

Introduction à la Cosmologie

Chapitre 2 : distances

Vincent Boudry

Vincent.Boudry@in2p3.fr



Résumé du chapitre 1

Introduction

- Historique
- Contenu

Instruments & Messagers → mesure

Mesures de distances

Objets

Plan du cours

Paradoxe de Olberts

Loi de Hubble

Rayonnement cosmologique

Distribution de la matière

Quasars & AGN

Paradoxe de Olberts

17^e siècle (Galilée, Kepler, Newton)

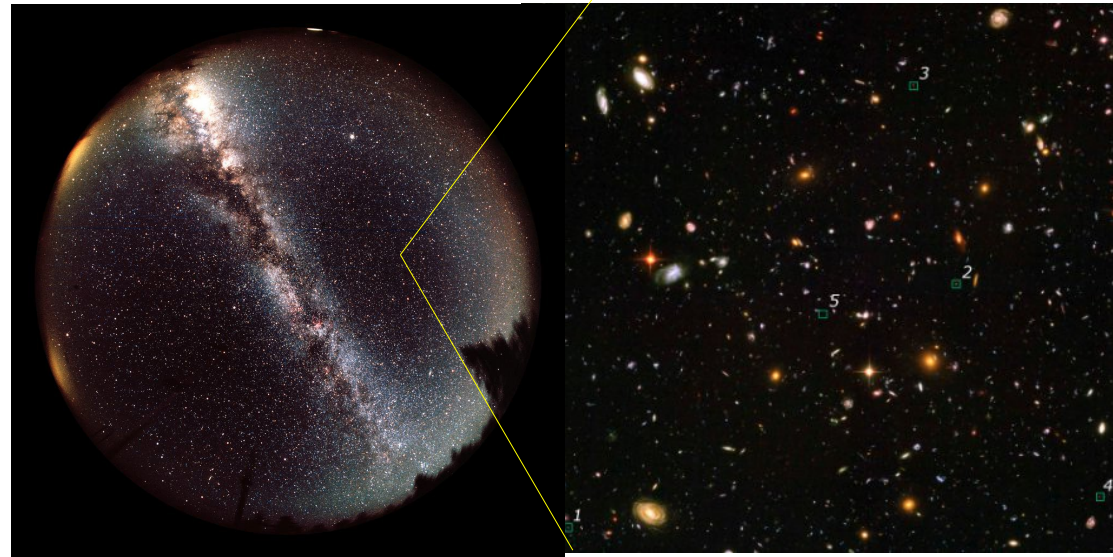
- Univers éternel, statique, infini

Halley (1720), de Chéseaux (1744),
Olbers (1826) :

- le ciel nocturne est noir

Paradoxe :

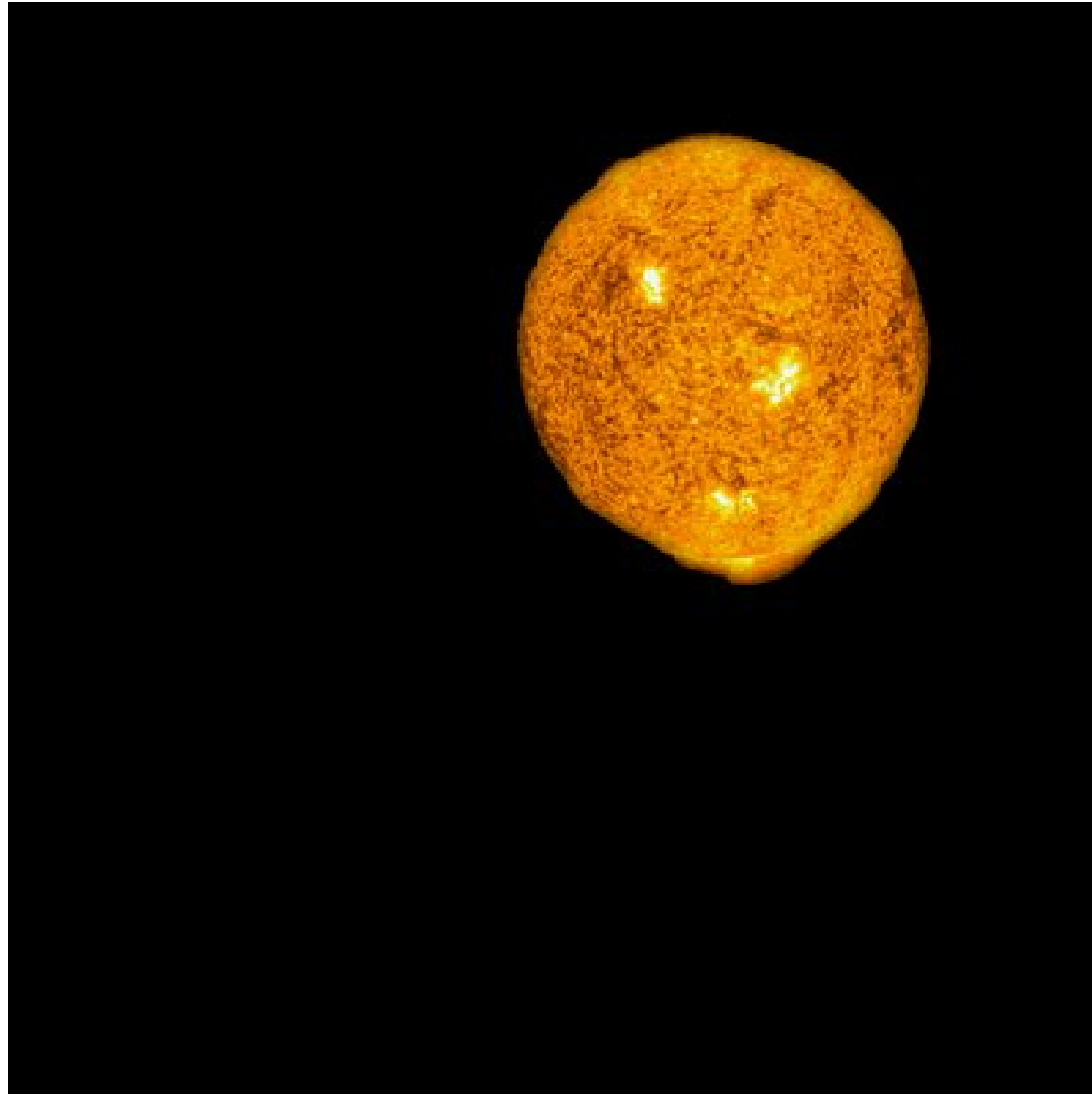
- Population de sources luminosité \mathcal{L} , densité: n
- Nombre dans la couronne sphérique dr : $dN = 4\pi nr^2 dr$
- Flux observé, par source : $I = \mathcal{L}/4\pi r^2$
- Flux total : $I_T = \int I dN \rightarrow \infty$ pour un univers ∞
 - Dimension finie des étoiles \Rightarrow ciel = luminosité moyenne du Soleil
 - Nuages absorbants \Rightarrow échauffement (2^e principe) \Rightarrow luminosité du CN



D. Officer, P. Welch, UofA

NASA, HST
Deep Field

Illustration du principe du paradoxe de Olbert



Source : Wikimédia

Solution du paradoxe :

– l'univers n'est pas éternel, la vitesse de la lumière est finie

⇒ univers visible < univers complet ($r = ct$)

- Univers fixe I_T ↗
- Expansion de l'univers ⇒ diminution de l'énergie des photons par effet Doppler ⇒ I_T ↘

Effet Doppler-Fizeau (1843, 1848)

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e}$$

En relativité

$$\beta = \frac{v}{c}$$

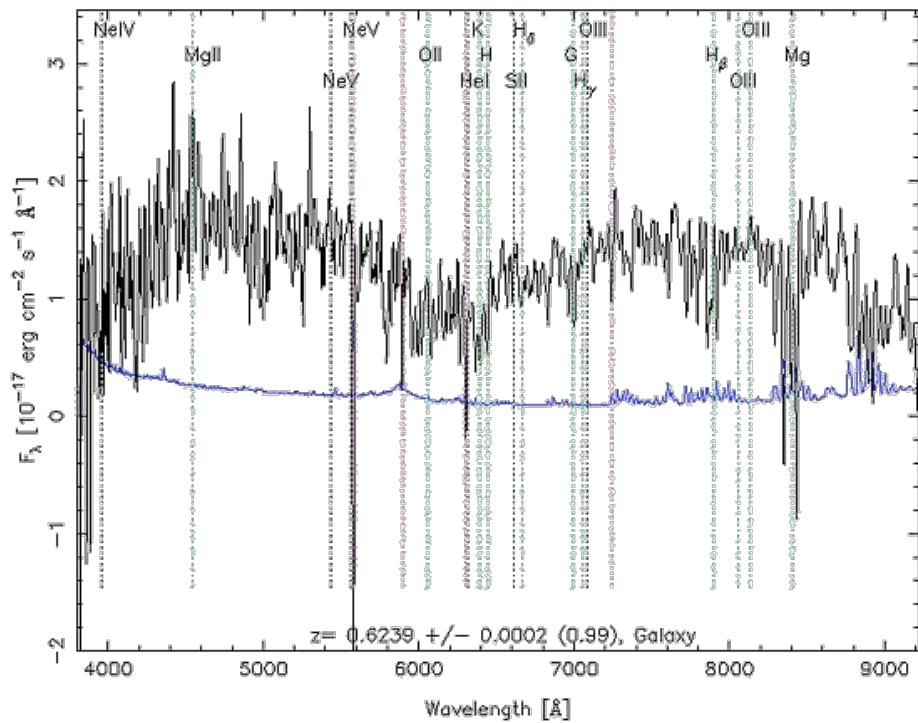
$$1 + z = \frac{\lambda_o}{\lambda_e} = \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}}$$

Vitesse faible

$$v = cz$$

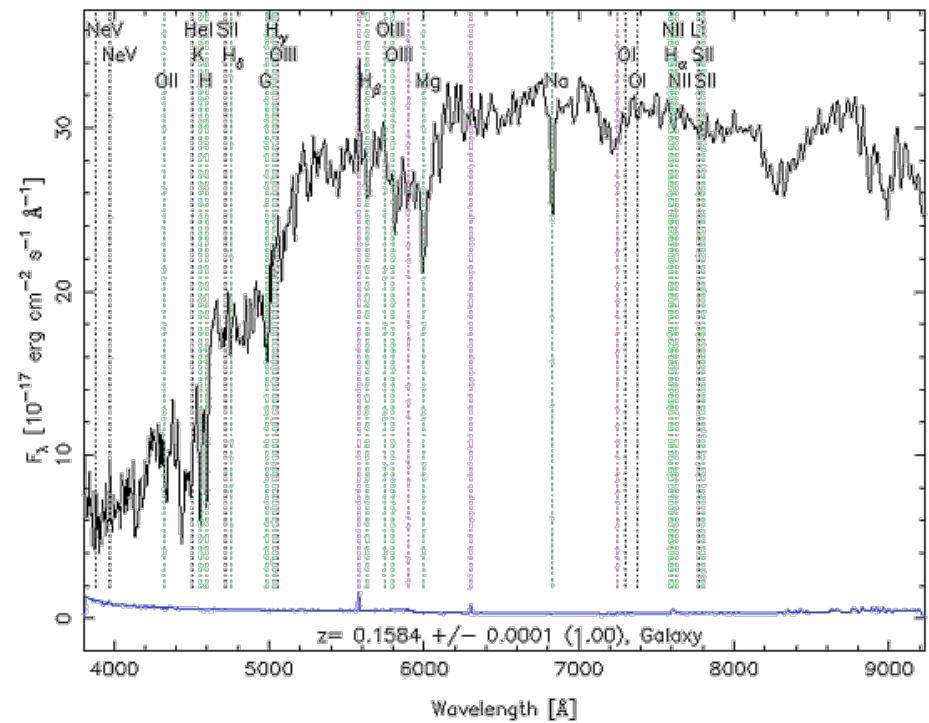
exercice 2

RA=220.69542, DEC= 0.60663, MJD=51662, Plate= 308, Fiber=331



Etoile double

RA=186.18278, DEC=-0.34586, MJD=52000, Plate= 288, Fiber= 37

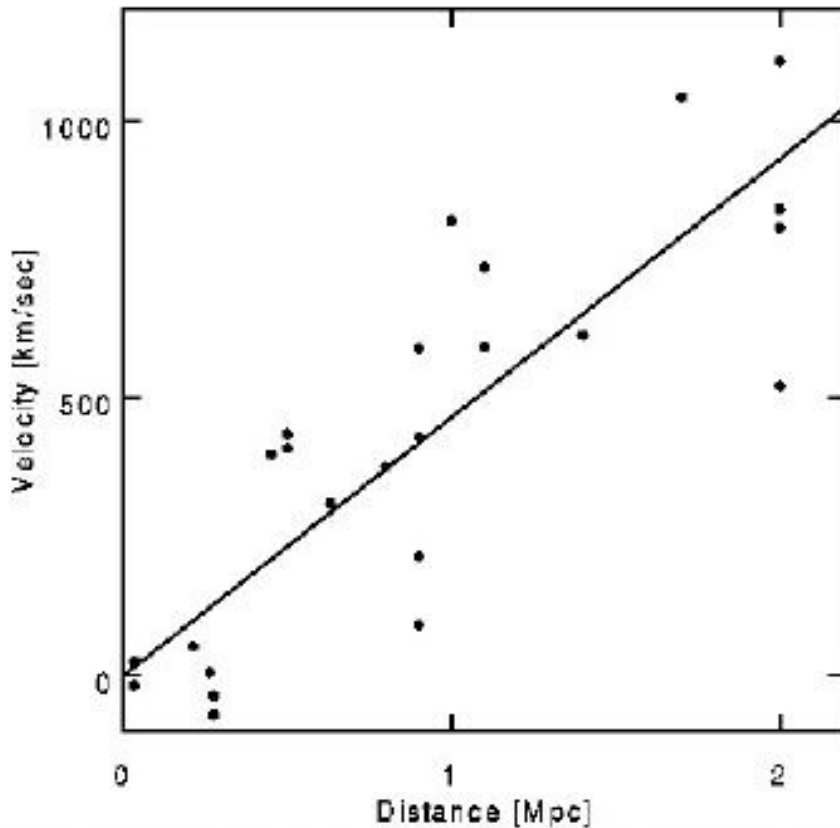


Galaxie

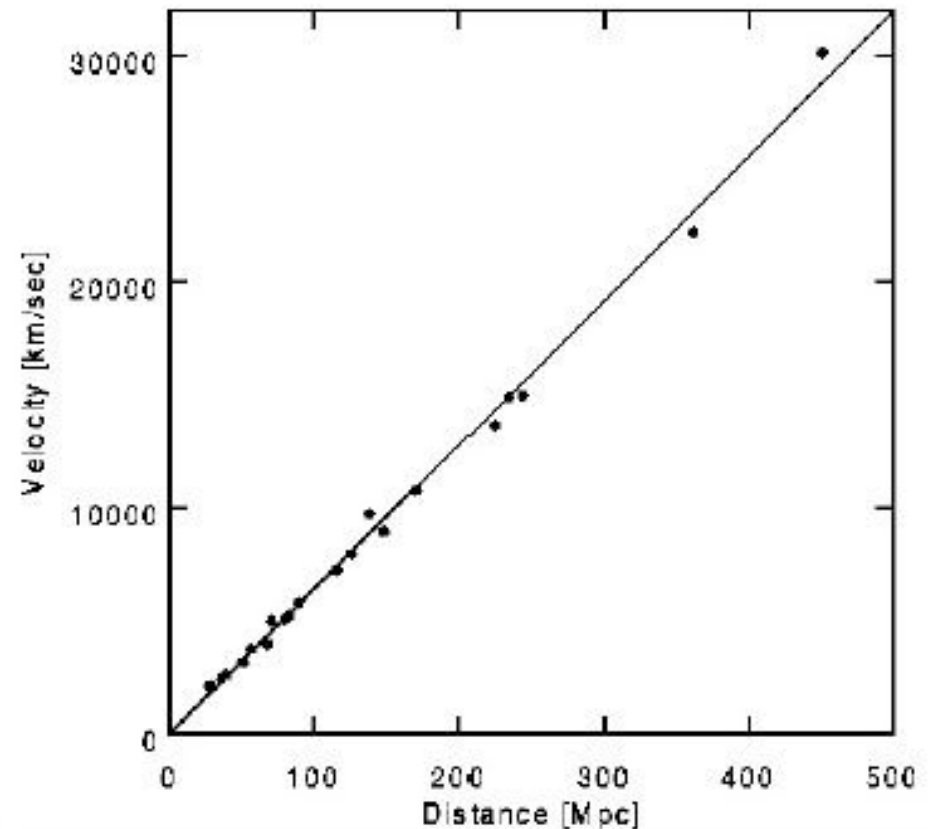
Loi de Hubble

1924 distance d'Andromède \Rightarrow extra-galactique

1929 fuite des galaxies : $v = H_0 d$



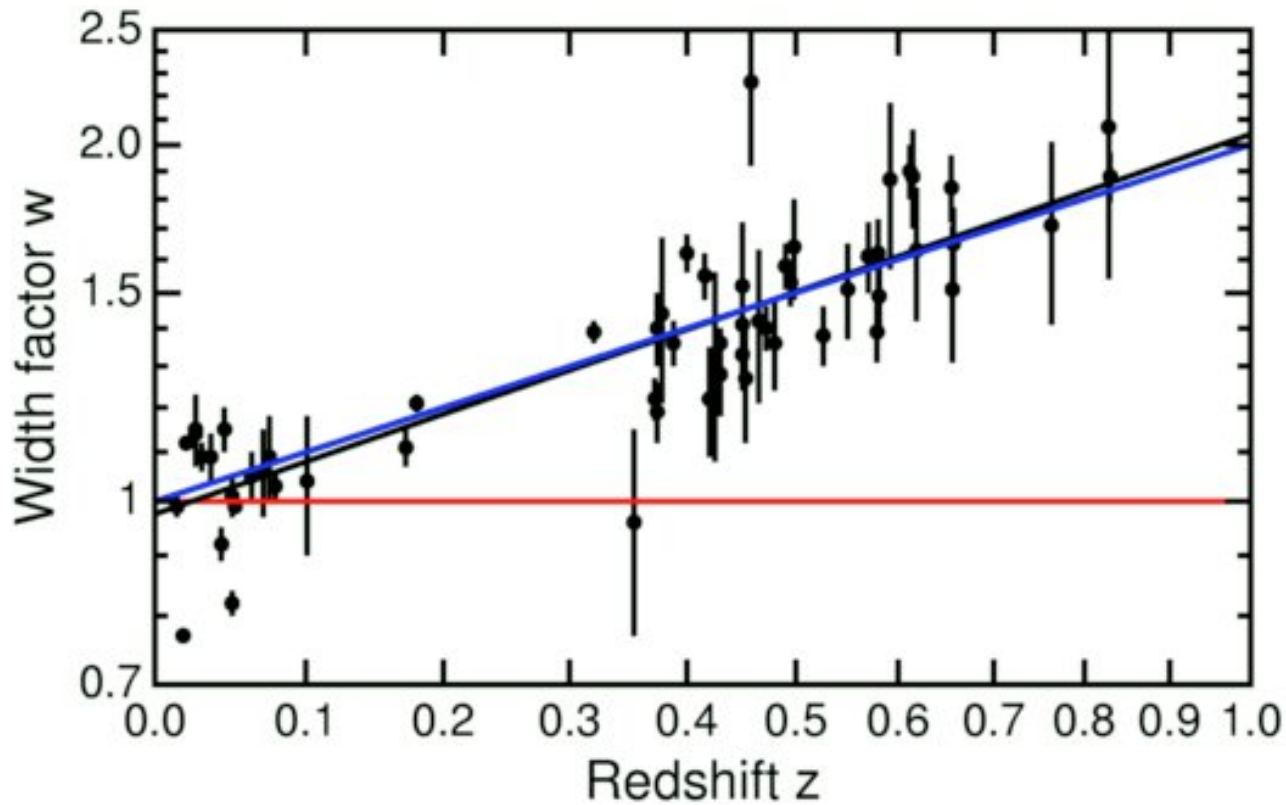
En 1929



en 1999

$$H_0 = 72 \pm 5 \text{ km / s / Mpc}$$

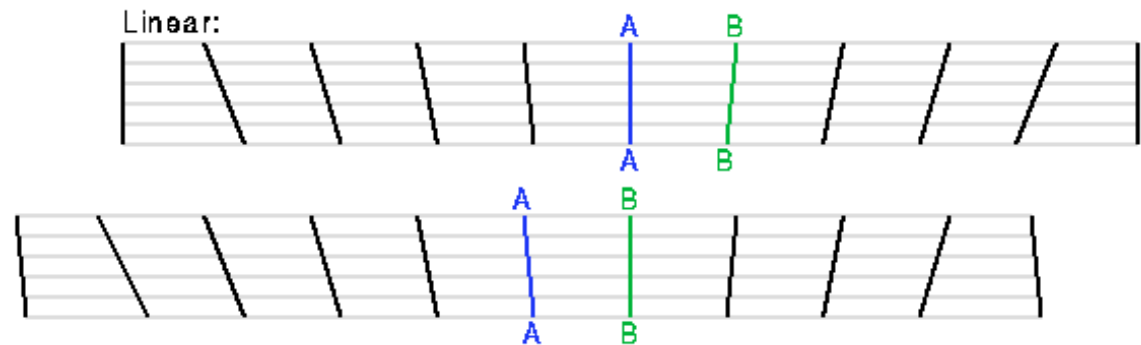
Fatigue de la lumière ? Effet « ad-hoc », pas d'élargissement



Périodes de supernovae Ia (Supernovae Cosmology Project 2001)

Propriété fondamentale : expansion homologue

tous les points (A, B) de l'Univers sont équivalents,
il n'y a pas de centre



Diagrammes espace-temps

Coordonnées comobiles : suivent le mouvement du flux de Hubble

⇒ Facteur d'échelle $R(t)$ commun pour tout l'Univers

– H_0 constante dans l'espace, pas dans le temps $\Rightarrow H(t)$

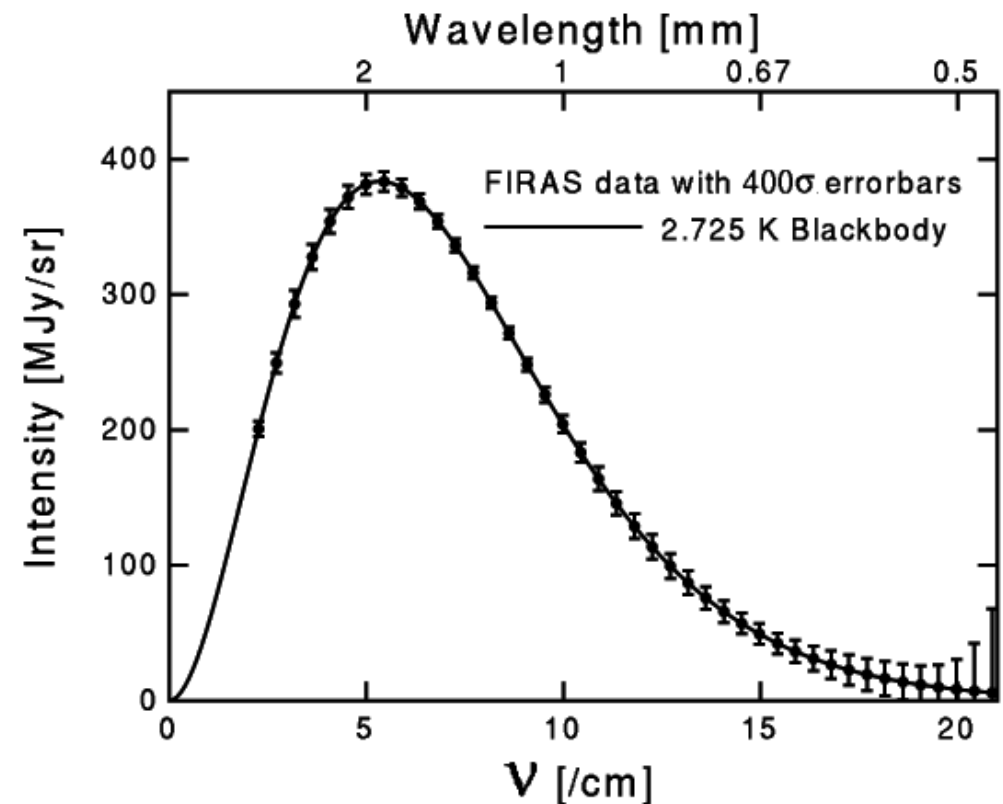
Les « petits » objets (< amas de galaxies) ne se dilatent pas

Le fond de rayonnement cosmologique

CMB (Cosmic microwave background)

Rayonnement millimétrique isotrope à 10^{-5} près
(après correction dû au mouvement de la
Terre /r soleil, du soleil /r galaxie,
de la galaxie /r amas, ...)

Rayonnement de corps noir
parfait (satellite COBE)



Prédit par Gamow dès 1946 (nucléosynthèse) à 10 Kelvins,
entrevu par McKellar en 1941

re-étudié par Dicke, Peebles, Roll, Wilkinson en 1965

Mesuré sur Terre par Penzias et Wilson à 7,35 cm

Densité d'énergie par
intervalle de λ
(loi de Planck) :

$$\frac{du}{d\lambda} = \frac{8\pi hc}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right)}$$

Si l'on multiplie les dimensions spatiales et la longueur d'onde par le facteur
d'expansion : $f = \lambda' / \lambda$

On ne change pas la forme, à *nombre de photons constant*
($E = hc / \lambda$), mais T devient T'

Un gaz de photons thermique contenu dans un volume en expansion conserve sa distribution de corps noir

Densité actuelle :
$$\frac{N}{V} = 0,244 \left(\frac{kT}{\hbar c} \right)^3 = 410 \text{ cm}^{-3}$$

Hypothèses du Big Bang :

- le libre parcours moyen est très grand aujourd'hui car la densité moyenne de l'Univers est faible $< 10^{-6}$ baryon cm^{-3}
- quand ce libre parcours était faible, les photons étaient en équilibre avec la matière : à 3000 Kelvin l'hydrogène est ionisé, opaque

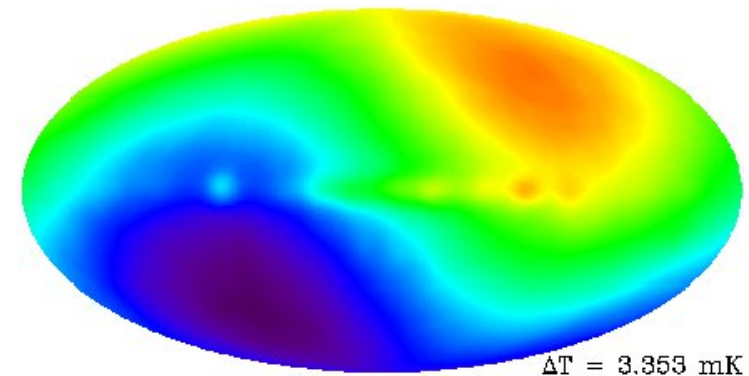
⇒ Nous voyons les photons émis à $T = 3000 \text{ K}$, lorsque l'Univers était
 $f = 3000\text{K} / 3\text{K}$ fois plus petit

La matière qui les a émis s'éloignait ⇒ Doppler $z = 1000$

Difficultés de la découverte : fenêtre atmosphérique, isotropie

Mouvements par rapport au CMB (repère comobile)

- Terre autour du Soleil 30 km/s
- Système solaire 370 km/s
- Groupe local de galaxies 600 km/s



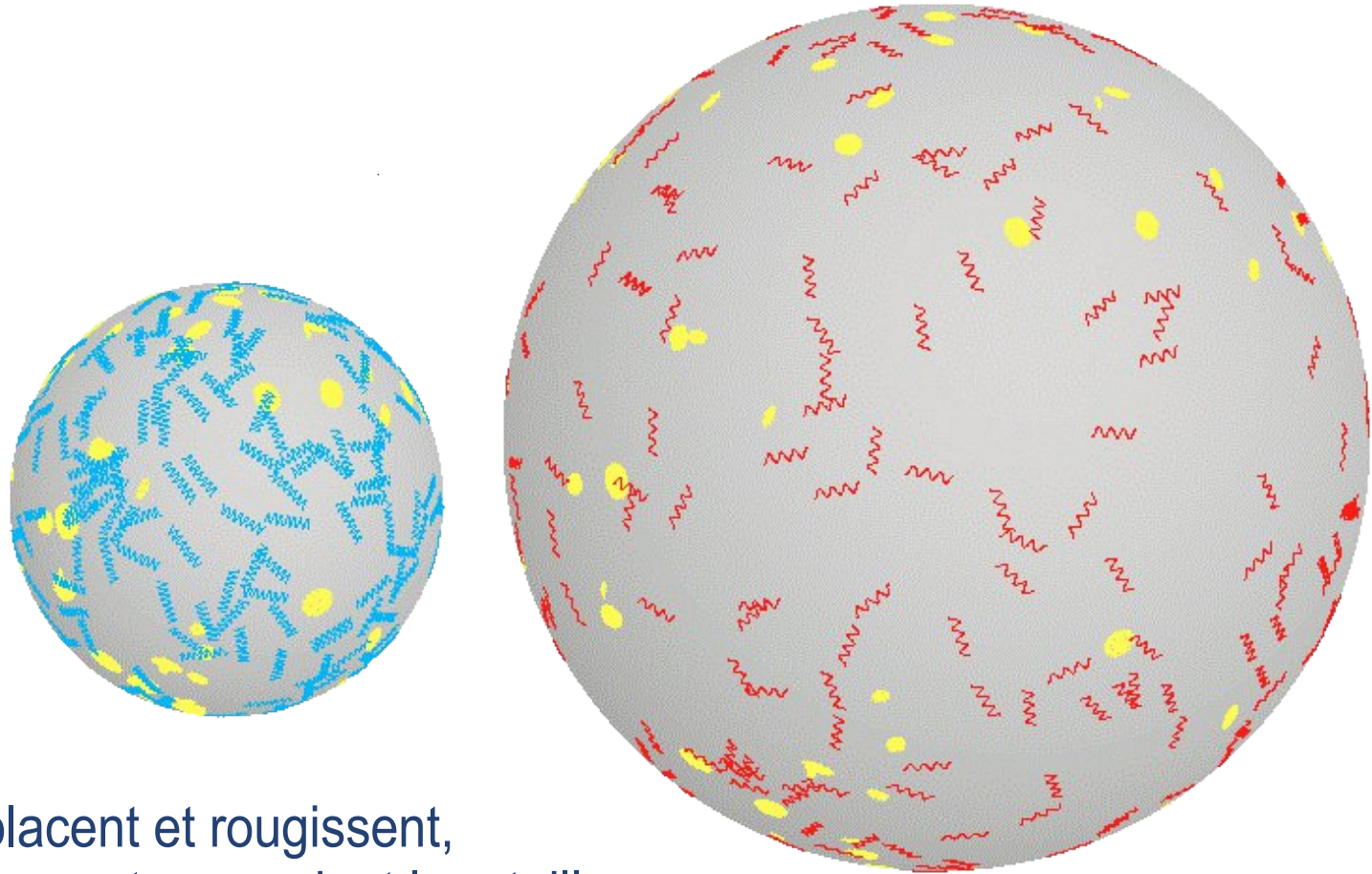
Nombre de photons CMB constant dans le covolume,

Énergie \rightarrow : travail de la pression de radiation $p = u / 3$ (u = densité d'énergie)

L'Univers est opaque pour $z > 1000$

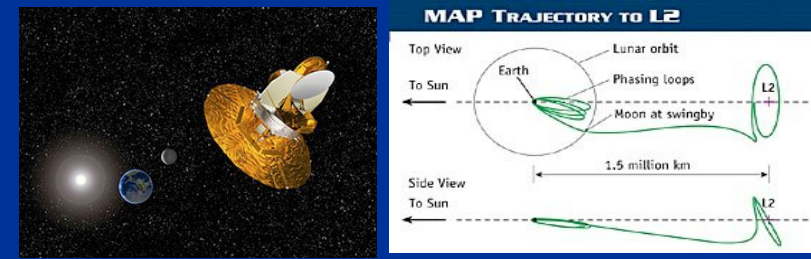
On ne peut pas « voir » le Big Bang

Analogie du ballon gonflé (univers de dimension finie)

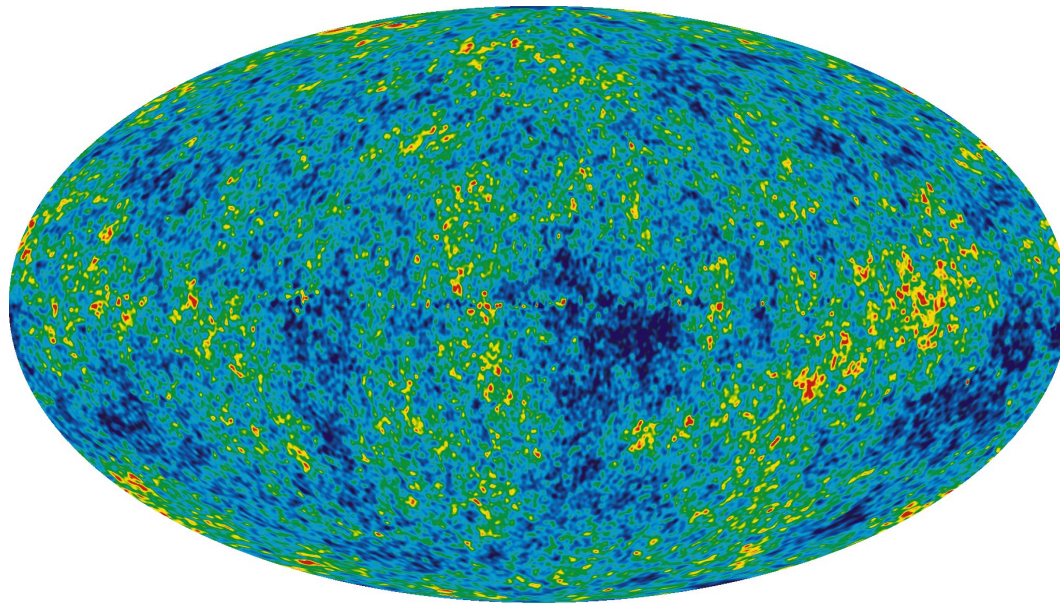


Les photons se déplacent et rougissent,
les galaxies se dispersent en gardant leur taille

Fluctuations (WMAP)



WMAP: 1995, launched in 2001



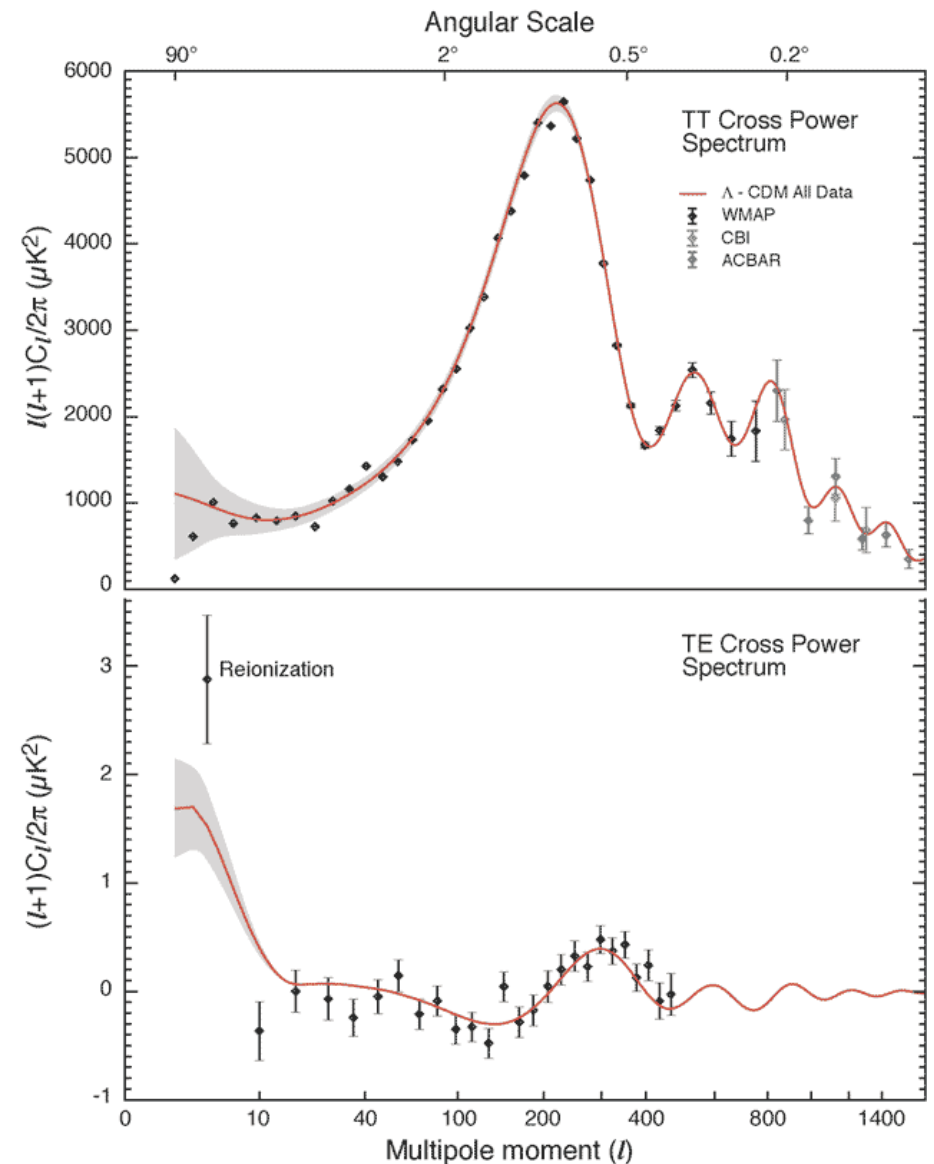
-200 T (μK) 200 WMAP Science Team

Distribution caractérisée par

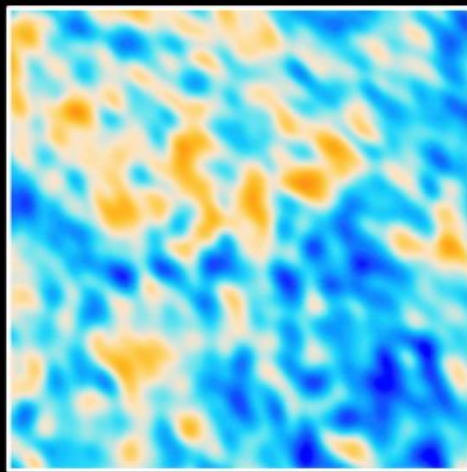
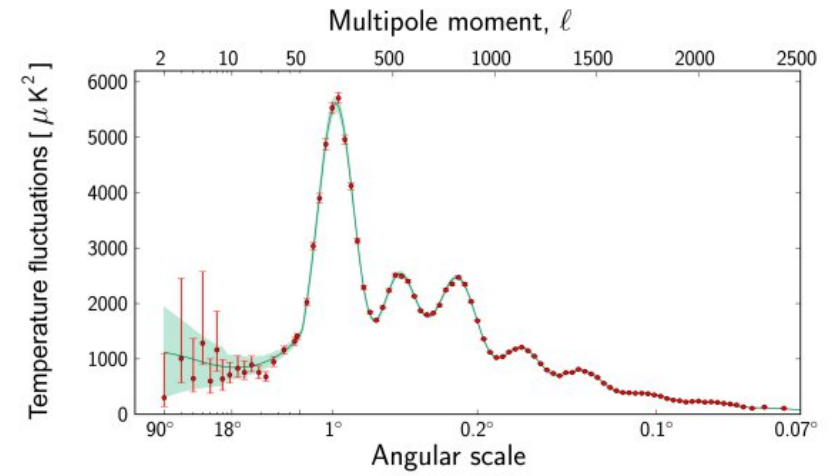
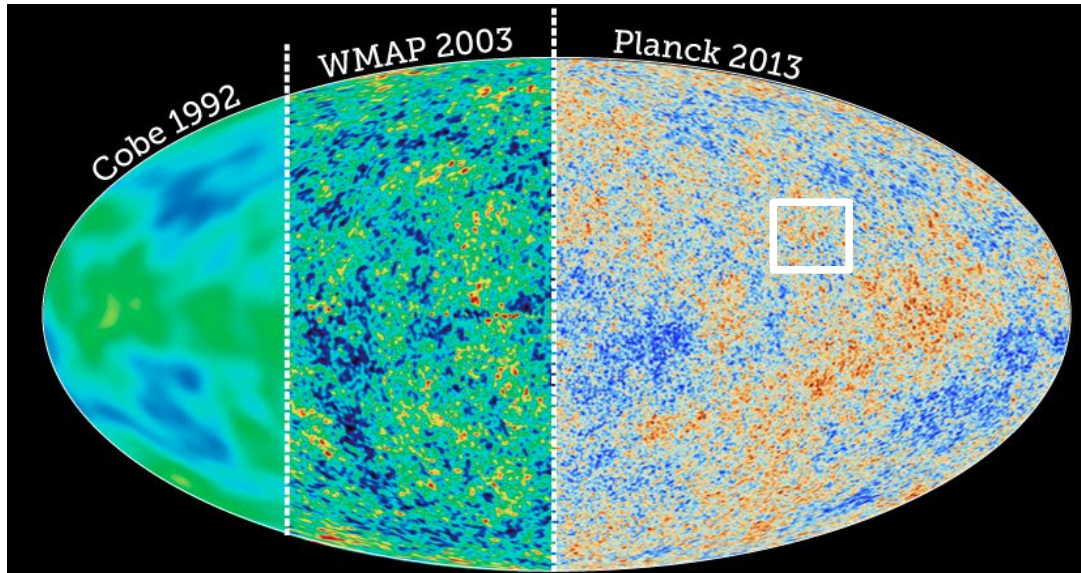
une fluctuation gaussienne $\rightarrow \mu, \sigma$

- $\mu \propto T \propto \text{densité}$

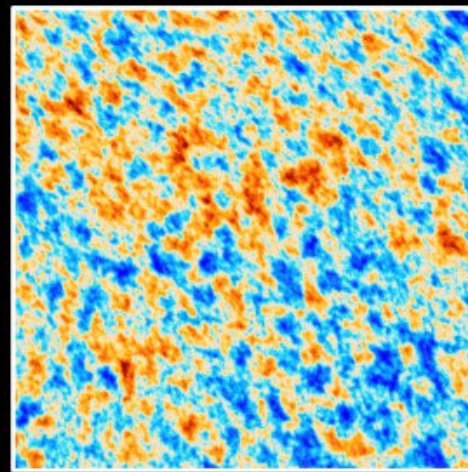
\Rightarrow Moments angulaires



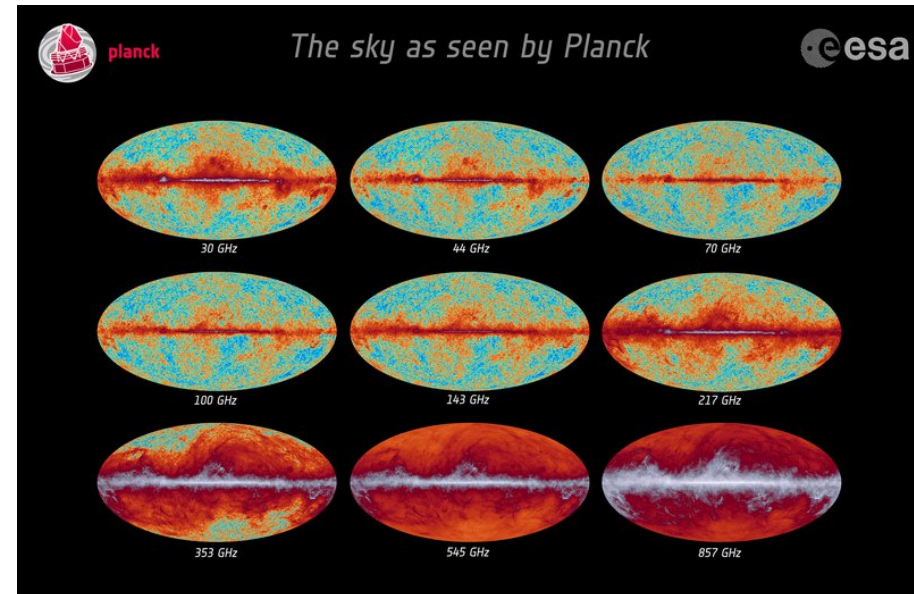
Planck



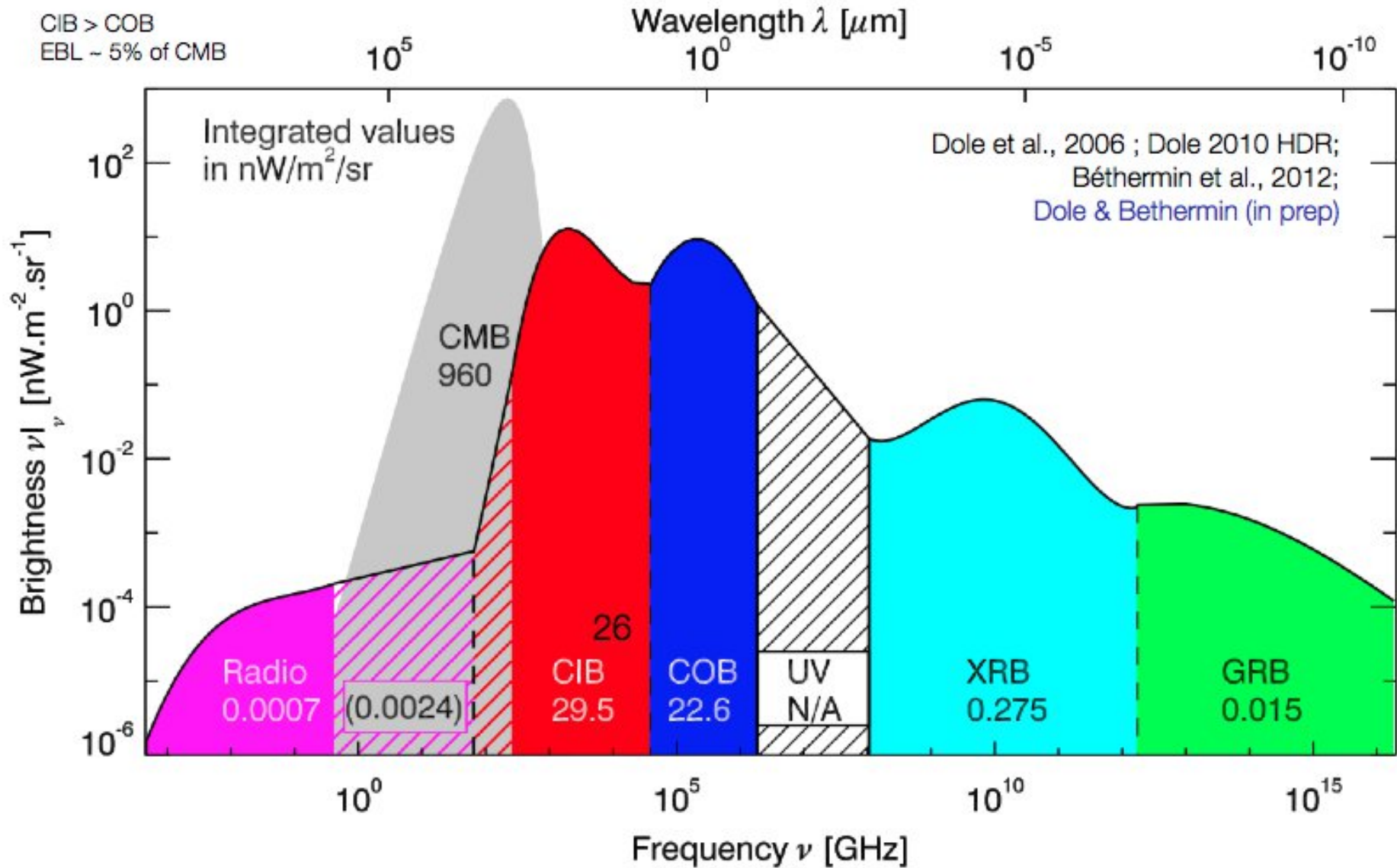
WMAP



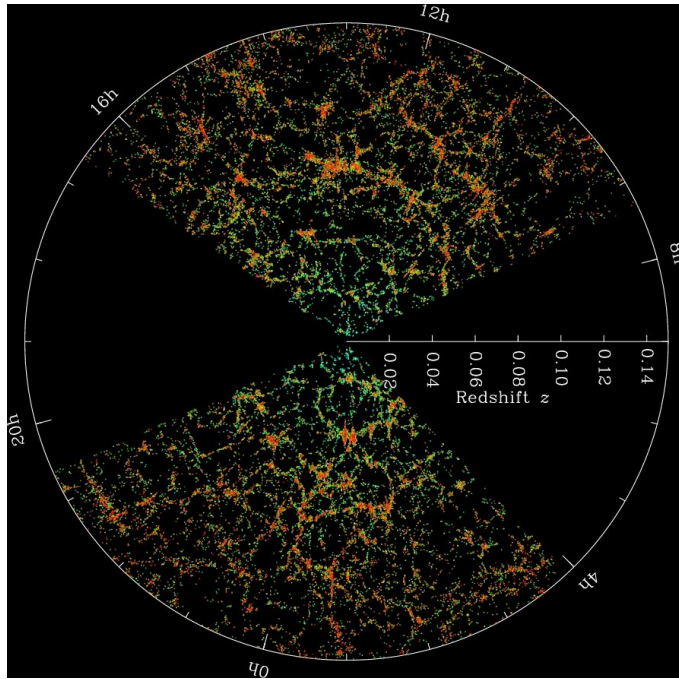
Planck



AUTRES C*B :



Distribution de la matière

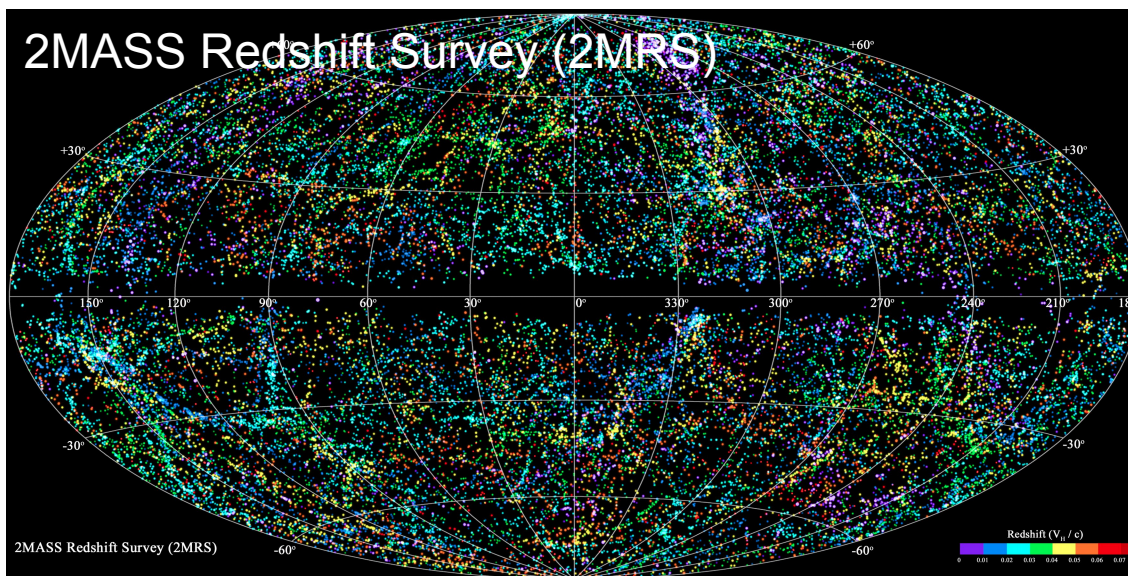


Difficultés :

- faire du 3D,
- corriger pour les galaxies peu lumineuses
- ≤ 2 Gal (500Mpc)
- Corriger les effets gravitationnels

Structures :

- amas,
- superamas,
- vides,
- filaments jusqu'à 100 Mpc

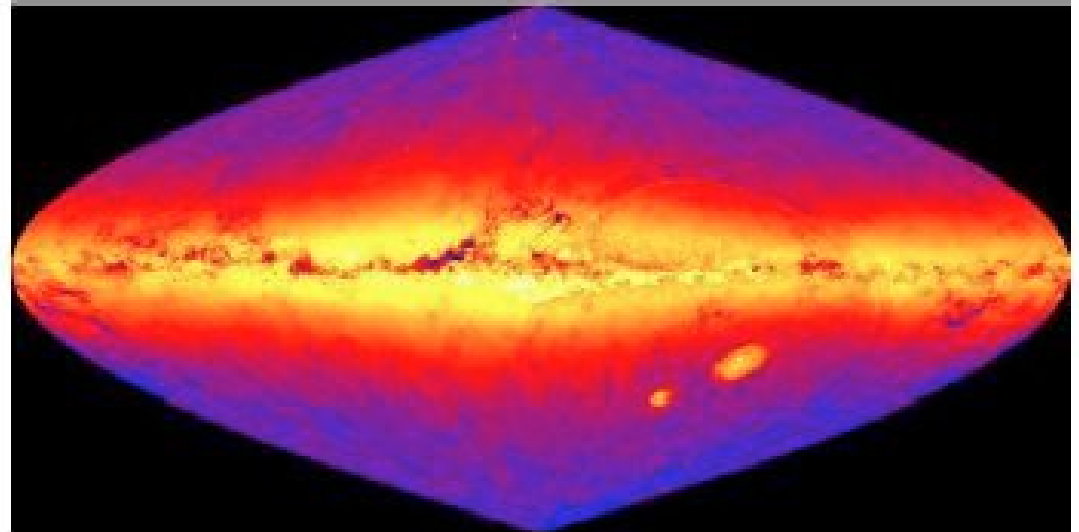


Video1 (SDSS)

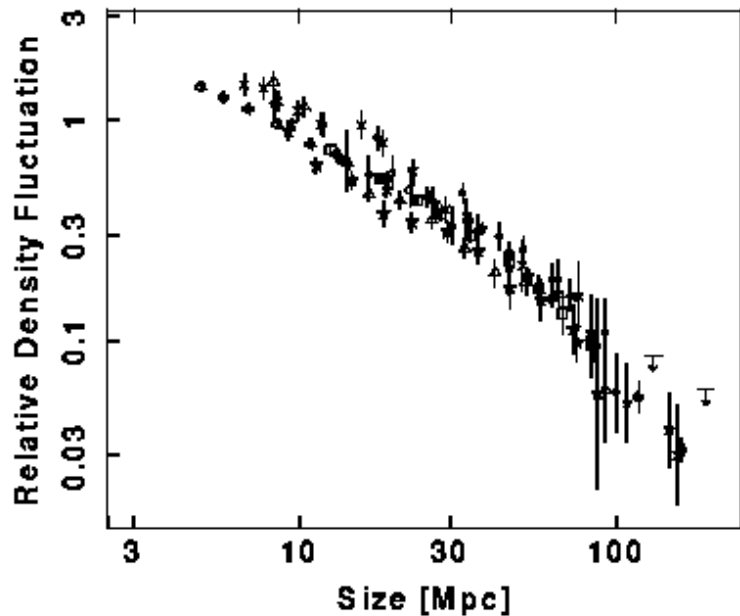
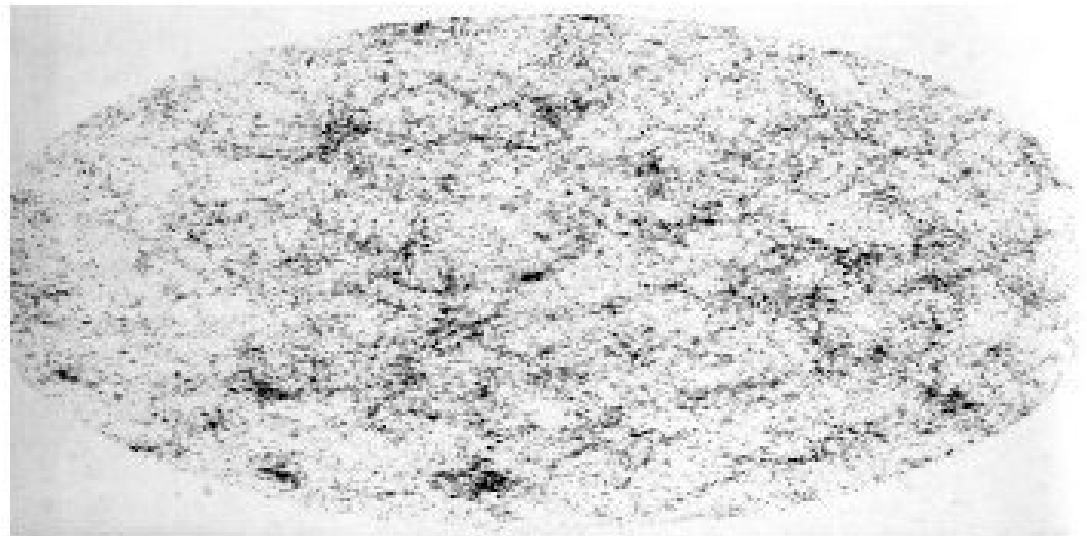
Principe cosmologique :

- espace homogène et isotrope, à grande distance

C'est un principe



La distribution des étoiles (USNO) diffère des galaxies (Shane & Wirtanen) :



Quasars & AGN

Les objets les plus lointains dans l'Univers

CMB $z = 1000$

Galaxie la plus lointaine 2013: $\sim 13,1 \cdot 10^9$ al ($z \sim 10$)

- Galaxie Abell 1835 IR1916, (VLT 2004)
 13×10^9 années-lumière, $z = 10$

Noyaux actifs de galaxies (AGN)

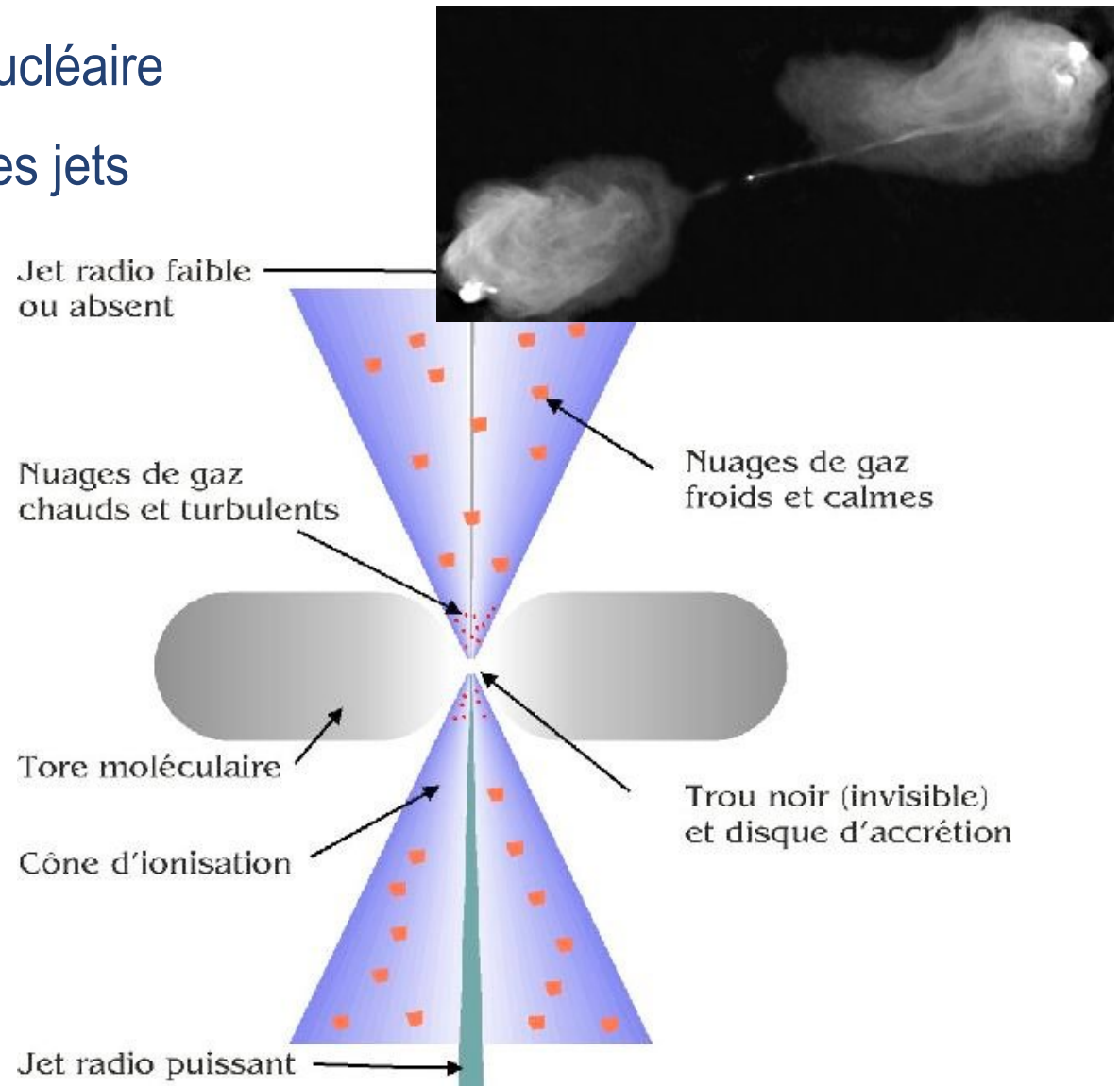
- galaxies de Seyfert ~ 1940 , noyau très brillant
- radio-galaxies ~ 1950 , ondes-radios très intenses venant du coeur (mesuré par interférométrie à longue base vers 1970)
- quasars = quasi-stars (1960-1963) très compact car variation temporelle sur quelques jours

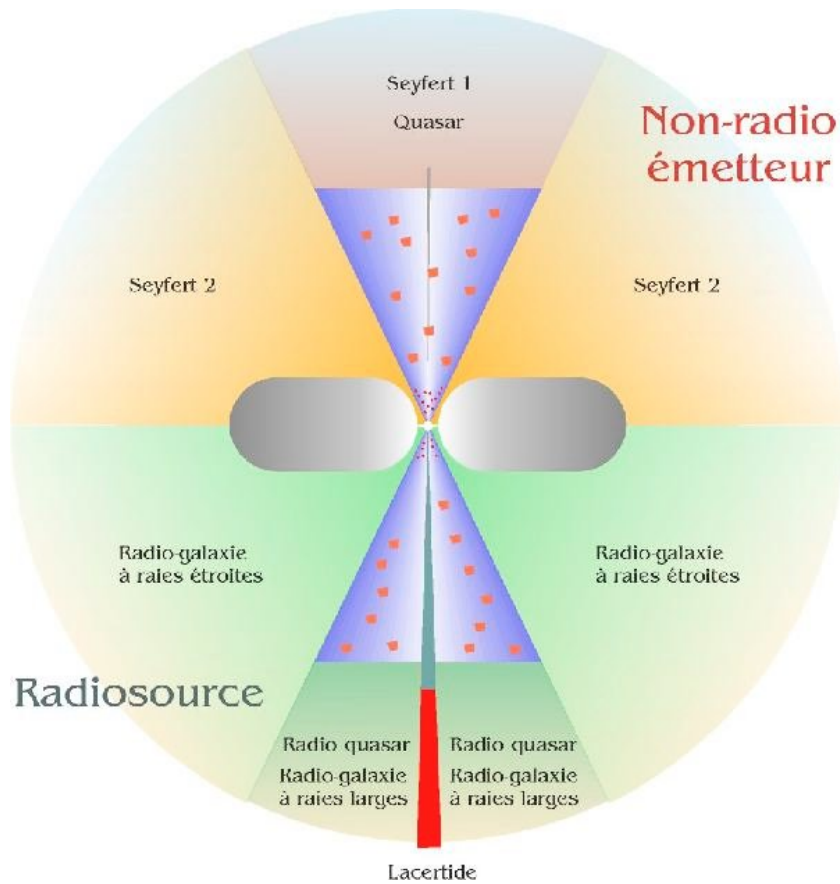
La source d'énergie est > la fusion nucléaire

⇒ trou noir central, anisotropie des jets



Seyfert IC1566





Vérifier l'homogénéité

« Remonter » le temps

Les quasars sont plus rares aujourd'hui

L'Univers a une histoire

Comprendre cette histoire :

- univers primordial chaud, formation des structures

Alternatives

Principe cosmologique parfait :

- homogénéité de l'espace et du temps

H_0 mesuré par Hubble = 530 km/s/Mpc \Rightarrow âge plus jeune que la Terre !

- Controverse sur H_0 jusqu'en ~ 1990

Modèle de l'état stationnaire (Hoyle, et al. 1948)

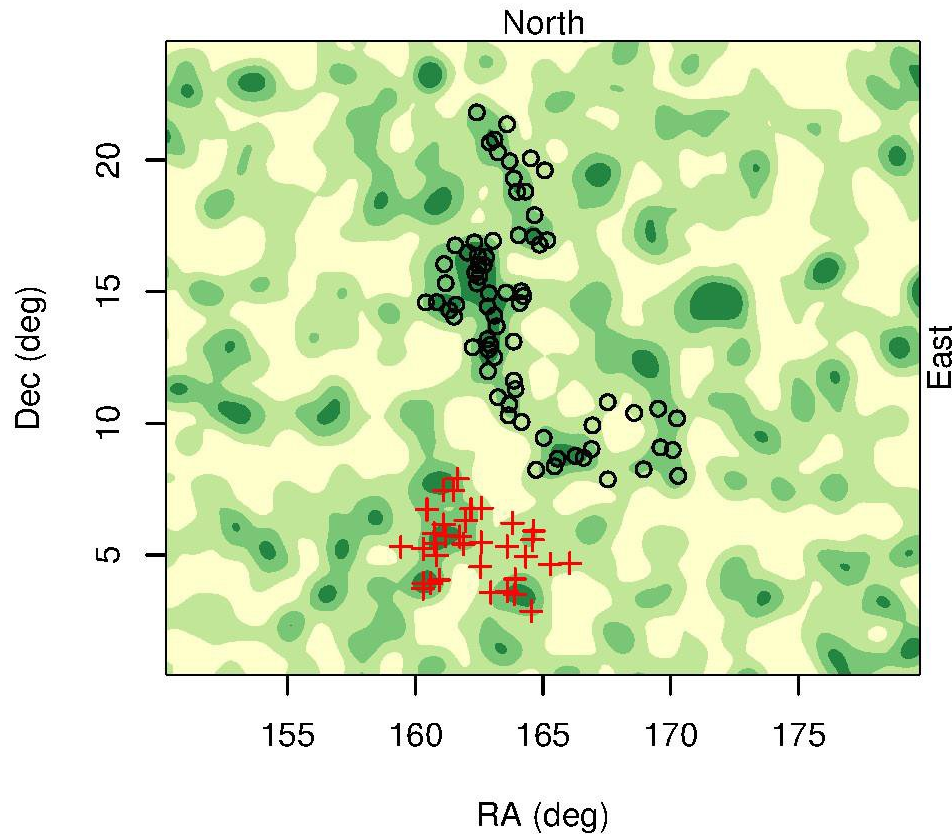
- inventeur de l'expression « Big Bang » dans les années 1950

Expansion avec création continue de matière

Modifié pour CMB (Narlikar et al.)

. . . entre autres

Quelques épines ?



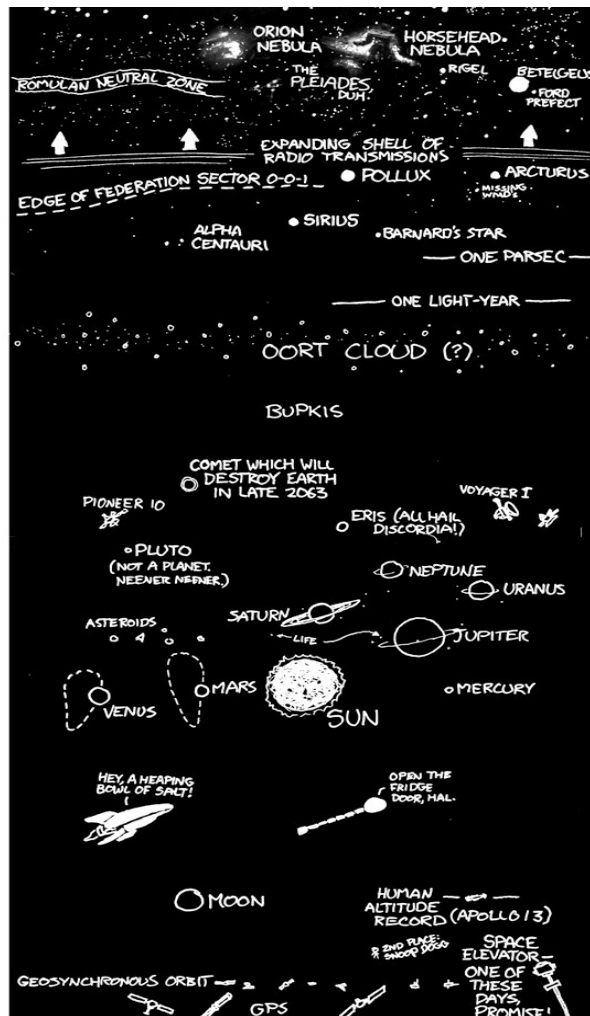
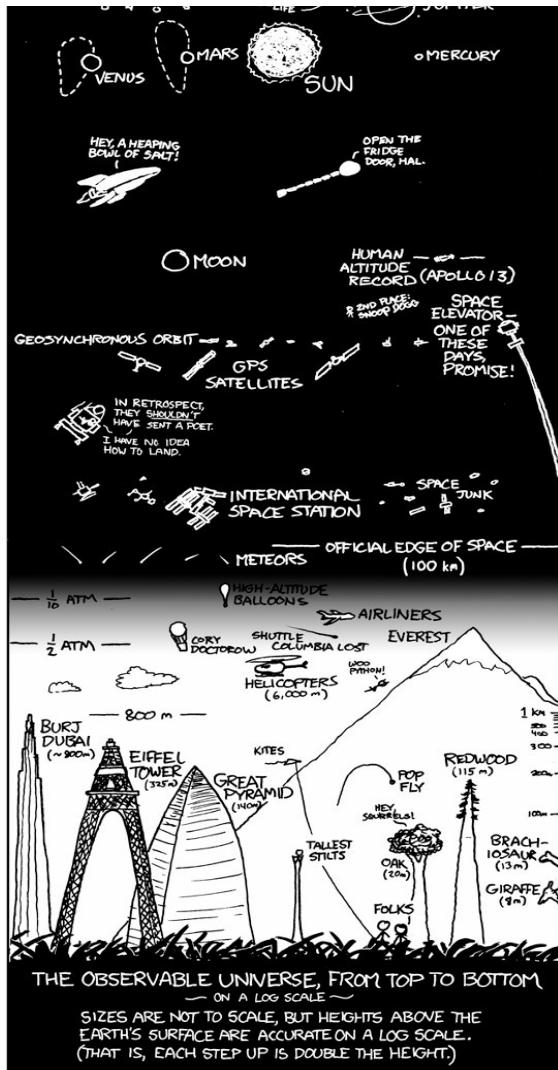
R. G. Clowes / UCLan

Huge-LQC :

Plus grande structure de l'univers ?

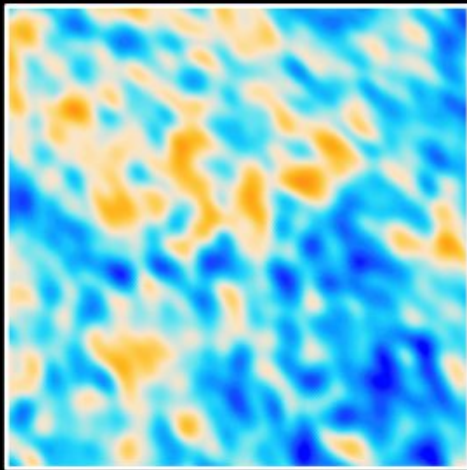
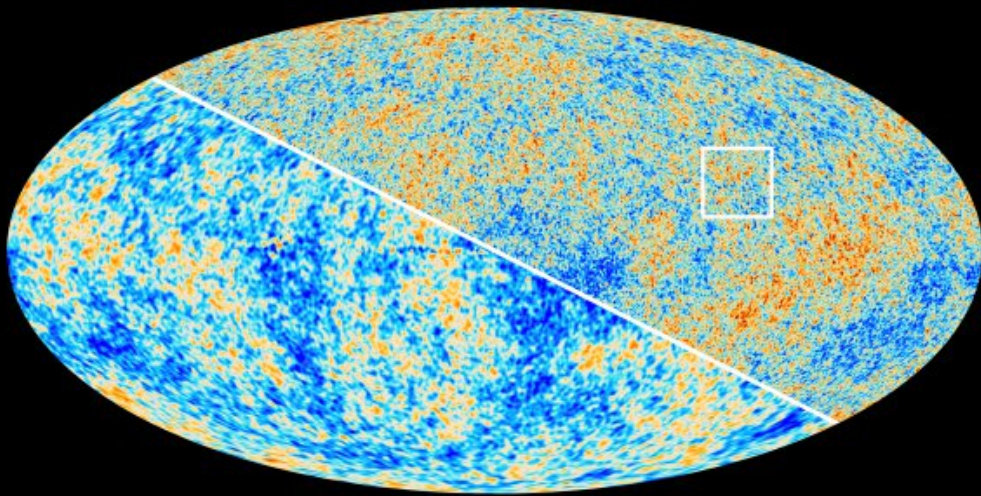
- mesuré par le Sloan Digital Sky Survey (ou SDSS)
 - 25 % du ciel
- Distribution de 73 Quasar sur 4 Gal (~1 Gpc)
 - $z \sim 1.3$
 - sur la distribution de galaxies
- principe cosmologique
 - $L_{\max} \sim 1,2 \text{ Gal (370 Mpc)}$

Extras

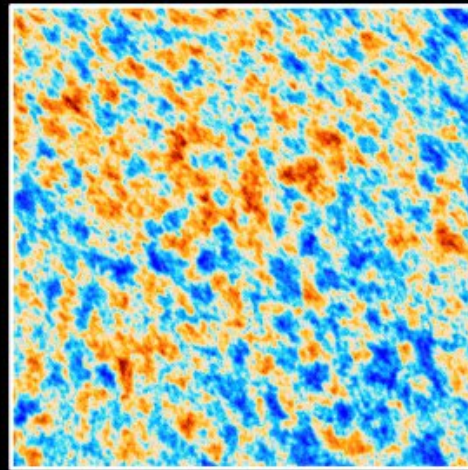


<http://xkcd.com/482/>

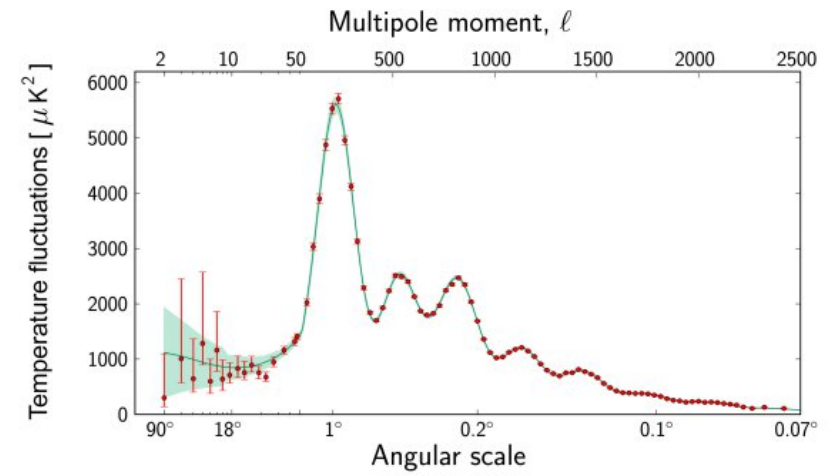
The Cosmic Microwave Background as seen by Planck and WMAP

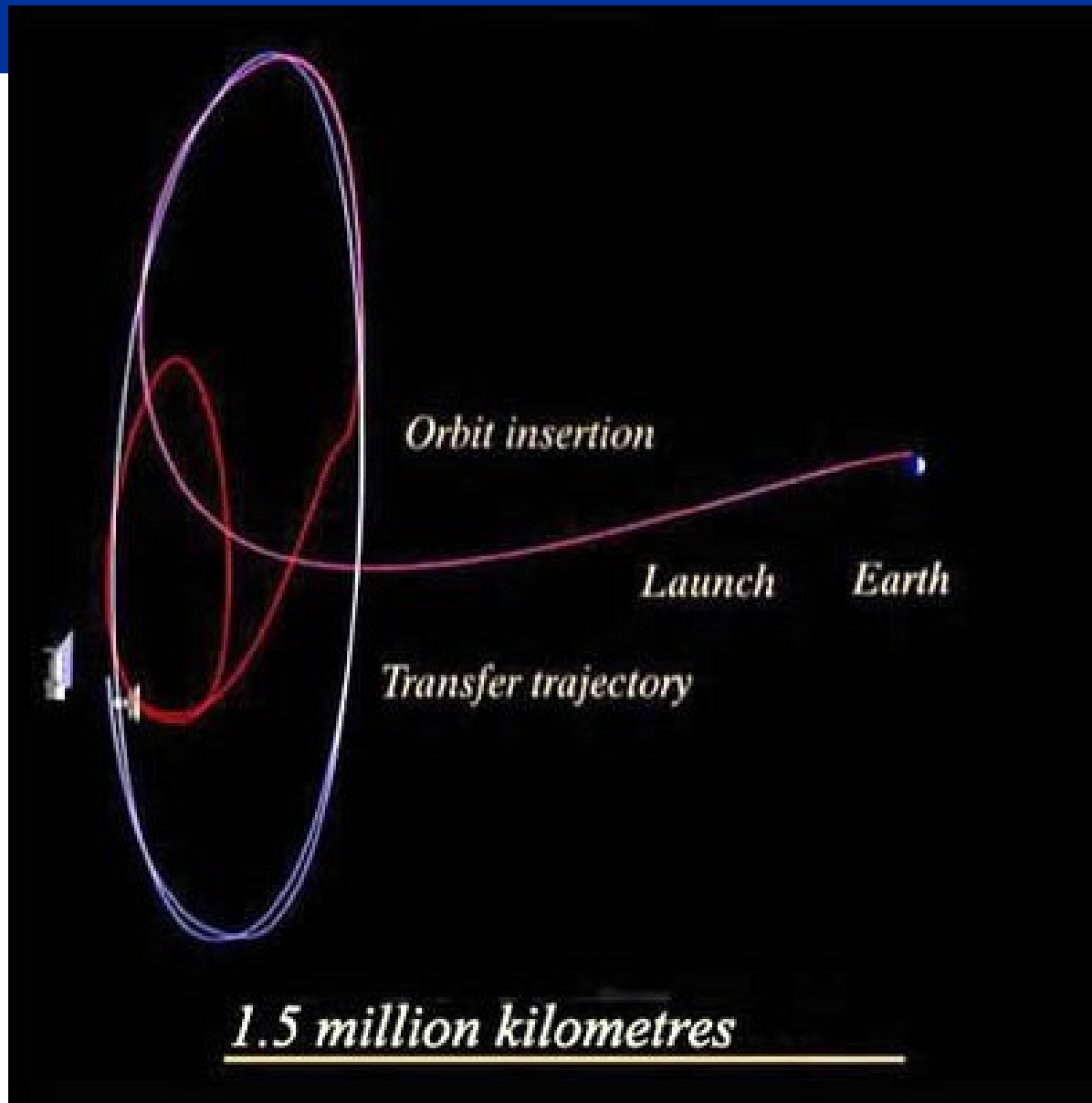


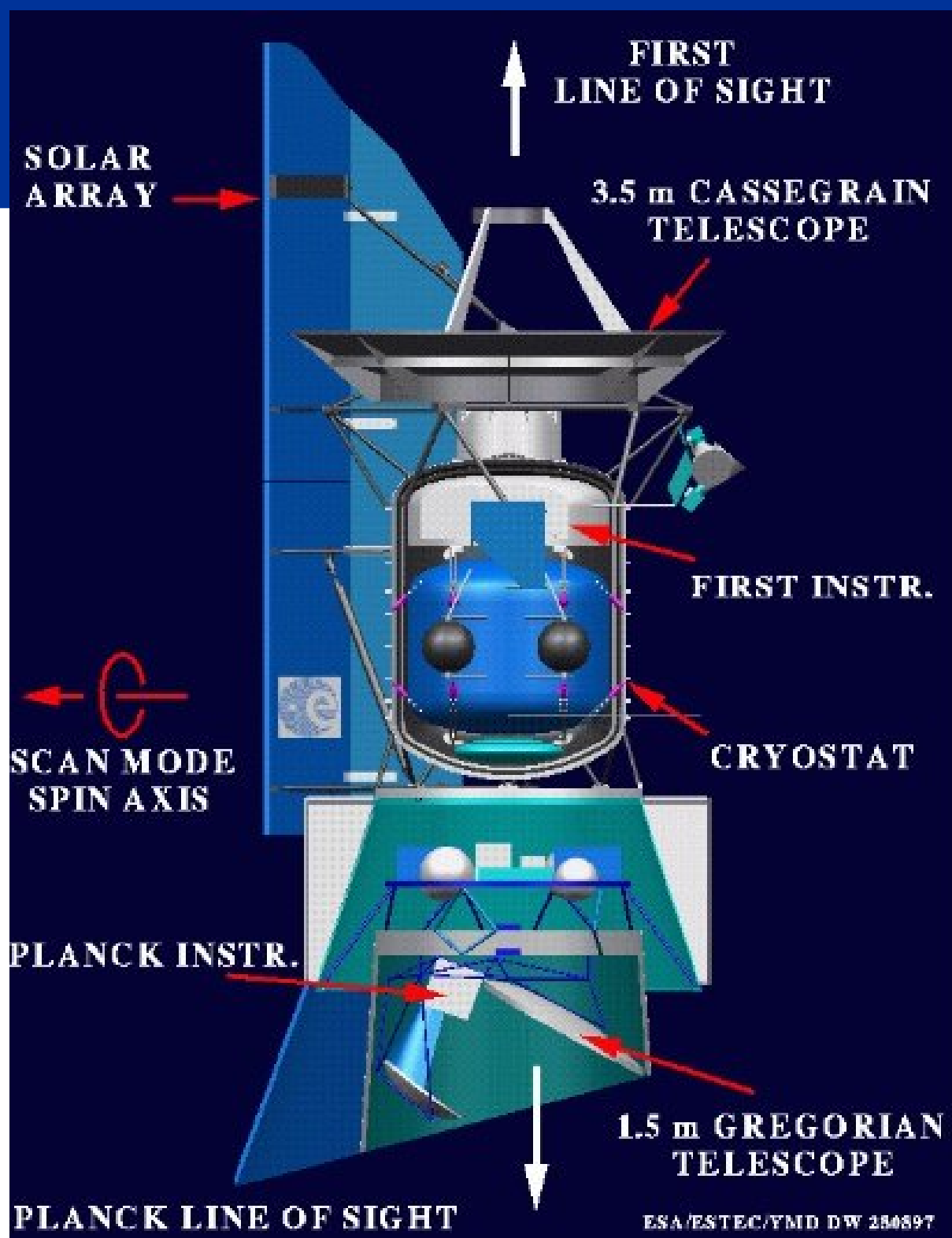
WMAP

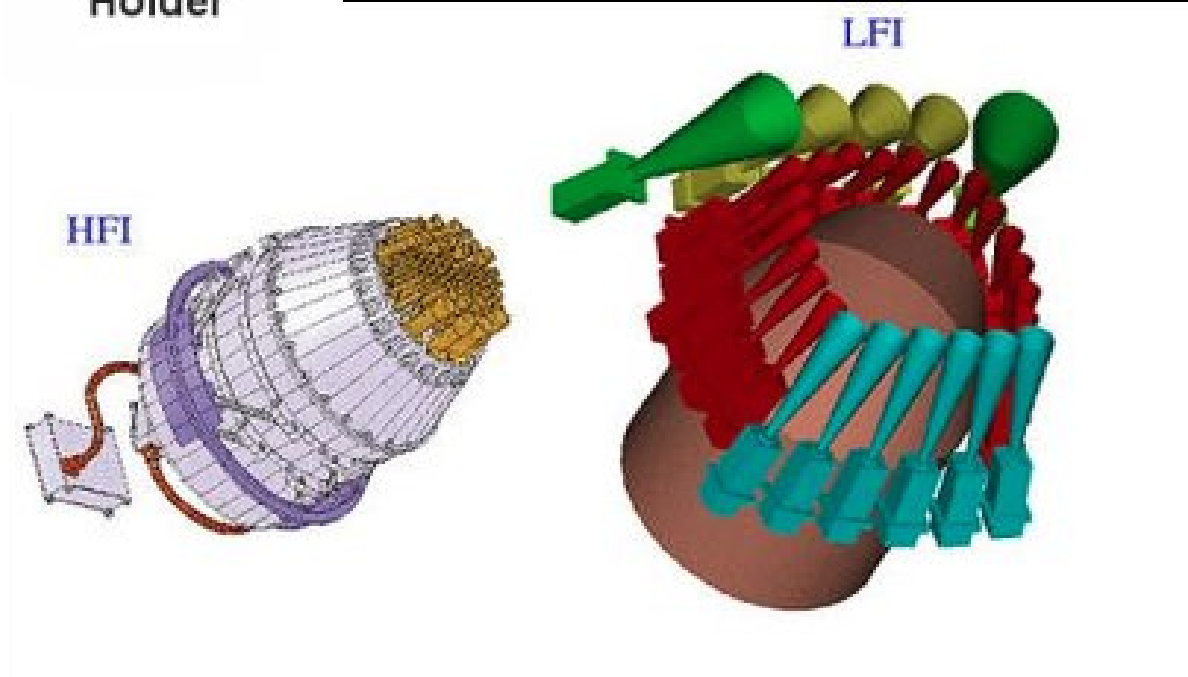
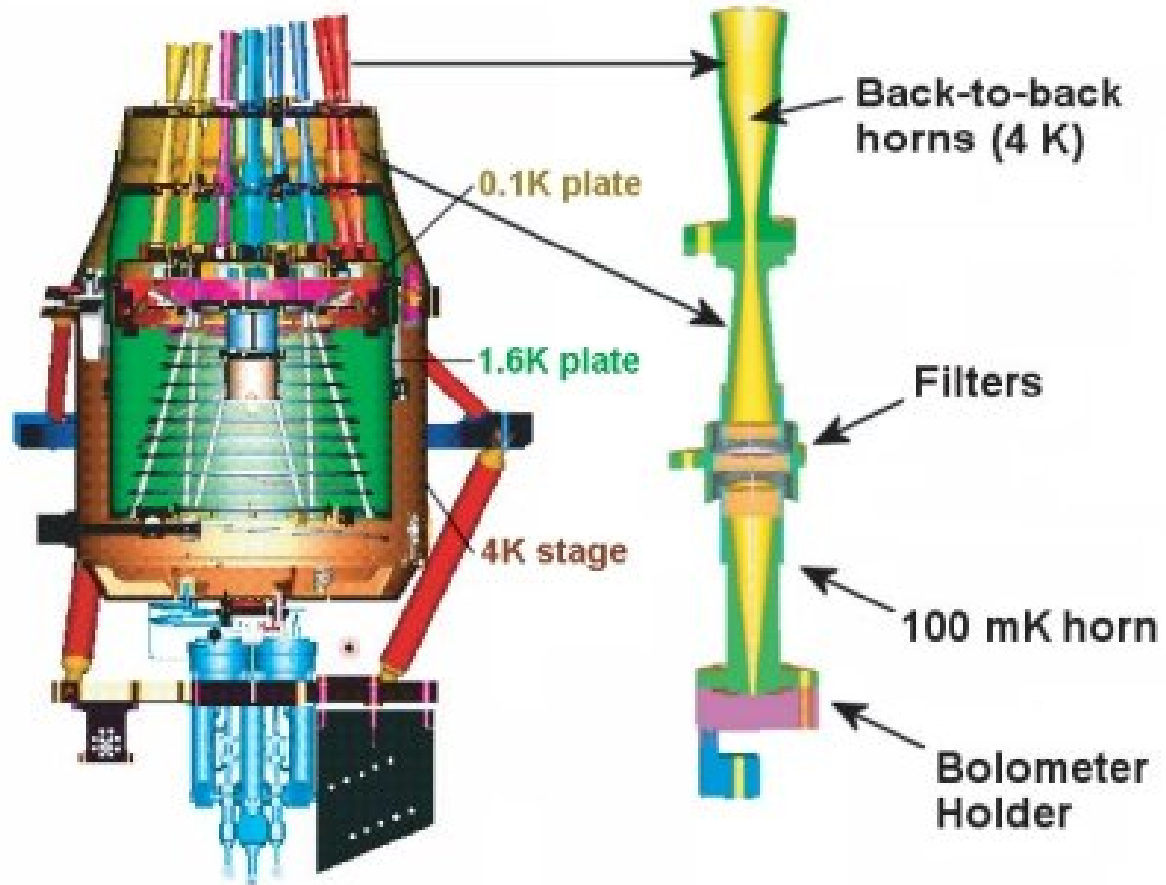


Planck





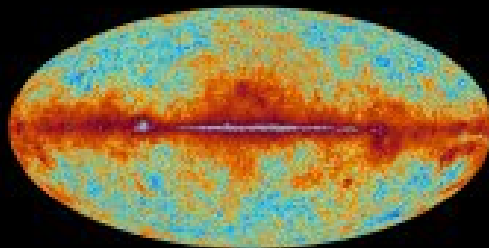




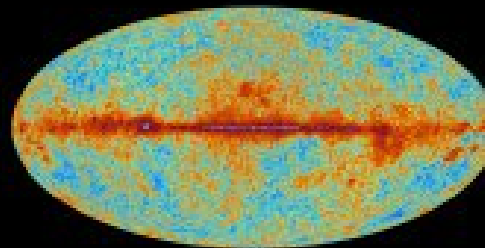


planck

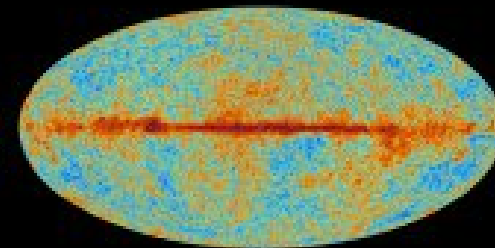
The sky as seen by Planck



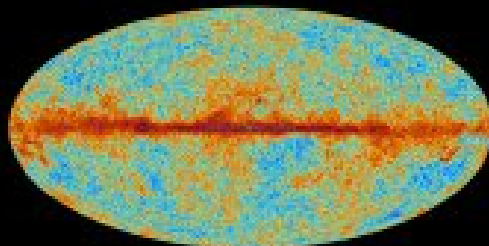
30 GHz



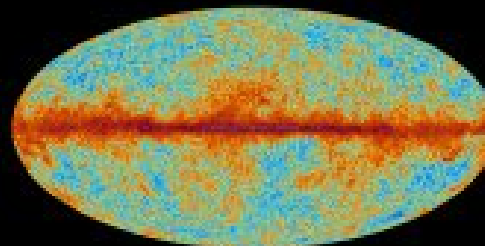
44 GHz



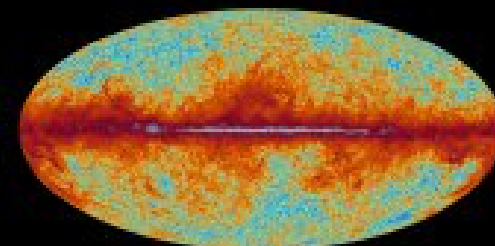
70 GHz



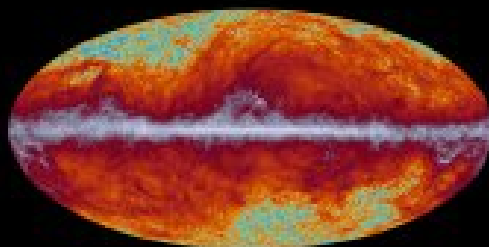
100 GHz



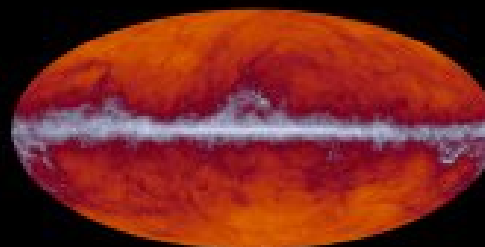
143 GHz



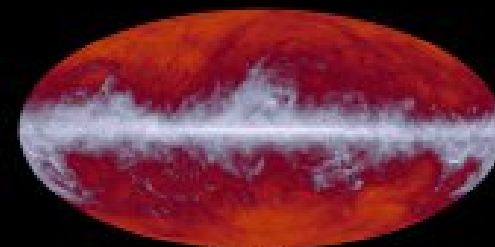
217 GHz



353 GHz

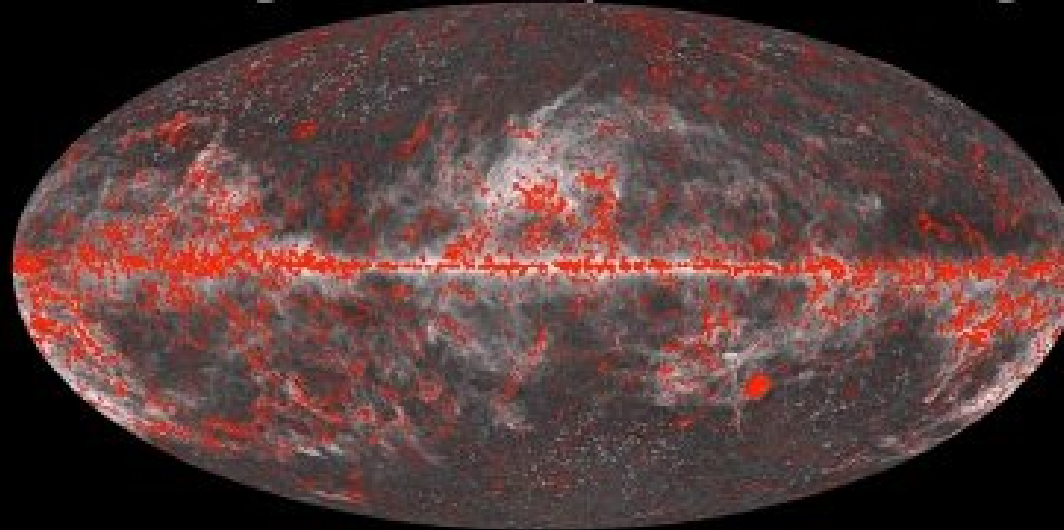


545 GHz

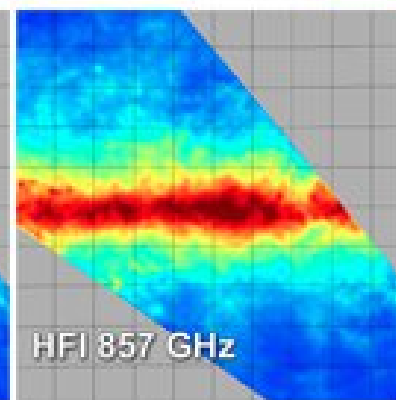
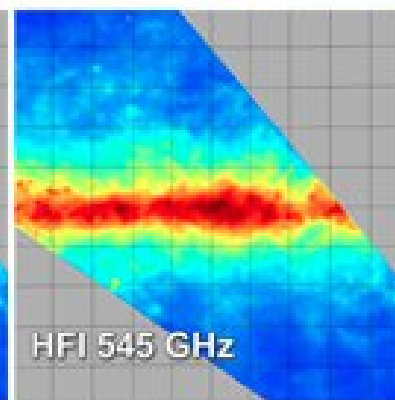
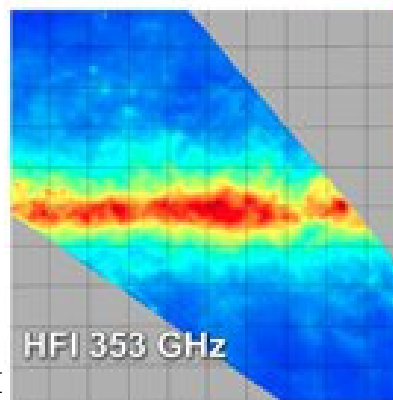
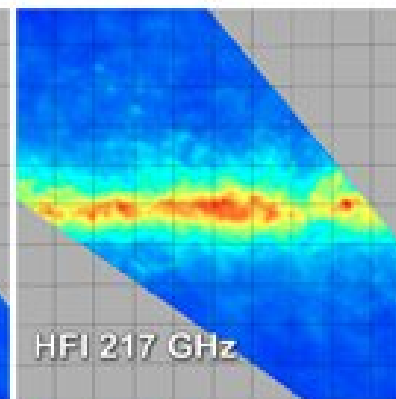
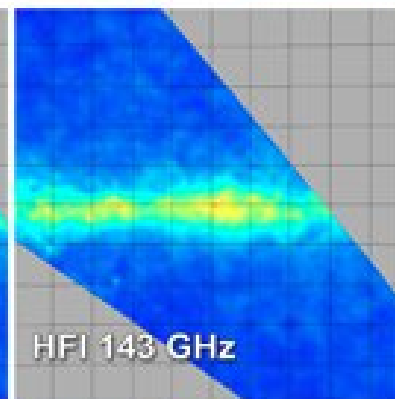
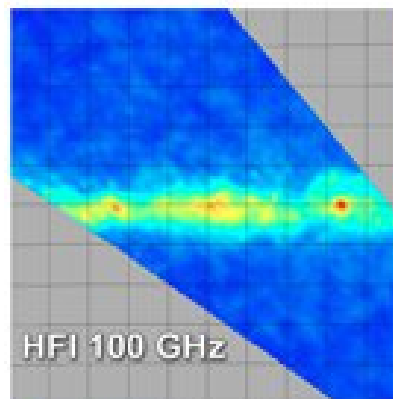
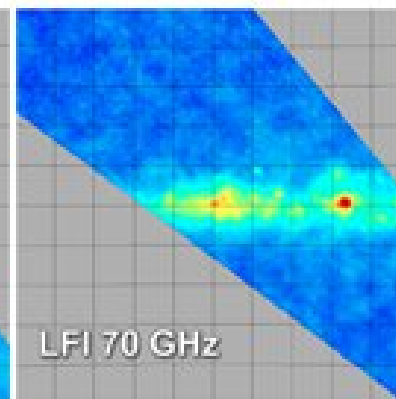
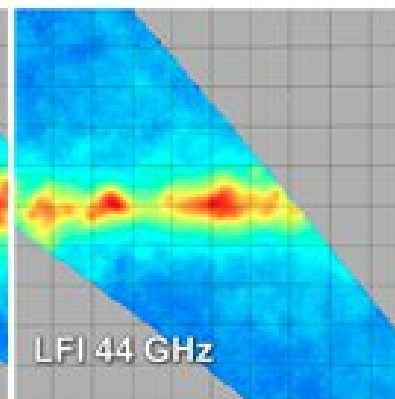
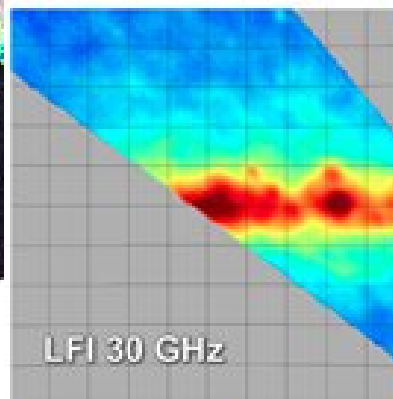
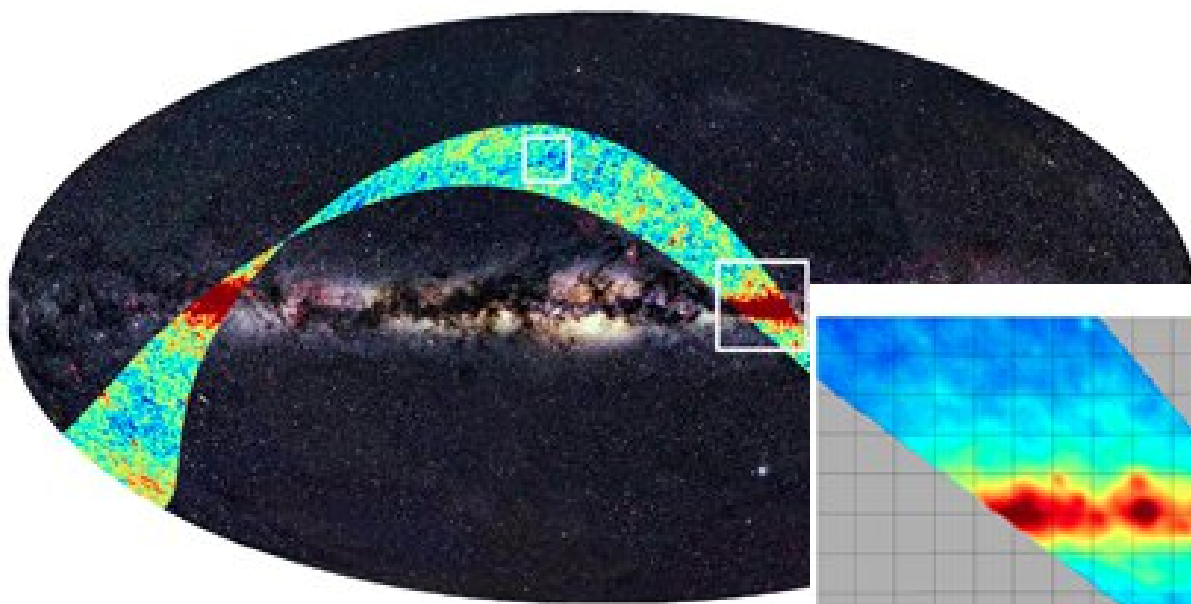


857 GHz

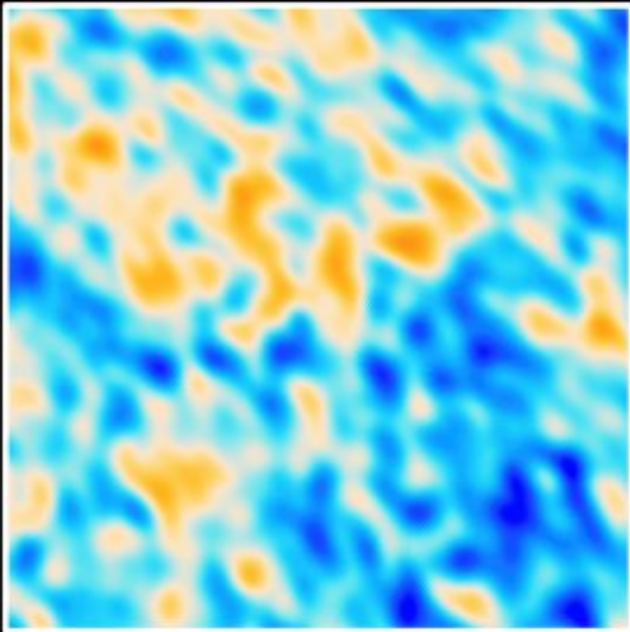
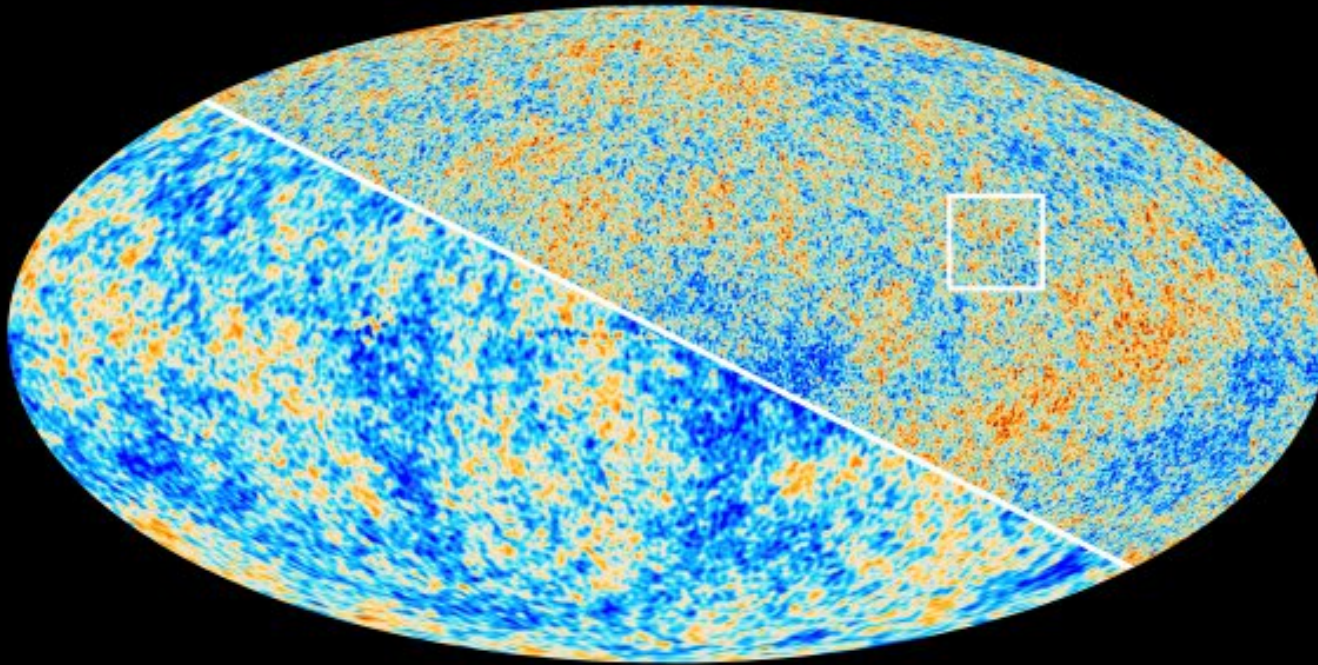
Planck Early Release Compact Source Catalogue



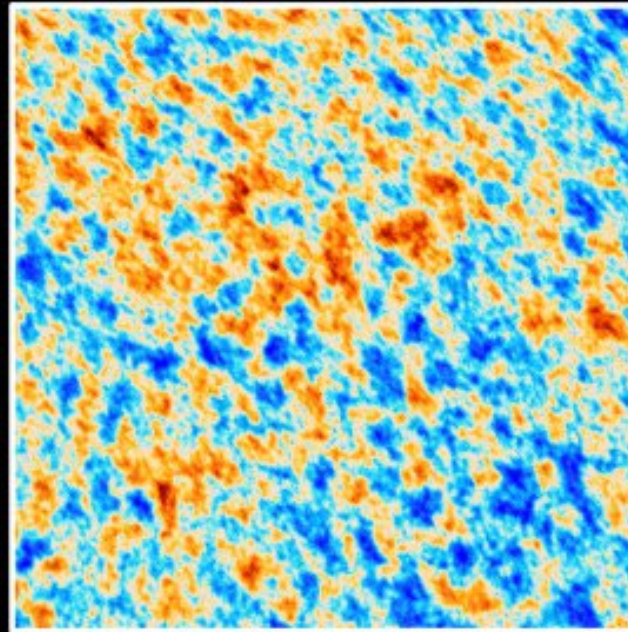
All compact sources



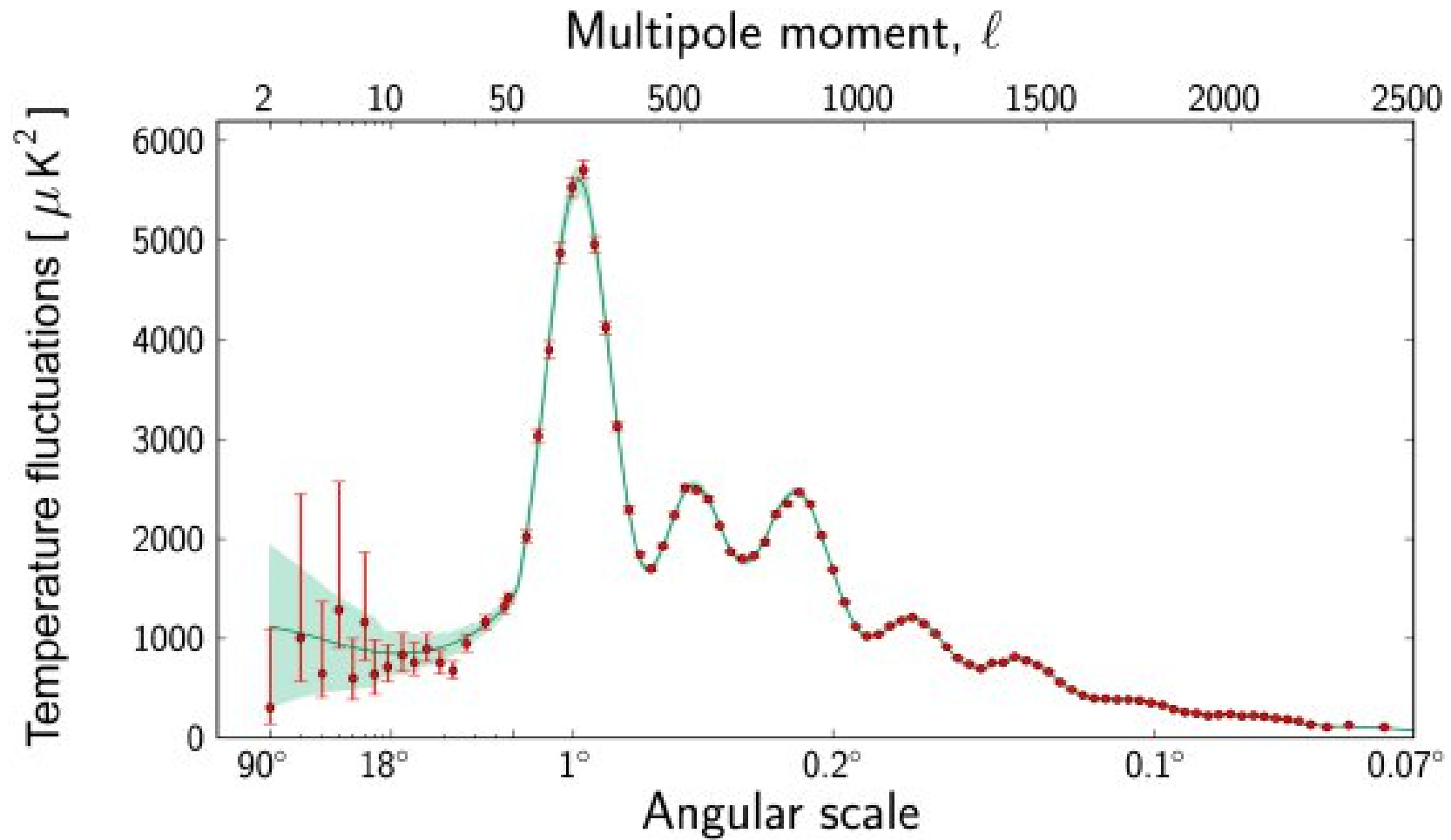
The Cosmic Microwave Background as seen by Planck and WMAP

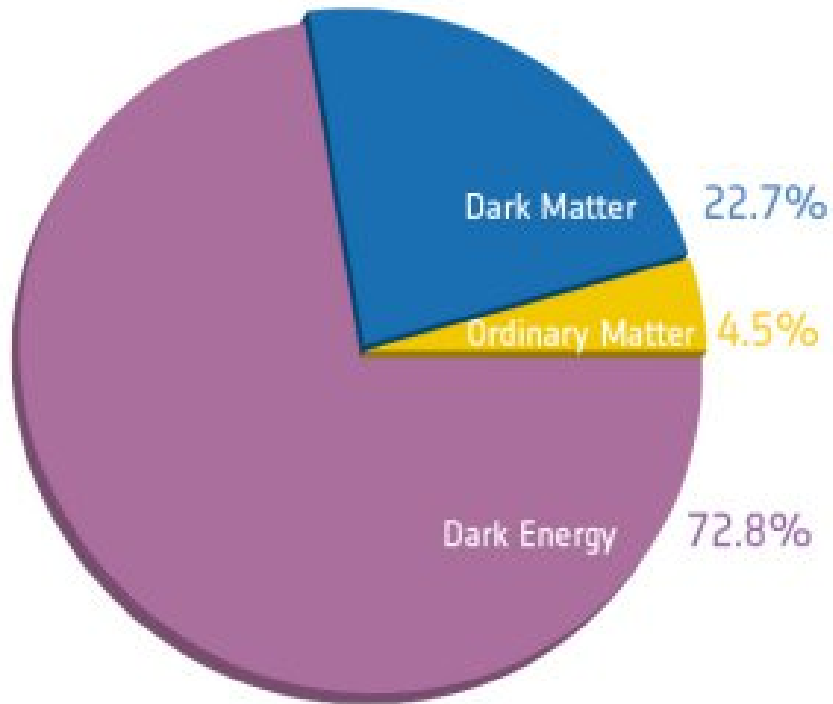


WMAP

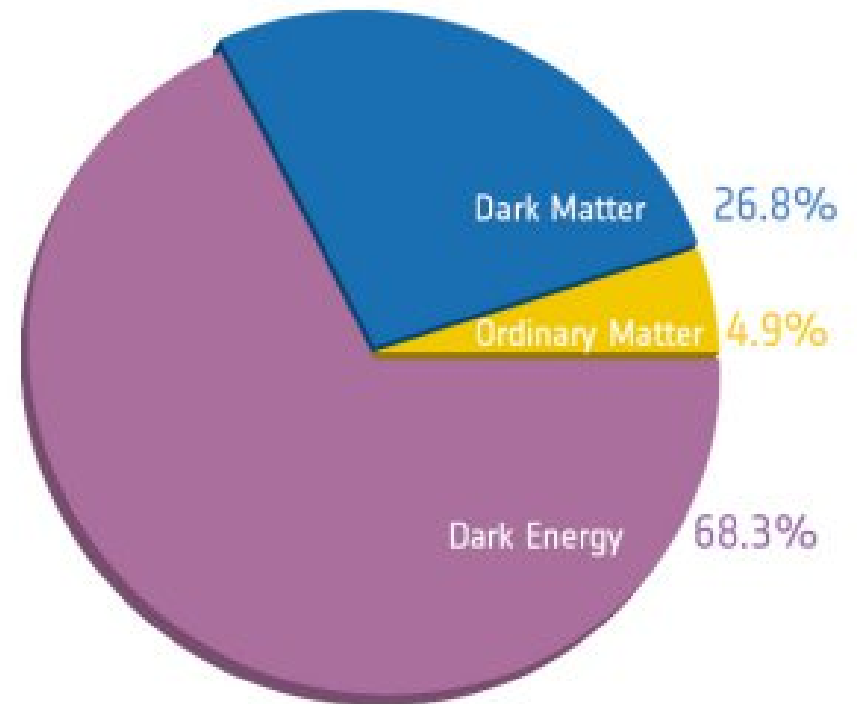


Planck

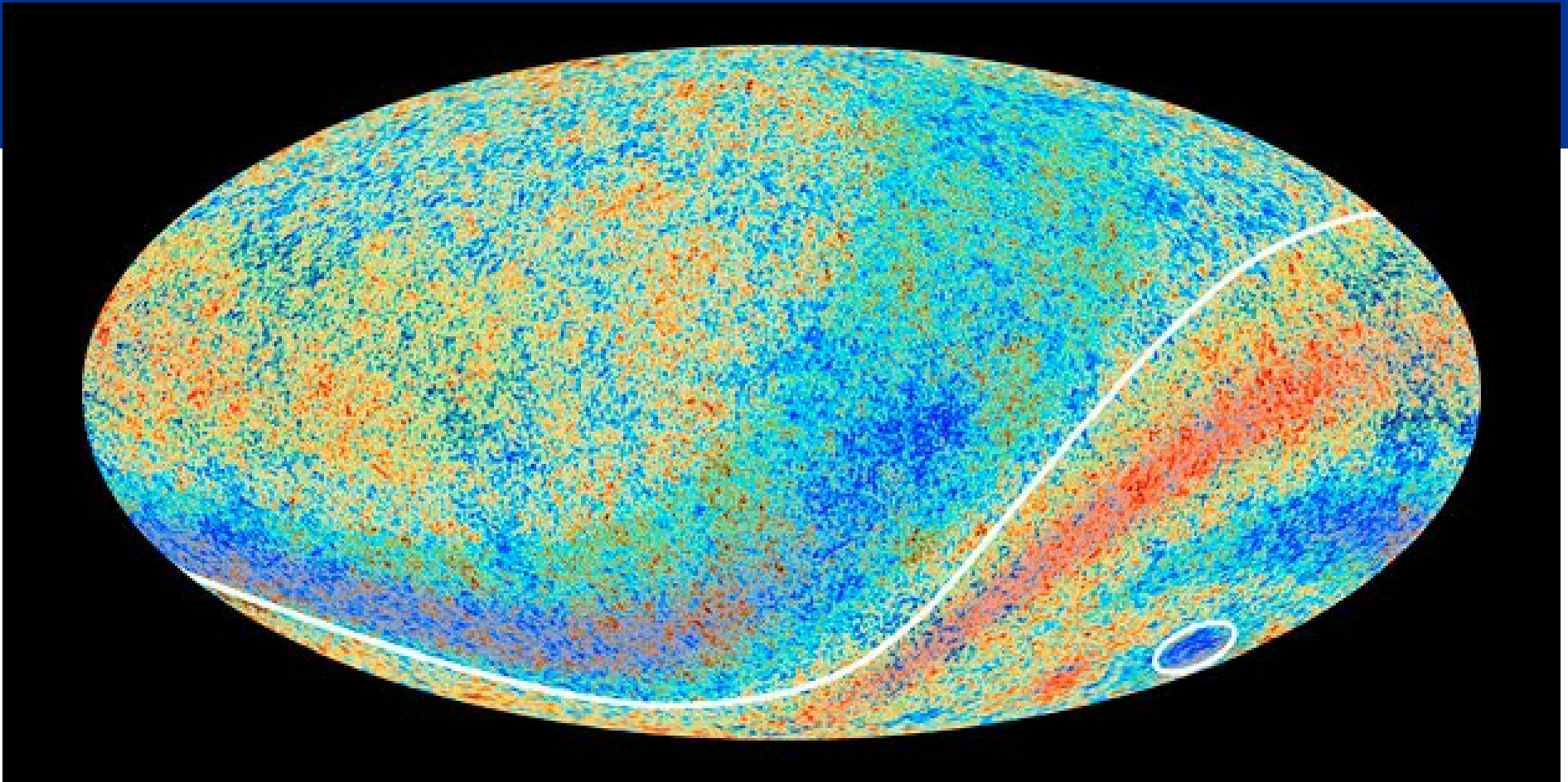




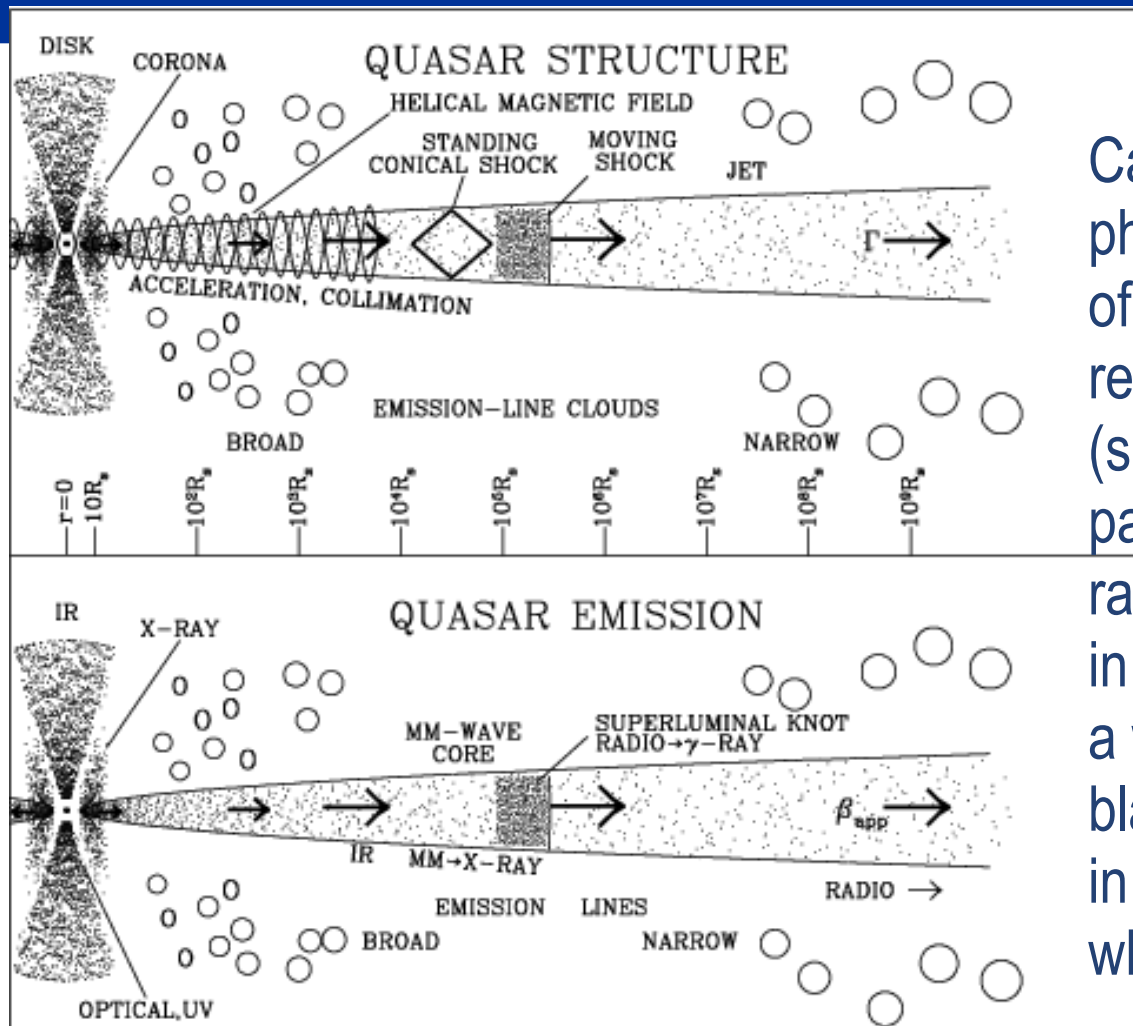
Before Planck



After Planck



Asymétrie hémisphérique & « point froid »



Cartoon illustrating the various physical and emission components of a quasar or other AGN with a relativistic jet. The length scale (shown along the bottom of the top panel in terms of Schwarzschild radii of the black hole) is logarithmic in order to include phenomena over a wide range of distances from the black hole. The radiation produced in the jet is relativistically beamed, while that outside the jet is not

Support exercices