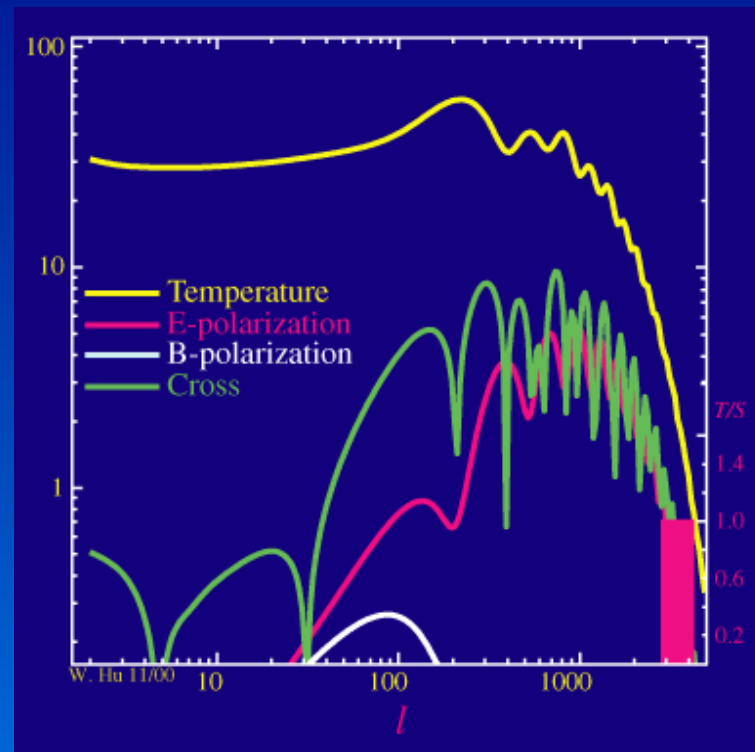
Matière

+

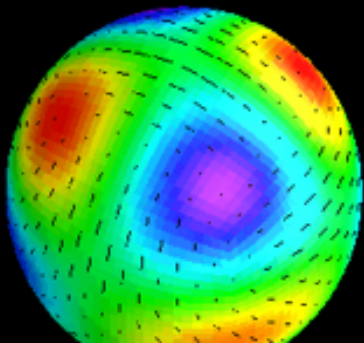
Courbure

(càd ondes gravitationnelles)

Prédiction spécifique :



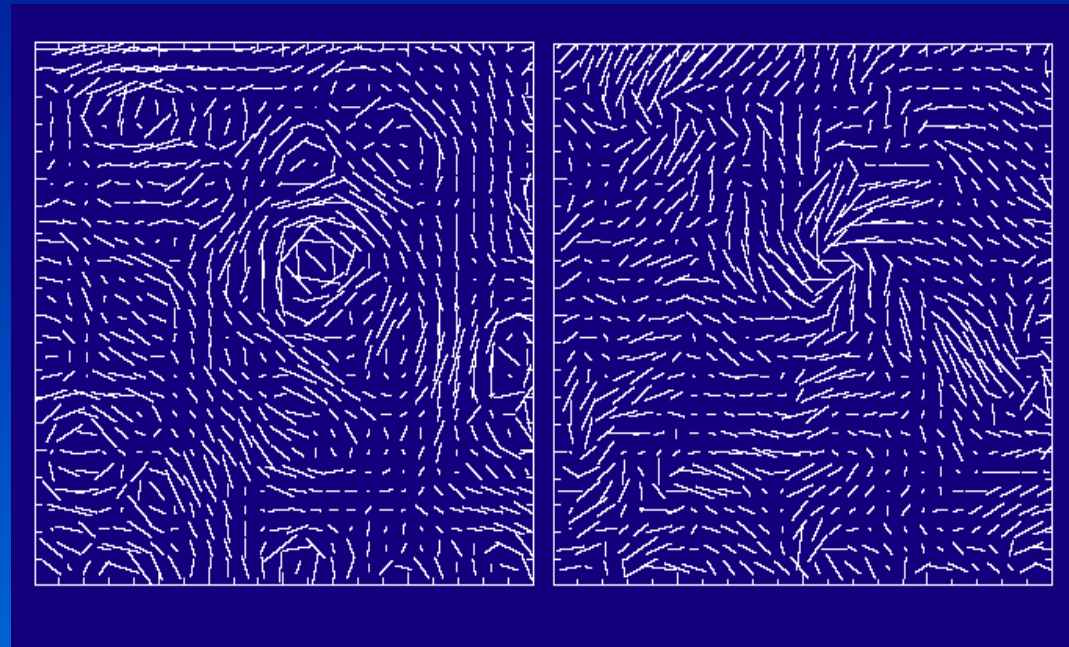
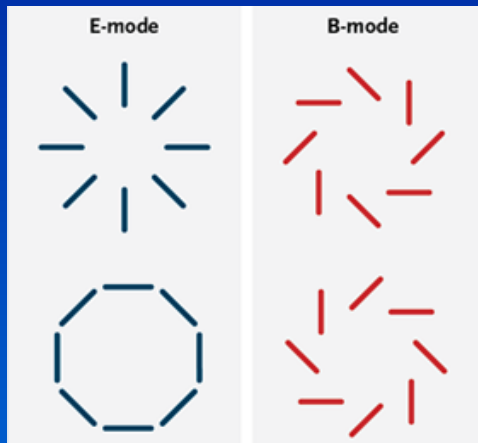
Rapport T/S (r)



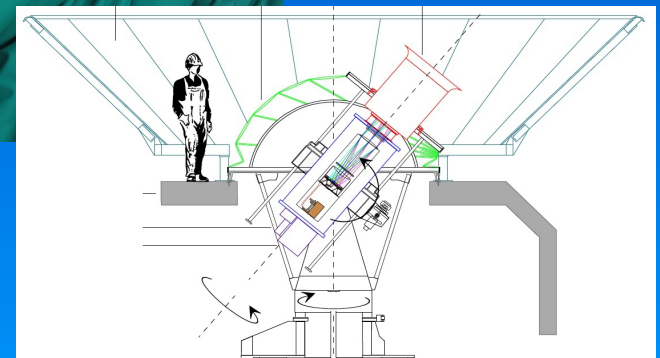
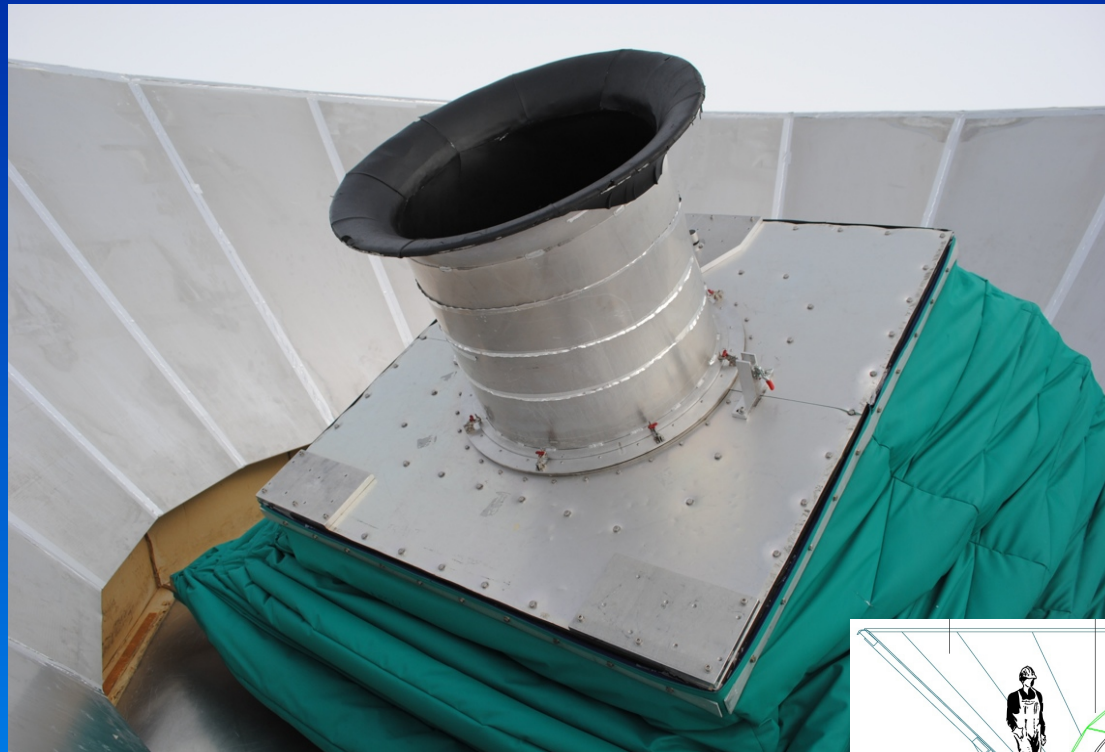
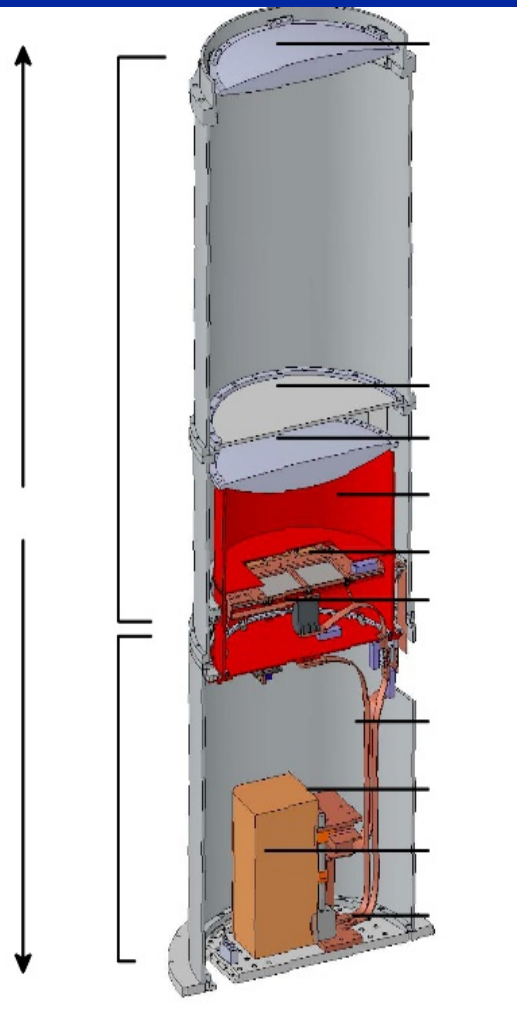
Especially, measurement of B-modes of the CMB polarization will provides direct evidence for gravitational waves and hence inflation.

Scattering coupled with tensor modes causes **B-modes** as shown on the left. Though B-modes are the most direct test of inflation, their signal is expected to be extremely small ($<0.1\text{mK}$), which will be a very challenging observation.

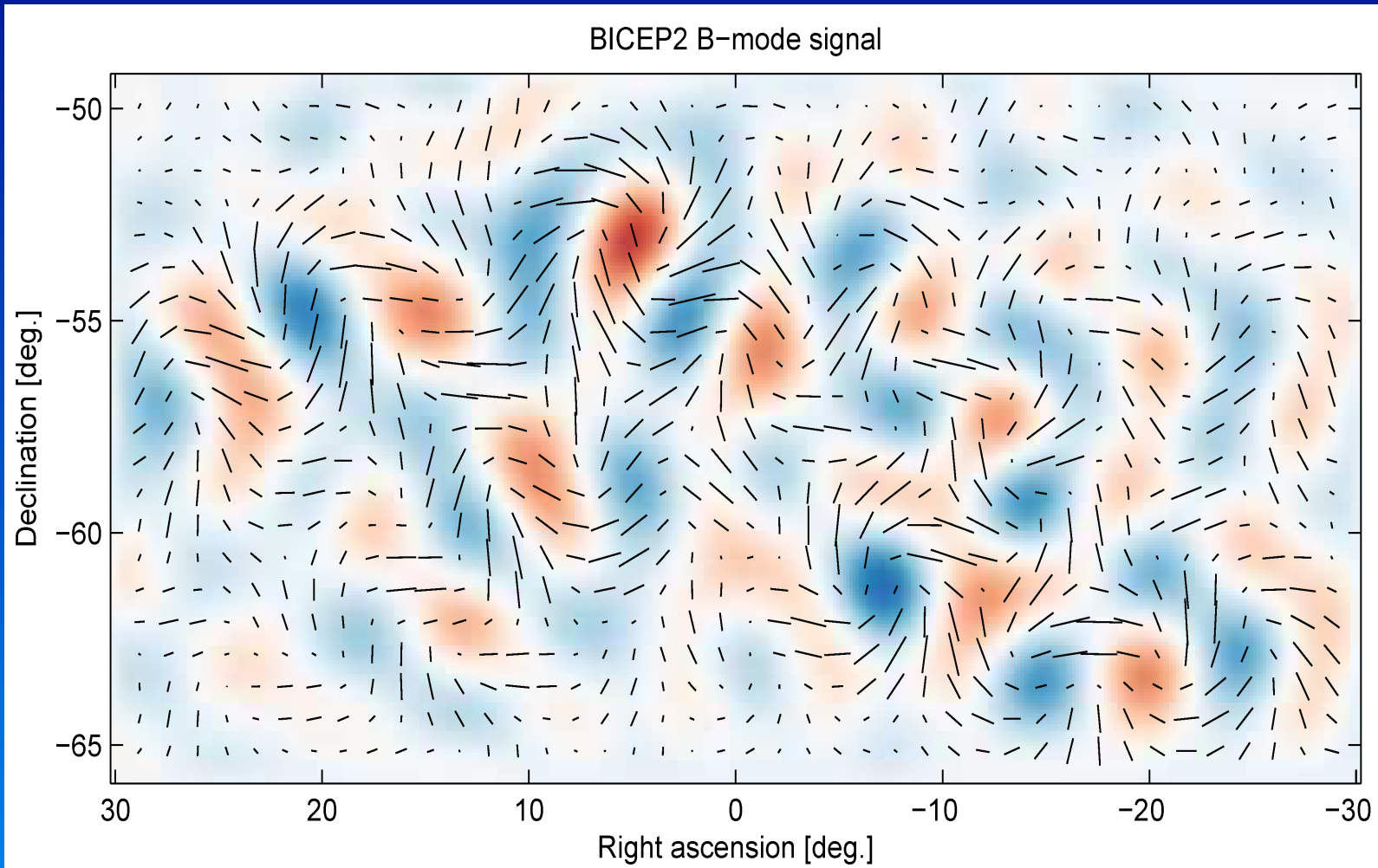
Prédiction spécifique :



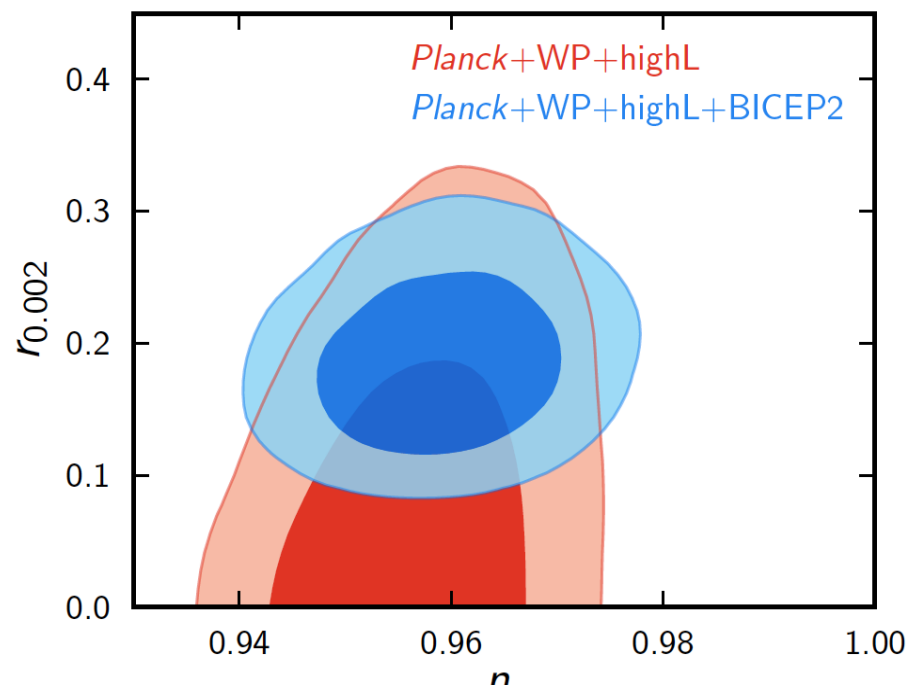
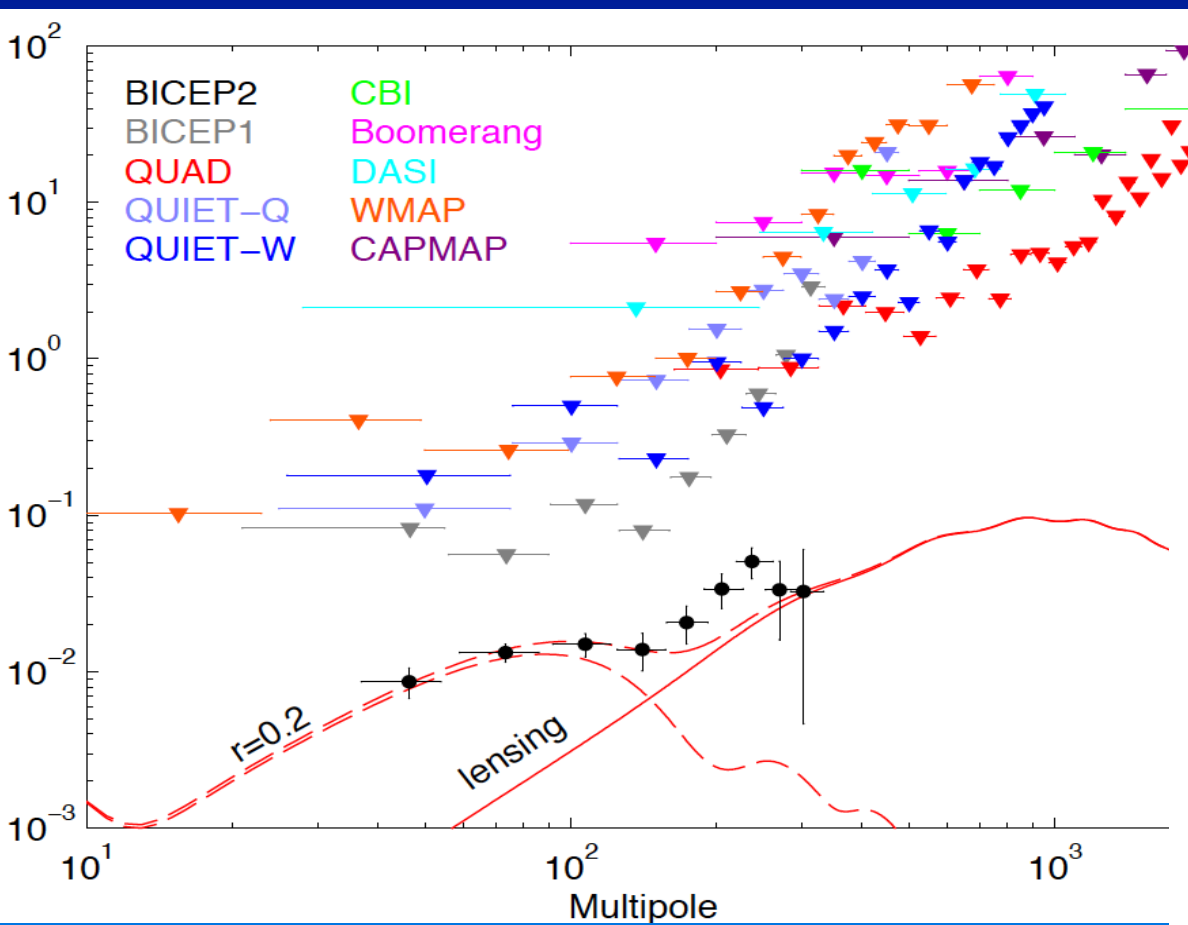
BICEP2



BICEP2



BICEP2



**Les modes B de la polarisation
sont une prédiction assez spécifique
des modèles d'inflation...**

**et ils semblent avoir été trouvés
(1 fréquence, 500 deg², ...)**

Ouverture « expérimentale » vers
la physique à $2 \cdot 10^{16}$ GeV...

bicepkeck.org/

Conclusion

Nouvelles certitudes:

⇒ Nouveaux éléments en physique:

- matière noire non-baryonique

- géométrie $\sim$ plane de l'univers $\leftrightarrow$ Inflation

Conclusion

Nouvelles questions:

- Nature de la matière noire
- « Énergie noire »



- Nouvelle physique à haute énergie