

Histoire de l'Univers

Un tour d'horizon de la cosmologie



Mathieu Langer
Institut d'Astrophysique Spatiale

A l'aube de la Cosmologie moderne

Début du 20^e siècle

- L'Univers est immuable et éternel
- Son étendue (univers visible) se résume à la Voie Lactée
- Possibilité envisagée d'autres « Univers – Îles » (cf. I. Kant, P.S. de Laplace)

Le Grand Débat : 1920



Shapley vs. Curtis



Le Grand Débat

- Curtis :

- Convaincu que la Voie Lactée est petite (10 kpc)
- Place le Soleil au centre de la Voie Lactée
- Certain que les « nébuleuses spirales » sont **externes** à la Voie Lactée

- Shapley :

- Persuade que la Voie Lactée est grande (100 kpc)
- Place le Soleil en périphérie de la Voie Lactée
- En dehors de la Voie Lactée : **rien** !

Citation de H. Shapley

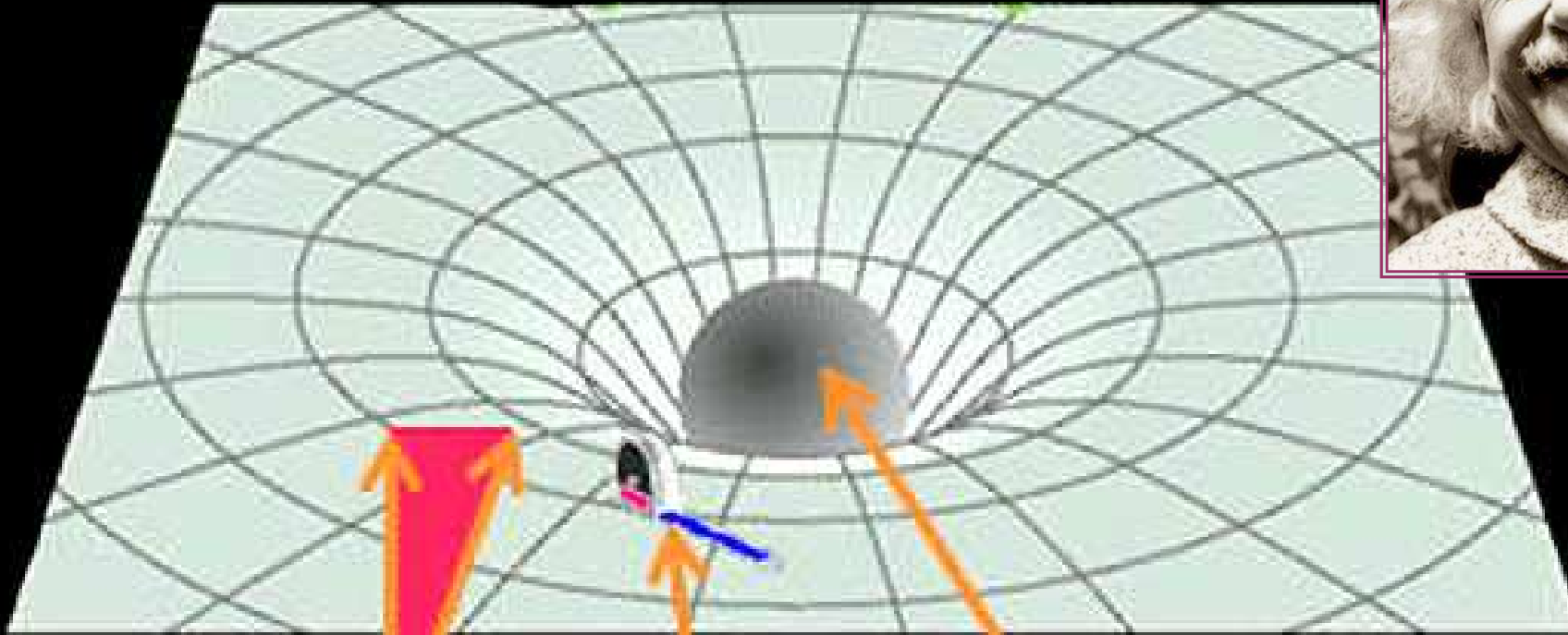
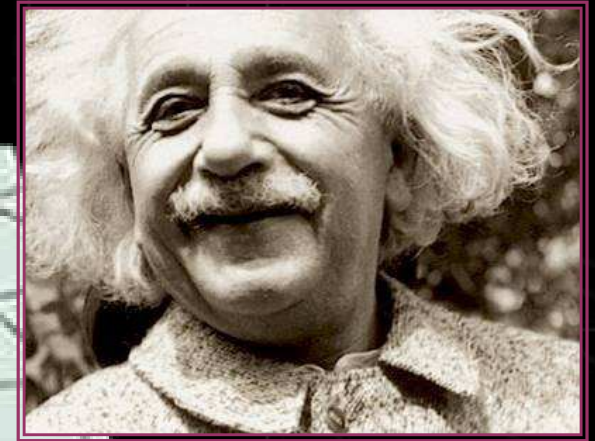
« From the new point of view our galactic universe appears as a single, enormous, all-comprehending unit [...] The adoption of such an arrangement leaves us with no evidence of a plurality of stellar 'universes'. [...] The hypothesis that spiral nebulae are separate galactic systems now meets with further difficulties.» (1920)

Mais pendant ce temps, du côté de la théorie...

La Révolution Générale...



La Relativité Générale !



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = - \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

*Die Feldgleichungen
der Gravitation, 1915*

Variation de la
courbure
de place en place

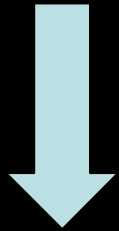
Mesure des distances
étant donnée la courbure R
en chaque point

Matière et énergie
courbent l'espace

Application de la Relativité Générale à l'Univers entier : 1917

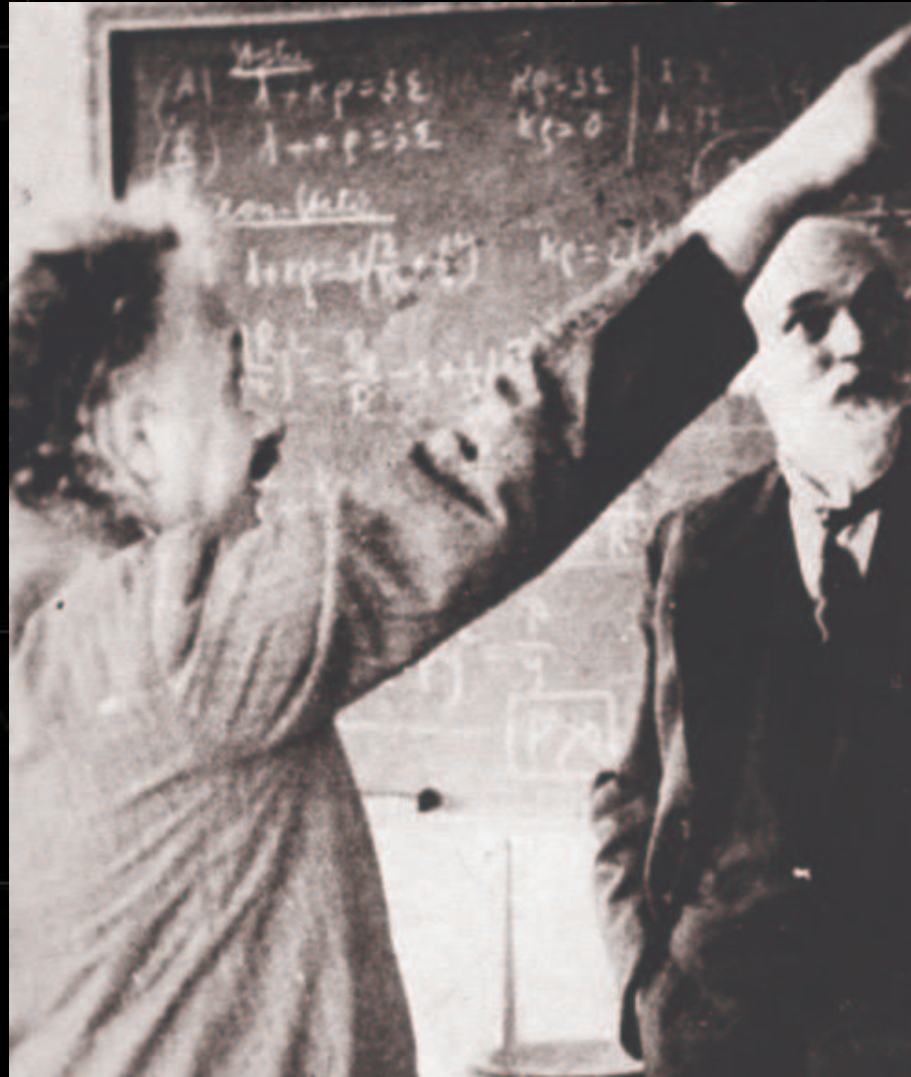
Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie

Albert Einstein



Univers plein de matière
courbure induite
par la masse,

Constante Cosmologique
pour le rendre statique!



Univers vide,
courbure non-nulle,
en expansion!!



Willem de Sitter

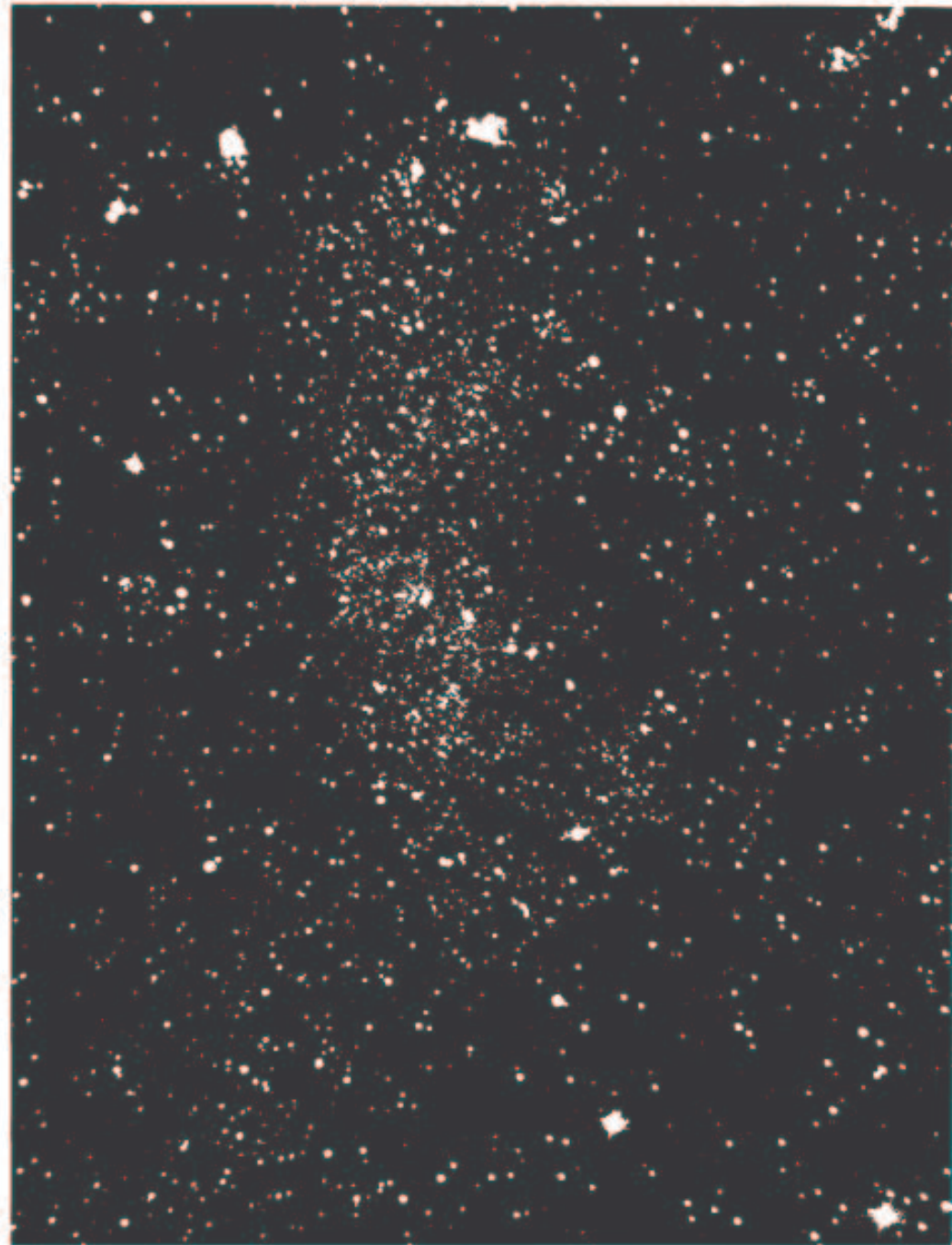
Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences. Third paper



Nébuleuses
=
Galaxies!

(1925)

E



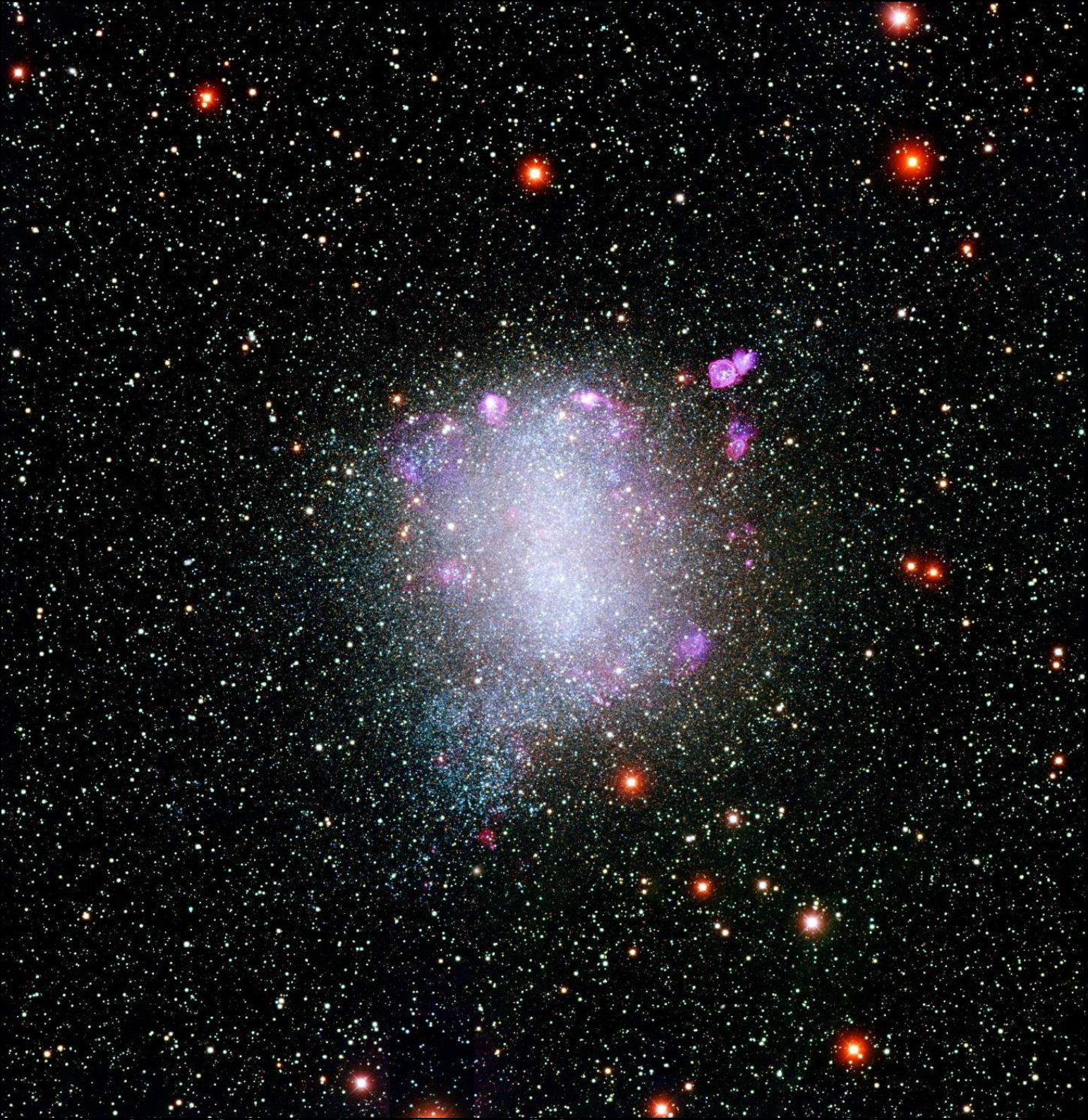
W

N.G.C. 6822

Photographed at the 42-foot focus of the 100-inch Hooker telescope on July 10, 1923. Exposure $3^{\text{h}}30^{\text{m}}$ on a Seed 30 plate. Enlargement 2.5 times original negative

E. P. Hubble, 1925, ApJ, 62 409
N.G.C. 6822, A Remote Stellar System

CERRO TOLOLO INTER-AMERICAN OBSERVATORY
P. Massey, G. Jacoby, K. Olsen, C. Smith & T.A. Rector, 2000

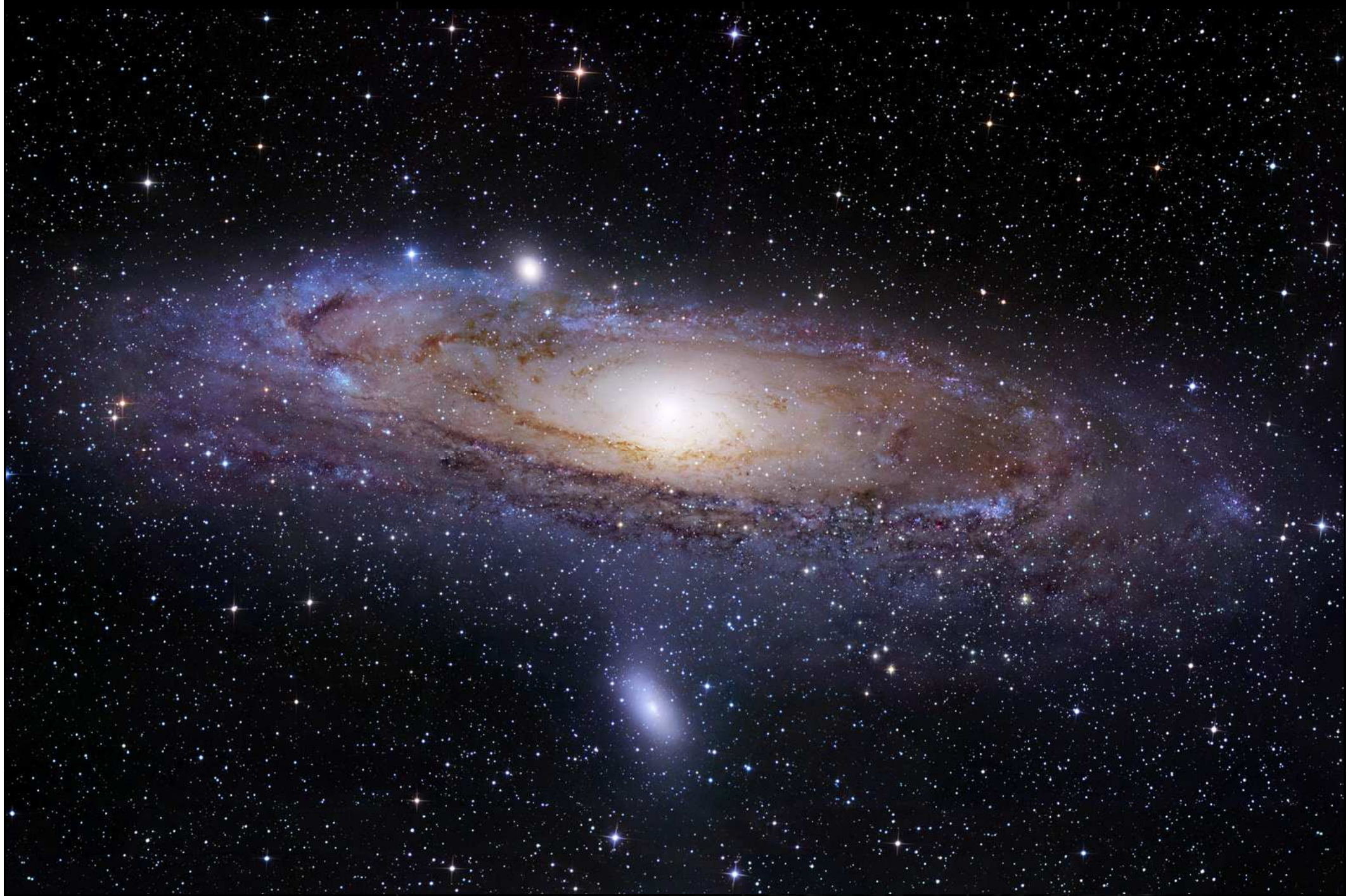


A wide-field astronomical image of the Sombrero galaxy (Messier 104). The galaxy is seen from an edge-on perspective, showing a bright, glowing central core and a prominent, dark, dusty ring that encircles the core. The galaxy is set against a dark, star-filled background. The image is framed by a grid of thin white lines.

Messier 104 – « Galaxie du Sombrero »



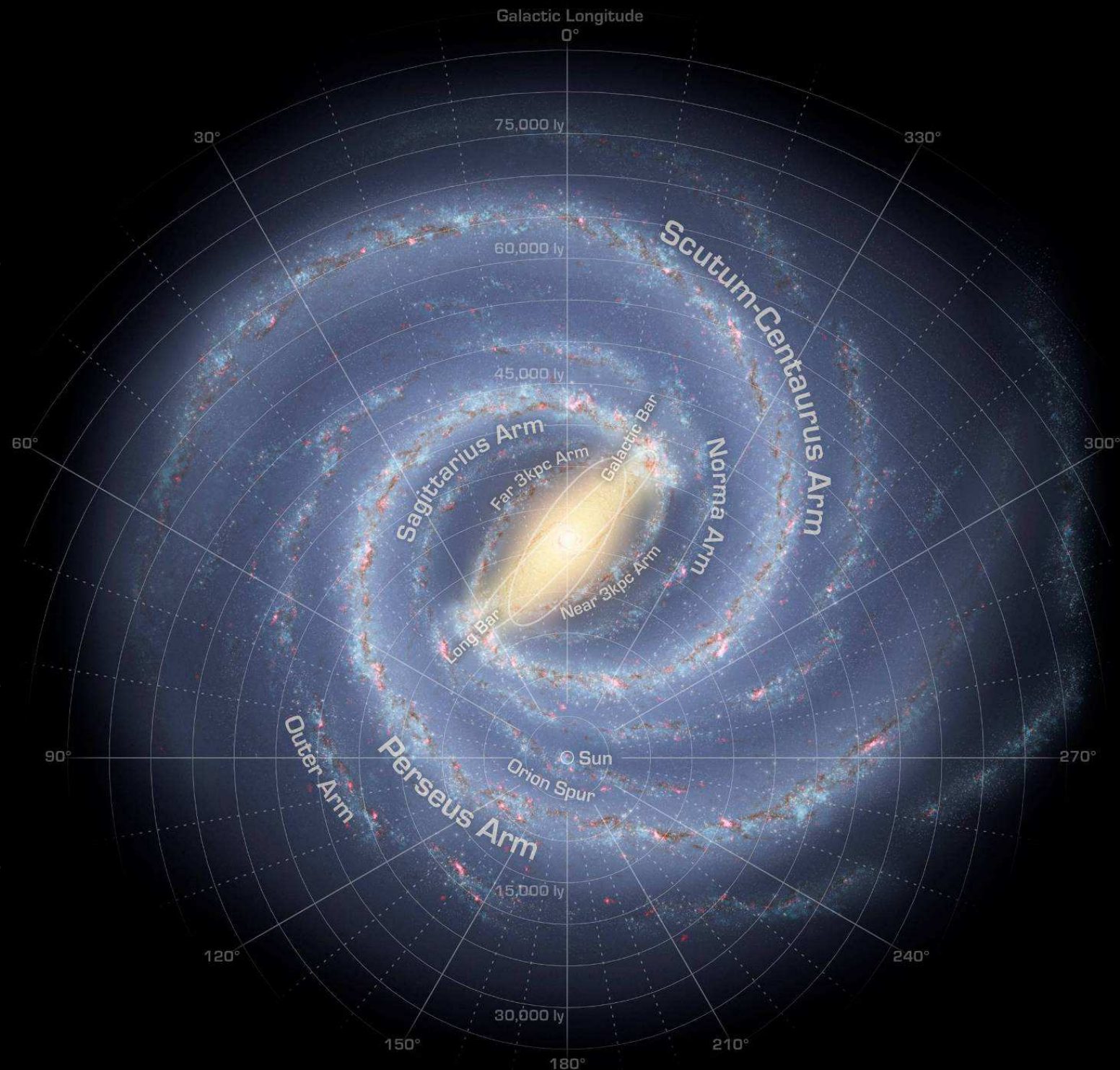
NGC 4565



Messier 31 – « Galaxie d'Andromède »



Messier 109

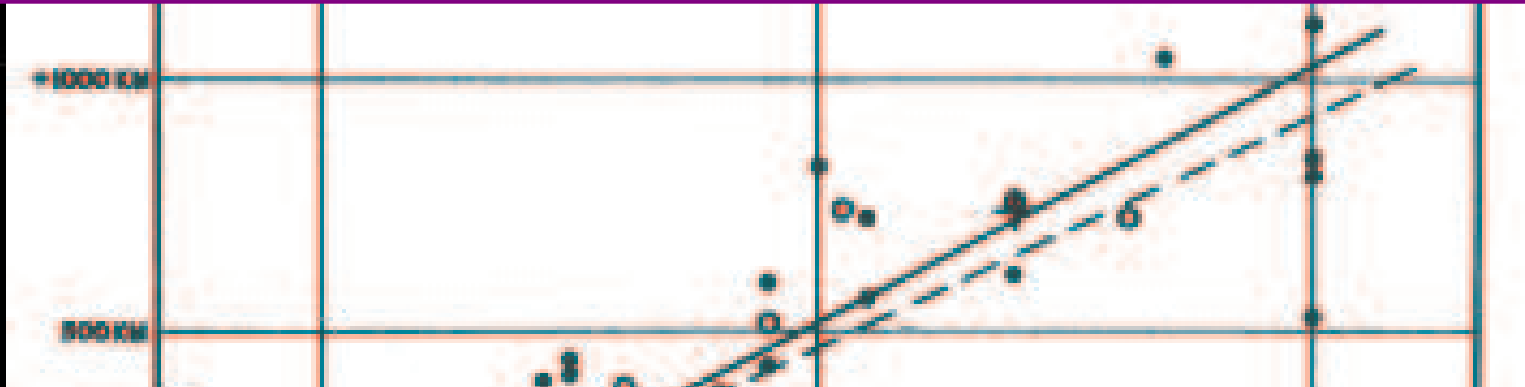


La Voie Lactée (vue d'artiste)

Récession des galaxies

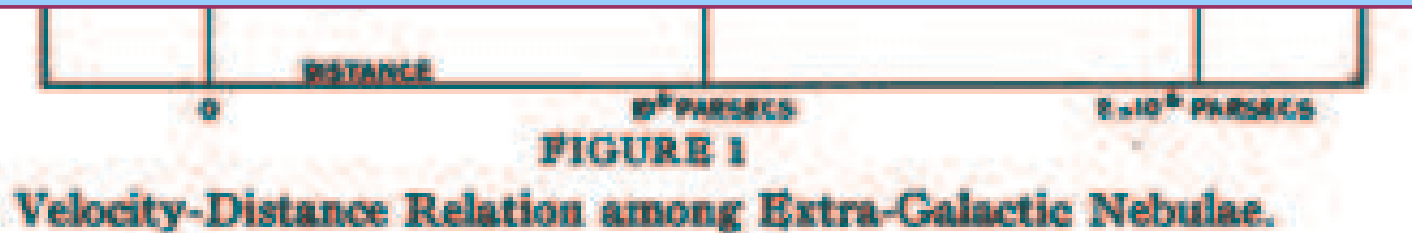
E. P. Hubble, 1929, PNAS, 168, 73

A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae



Interprétation : **expansion de l'univers** lui-même !

(Einstein, de Sitter, Friedmann, Lemaître, Milne, Robertson, Walker)

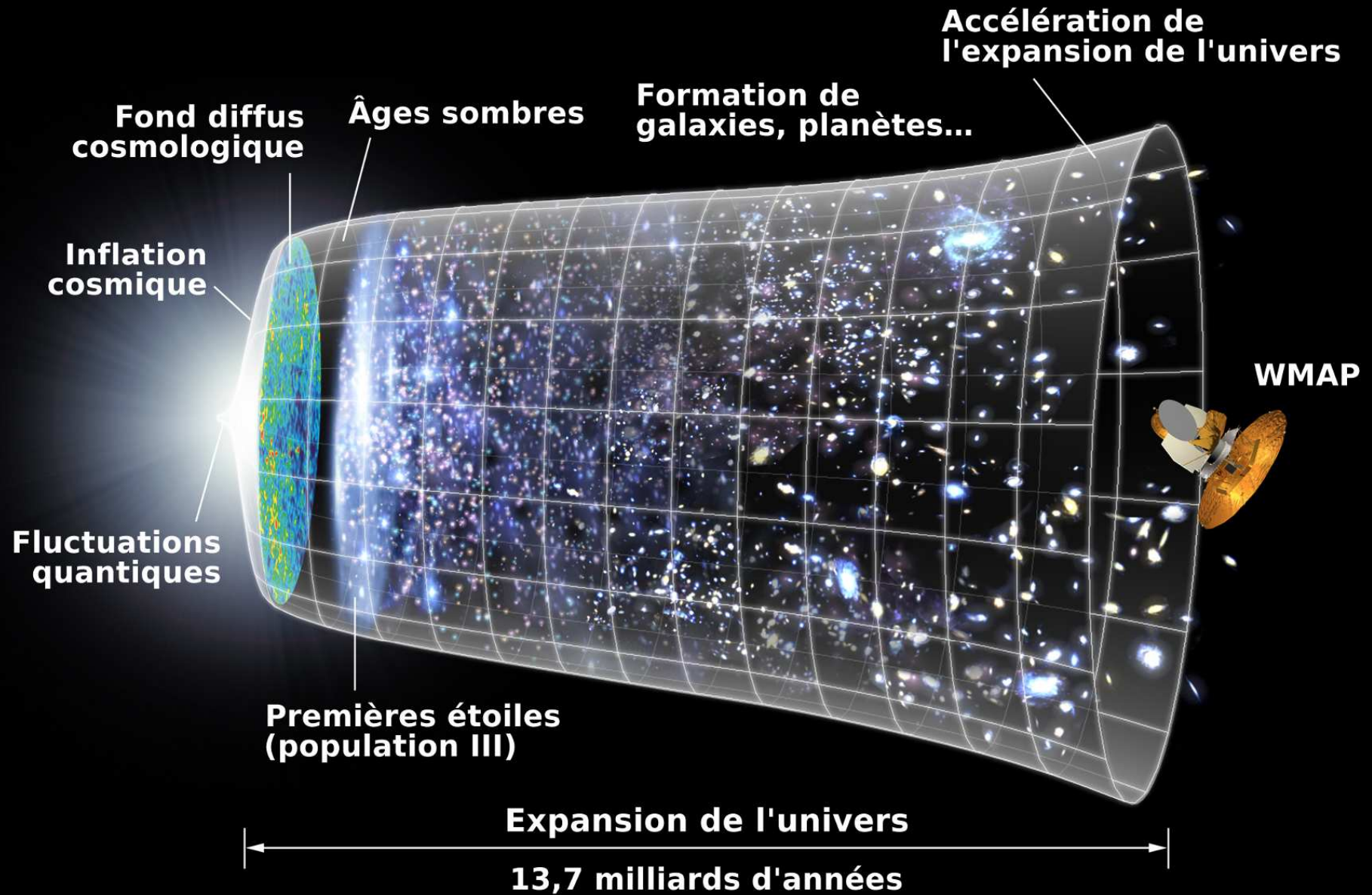


$$V = K \cdot D$$

avec

$$K = 500 \text{ km/s/Mpc}$$

Notre connaissance de l'Univers...



Description de l'Univers

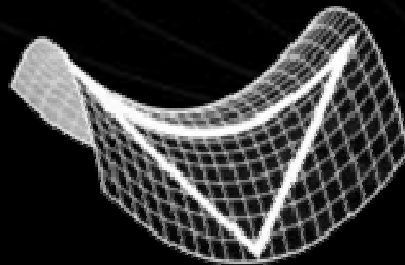
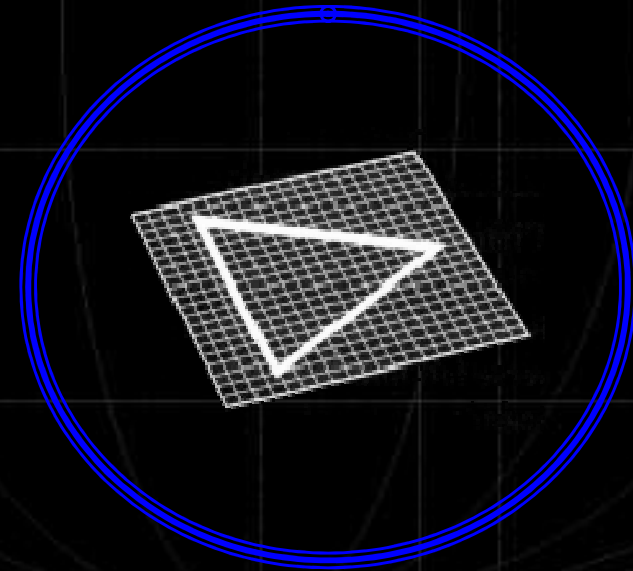
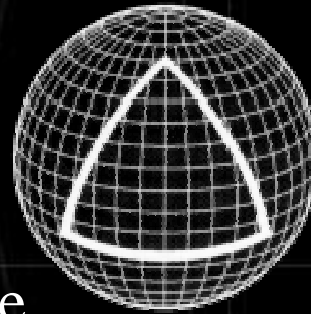
- **Géométrie globale**
- **Dynamique de l'expansion**
- **Contenu physique**

Géométrie de l'Univers

- Métrique de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dr^\mu dr^\nu = dt^2 - a^2(t) \left(dq^2 + f_\kappa^2(q) \left(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2 \right) \right)$$

$$f_\kappa(q) = \begin{cases} \sin q & \Leftrightarrow \text{sphérique} \\ q & \Leftrightarrow \text{plat} \\ \sinh q & \Leftrightarrow \text{hyperbolique} \end{cases}$$



Dynamique de l'Univers

- Évolution des distances :

Facteur d'échelle : $a(t)$

$$\frac{D(t_0)}{D(t_1)} = \frac{a(t_0)}{a(t_1)}$$

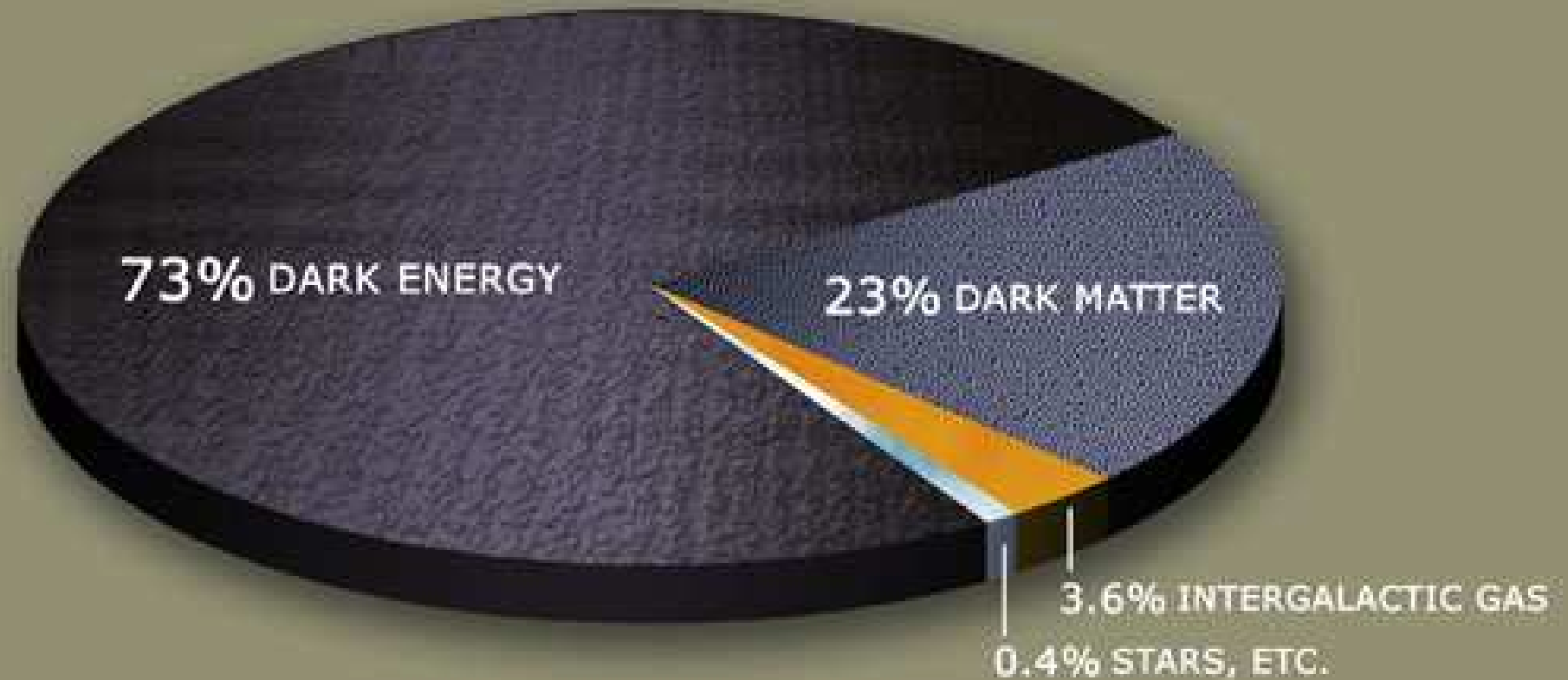
- Équations de Friedmann
 - Expansion

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho(t) \quad (\text{Univers euclidien})$$

- Accélération

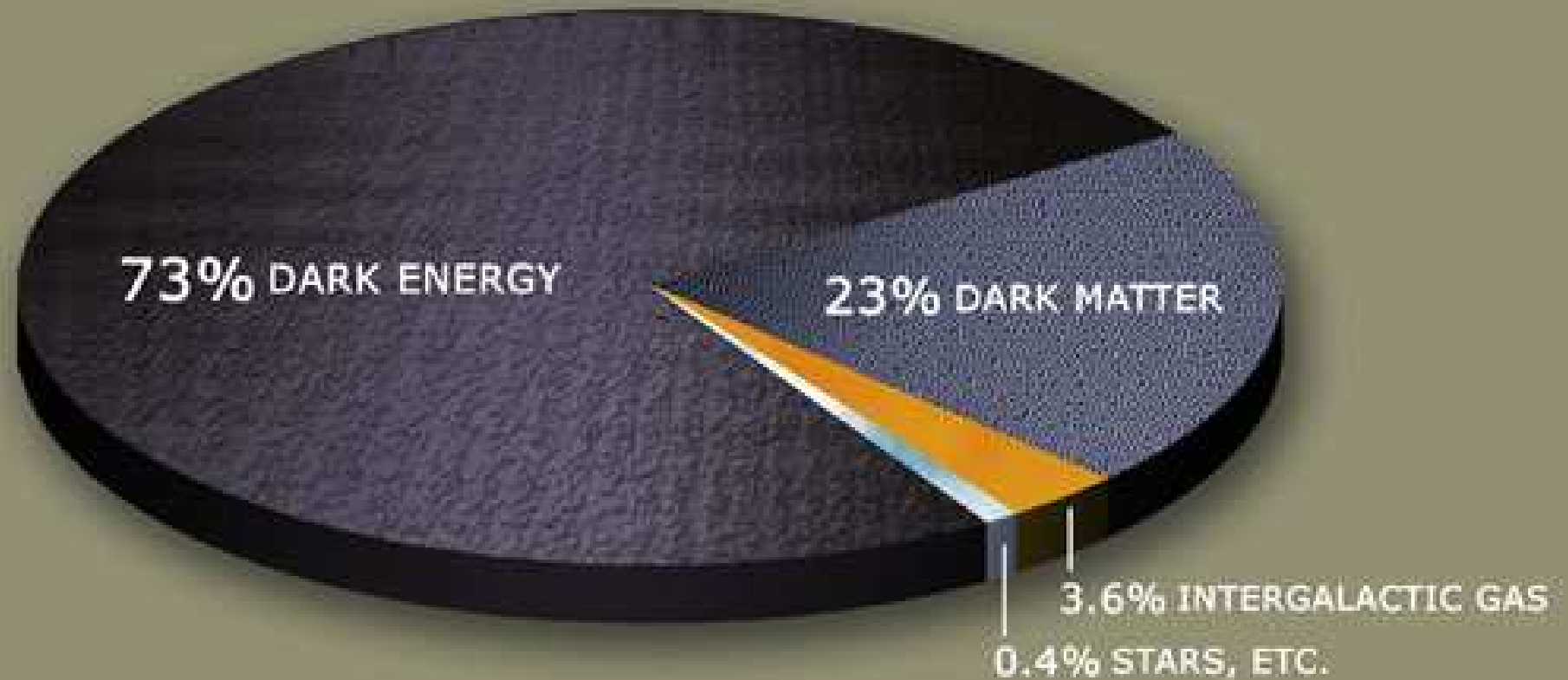
$$\frac{\ddot{a}(t)}{a(t)} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho(t) + 3 \frac{p(t)}{c^2} \right)$$

Contenu de l'Univers



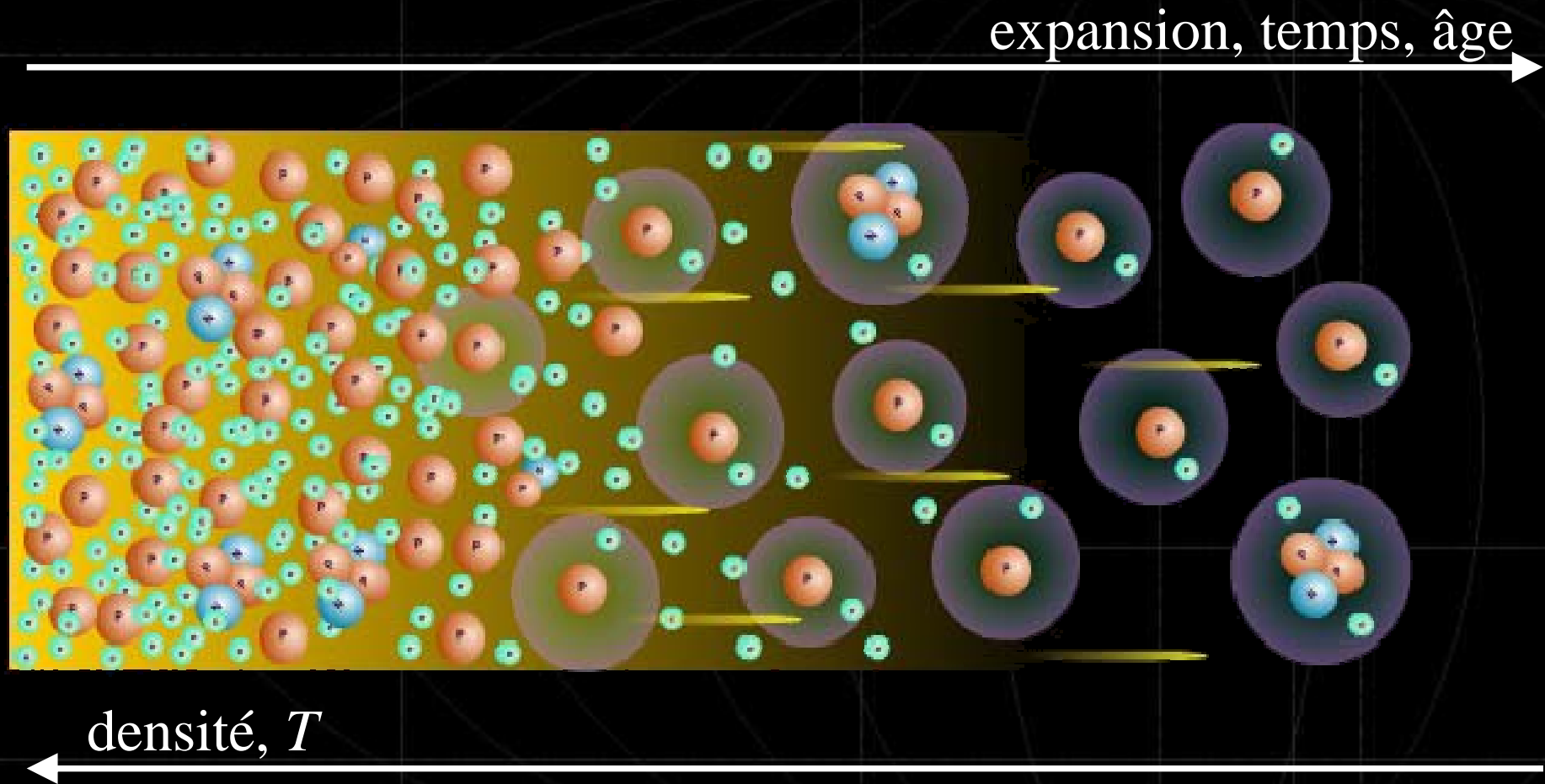
Comment fait-on pour savoir??

Contenu de l'Univers



A partir du CMB, p. ex. ...

Le CMB en quelques mots...



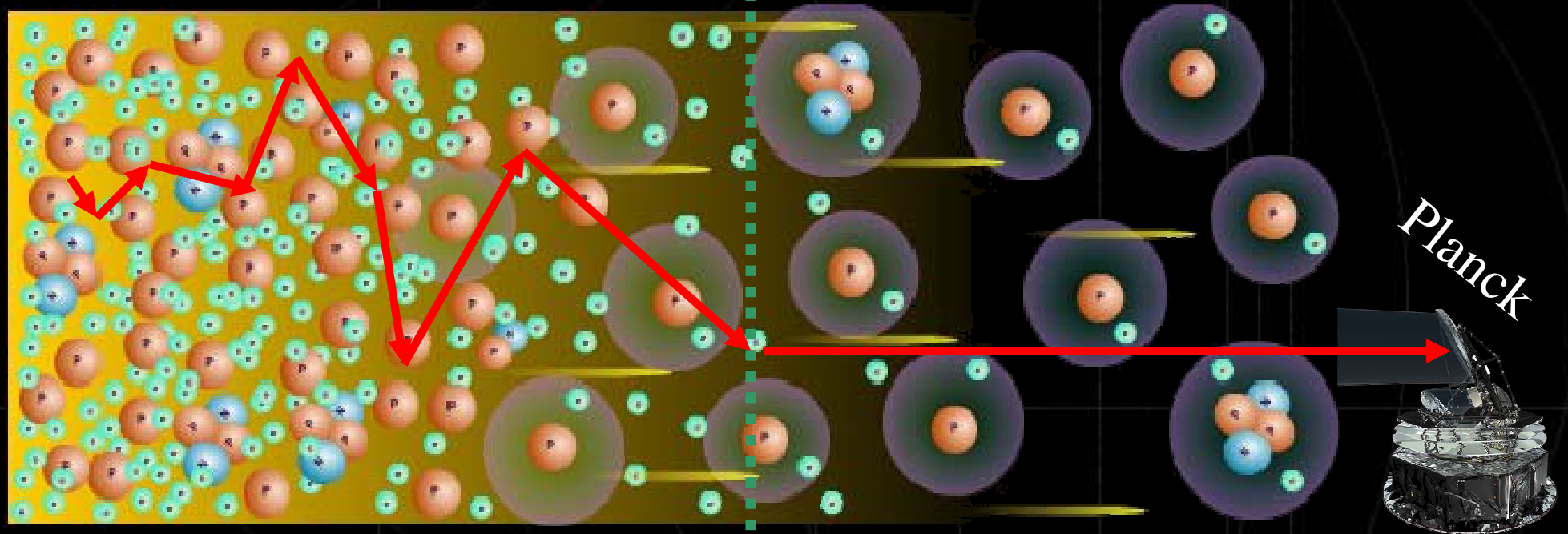
- Rayonnement & matière en équilibre thermique
- **Gaz ionisé**

- Rayonnement & matière vivent séparés
- **Gaz neutre**

CMB : dernière diffusion des photons primordiaux

380 000 ans

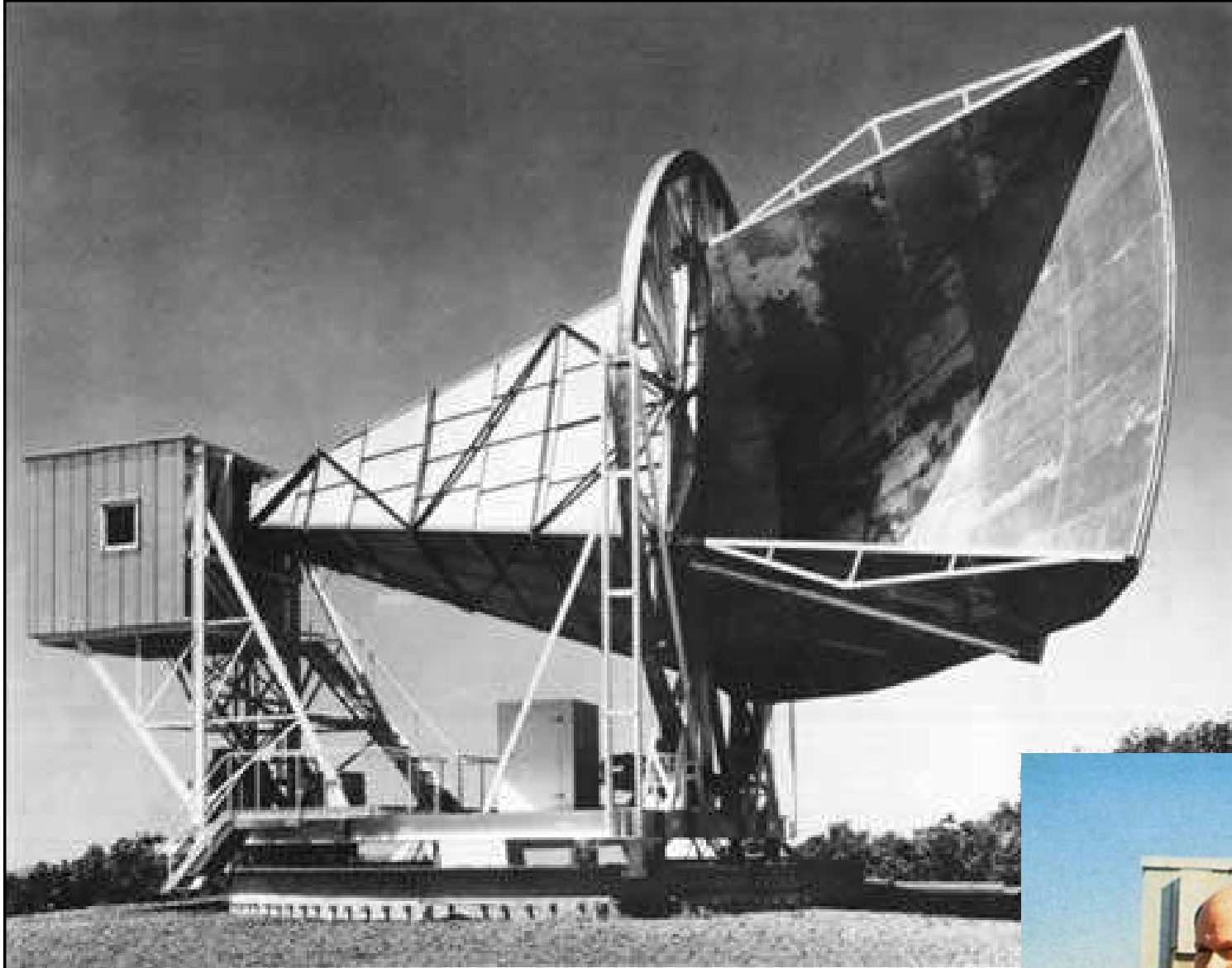
expansion, temps, âge



densité, T

Rayonnement & matière
en équilibre par couplage fort

Rayonnement & matière
découplés, pas d'interaction

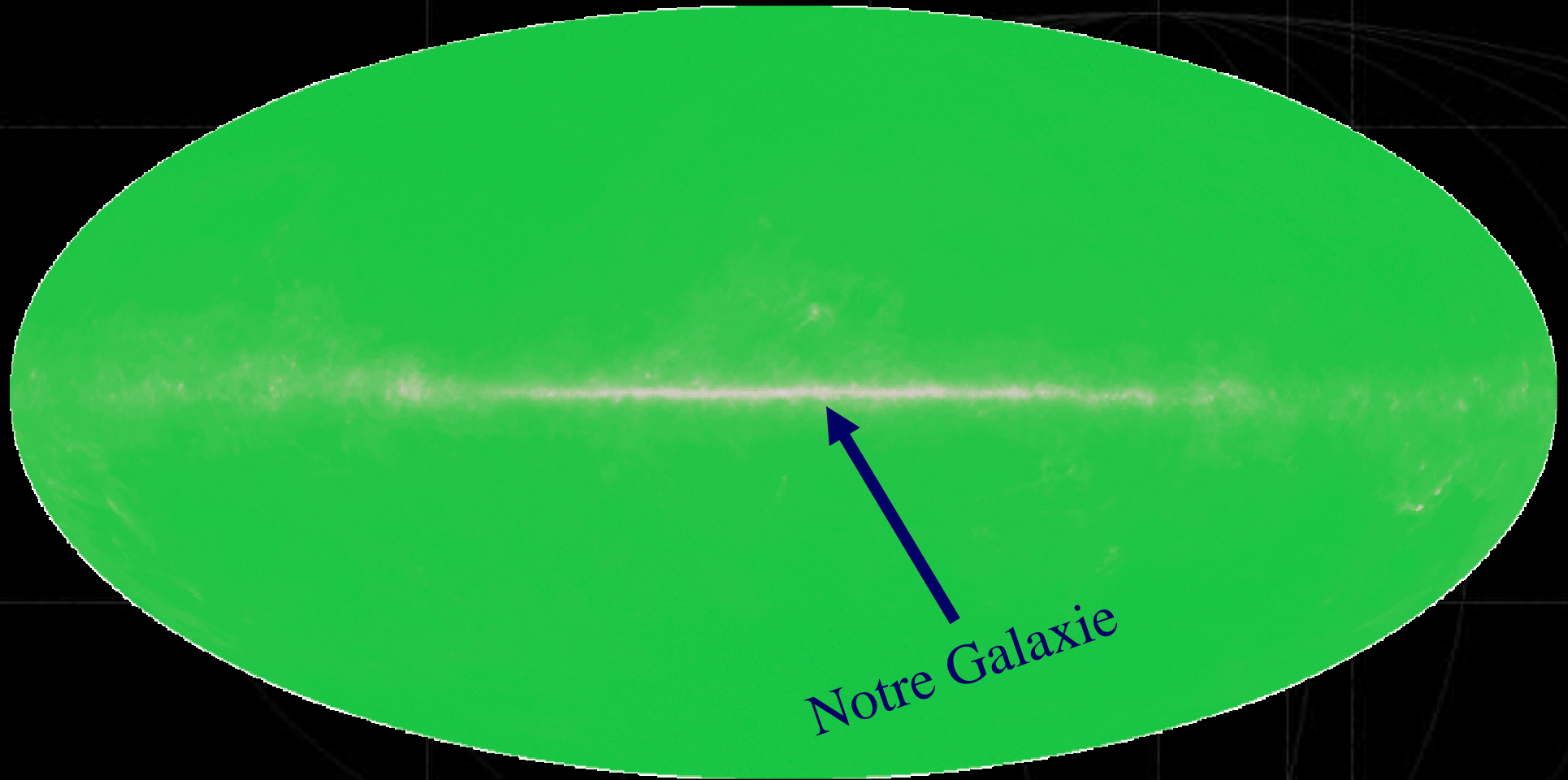


Première
détection !

Penzias & Wilson (1965)
Prix Nobel 1978



Remarquable homogénéité!



Ce qu'auraient vu Penzias & Wilson s'ils avaient observé tout le ciel

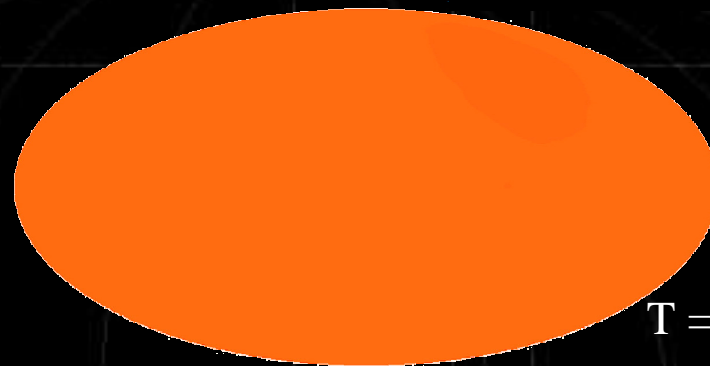
Interprétation cosmologique :
Dicke, Peebles, Roll, Wilkinson (1965)

COsmic Background Explorer

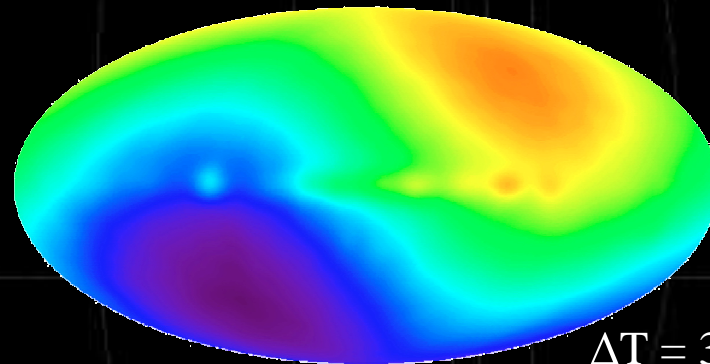
Première détection de fluctuations!



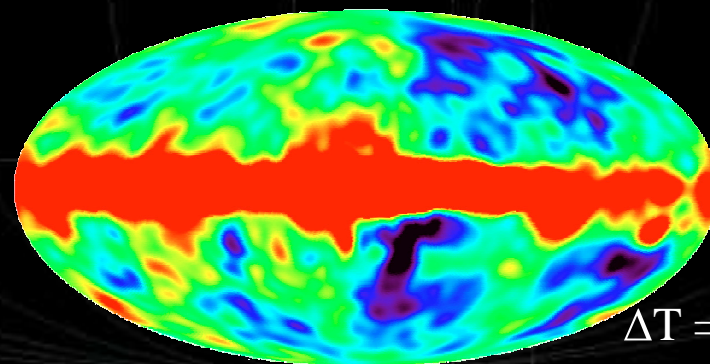
DMR 53 GHz



$T = 2.728 \text{ K}$



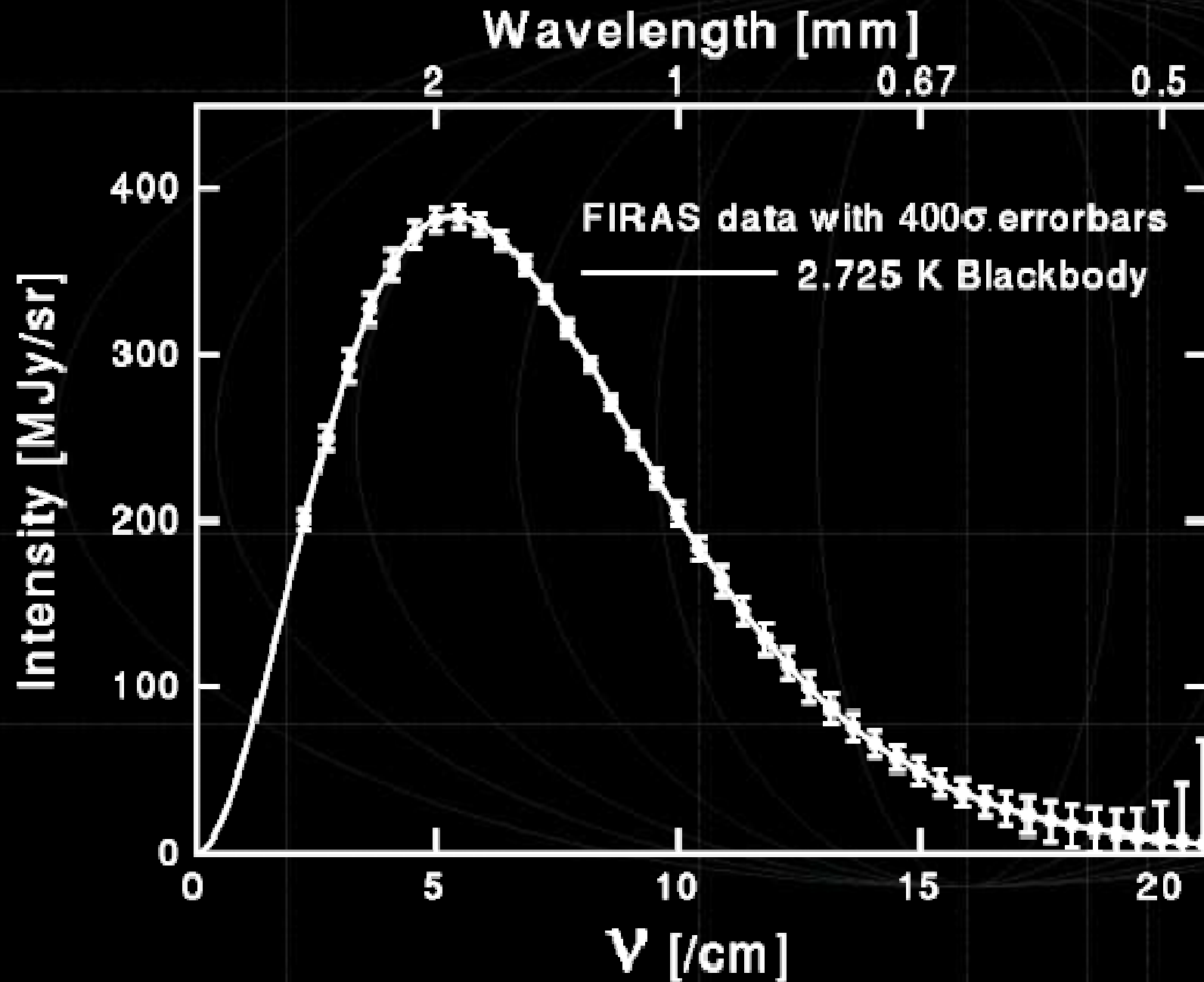
$\Delta T = 3.353 \text{ mK}$



$\Delta T = 18 \mu\text{K}$

COBE, 1991-1996 (Prix Nobel 2006: Smoot & Mather)

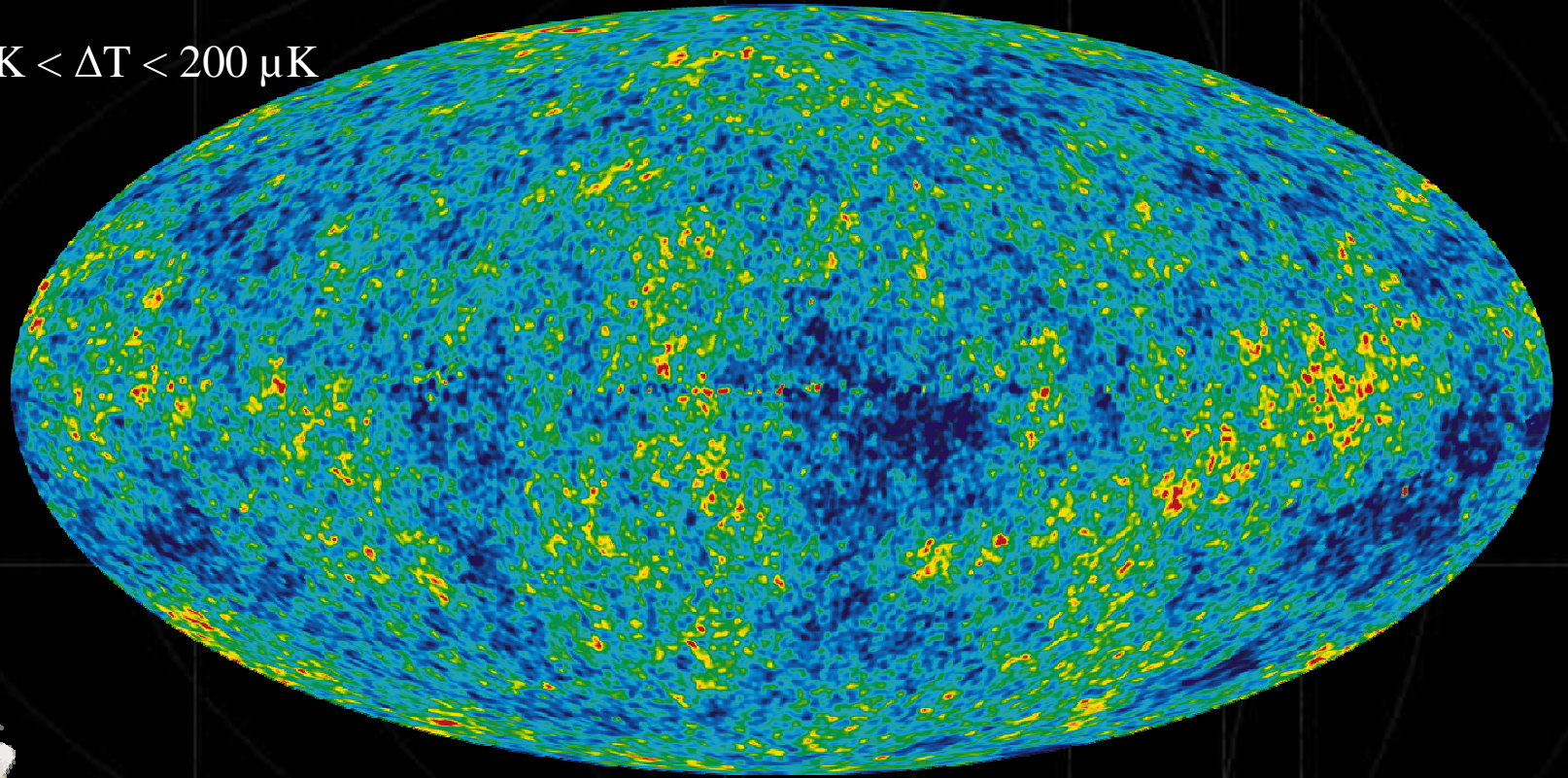
Le CMB : un corps noir “parfait”



Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

Lancé juin 2001

$-200 \mu\text{K} < \Delta T < 200 \mu\text{K}$



Première carte fine-résolution (0.2 degrés)

CMB - Le satellite ultime : Planck

HFI : J.-L. Puget

Résolution
inégalée
(0.08 degrés)

Lancement
le 14 mai 2009 !



IAS
orsay



Mesurera
clairement
la polarisation

LFI : N. Mandolesi



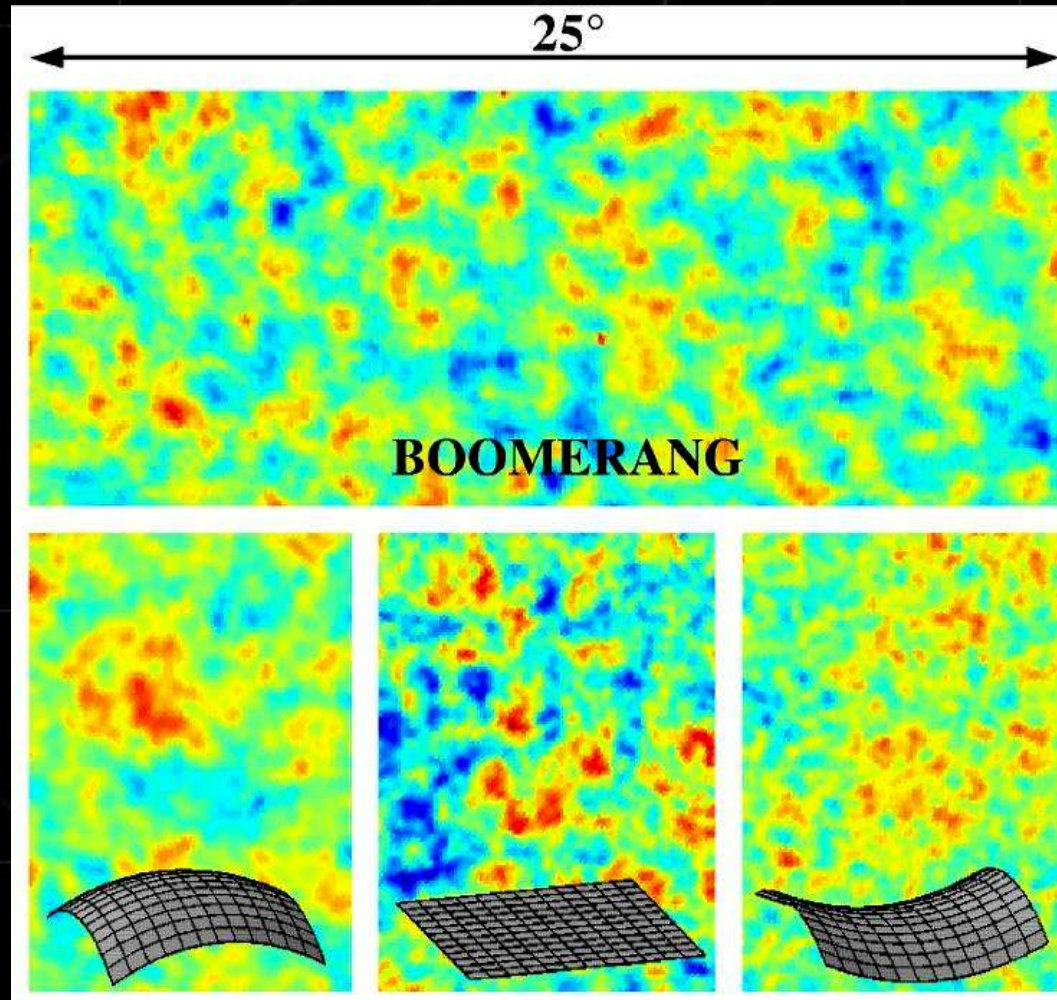
Kourou
26 février 2009



Mais revenons au CMB...

Le CMB et la géométrie de l'Univers

Données
(Boom., 1998)



Taille angulaire
typique : 1°

Cartes
simulées

Sphérique

Plat

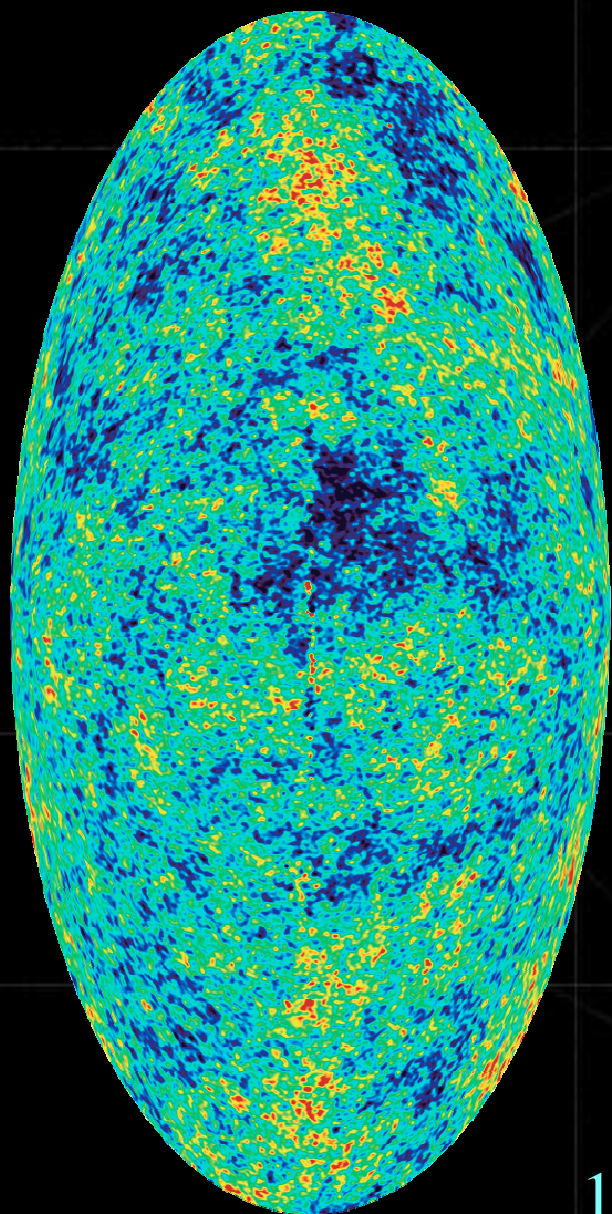
Hyperbolique

Analyse statistique

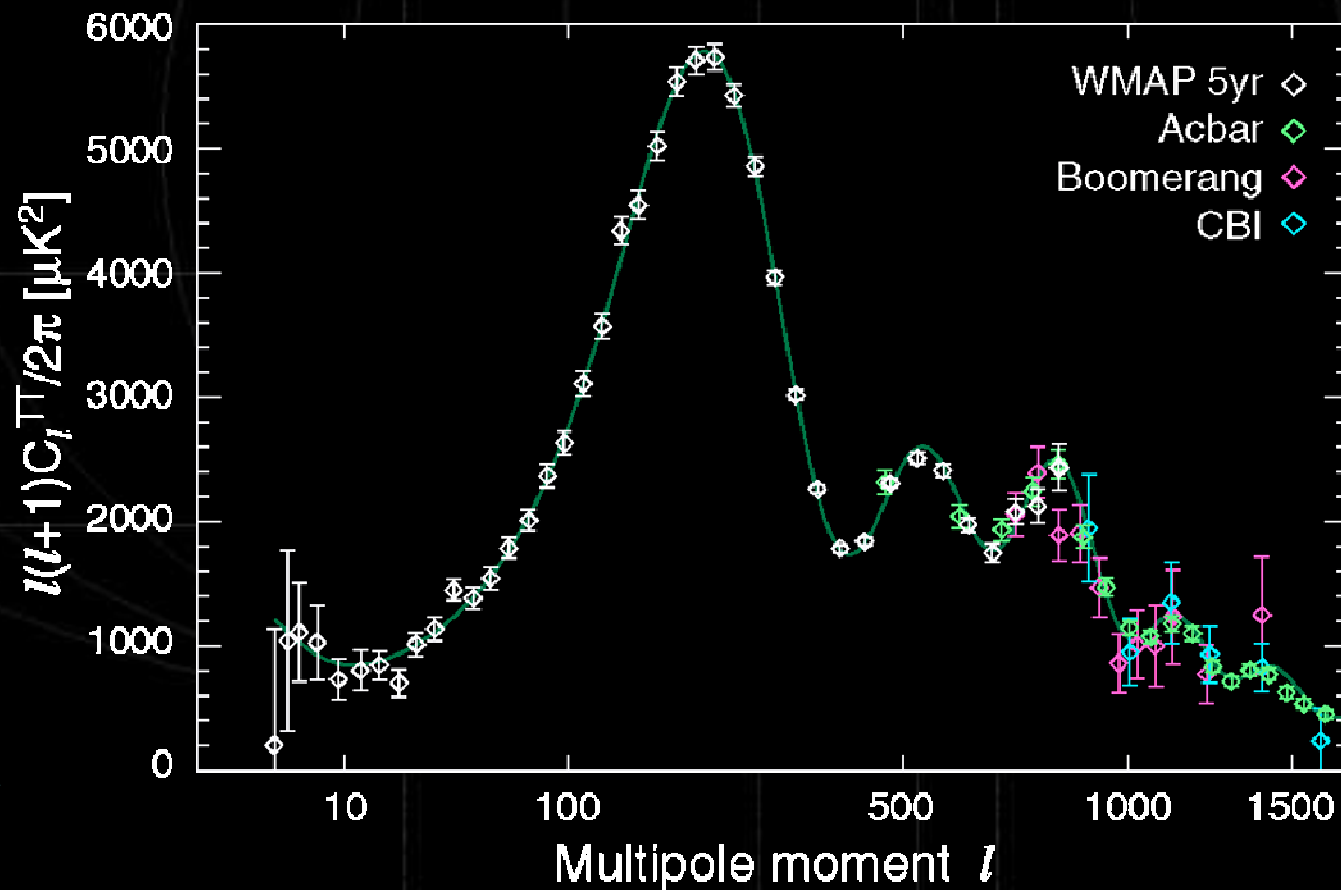
$$\frac{\Delta T}{\bar{T}}(\theta, \varphi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^{+l} a_{lm} Y_l^m(\theta, \varphi)$$

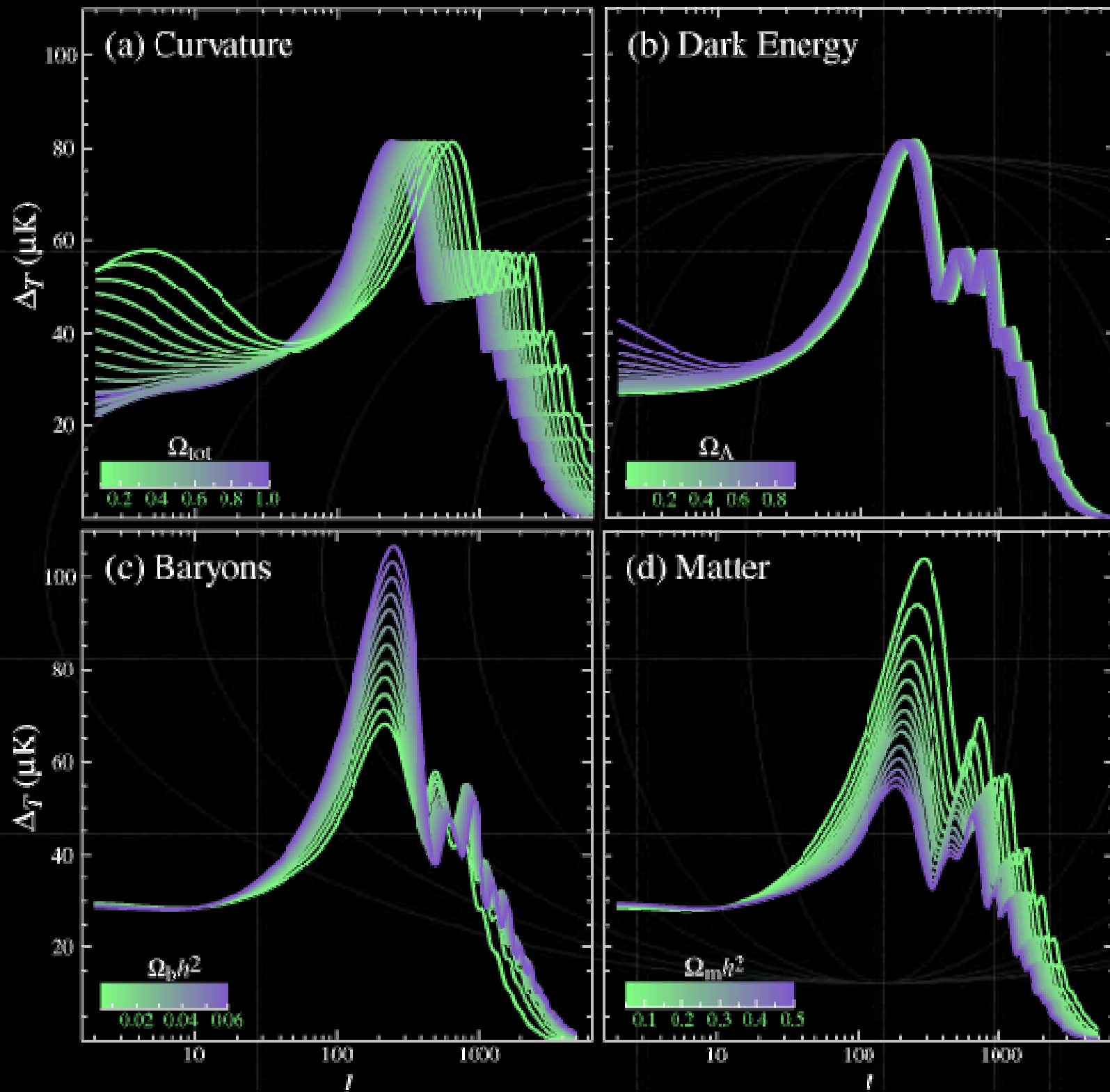
$$C_l \sim \text{TF} \left[\left\langle \frac{\Delta T}{\bar{T}}(\vec{n}) \frac{\Delta T}{\bar{T}}(\vec{n}') \right\rangle \right]$$

$$\Rightarrow C_l = \langle |a_{lm}|^2 \rangle$$

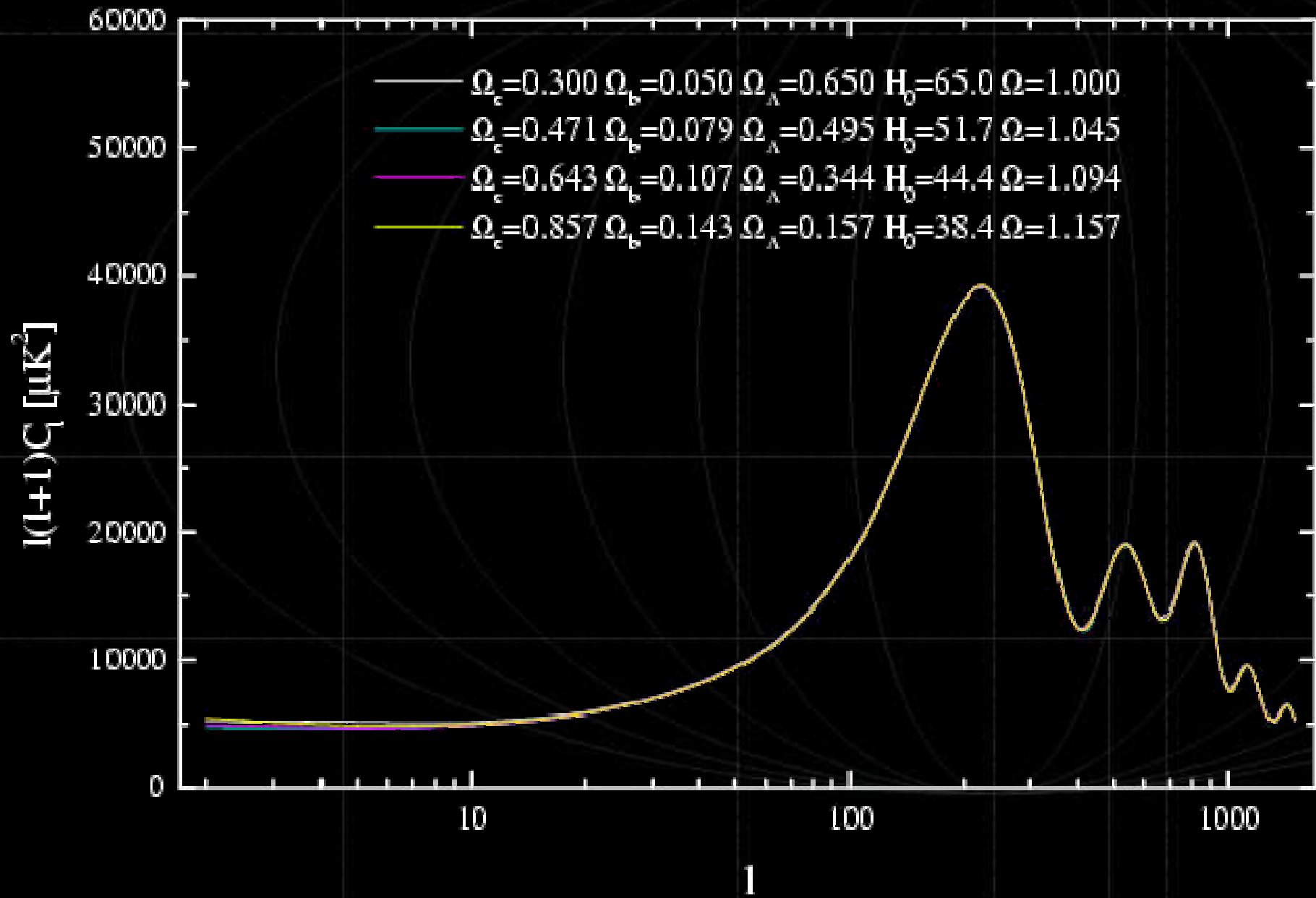


$$l \sim \frac{180^\circ}{\theta}$$



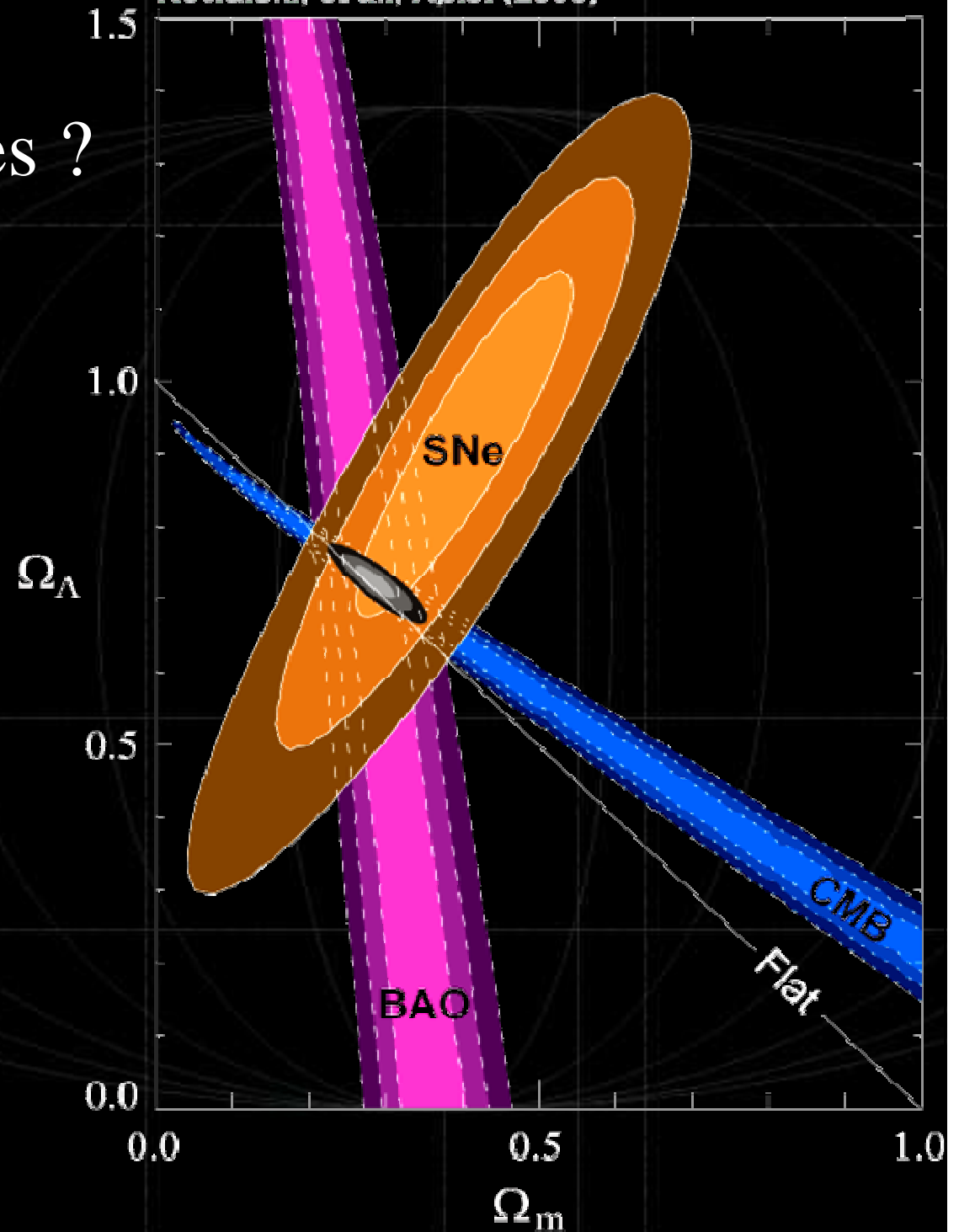


Le CMB et les dégénérescences



Lever les dégénérescences ?

Combinaison de
données
indépendantes !



L'expansion de l'Univers en accélération !

Comment est-ce possible ?

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho(t) + 3\frac{p(t)}{c^2} \right)$$

1. Constante Cosmologique
2. Fluide de **pression** suffisamment **négative** (cf. « quintessence »)
3. Théorie de la gravitation incomplète (extensions de la RG)
4. Effet des structures (vs. homogénéité et isotropie)

Comment distinguer... ?

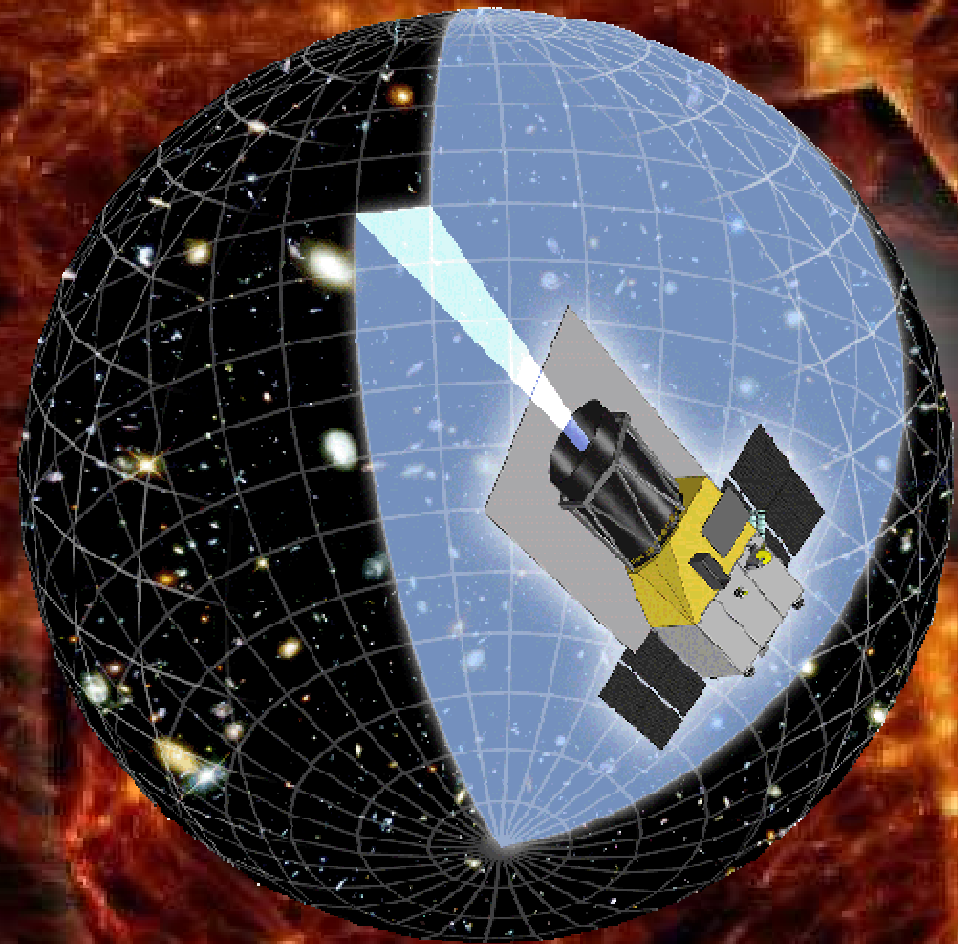


Cosmic Vision 2015-2025

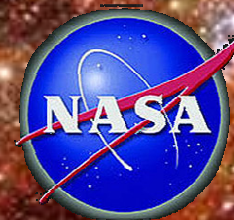
Science Programme
European Space Agency

EUCLID

Mapping the geometry of the dark Universe



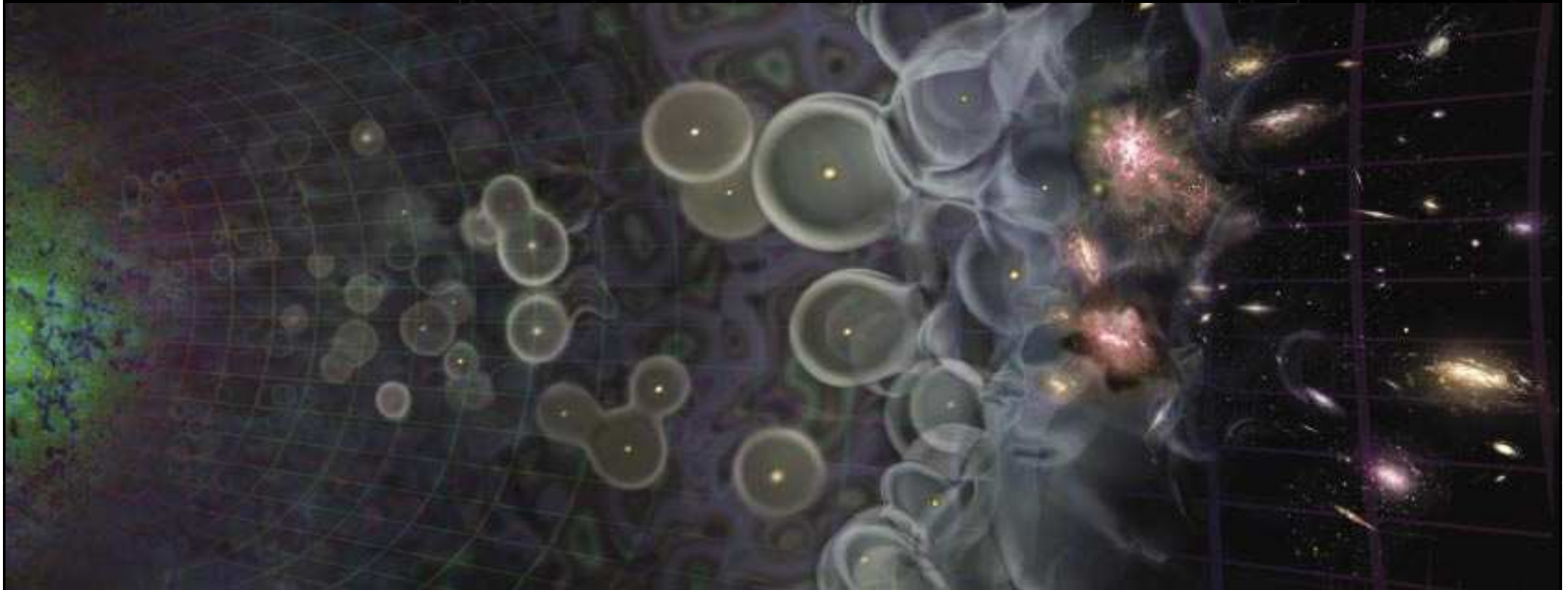
JDEM
THE JOINT DARK ENERGY MISSION



Entre le CMB et l'accélération : la formation des structures

Ages Sombres

Réionisation



CMB

Premières
étoiles

Premières galaxies

(Sci.Am., Nov. 2006)

Formation des structures : instabilité gravitationnelle

Fluide :

- Conservation de la masse
- Conservation de l'impulsion
- Equation de Poisson

Surdensités : $\delta(\vec{r}, t) = \frac{\rho(\vec{r}, t) - \bar{\rho}}{\bar{\rho}}$

Expansion : $a(t)$

$$\ddot{\delta}_k + 2\frac{\dot{a}}{a}\dot{\delta}_k = \left(4\pi G\bar{\rho} - c_s^2 k^2 / a^2\right) \delta_k$$

gravité vs. pression

$k \sim 1/\lambda$

$\lambda > \lambda_J$

→

effondrement

$\lambda < \lambda_J$

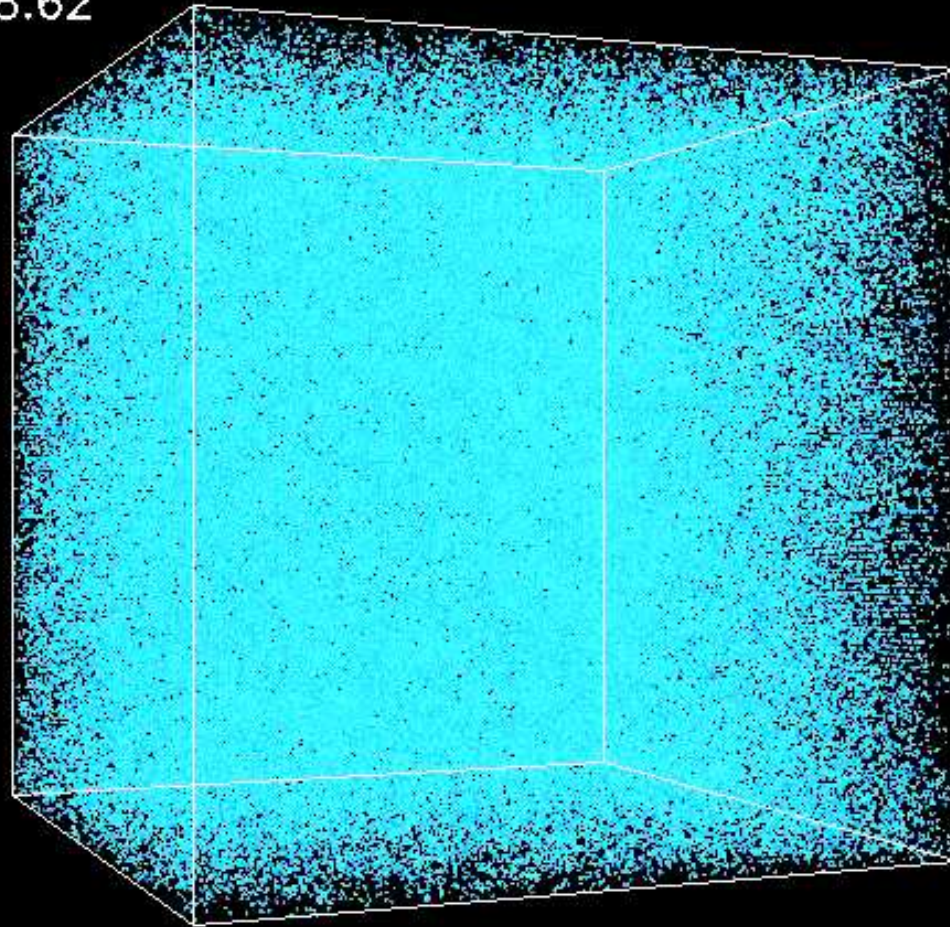
→

oscillations

Effondrement si $M > M_J = \left(\frac{5kT}{Gm}\right)^{3/2} \left(\frac{3}{4\pi\bar{\rho}}\right)^{1/2}$

Formation des structures : la gravité en action

$Z=28.62$



43 Mpc

(Kravtsov & Klypin)

Simulations N-corps
Matière noire seule

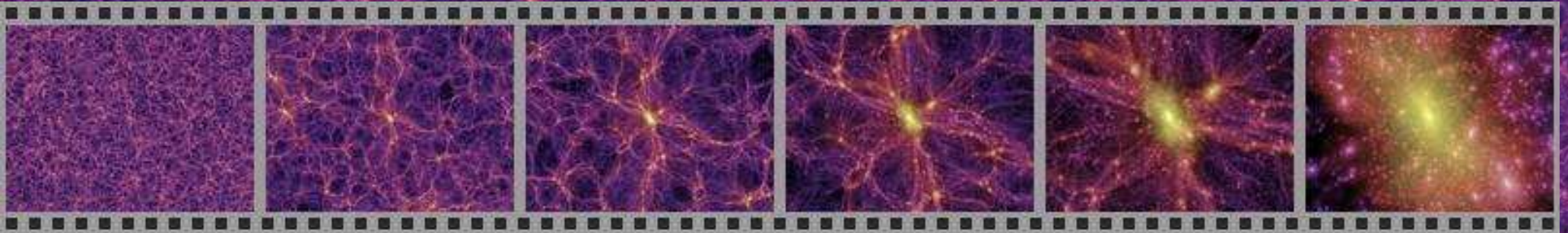
Millennium Run

125 Mpc/h

- plus de 10 milliards de « particules »
- boîte cubique de côté 2 milliards d'années-lumière
- évolution de la distribution de matière noire

qqq Gpc

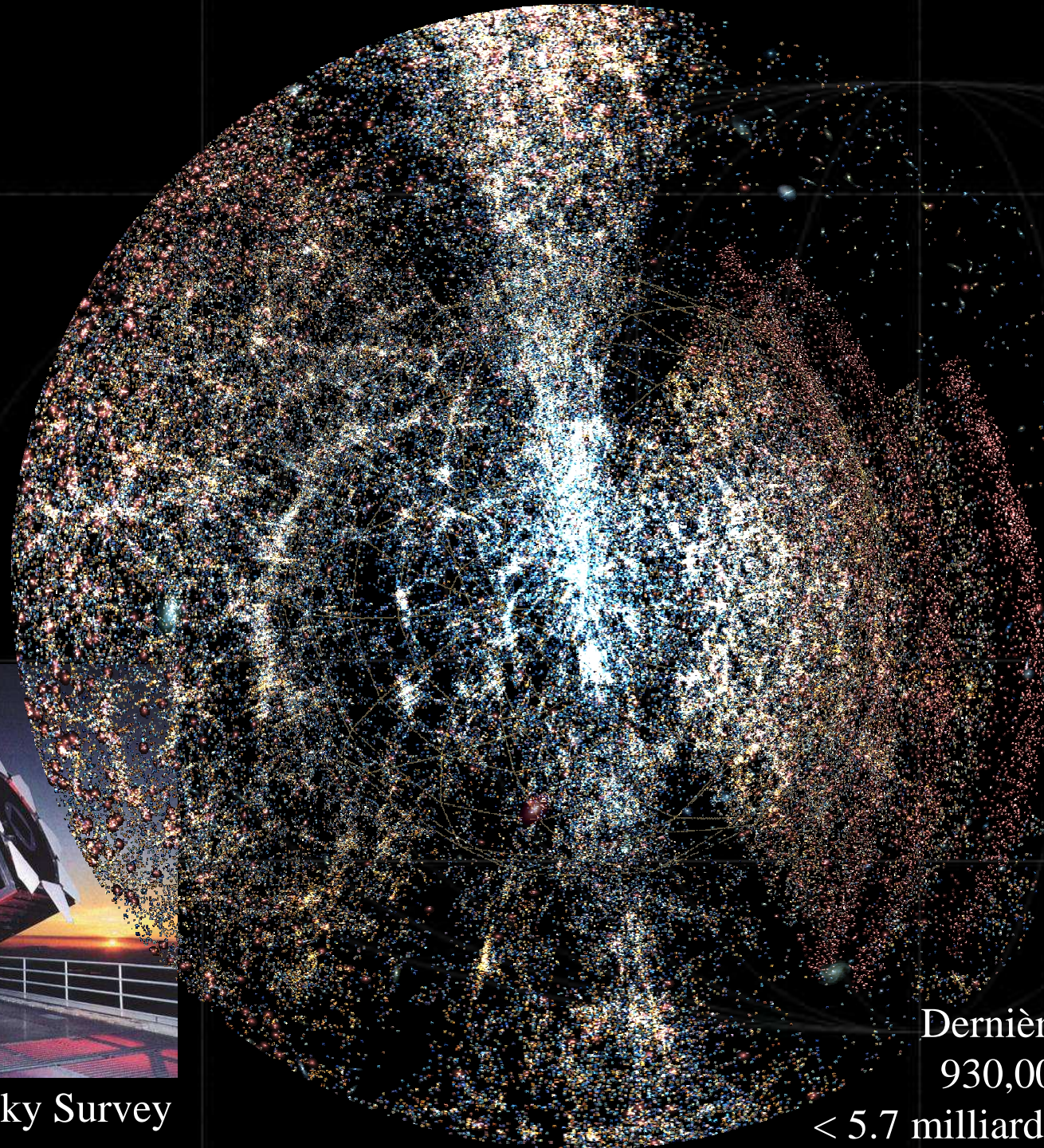
10 kpc



Distribution observée des galaxies



Sloan Digital Sky Survey



Dernières données :
930,000 galaxies
< 5.7 milliards d'années-lumière

Effondrement gravitationnel : OK

Et le gaz dans tout ça?

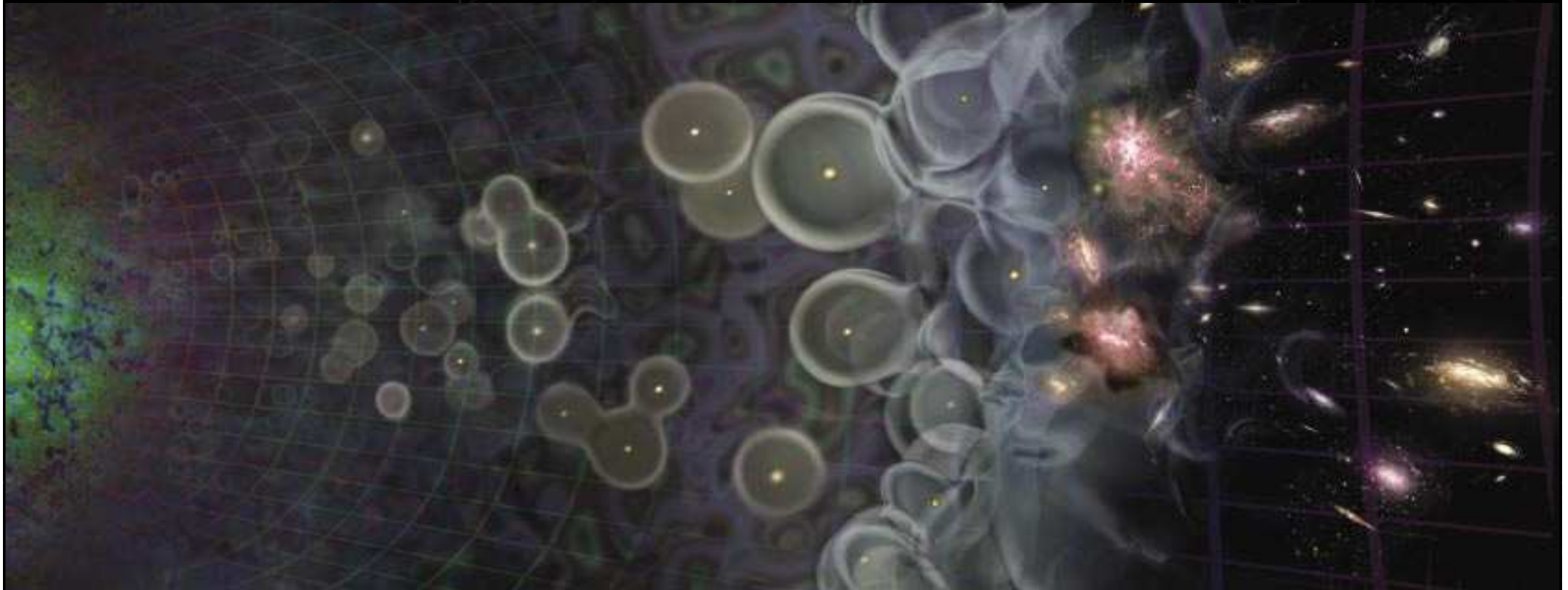
Importance :

1. propriétés des premières étoiles
2. formation des premières galaxies

Réionisation et premières étoiles

Univers neutre

Univers ionisé



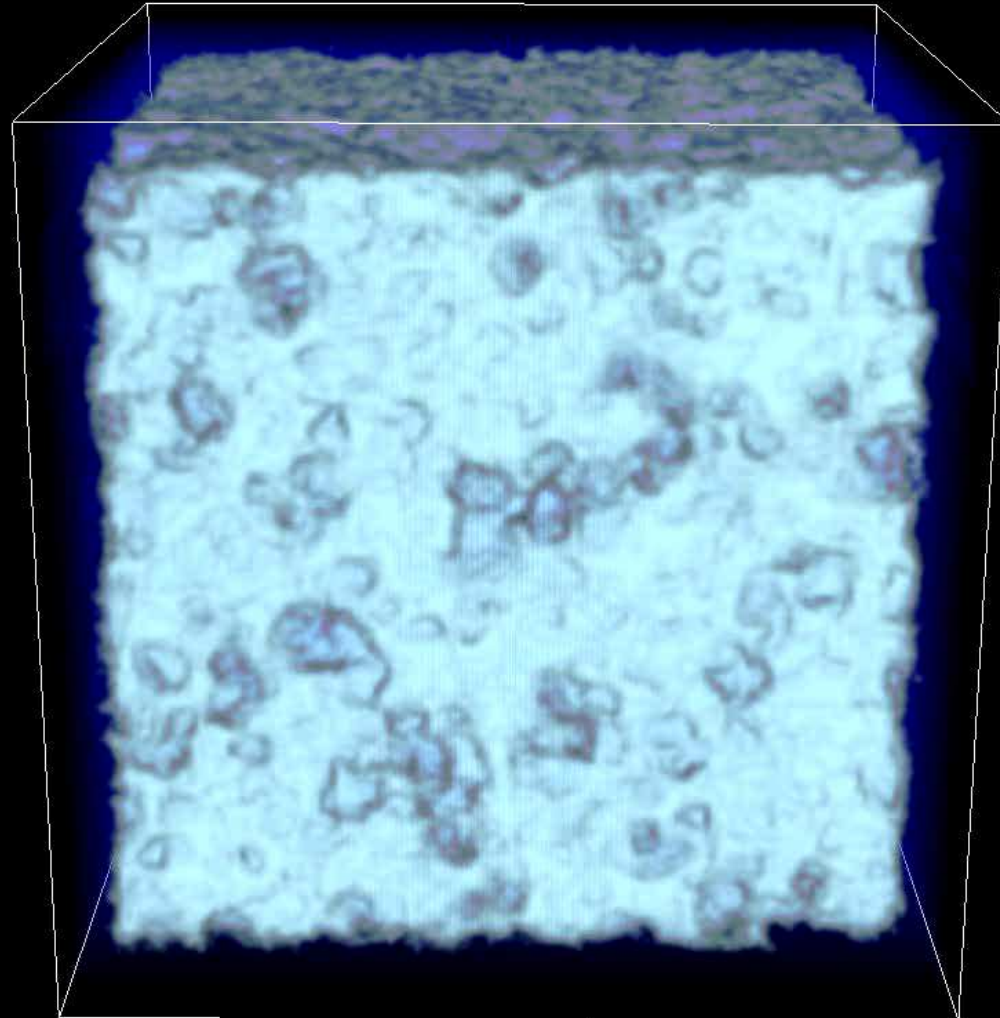
CMB

Premières
étoiles

Réionisation

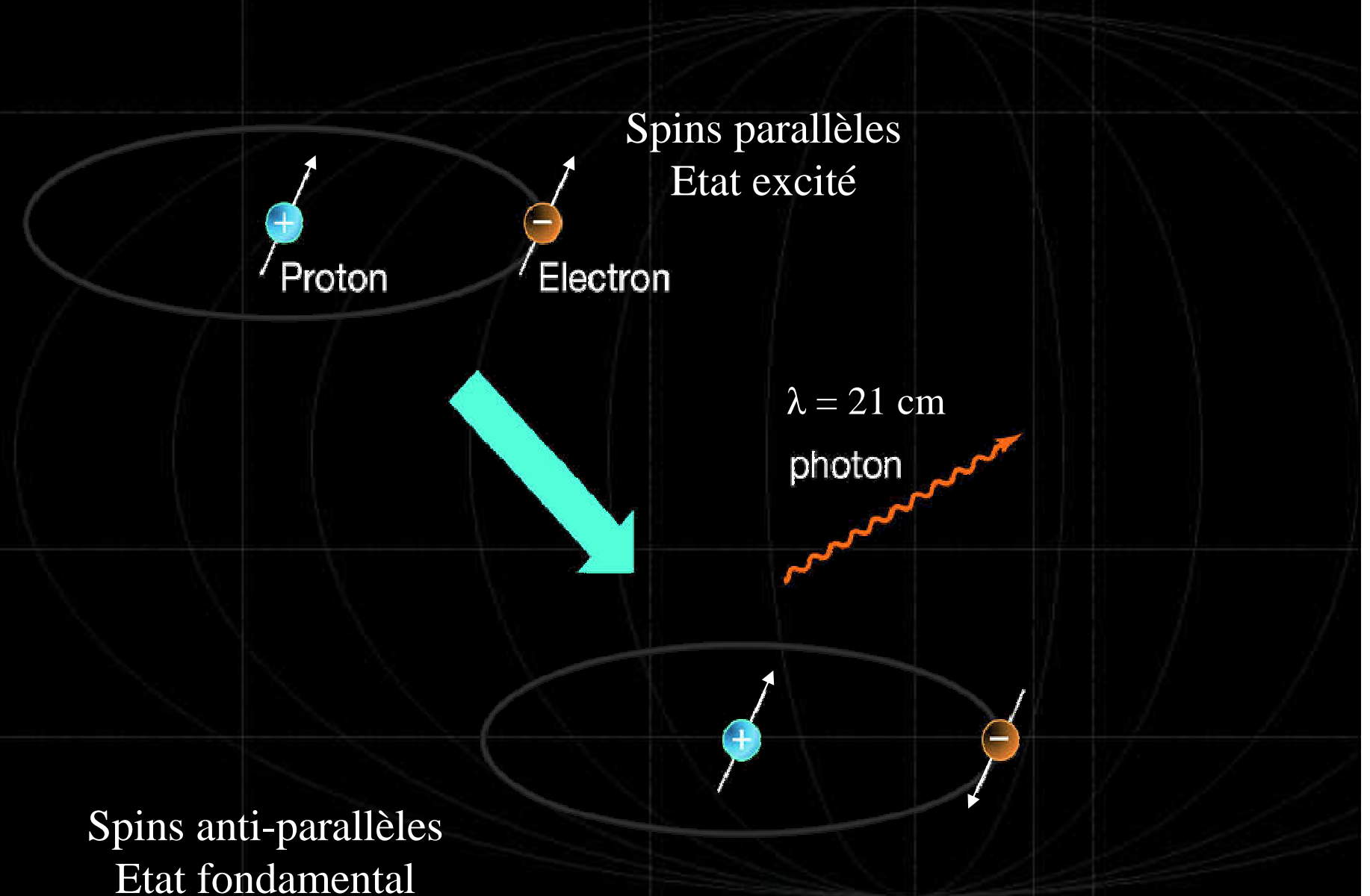
La réionisation cosmique par les premières sources lumineuses

100 Mpc



(Ritzerveld, Van de Weijgaert, Icke)

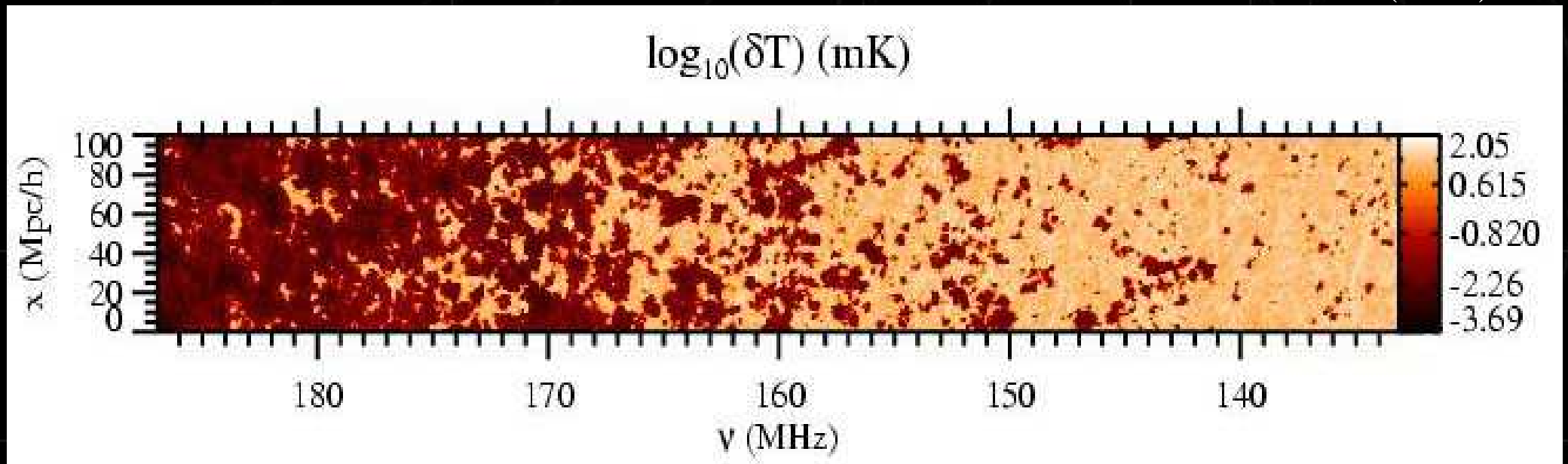
Détection de l'hydrogène neutre? La mécanique quantique à la rescousse!



Expansion & décalage spectral → **tomographie cosmique!**

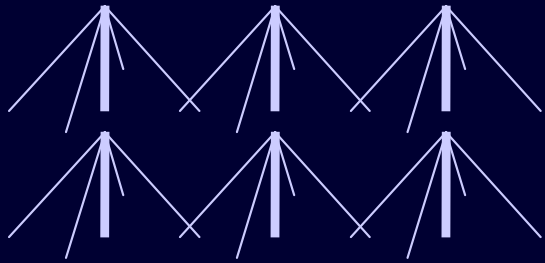
$$1 + z = \frac{a(t_0)}{a(t_{\text{em}})} = \frac{\nu_{\text{em}}}{\nu_{\text{obs}}}$$

G. Mellema (2006)

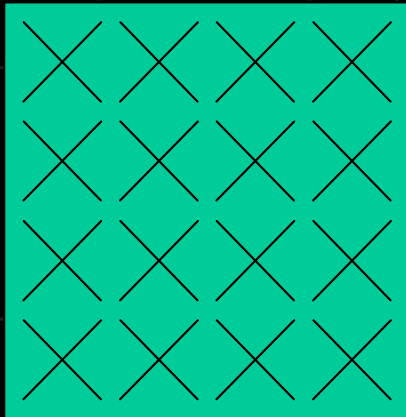


Ex: $\nu = 1420.4 \text{ MHz} \rightarrow \nu_{\text{obs}} = 160 \text{ MHz} \leftrightarrow z \sim 8.9$
($\leftrightarrow 565$ millions d'années)

Interférométrie radio : LOFAR



Antennes Basses Fréquences



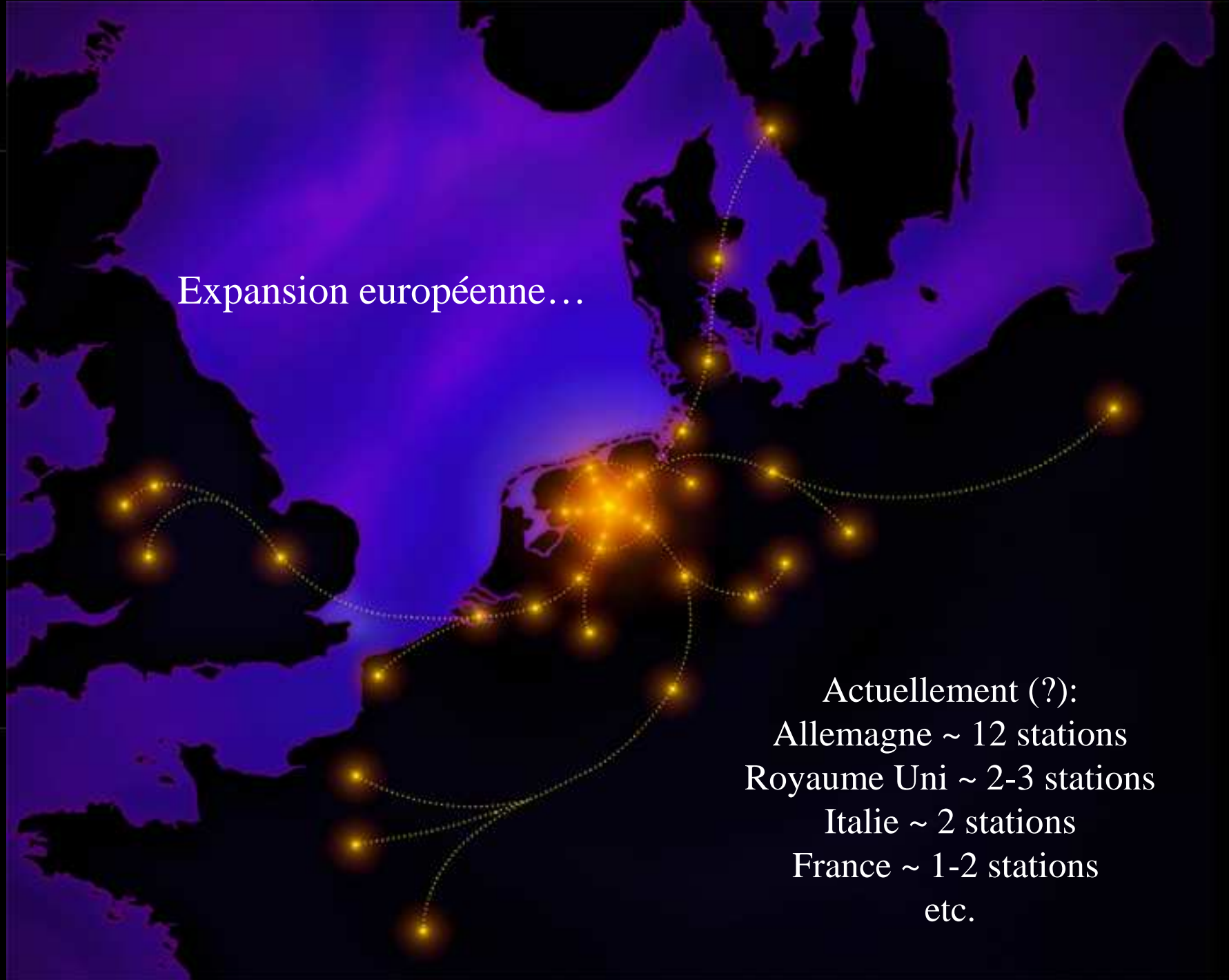
Antennes Hautes Fréquences



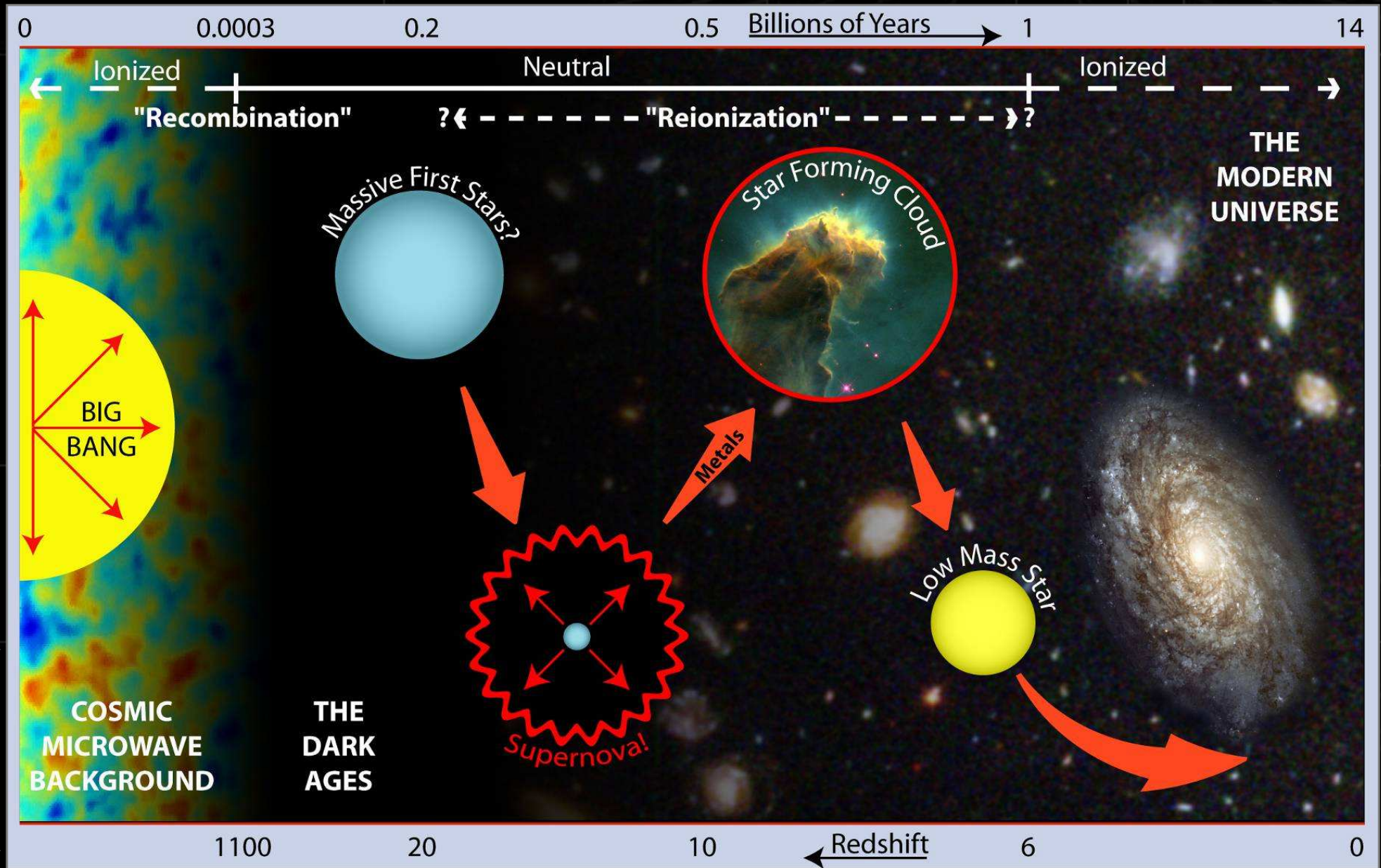
LOFAR Europe

Expansion européenne...

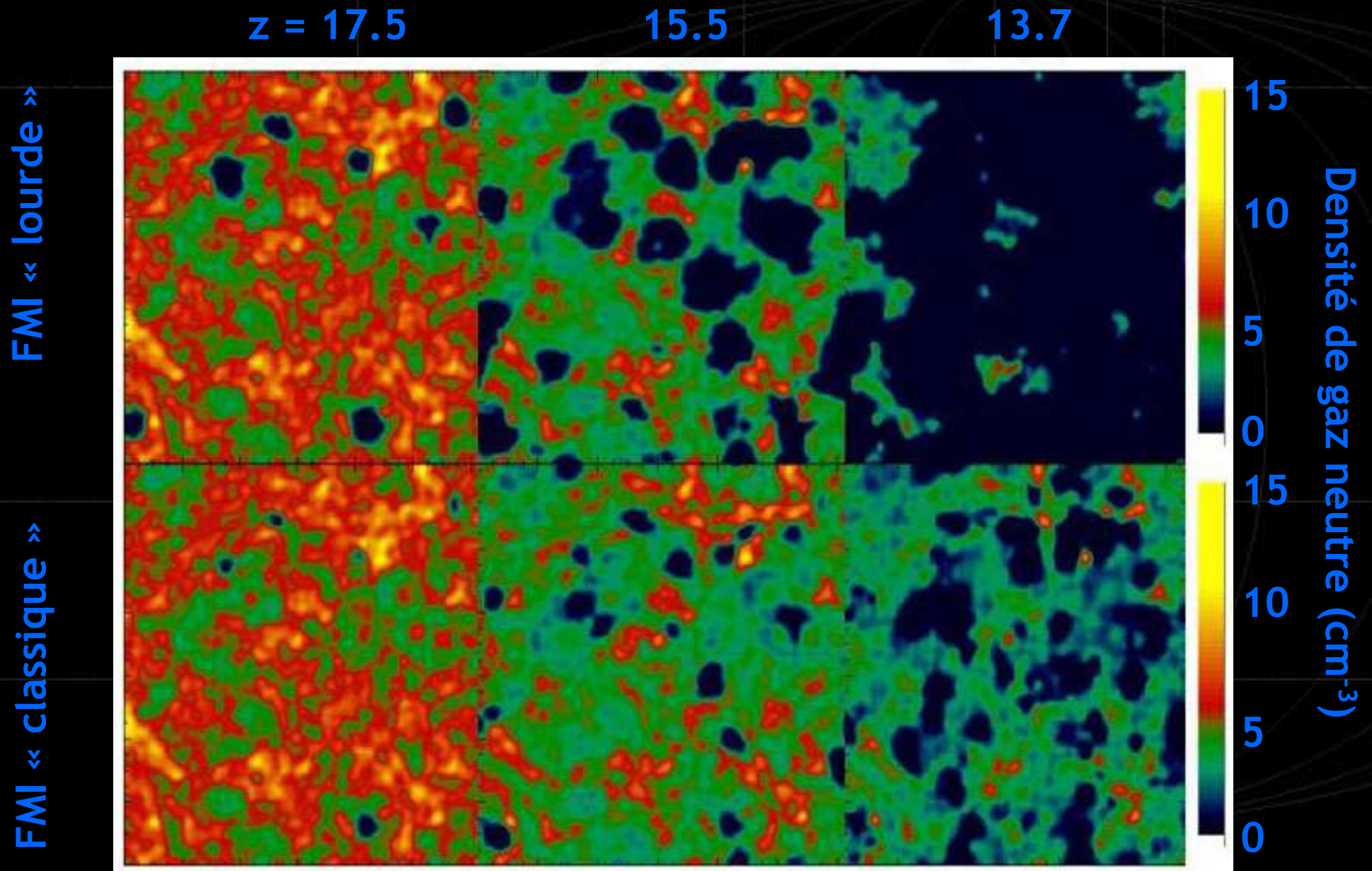
Actuellement (?):
Allemagne ~ 12 stations
Royaume Uni ~ 2-3 stations
Italie ~ 2 stations
France ~ 1-2 stations
etc.



Propriétés des premières étoiles : enjeux?



Réionisation vs. nature des sources

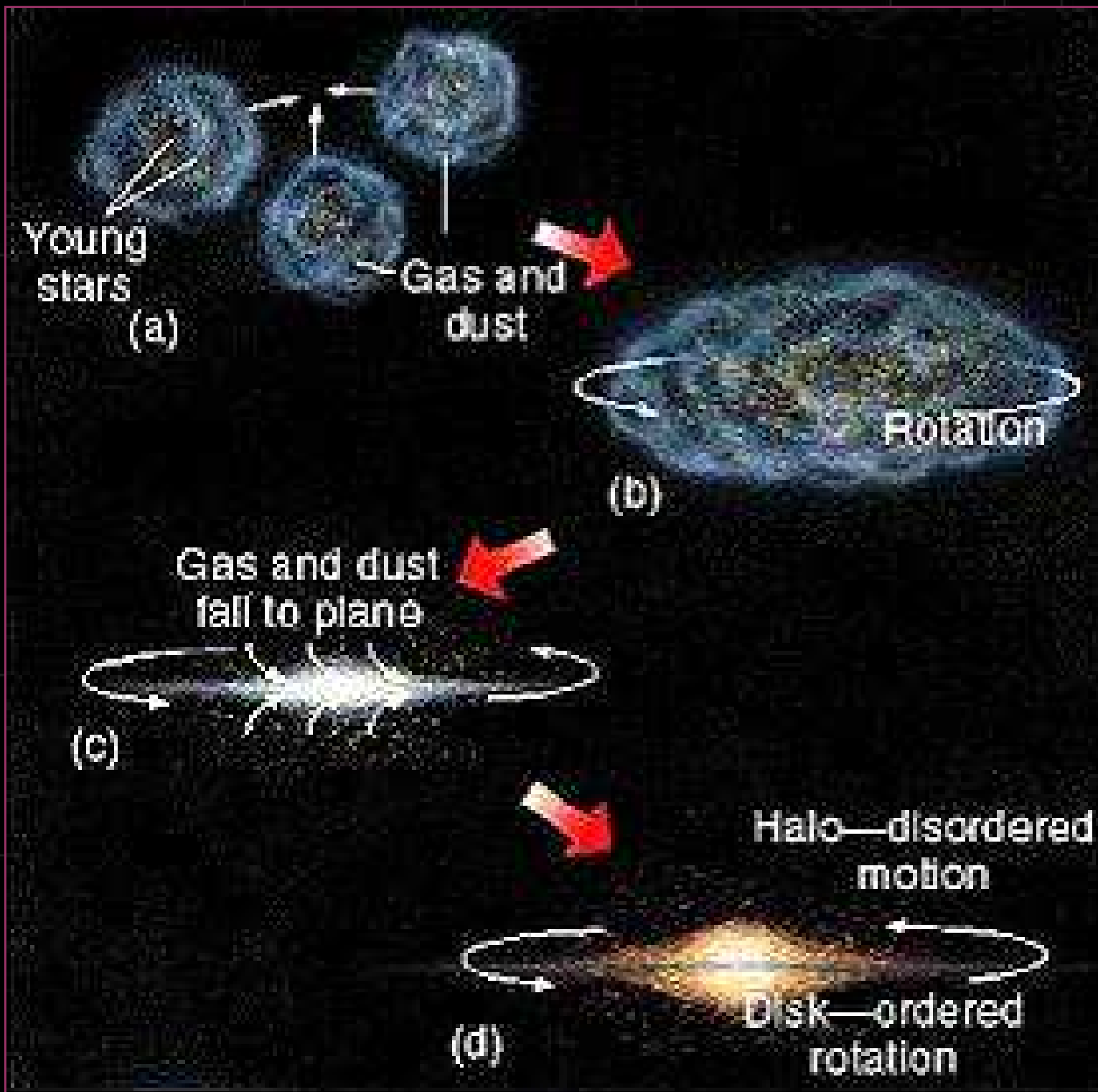


(Ciardi et al. 2001)

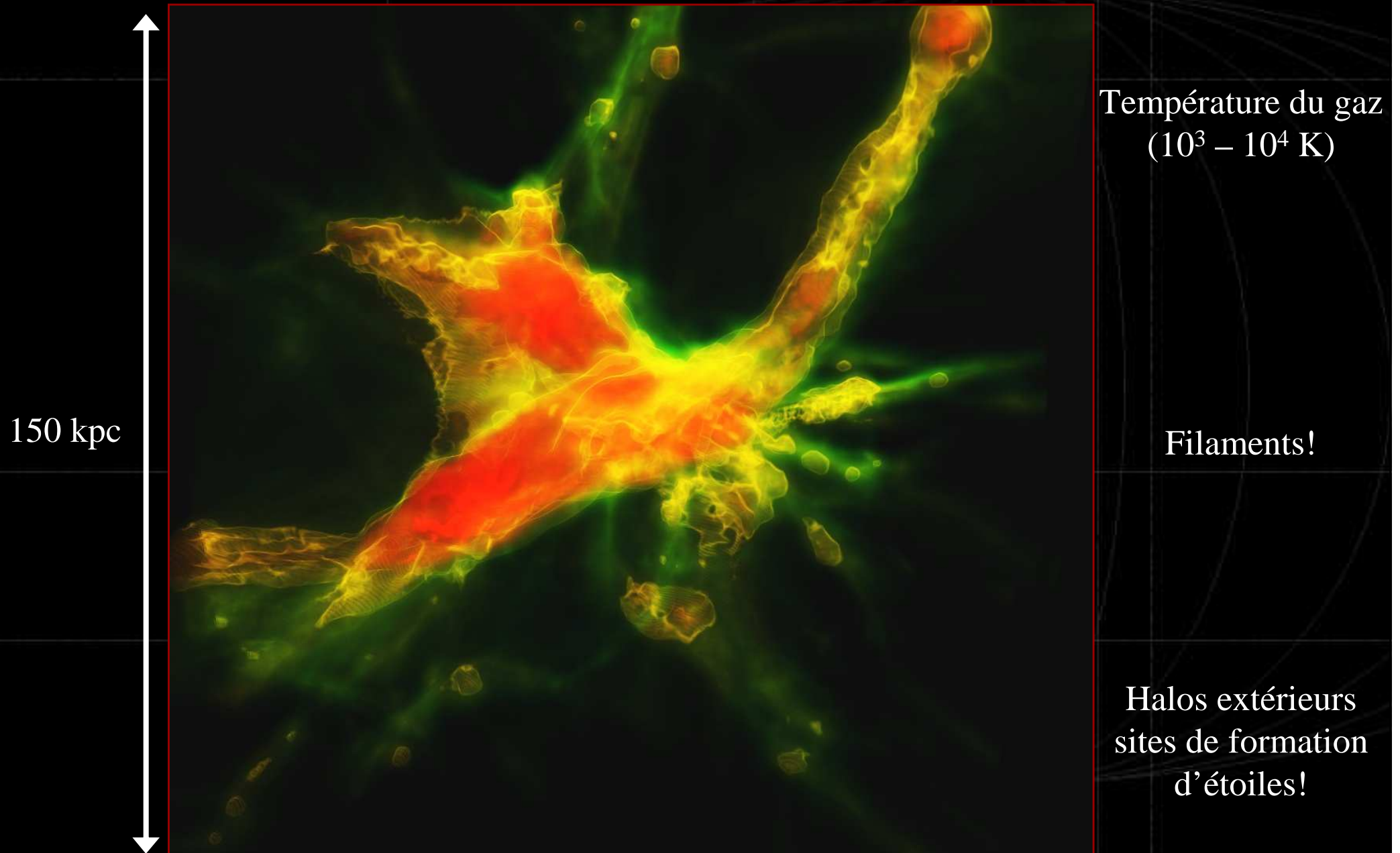
Formation des galaxies : compréhension fine ?



Messier 64




Formation des galaxies : refroidissement, instabilités, fragmentation du gaz, turbulence...




Infrarouge lointain à
submillimétrique
60 microns - 0.67 mm

Miroir : 3.5 mètres
en une seule pièce!

Lancement
le 14 mai 2009!



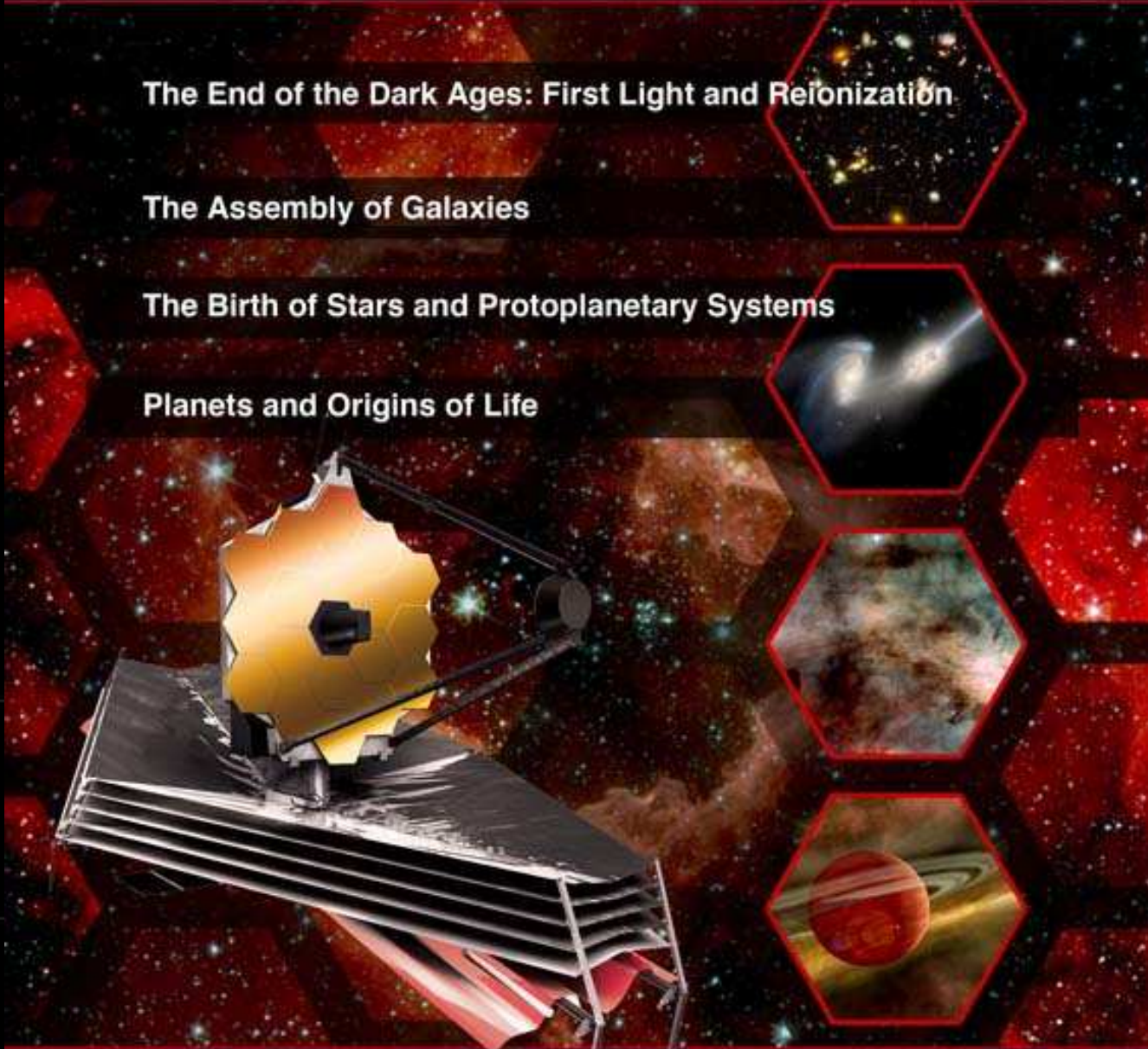
*Exploring the
Formation of
Galaxies and Stars*



HERSCHEL

European Space Agency
Agence spatiale européenne

The image is a promotional poster for the Herschel Space Observatory. It features a central illustration of the satellite in space, set against a background of a starry field with a prominent yellow and orange nebula. The ESA logo is in the top left, and the mission name 'HERSCHEL' is written vertically in large, bold, white letters on the right side. The text 'Exploring the Formation of Galaxies and Stars' is written in a cursive font above the satellite. At the bottom, the European Space Agency name is written in both English and French.



The End of the Dark Ages: First Light and Reionization

The Assembly of Galaxies

The Birth of Stars and Protoplanetary Systems

Planets and Origins of Life

Infrarouge proche
à infrarouge moyen
(0.6 - 28 microns)

Miroir : 6.5 mètres
en 18 segments

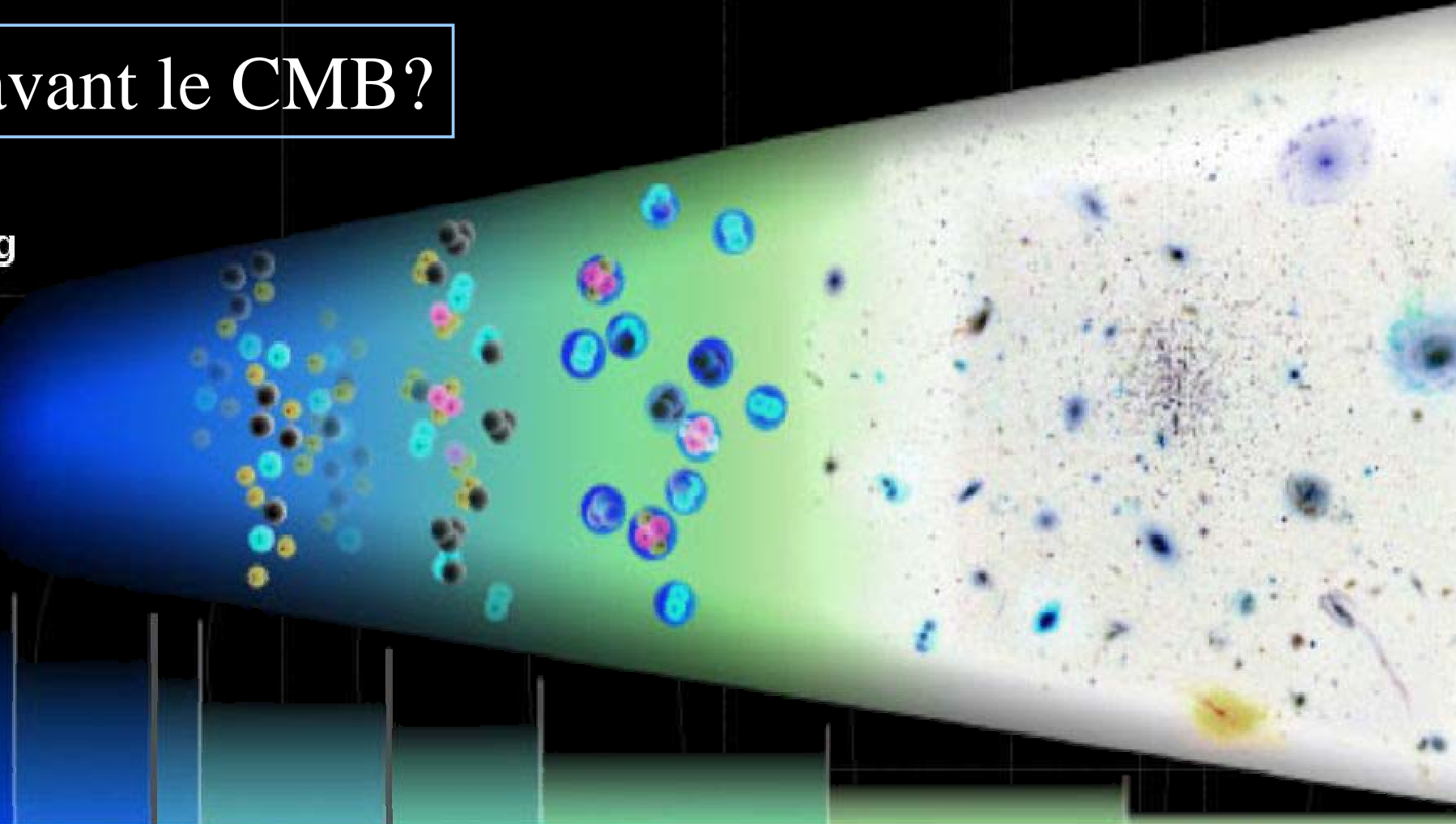
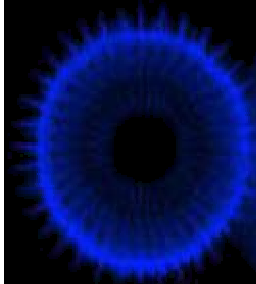
Lancement
prévu

2013

James Webb Space Telescope

Et avant le CMB?

Big Bang



10^{-36} second

Inflation

10^{-5} second

Confinement
des quarks

300,000 years

Formation des
premiers atomes

CMB

10 to 15 billion years

Formation
des grandes structures
(galaxies, amas de galaxies)

10^{-43} second

Gravité
quantique?

10^{-11} second

Transition
électrofaible

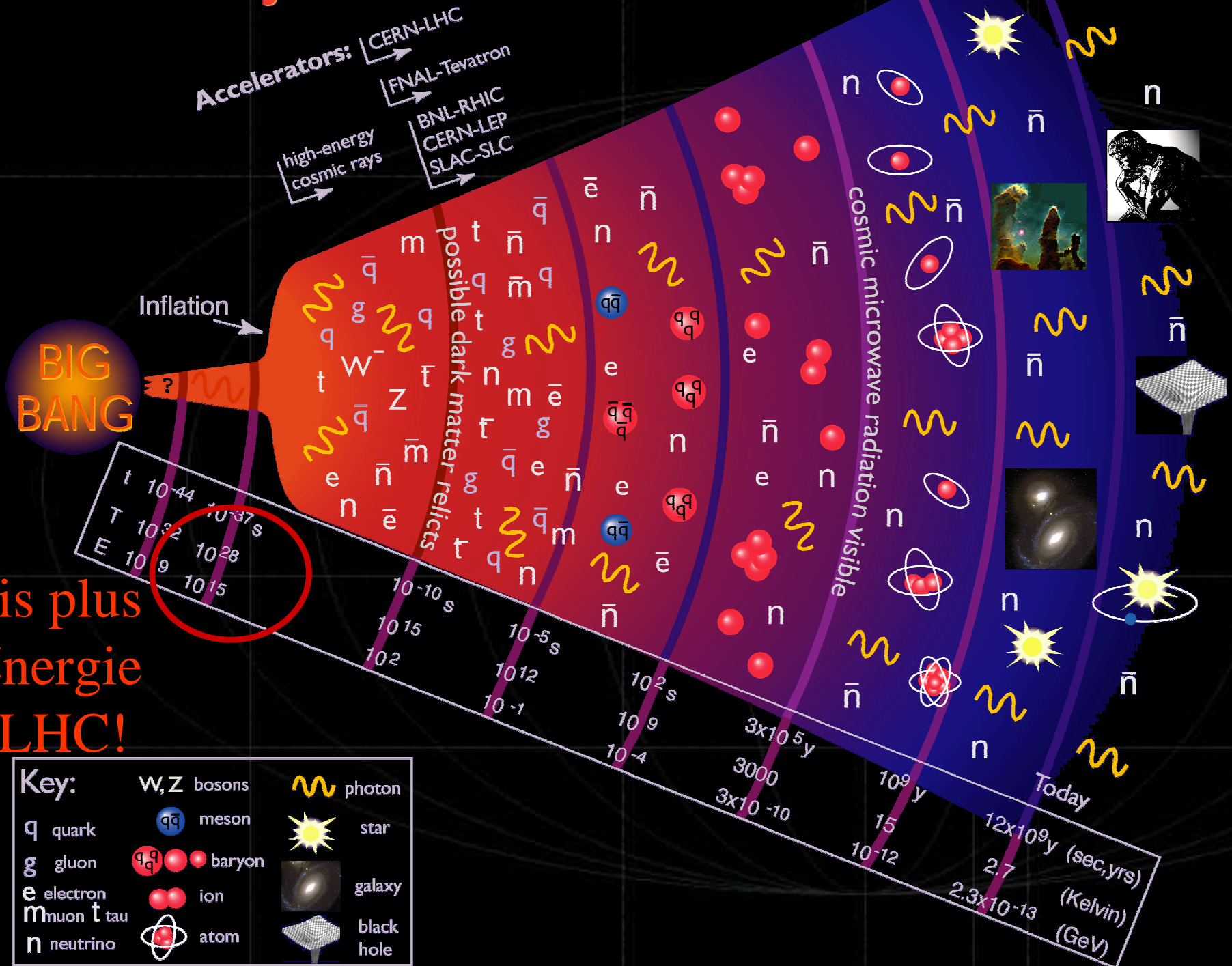
3 minutes

Synthèse
des noyaux
d'hydrogène
& d'hélium

100 million years

Formation des premières
sources lumineuses
Réionisation

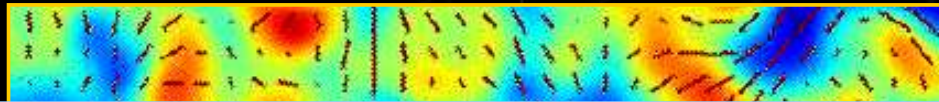
History of the Universe



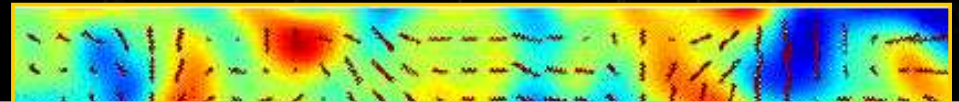
10¹³ fois plus
haute énergie
qu'au LHC!

Inflation \rightarrow ondes gravitationnelles
 \rightarrow B – polarisation du CMB

Mode « E » (irrotationnel)

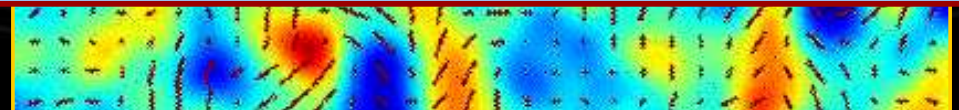
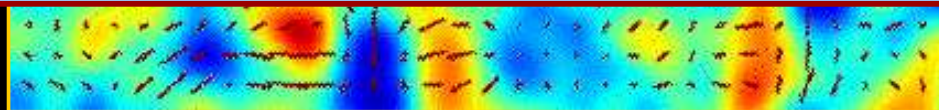


Mode « B » (sans divergence)



Mesurable par Planck!

Accès à la physique fondamentale!



La Cosmologie...

Science jeune

Science active

Très nombreux succès

Nouvelles questions
plus nombreuses encore

Extraordinaires découvertes
en perspective !

... vers une connaissance fine de l'Univers