

Astrophysique et Cosmologie III

Alberto Cappi

INAF - Osservatorio di Astrofisica e Scienza dello Spazio - Bologna - Italia

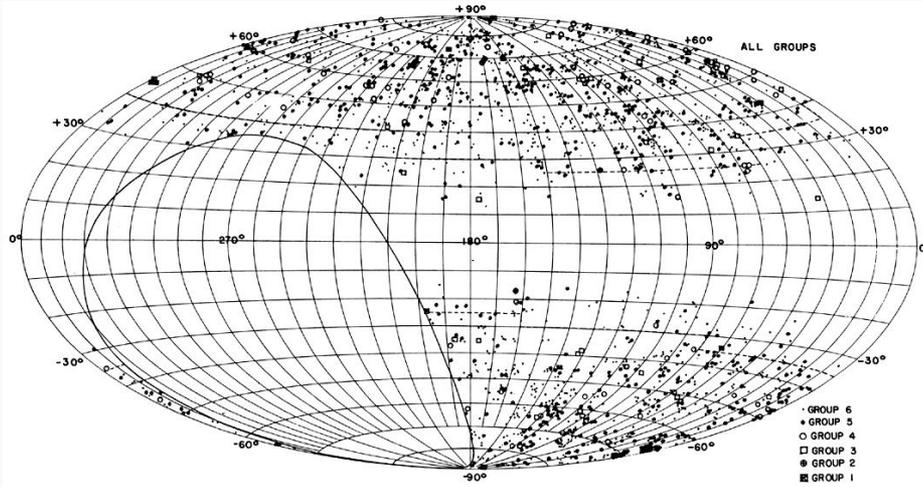
**Observatoire de la Côte d'Azur - CNRS - Laboratoire Lagrange - Université de
la Côte d'Azur - Nice**

Ecole IN2P3 De la physique au détecteur, Frejus 2021

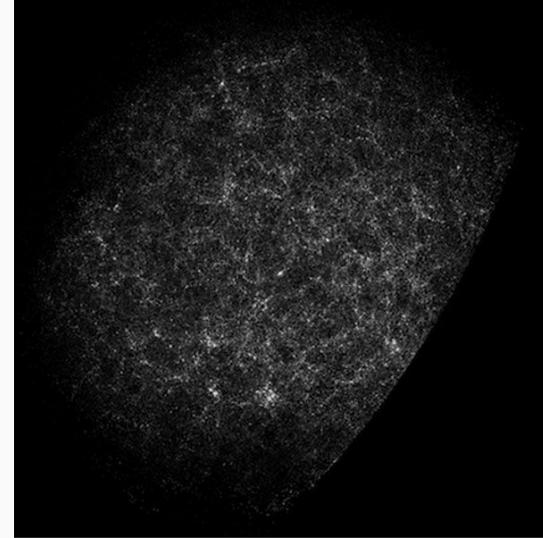
Les structures dans l'univers

Les premiers catalogues de galaxies

Les inhomogénéités dans la distribution des galaxies



Abell 1958 (catalogue d'amas de galaxies identifiés dans la Palomar Sky Survey)



Shane-Wirtanen Lick galaxy catalogue
Seldner et al. 1977

Les premiers redshift surveys

Le but des redshift surveys : étudier la distribution spatiale des galaxies (et des amas) et leur évolution avec l'analyse statistique (fonction de corrélation, spectre de puissance, moments d'ordre supérieur, fonction de masse, fonction de luminosité, couleurs...) ; mesurer les paramètres cosmologiques.

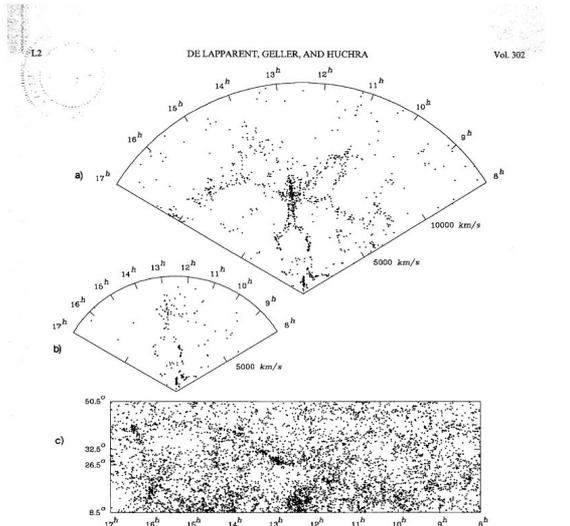


FIG. 1.—(a) Map of the observed velocity plotted vs. right ascension in the declination wedge $20^{\circ}5' \leq \delta \leq 12^{\circ}5'$. The 1063 objects plotted have $15.5 \leq v \leq 15.8$ and $15.8 \leq v \leq 15.9$ km s $^{-1}$. (b) Same as Fig. 1a for $14.5 \leq v \leq 14.9$ and $14.9 \leq v \leq 15.0$ km s $^{-1}$. The plot contains 102 galaxies. (c) Projected map of the 701 galaxies with $15 \leq v \leq 15.5$, listed by Zwicky et al. in the region bounded by $8^{\circ} \leq \alpha \leq 17^{\circ}$ and $8^{\circ}5' \leq \delta \leq 30^{\circ}5'$.

with the depth of the earlier survey. Thus undersampling explains the difference in the appearance of the surveys.

In order to compare the redshift-space distribution with the distribution projected on the sky, Figure 1c shows the positions of all the galaxies from the Zwicky et al. catalog which satisfy $15 \leq v \leq 15.5$, $8^{\circ} \leq \alpha \leq 17^{\circ}$ and $8^{\circ}5' \leq \delta \leq 30^{\circ}5'$. The grid is Cartesian in R.A. and decl. The deficiency of galaxies west of 9° and east of 16° is caused by Galactic obscuration. The tick marks show the 6° declination region of the redshift survey in Figure 1a. The Coma cluster is the dense region at 13° in the α step.

III. ANALYSIS

The cellular pattern of Figure 1a and the smoothness of Figure 1c can be simply understood if the galaxies are distributed on the surfaces of shells tightly packed next to each other. If shell-like structures are common in the universe, any sufficiently deep wedge-shaped redshift survey will show a pattern of voids surrounded by connected filaments of galaxies similar to that in Figure 1a. One impressive feature of the new data in Figure 1a is the presence of several large regions almost devoid of galaxies. The galaxies appear to be distributed in elongated structures

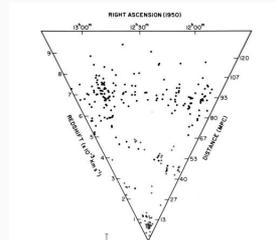


FIG. 2.—The Coma/A1367 supercluster region from Gregory and Thompson (1978). The core of Coma is the elongated feature on the far left and A1367 the weaker elongated feature on the far right. A bridge of galaxies connects the cluster cores, and in the foreground are the first recognized voids.

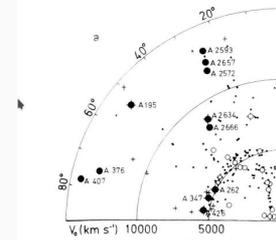
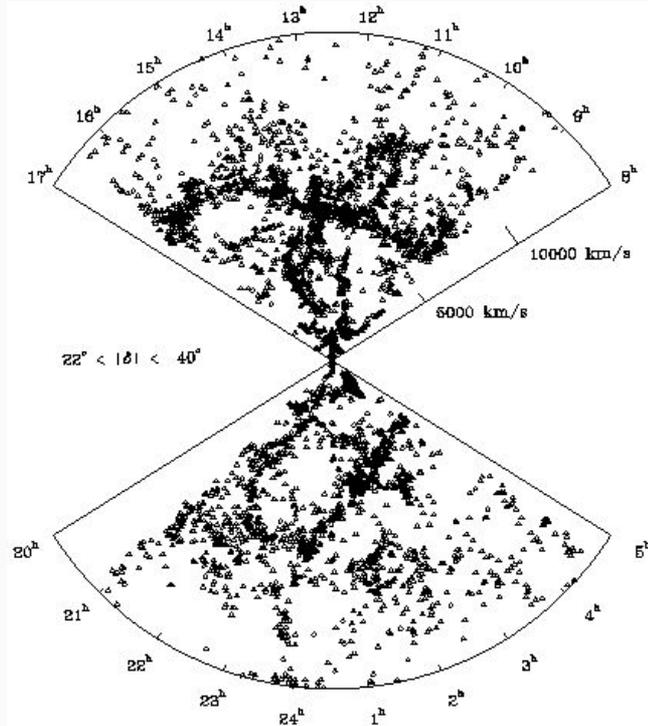


FIG. 3.—Redshift cone diagram of the south galactic hemisphere by Joewer, Einasto, and Tugo (1978). Large filled circles represent clusters of galaxies. Small filled circles represent galaxies. They note the existence of "large holes" in the 3D distribution.

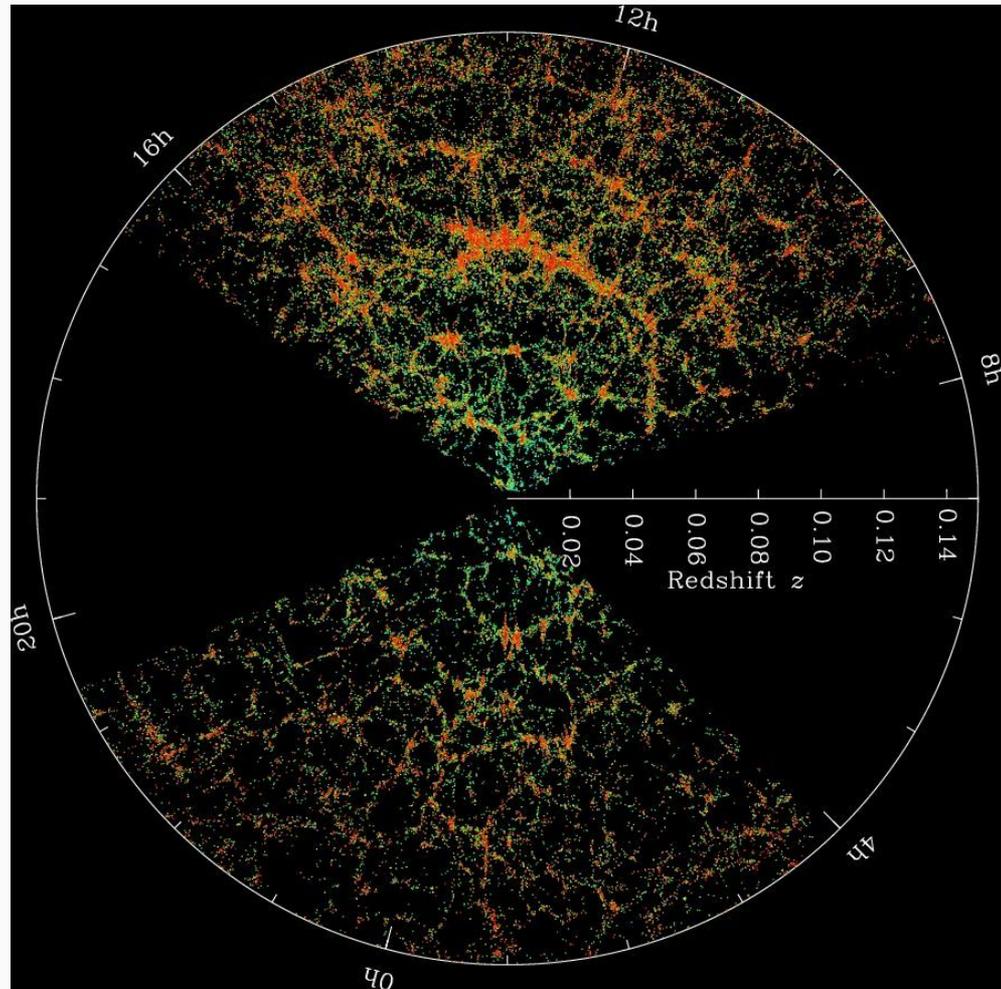


CfA2 + SSRS2 (da Costa et al. 1994)

SLOAN Digital Sky Survey (SDSS)

Commencé en 2000, deux télescopes dédiés (2.5m)

Photométrie multibande et trois millions de spectres sur un tiers du ciel



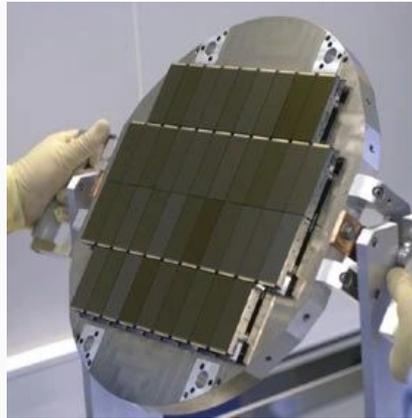
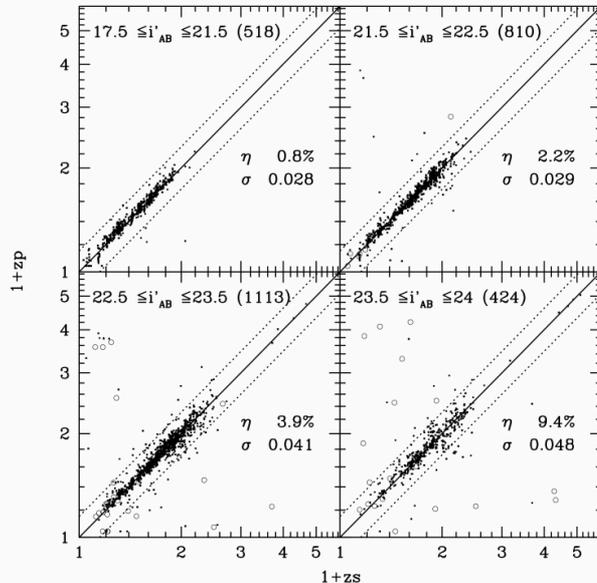
Les caméras à grand champ

MegaCam au CFHT (construite par le CEA, Saclay, France) : wide-field imager, 40 2048 x 4612 pixel CCDs (un total de 378 mégapixels), champ de 1x1 degré carré, résolution de 0.187 arcsecond per pixel, seeing de 0.7 arcsecond (median) seeing au CFHT à Mauna Kea.

CFHT Legacy Survey (450 nuits entre 2003 et 2009).

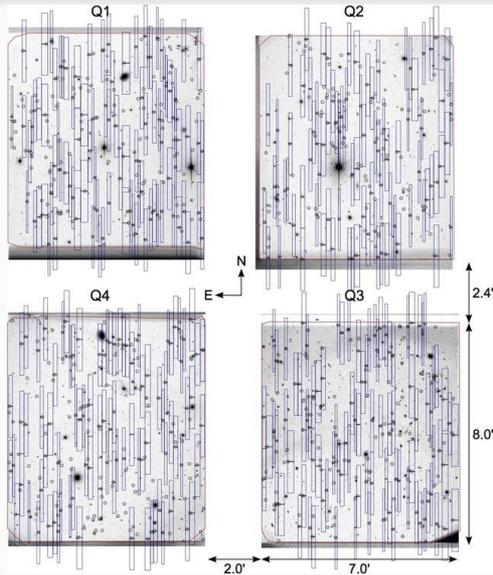
CFHT (téléscope de 3.6m)

Les redshifts photométriques

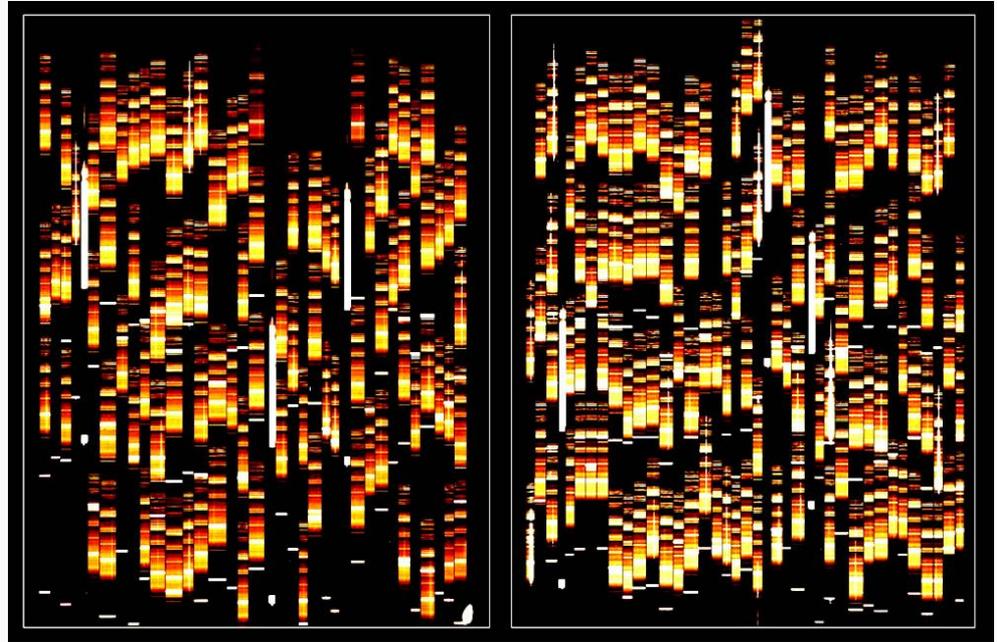


Ilbert et al. 2006

La révolution de la spectroscopie multi-objet



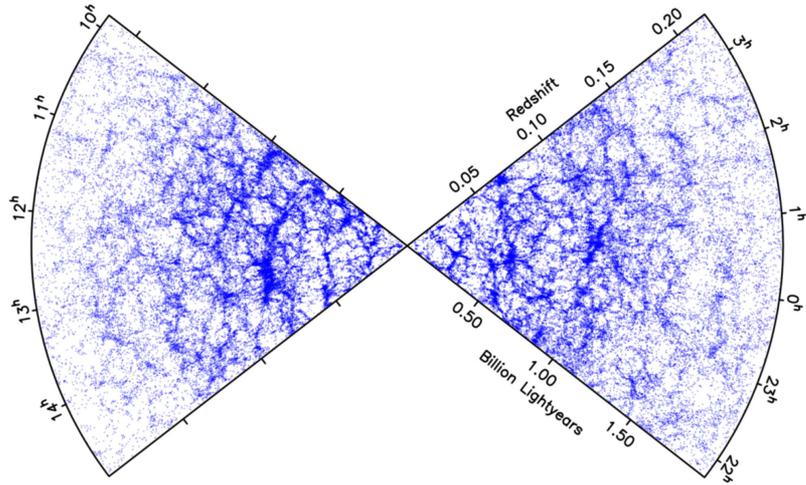
3650Å λ <math>< 9350\text{\AA}</math> at a spectral resolution $R=230$ VIMOS multi-slit spectrograph on the ESO-VLT.



VIMOS, VIvisible Multi Object Spectrographe

Le Fèvre et al., 2003, SPIE, 4841, 1670

2dF redshift survey



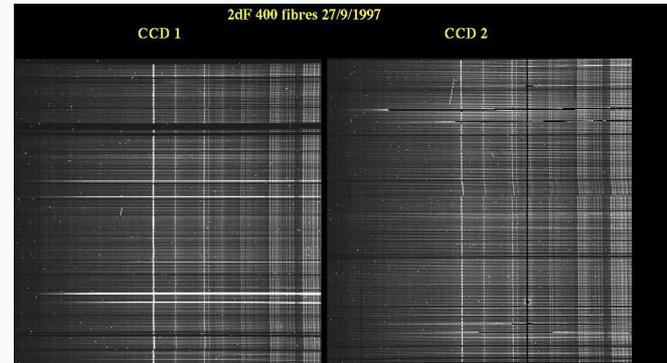
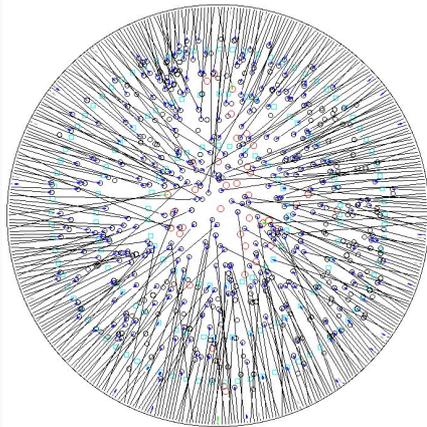
1997-2002 272 nuits
au télescope anglo-australien
de 3.9m

(Colless et al. 2001)

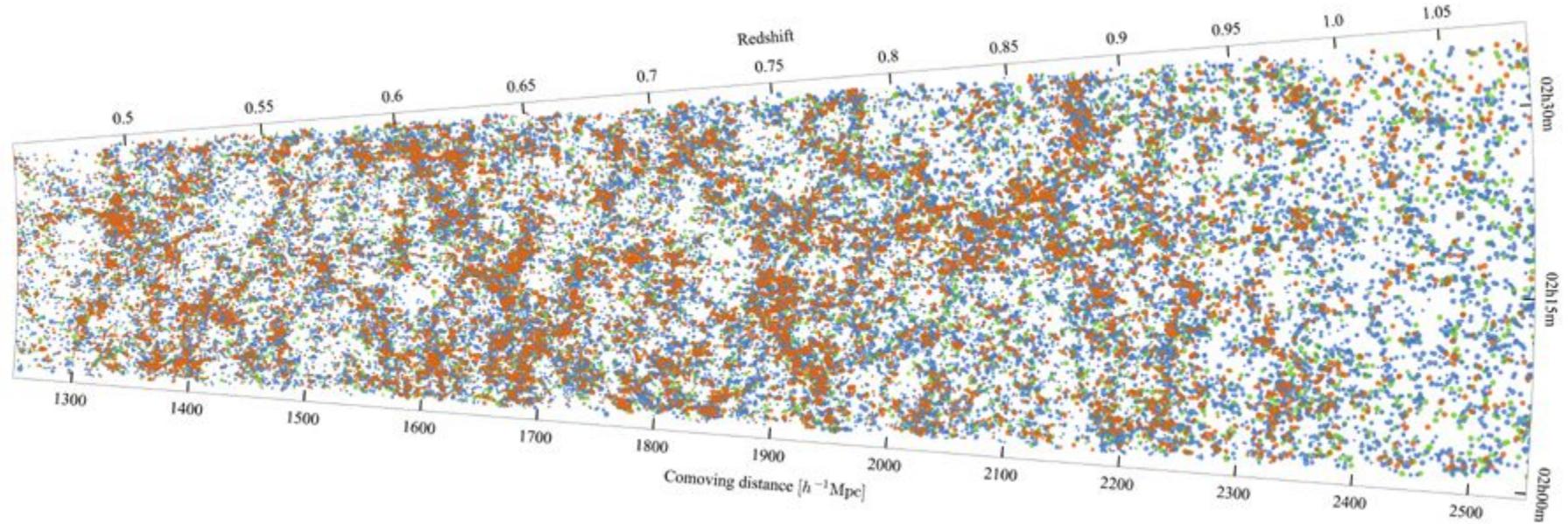
$z \sim 0.2$
diamètre du champ :
2 degrés

1500 degrés carrés
deux régions au pôle nord et sud
galactiques

spectrographe multifibre



VIPERS (VIMOS Public Extragalactic Redshift Survey)



VIPERS

$\sim 10^5$ galaxies dans l'intervalle $0.5 < z < 1.2$. Input catalogue : données photométriques (5 bandes) du Canada-France-Hawaii Telescope Legacy Survey Wide catalogue.

$\sim 24 \text{ deg}^2$ dans les champs W1 and W4 du CFHTLS. Area et profondeur correspondent à un volume comparable au 2dF Galaxy Redshift Survey à $z \sim 0$. $i_{AB} < 22.5$, $z > 0.5$ avec présélection en couleur ugr (voir Guzzo et al. 2013).

Le problème de la formation des structures

Quand les fluctuations de densité sont petites :

$$\delta\rho/\rho \propto 1/(1+z) \quad \delta\rho \equiv \rho - \langle\rho\rangle$$

à $z = 0$ il y a des structures avec $\delta\rho/\rho \gg 1$ (la valeur dépend de l'échelle)

$$\delta\rho/\rho \sim 1 \text{ aujourd'hui} \rightarrow \text{à } z = 1100 \quad \delta\rho/\rho \sim 10^{-3}$$

Mais on observe de fluctuations de température du CMB $\delta T/T \sim 10^{-5}$
ce qui implique $\delta\rho/\rho$ du même ordre.

La matière noire froide (Cold Dark Matter)

Problèmes :

1 : quantité de matière noire détectée (de façon indirecte) bien supérieure aux limites de la nucléosynthèse primordiale, qui implique $\rho_B \sim 0.05 \rho_c$

2 : il n'y a pas de temps pour la formation des structures à partir des fluctuations de matière baryonique à l'époque de la recombinaison

Deux problèmes liés à la matière baryonique (protons et neutrons).

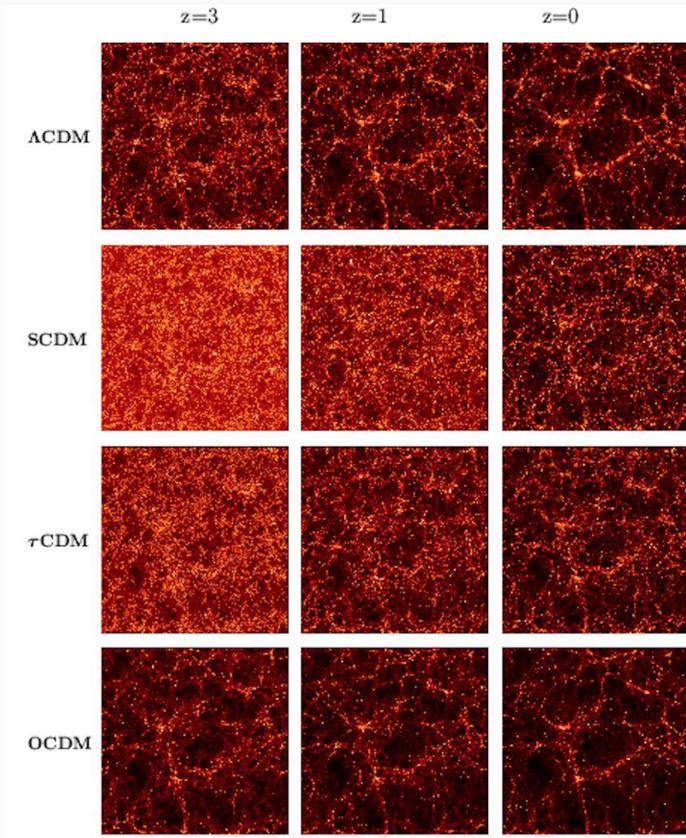
Solution :

La matière noire n'est pas baryonique : elle ne participe pas aux réactions nucléaires primordiales et n'interagit pas avec le rayonnement (les fluctuations de densité de la matière noire peuvent croître avant la recombinaison sans générer de fluctuations de température dans le CMB).

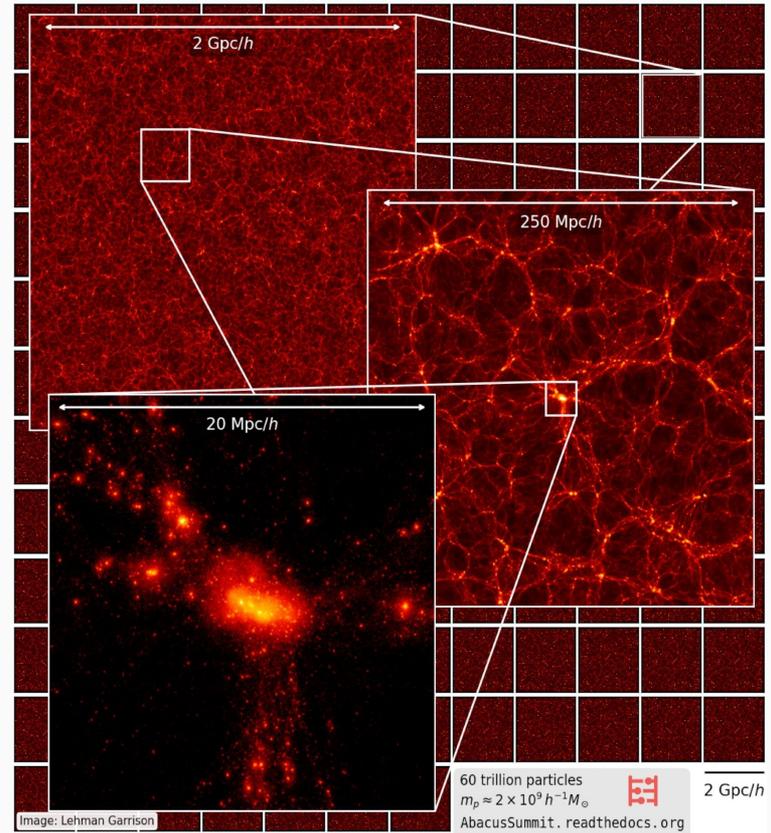
Pour expliquer les grandes structures observées il faut que la matière noire soit non relativiste, sinon le free streaming effacerait toute fluctuation au dessous d'une certaine grande taille

Weakly Interacting Massive Particles / Cold Dark Matter

N-body simulations



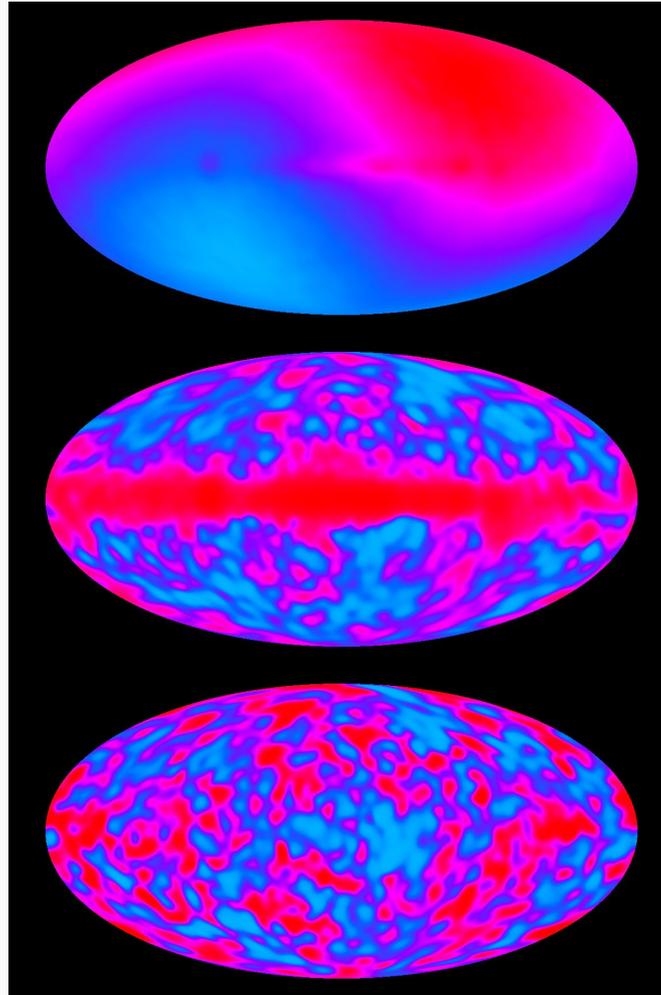
Jenkins et al. 1998



Maximova et al. 2021

Les fluctuations dans
le fond diffus cosmologique
(CMB, Cosmic Microwave
Background)

COBE (COsmic Background Explorer), 1992



Dipôle ($v_{LG} = 627 \pm 22$ km/s)
effet Doppler

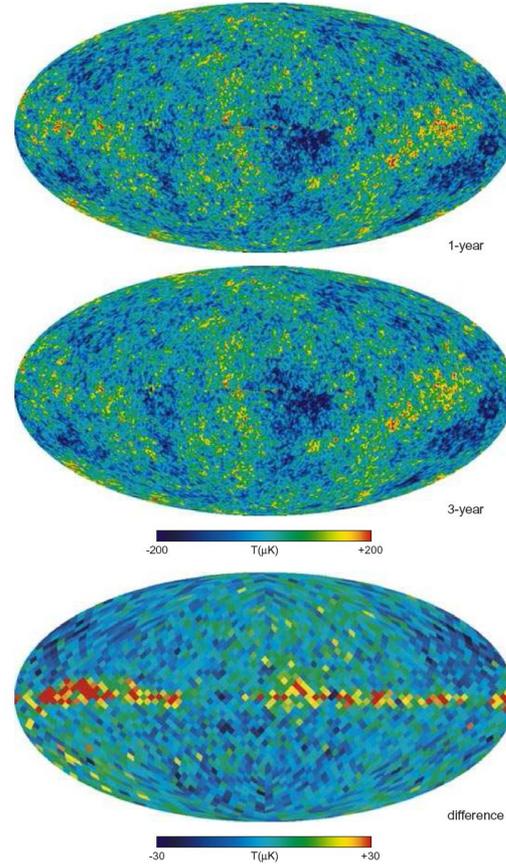
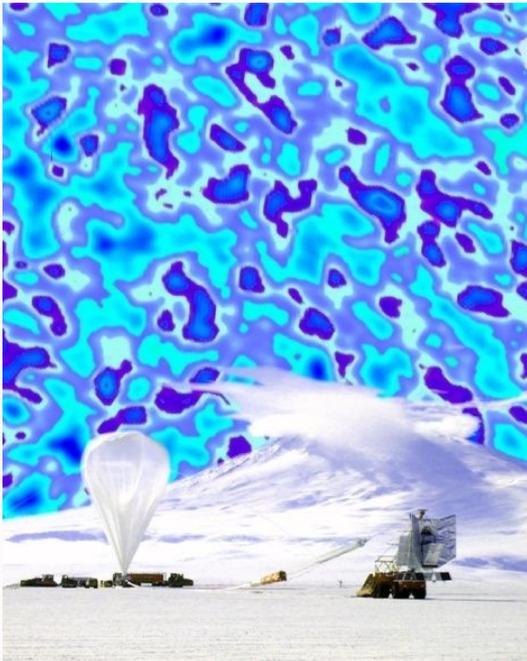
Emission de la Voie Lactée

Sachs-Wolfe effect
Redshift gravitationnel

$$\frac{\Delta T}{T} = -\frac{1}{3}\Phi$$

Les fluctuations de température à petite échelle

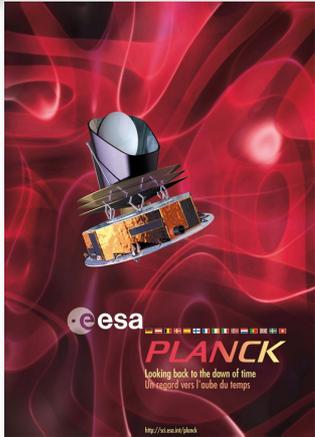
BOOMERANG
De Bernardis et al. 2000



WMAP
Bennett et al.
2003,
Spergel et al.
2003

Fig. 9.— *top*: The first-year ILC map reproduced from Bennett et al. (2003c). *middle*: The three-year ILC map produced following the steps outlined in §5.2. *bottom*: The difference between the two (1-yr – 3-yr). The primary reason for the difference is the new bias correction (Figure 8). The low- l change noted in §3 and shown in Figure 3 is also apparent.

La carte de température de Planck

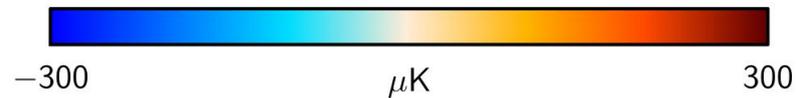
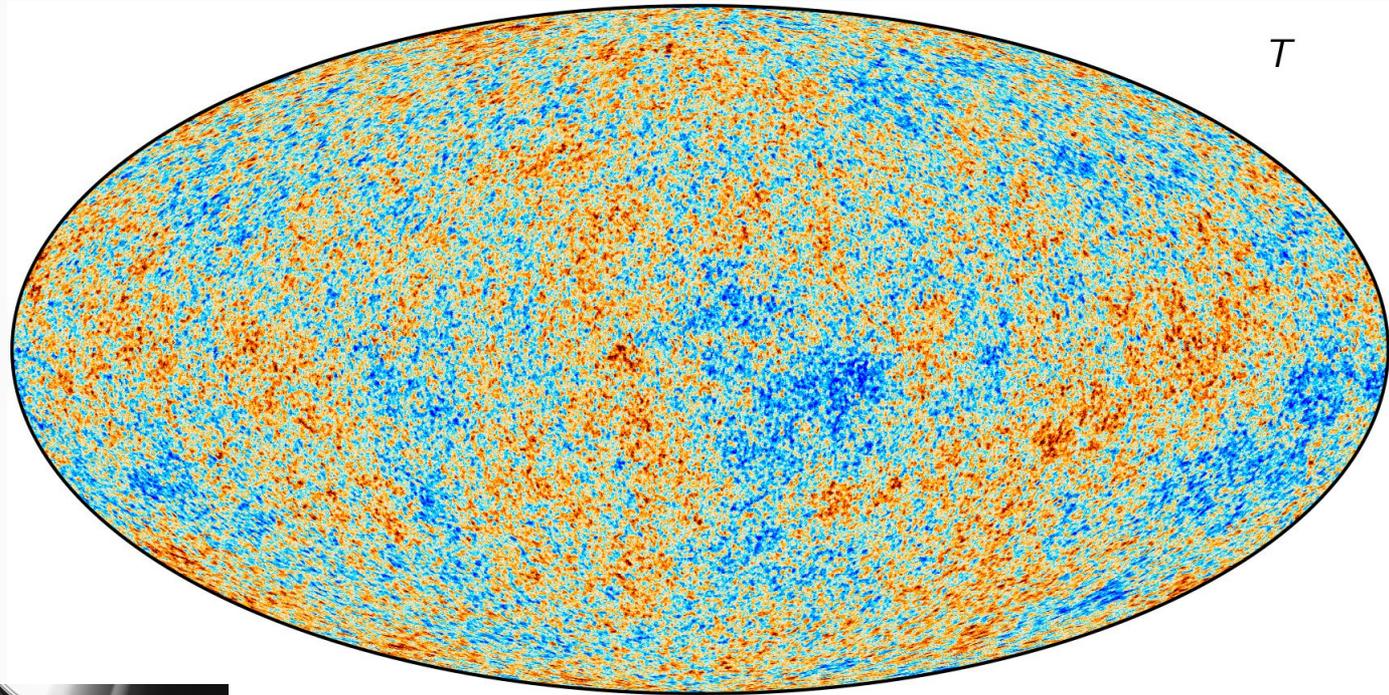
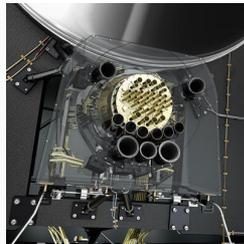


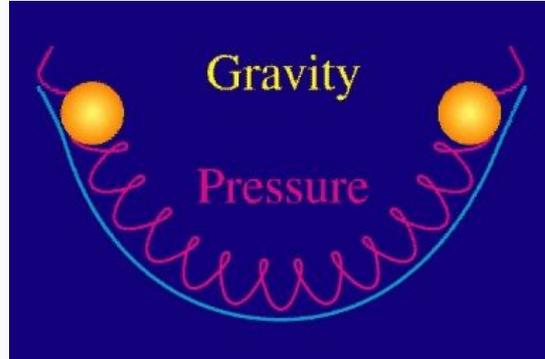
Planck mission (2009-2013)

deux instruments

LFI (PI N. Mandolesi)
fréquences de 27 à 77 GHz
(de 11.1 à 3.9 mm). 22
récepteurs radio.

HFI (PI J.-L. Puget)
fréquences de 84 GHz à 1
THz (3.6 to 0.3 mm). 52
bolomètres dans le plan
focal.

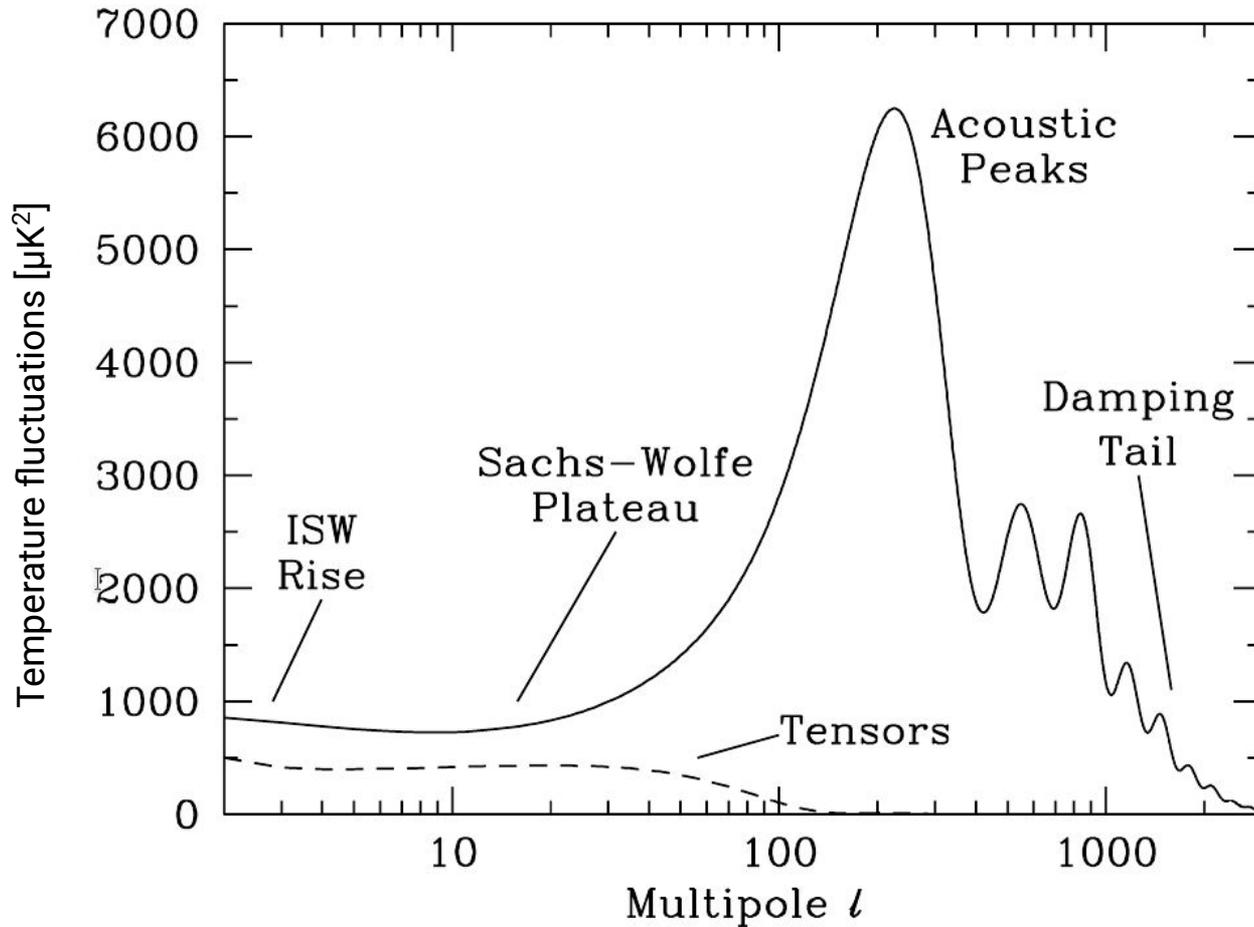




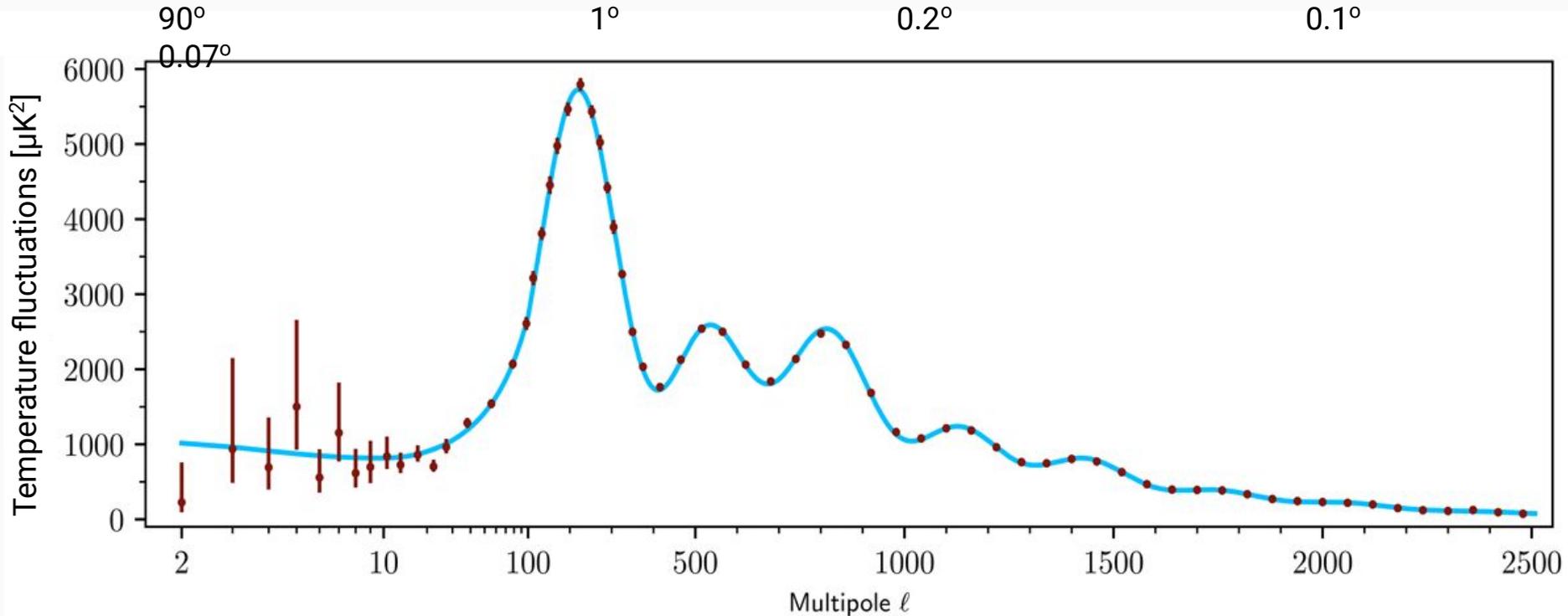
Avant la recombinaison, les régions à plus haute densité ont tendance à la contraction, mais la pression du rayonnement les pousse à l'expansion.

Après la recombinaison on trouve la trace de ces oscillations dans le CMB.

Le spectre de puissance des fluctuations de température (théorique)



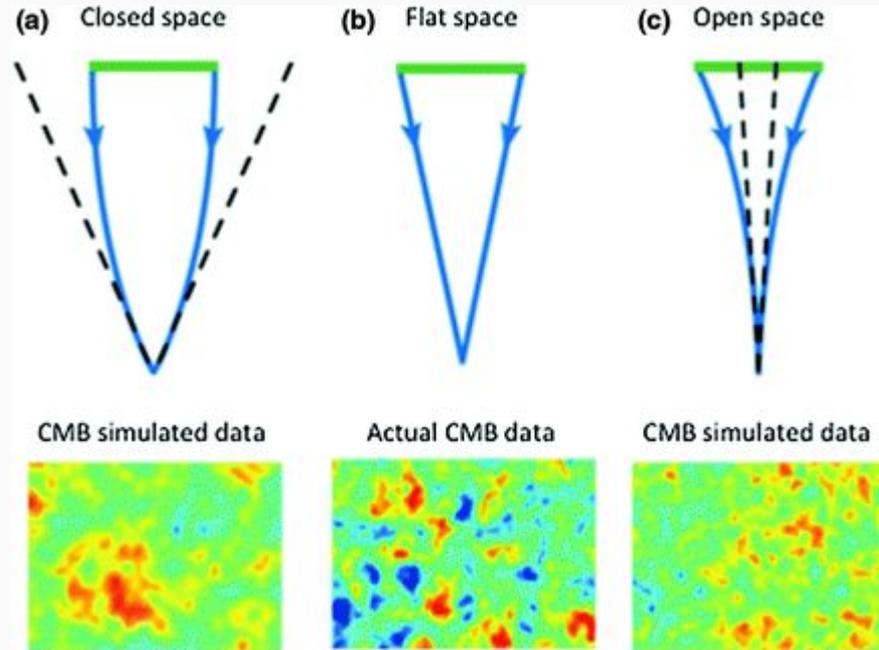
Le spectre de puissance des fluctuations de température (mesuré par Planck)



ESA/Planck

La mesure de la géométrie de l'univers

Le premier pic correspond à des régions arrivées à leur densité maximale à l'époque de la recombinaison. Leur taille dépend de la vitesse de propagation des fluctuations (horizon du son).



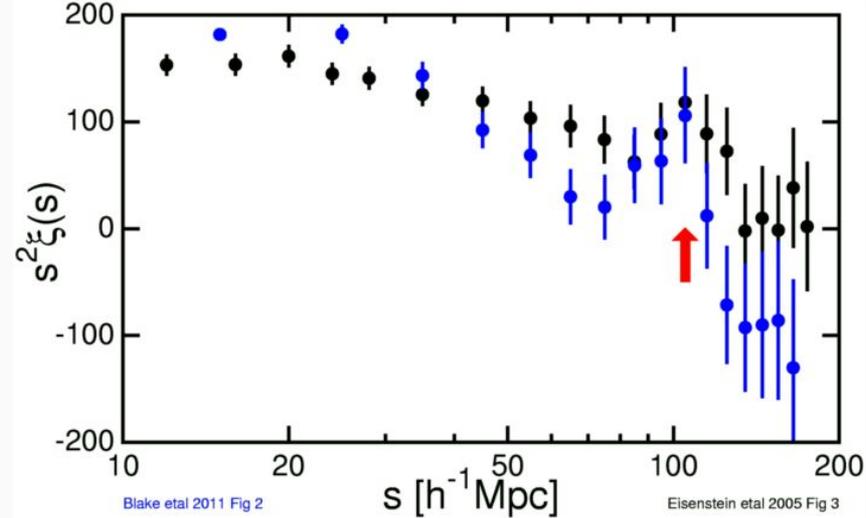
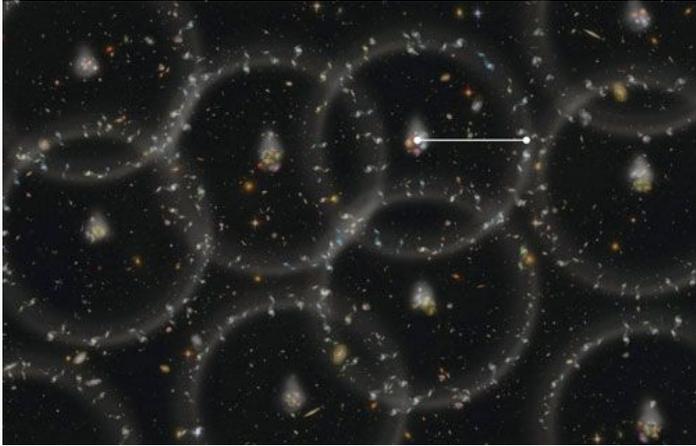
MESURES EN ACCORD AVEC UN UNIVERS PLAT

Résultats de Planck 2018 : $\Omega_{Tot} = 0.999 \pm 0.002$

Baryonic Acoustic Oscillations

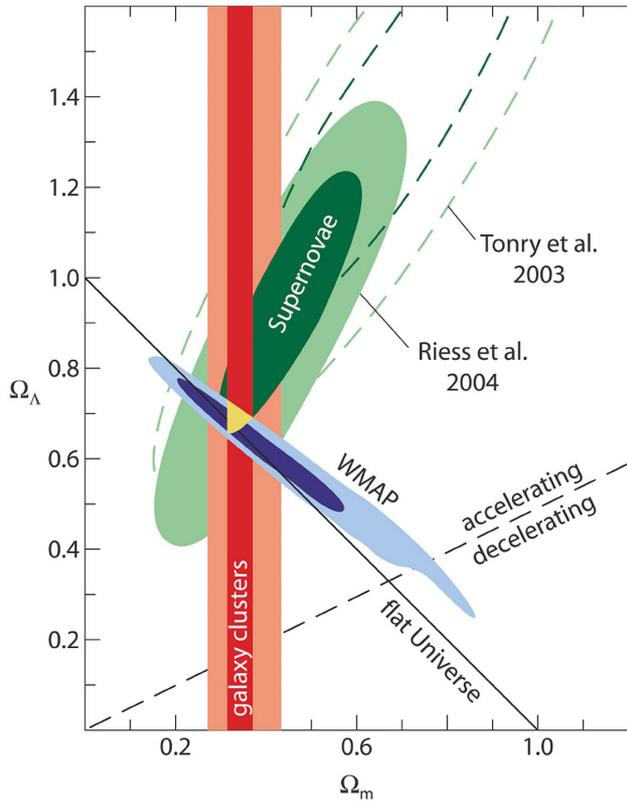
On retrouve la trace des oscillations acoustiques baryoniques dans la distribution des galaxies.

Identifié dans la fonction de corrélation.

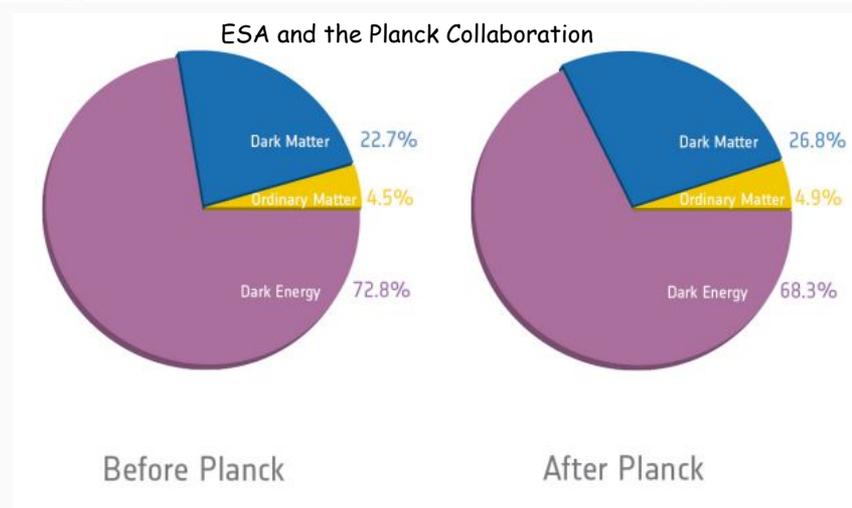
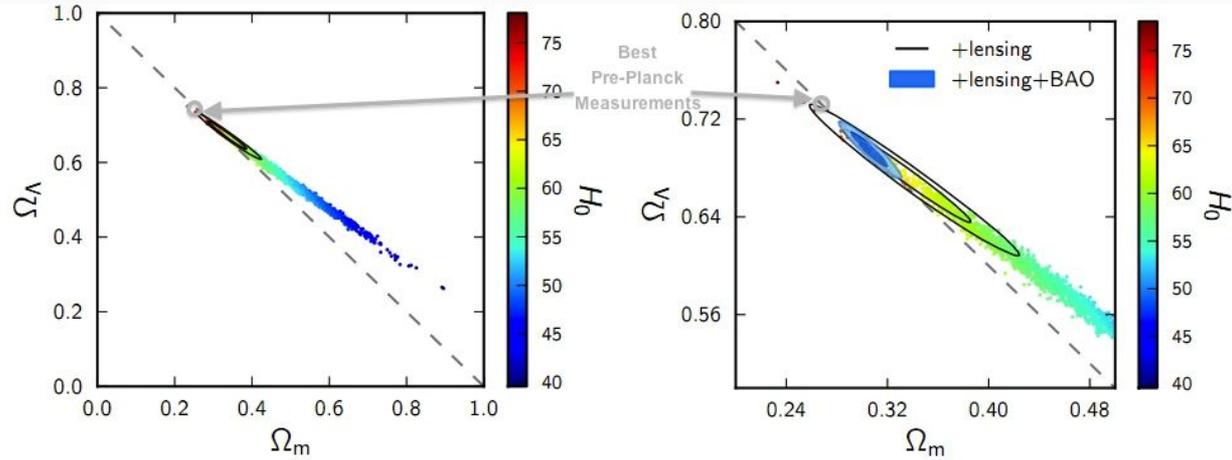


$\sim 150 \text{ Mpc}$

La cohérence des mesures des paramètres cosmologiques



Modèle standard : Λ CDM

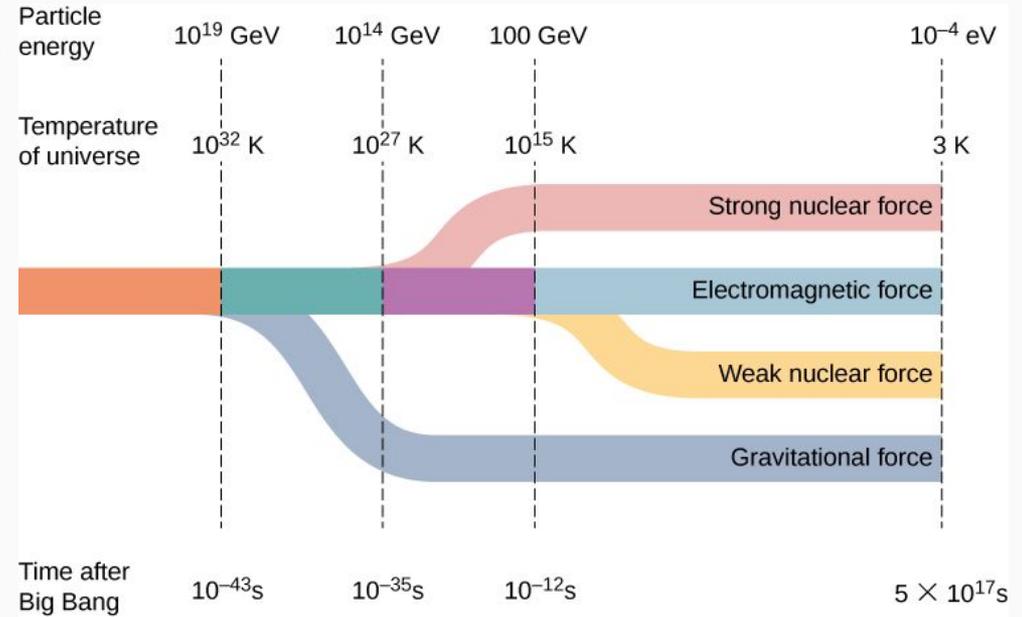


L'univers primordial

L'univers primordial

Ère de Planck ($t \sim 10^{-43}$ s, $T > 10^{32}$ K)

Hic sunt leones



Ère de grande unification (10^{-43} s $< t < 10^{-33}$ s, $T > 10^{32}$ K $> T > 10^{28}$ K)

Séparation de l'interaction gravitationnelle des autres trois interactions, qui restent unifiés (GUT). Prédiction de la désintégration du proton en $\sim 10^{31}$ ans, non observée.

L'antimatière

Asymétrie matière-antimatière

A. Sakharov (1967)

Dans les conditions de l'univers primordial, les réactions qui produisaient la matière étaient légèrement favorisées par rapport à celles qui produisaient l'antimatière" (A.Sakharov).

Conditions :

Nombre baryonique non conservé

Violation de la symétrie C et CP

Rupture de l'équilibre thermique

Ere hadronique ($10^{-33} \text{ s} < t < 10^{-4} \text{ s}$, $10^{28} \text{ K} > kT > 10^{12} \text{ K}$)

Quark et leptons interagissent avec les photons et les bosons W^+ , W^- , Z_0 (de masse nulle)

Les quarks interagissent entre eux (gluons)

Séparation interaction électromagnétique et faible, les bosons W^+ , W^- , Z_0 deviennent massifs.

Annihilation particules-antiparticules à partir de celles plus massives (quark top, boson de Higgs...)

Transition quark-hadron

A $T < 10^{13} \text{ K}$ le rayonnement n'a plus assez d'énergie pour dissocier les quarks, qui se confinent dans les hadrons.

Annihilation des nucléons-antinuéons

Annihilation des pions (100 MeV) à $T \sim 10^{12}$, $t \sim 10^{-4}$

Conséquence de l'asymétrie matière antimatière :

l'annihilation finale des paires laisse **un petit excès de nucléons**.

Il devait y avoir $10^9 + 1$ nucléons pour $\sim 10^9$ antinucléons.

10^9 nucléons et 10^9 antinucléons s'annihilent et laissent 1 nucléon.

L'inflation

Problèmes auxquels la théorie du Big Bang ne peut pas répondre

La platitude

La densité de l'univers est très proche de la densité critique (et me une petite différence à l'origine aurait été amplifiée avec le temps).

L'Horizon

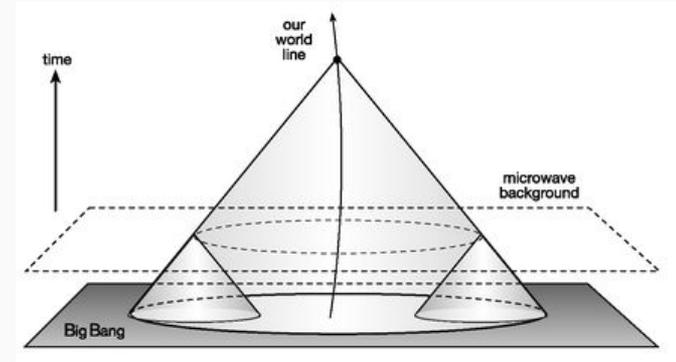
Dans des régions du ciel séparés par quelques degrés qui ne devraient jamais avoir été en contact physique (limite imposé par la vitesse finie de la lumière), la température moyenne du CMB est la même.

Problème des monopôles magnétiques

Il n'y a pas de charges magnétiques (les monopôles) prévus par les Grand Unified Theories (GUT)

Origine des fluctuations

Origine des fluctuations de densité qui ont permis la formation des structures.



Solution :

champ scalaire (inflaton), qui agit comme une constante cosmologique (plusieurs modèles)

$$\rho_\phi = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi)$$

$$P_\phi = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V(\phi)$$

$$\text{si } \dot{\phi} \ll V(\phi) : P \sim -\rho c^2$$

La platitude

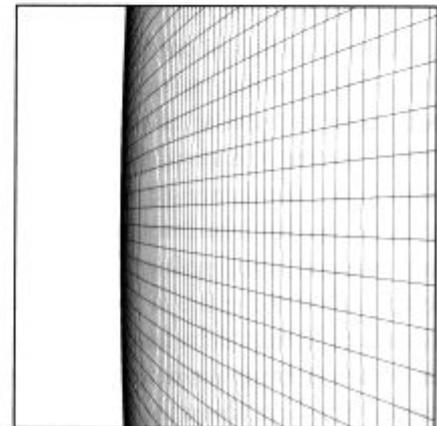
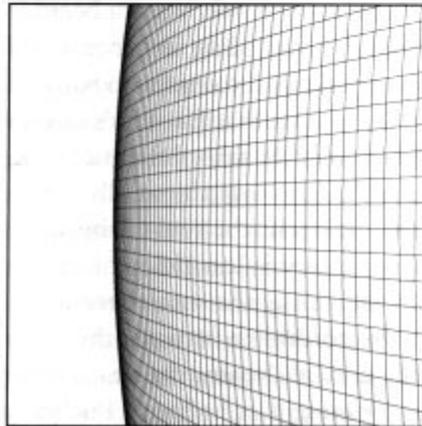
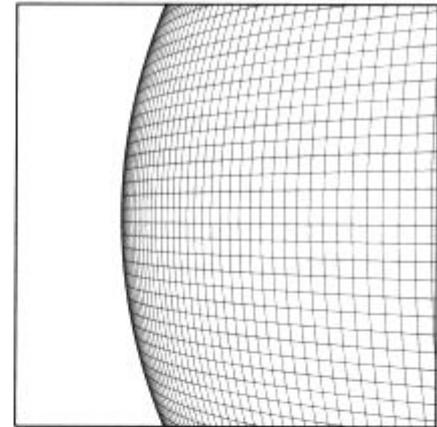
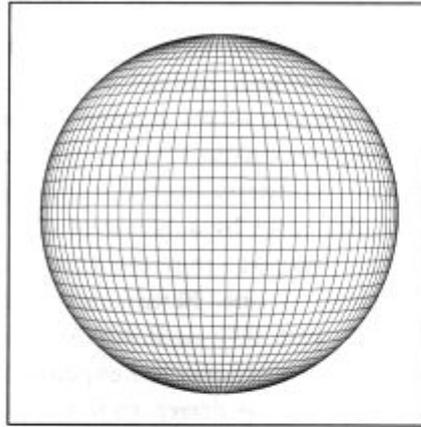
L'espace a eu une expansion très rapide (exponentielle) dans les tous premiers instants de vie de l'univers.

H constante

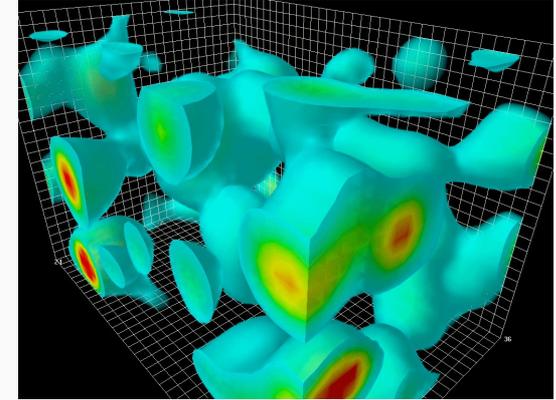
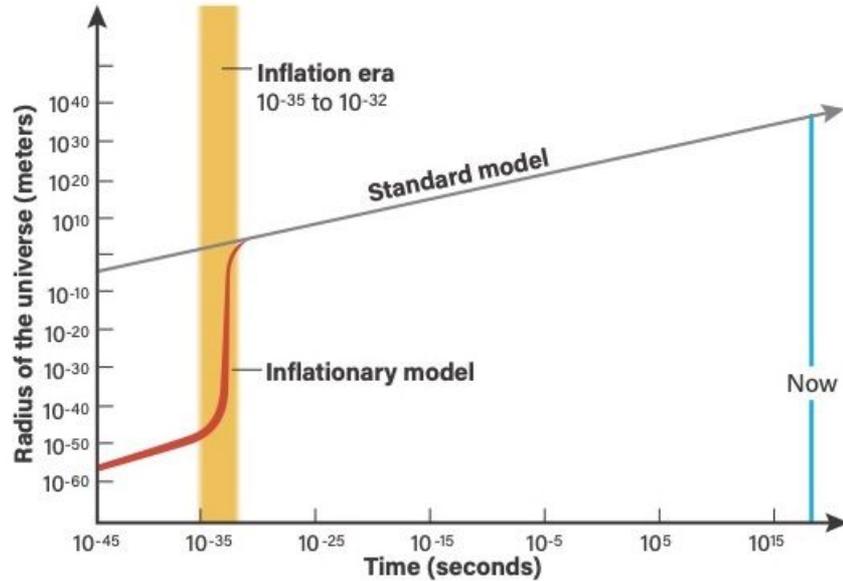
$$a(t) = e^{Ht}$$

Les dimensions de l'univers augmentent d'un facteur e^{60}

Prédiction: $\Omega = \rho/\rho_c = 1 \pm 10^{-5}$



Horizon



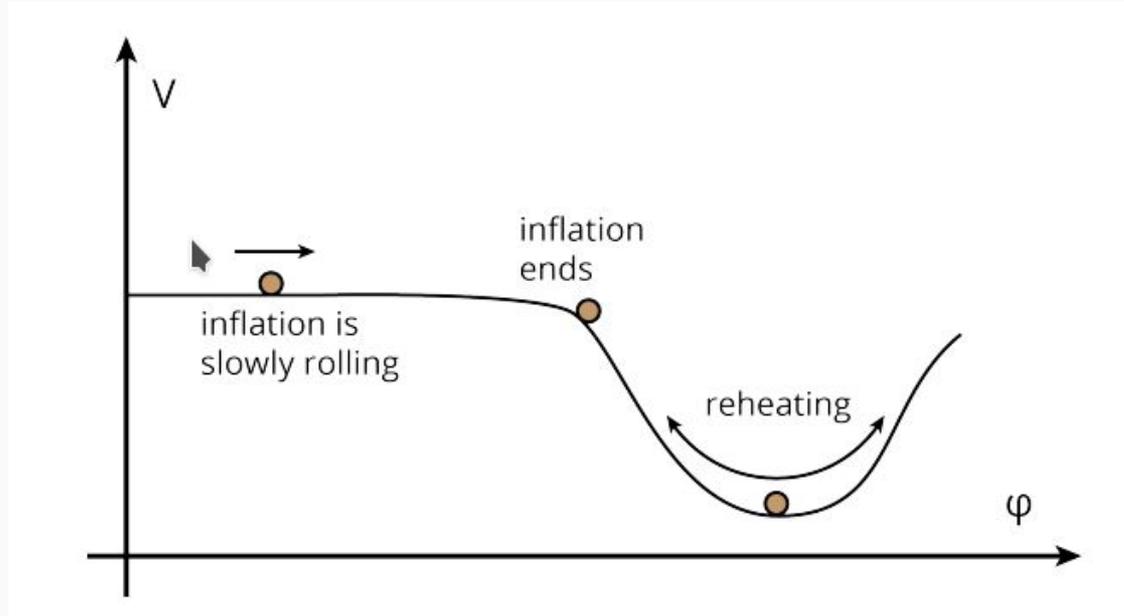
A l'origine univers microscopique

L'univers entier qu'on observe aujourd'hui était en contact causal.

Dilution des monopôles magnétiques.

Fluctuations quantiques portés par l'inflation aux échelles macroscopiques.

Fin de l'inflation



Après le *reheating* on a le départ du Big Bang standard

Prédictions de l'inflation

"Nearly scale-invariant Gaussian random field"

Les mesures de Planck sont en accord avec cette prédiction.

En particulier l'indice spectral n_s prévu par l'inflation est dans l'intervalle :

$0.92 < n_s < 0.98$ (modèles simples)

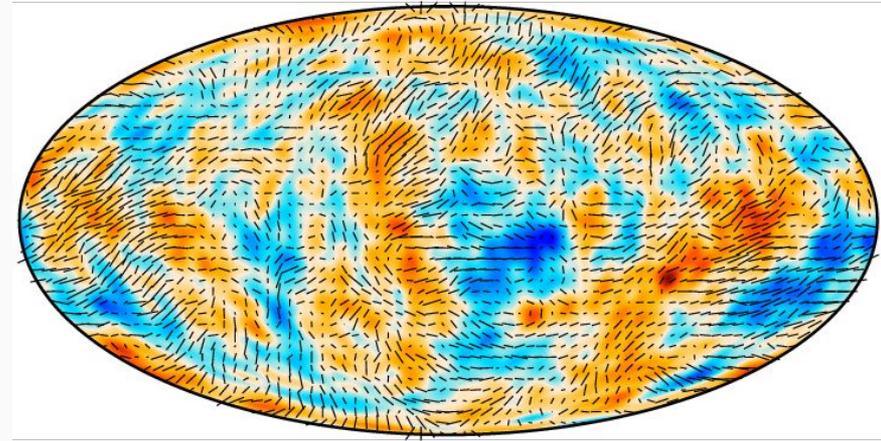
Les mesures de Planck donnent : $n_s = 0.968 \pm 0.006$

Polarisation du CMB

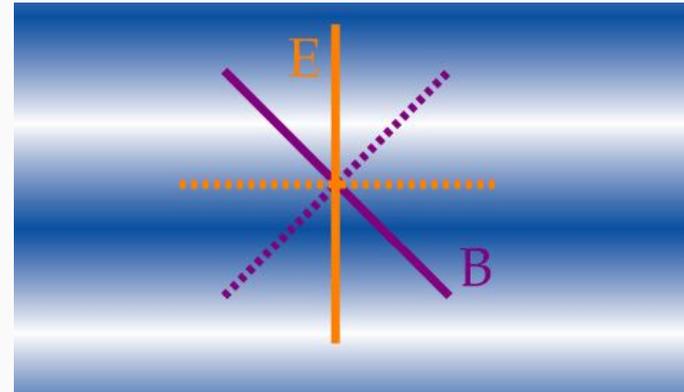
Planck a aussi mesuré la polarisation due à la diffusion Thomson des photons du CMB par les électrons libres.

IL y a un autre mode de polarisation qui pourrait se trouver dans le CMB, le mode B, dû aux ondes gravitationnelles générées par l'inflation.

Il y a eu en 2014 une fausse détection des B modes par BICEP2 (il y avait une contamination due à la poussière galactique révélée par Planck).



1 0.41 μK -160 160 μK



Quelques problèmes du modèle Λ CDM

Le problème du Lithium

Spite plateau

Prédiction de l'abondance du ${}^7\text{Li}$ avec la nucléosynthèse primordiale et avec la densité baryonique déterminé avec le CMB

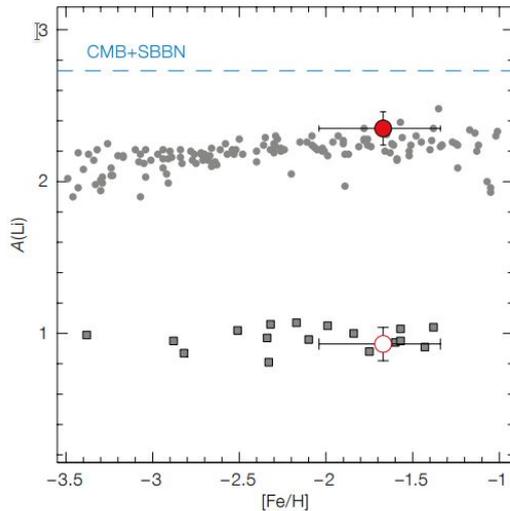
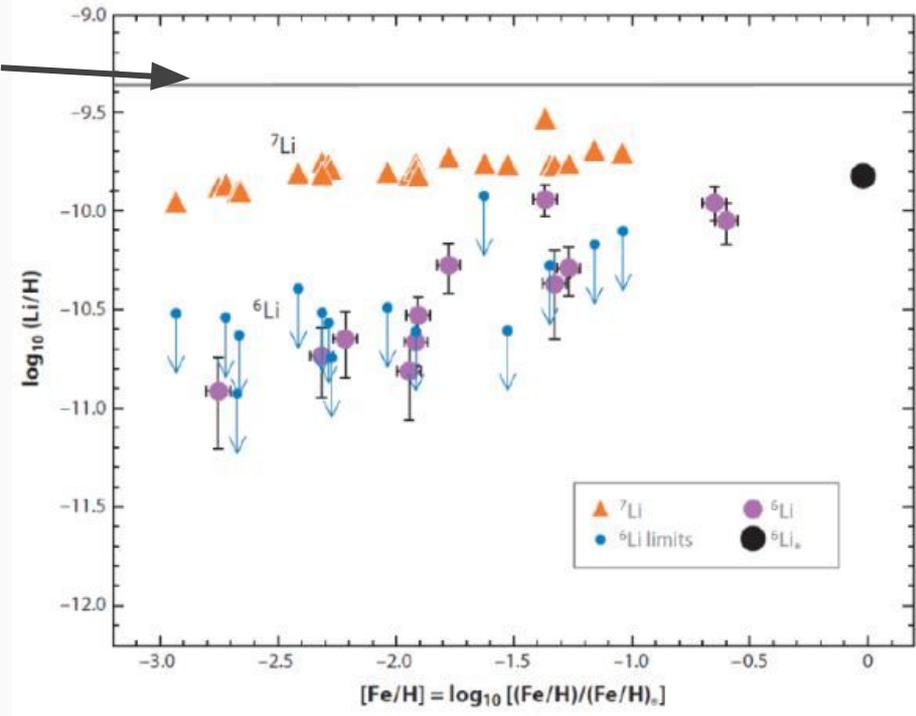


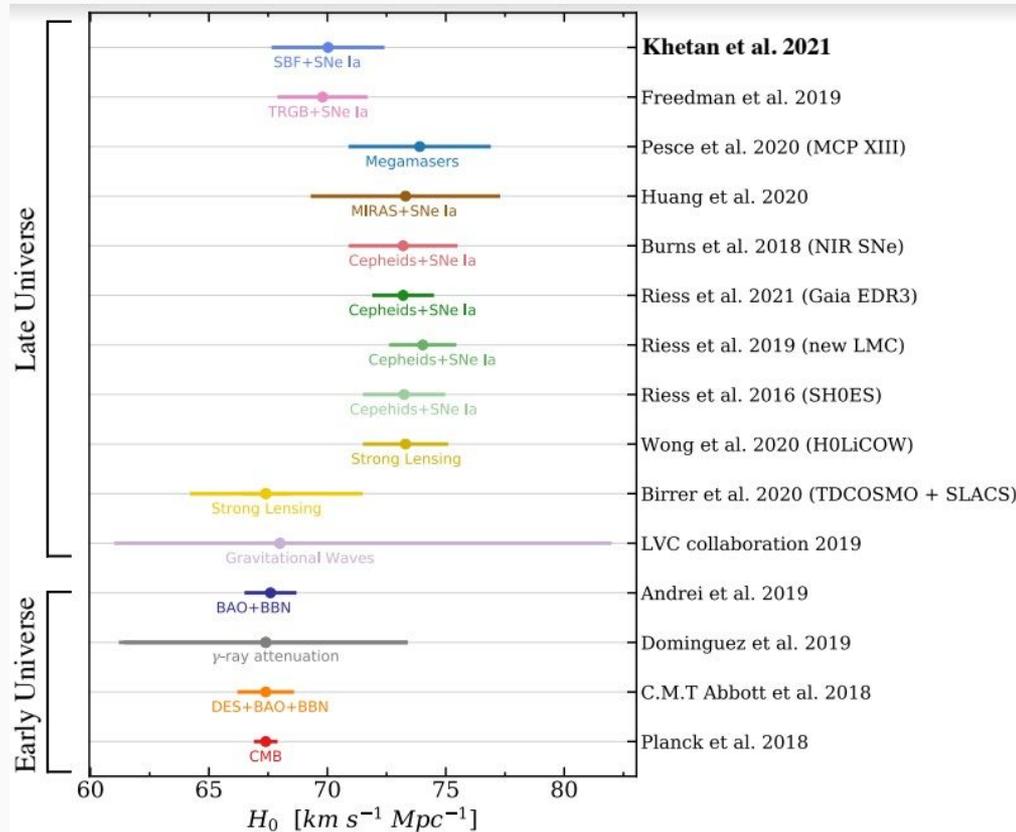
Figure 3. Abundance of lithium as a function of $[\text{Fe}/\text{H}]$ for the Spite Plateau (grey circles) and lower RGB stars (grey squares) of the Galactic field. The empty red circle denotes the surface lithium abundance measured in the lower RGB stars of M54, while the filled red circle shows the initial lithium abundance of M54. The blue dashed line is the initial lithium abundance from CMB + SBBN.

Mucciarelli et al. 2014

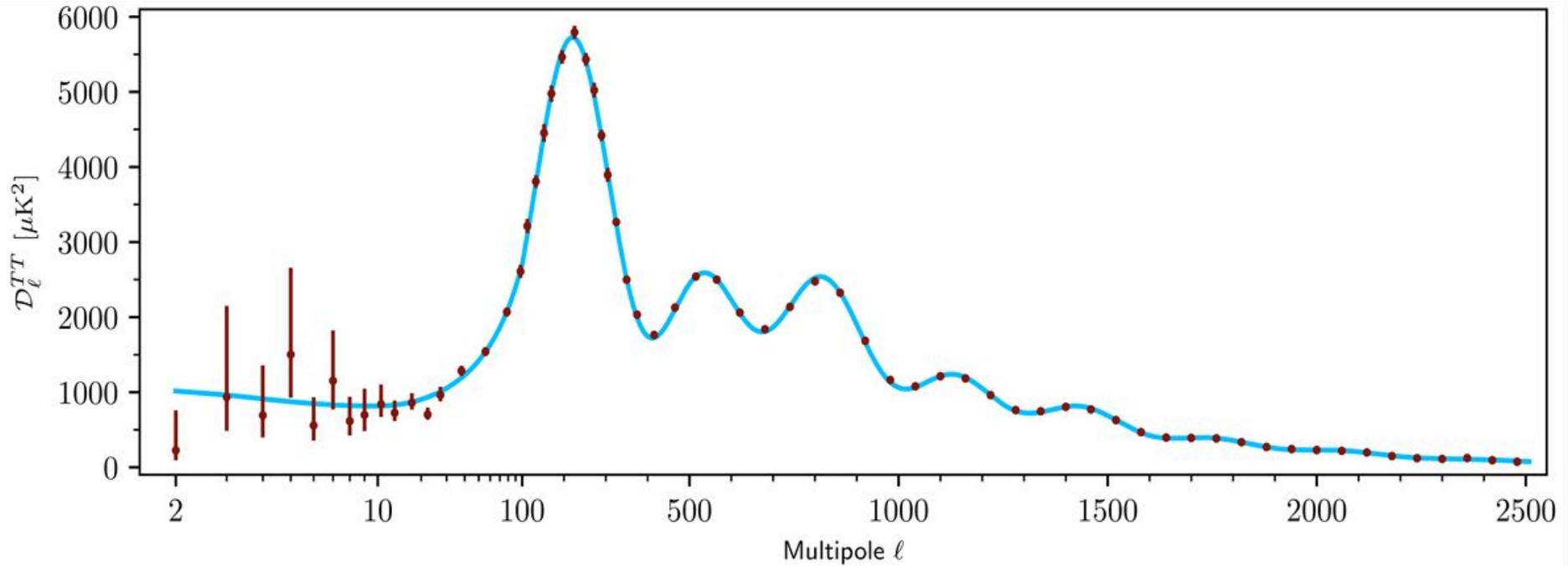


Fields 2011

La tension pour la constante de Hubble aujourd'hui



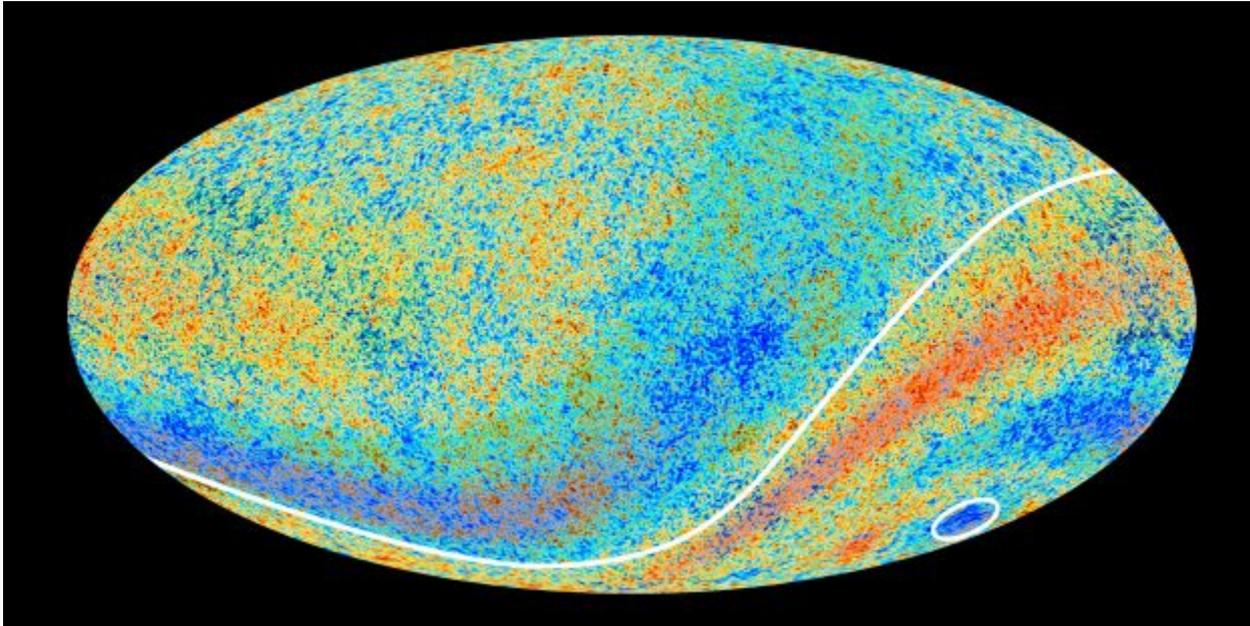
Le problème à $l = 2$



Signal trop bas à $l = 2$

Des anomalies dans le CMB

"Axis of evil" : différence de quelques μK entre les deux parties du ciel séparées de l'écliptique
Cold spot : région plus froide $70\mu\text{K}$ relativement grande et a priori improbable.



Date: 20 March 2013
Satellite: Planck
Copyright: ESA and the Planck Collaboration

A la recherche
d'une nouvelle physique

Matière noire : quelques candidats

Les neutrinos

Ils vont trop vite (relativistes) → matière noire chaude (hot dark matter)

Ils ont une masse trop petite (Planck limits : somme des trois neutrinos ≤ 0.17 eV).

Probable contribution à la densité : $0.005 < \Omega_\nu < 0.016$

neutralino (la plus légère particule stable de la Supersymétrie)

neutrino stérile (quatrième espèce de neutrino)

axion (solution au problème de la violation de la symétrie CP dans la QCD)

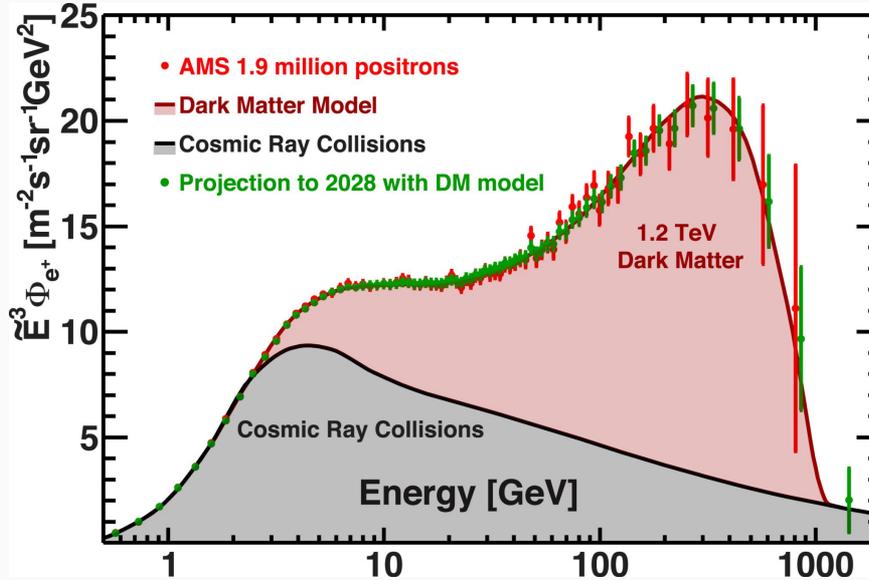
LHC aucune évidence de la Supersymétrie

Aucune évidence de particules invisibles produites par la désintégration du boson de Higgs

Aucune évidence dans les expériences de détection directe

Détection indirecte de la matière noire ?

Aguilar et al. 2021



Alpha Magnetic Spectrometer sur la Station Spatiale Internationale

Constante cosmologique et énergie du vide

La constante cosmologique est équivalente à une énergie du vide :

$$P_{\Lambda} = -\rho_{\Lambda} c^2 \quad (\text{Lemaître 1934})$$

En relativité générale chaque forme d'énergie génère un champ gravitationnel (courbe l'espace-temps)

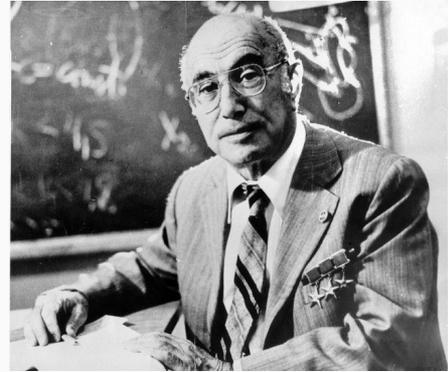
Selon la théorie quantique des champs, le vide a une énergie, donc selon la relativité générale il génère un champ gravitationnel.

L'énergie du vide quantique est équivalente à une constante cosmologique.

Faut-il donc identifier la constante cosmologique à l'énergie du vide quantique ?

En réalité, formellement on devrait les considérer séparément :

$$\rho_{\text{eff}} = \rho_{\Lambda} + \rho_{\text{v}} \quad \text{ou} \quad \Lambda_{\text{eff}} = \Lambda + \Lambda_{\text{v}}$$



Zel'dovich
1967-1968

Les problèmes de Λ ou de l'énergie du vide

La valeur petite mais différente de zéro

Energie du vide deduite des observations ($\rho_v \sim 0.7 \rho_c$) :

$$\rho_v \sim 10^{-29} \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_v \text{ (théorie)} \sim 10^{92} \text{ g/cm}^3 \quad \text{estimation naïve}$$

La coïncidence

$$\Omega_\Lambda / \Omega_M = \rho_\Lambda / \rho_M \propto a^3$$

Pourquoi $\rho_\Lambda \sim \rho_M$ aujourd'hui ?

L'énergie noire

Nouvelle composante de l'univers :

$$P = w\rho c^2 \quad -1 < w < 0$$

Evolution dans le temps : $w(t)$ Ex. $w = w_0 + w_a(1-a)$ $a = 1/(1+z)$

Champ scalaire (comme dans l'inflation) ?
"Quintessence"

Alternative à la relativité générale (modified gravity) ?

Pour l'instant les données sont compatibles avec $w = -1$ (constant)

Euclid

Euclid Space Telescope 1.2m
deep optical and near infrared imaging
lancement en 2022

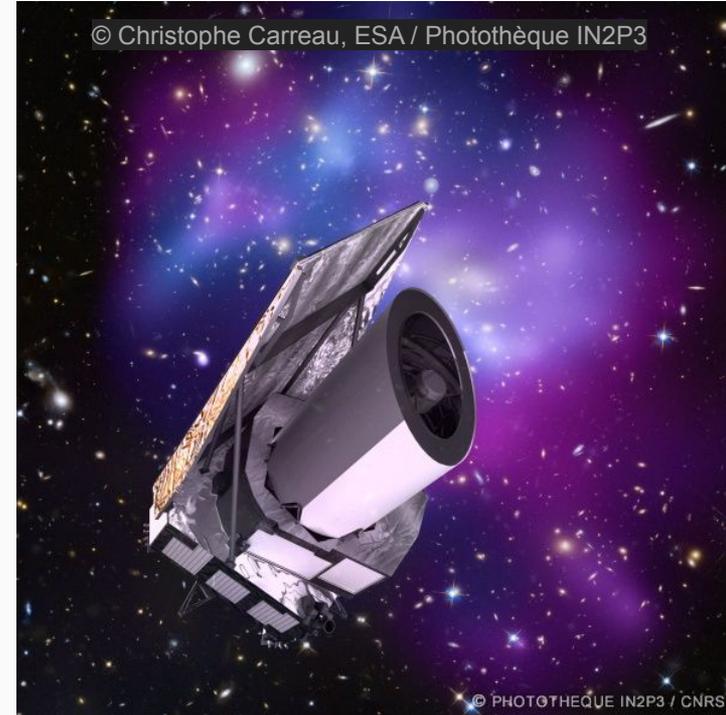
Visible instrument (VIS)
(R+I+Z), 550-900 nm

Near Infrared Spectrometer and Photometer (NISF)
Y, J, H magnitudes (1100nm - 2000nm for spectroscopy)
slitless near infrared spectroscopy

0.53 degrés carrés

Wide Survey, VIS < 24.5, 15000 degrés carrés
Deep Survey, 3 fields, 43 degrés carrés, VIS < 26.5

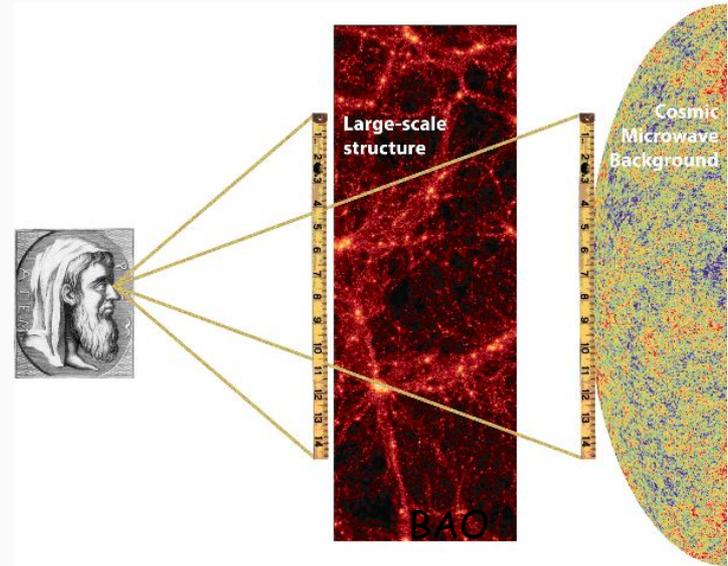
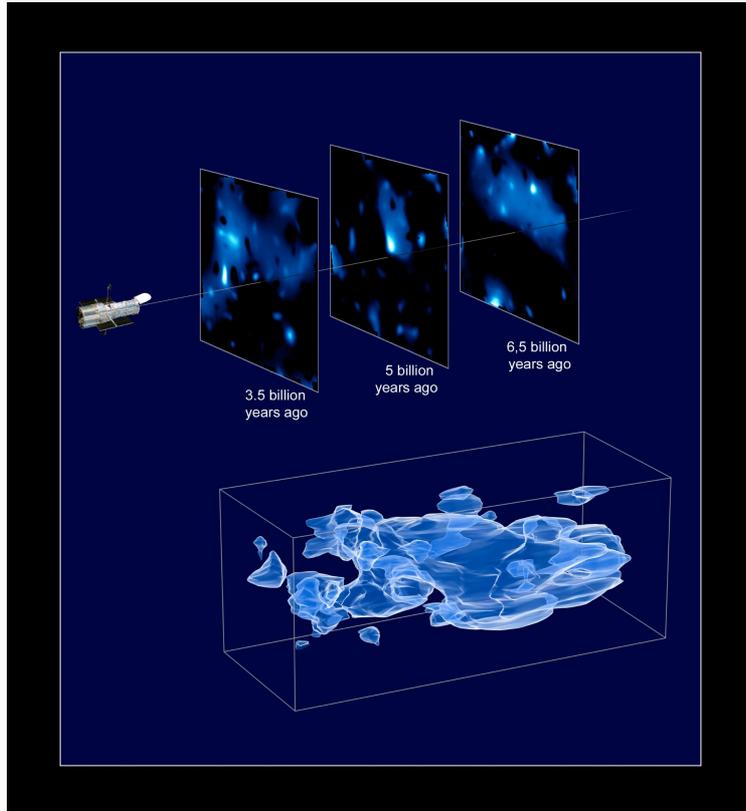
détection de 12 milliards de sources, images avec une
résolution de 0".2
redshift spectroscopique de 35 millions de galaxies



La science d'Euclid

Objective

To understand the nature of dark energy and dark matter by accurate measurements of both the accelerated expansion of the Universe and the strength of gravity on cosmological scales.

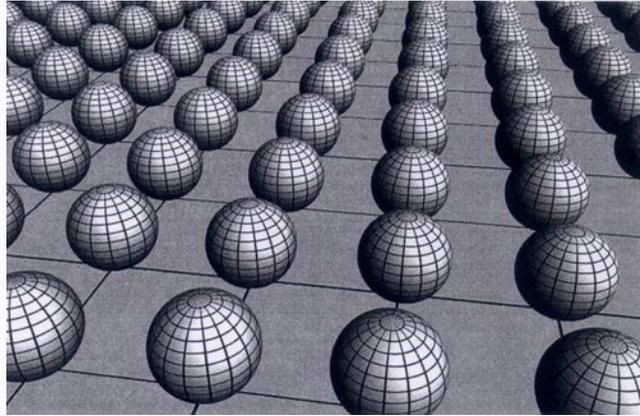


Weak lensing
Baryonic acoustic oscillations,
redshift space distortions

Clusters of galaxies

Le Multivers

A la recherche de la théorie du tout



Le Graal de la physique: avoir une théorie qui explique tous les phénomènes physiques et l'unicité et la nécessité de l'Univers et de ses lois (theory of everything).

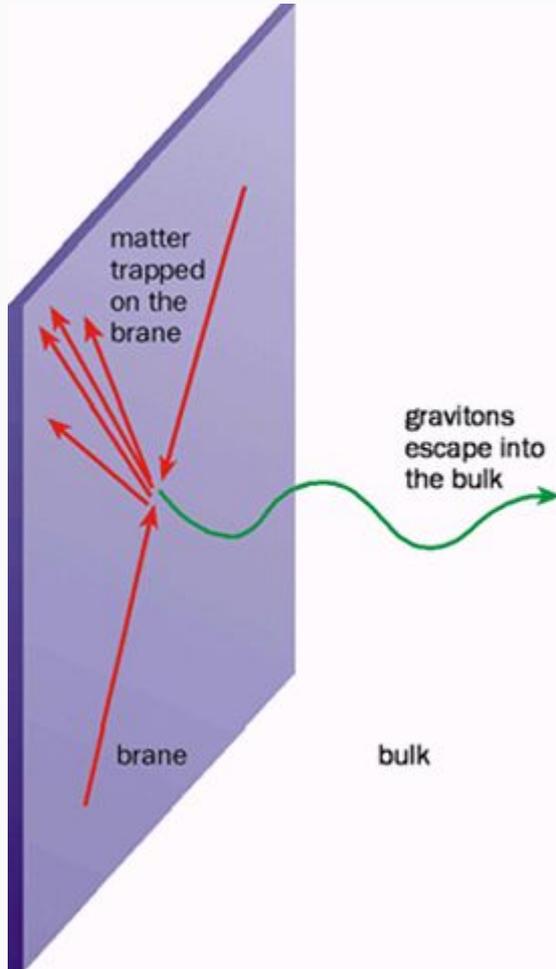
Gravitation quantique à boucles (Loop Quantum Gravity)

Théorie des Supercordes

Les particules fondamentales ne sont pas punctiformes,
mais des cordes

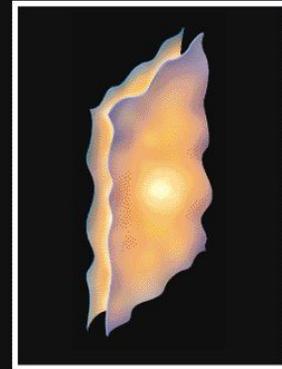
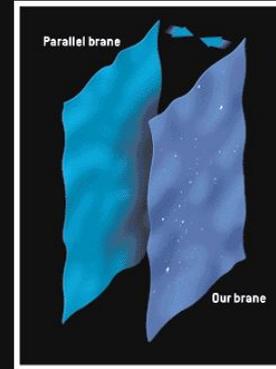
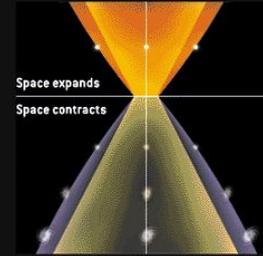
L'espace-temps Théorie M (10+1 dimensions de l'espace)

A brane new world



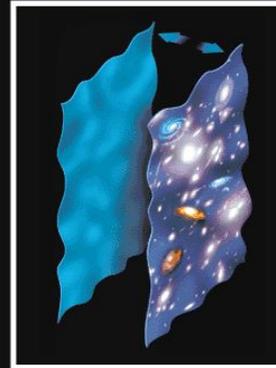
EKPYROTIC SCENARIO

If our universe is a multidimensional membrane, or simply a "brane," cruising through a higher-dimensional space, the big bang may have been the collision of our brane with a parallel one. The collisions might recur cyclically. Each galaxy follows an hourglass-shaped path through spacetime (*below*).

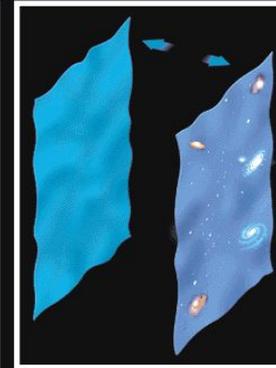


Two nearly empty branes pull each other together. Each is contracting in a direction perpendicular to its motion.

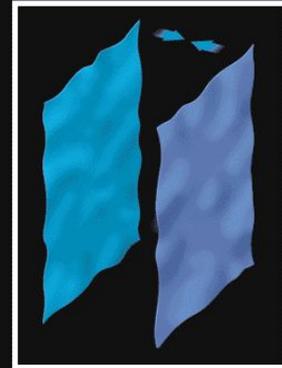
The branes collide, converting their kinetic energy into matter and radiation. This collision is the big bang.



The branes rebound. They start expanding at a decelerating rate. Matter clumps into structures such as galaxy clusters.



In the cyclic model, as the branes move apart, the attractive force between them slows them down. Matter thins out.



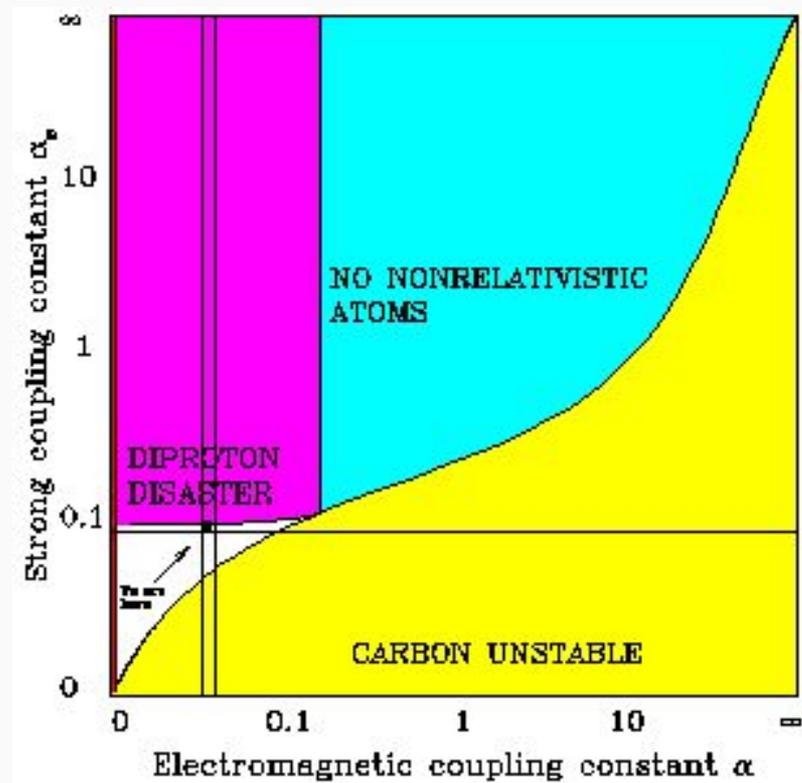
The branes stop moving apart and start approaching each other. During the reversal, each brane expands at an accelerated rate.

Le paysage de la Théorie des Supercordes

La théorie des supercordes permet des univers avec des configurations différentes (énergies du vide différentes, lois de la physique différentes).

Le nombre de configurations possibles (le paysage) est énorme : 10^{500}
La plupart de ces configurations ne sont pas compatibles avec la vie.

Pourquoi notre univers parmi les 10^{500} ?



Max Tegmark

Le principe anthropique

Principe copernicien

Nous ne sommes pas des observateurs privilégiés dans l'univers.

MAIS...

Principe anthropique (B. Carter 1974)

Faible

Our location in the universe is *necessarily* privileged to the extent of being compatible with our existence as observers.

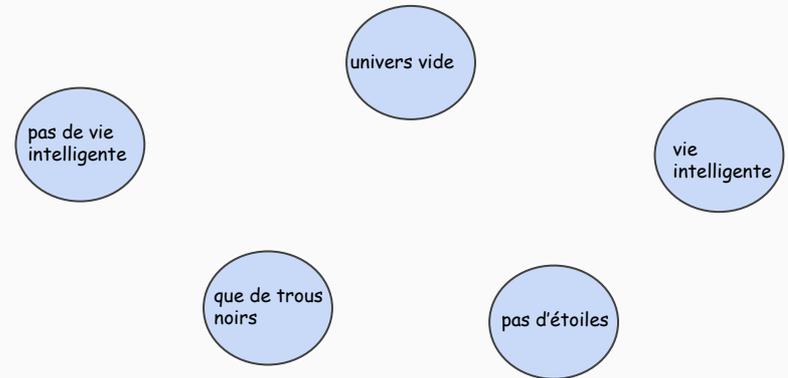
Fort

The Universe (and hence the fundamental parameters on which it depends) must be such as to admit the creation of observers within it at some stage. To paraphrase Descartes, 'cogito ergo mundus talis est'.

L'hypothèse du Multivers

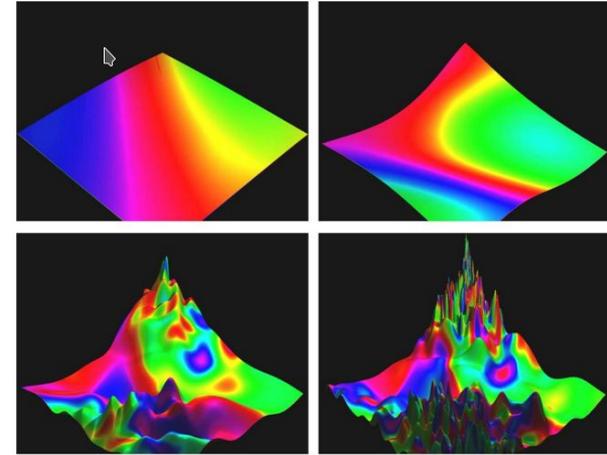
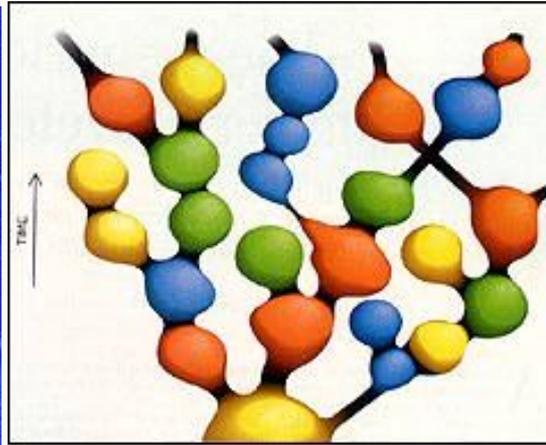
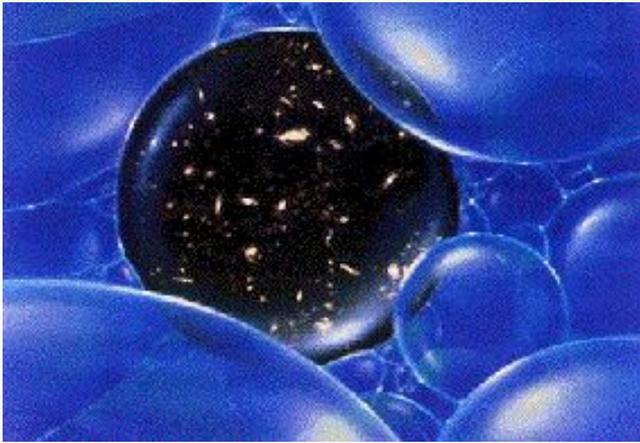
Il existe un nombre énorme, peut-être infini, d'univers avec des lois de la physique différentes.

Dans un petit nombre de ces univers les lois permettent la formation de la vie.
Nous nous retrouvons naturellement dans un de ces univers (principe anthropique fort).



L'inflation chaotique

Les configurations de la théorie des supercordes pourraient se réaliser dans l'inflation chaotique d'Andrei Linde.



"Un paysage de possibilités peuplé d'un megaverse de réalités locales" (Leonard Susskind)

Conclusions



→ COSMIC HISTORY



10⁻³² seconds

1 second

100 seconds

380 000 years

300–500 million years

Billions of years

13.8 billion years

Beginning of the Universe



Inflation

Accelerated expansion of the Universe

Formation of light and matter

Light and matter are coupled

Dark matter evolves independently; it starts clumping and forming a web of structures

Light and matter separate

• Protons and electrons form atoms
• Light starts travelling freely; it will become the Cosmic Microwave Background (CMB)

Dark ages

Atoms start feeling the gravity of the cosmic web of dark matter

First stars

The first stars and galaxies form in the densest knots of the cosmic web

Galaxy evolution

The present Universe



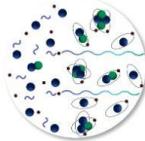
• Tiny fluctuations: the seeds of future structures
• Gravitational waves?



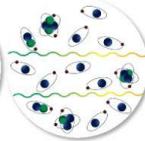
Frequent collisions between normal matter and light



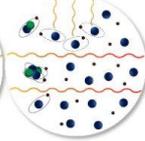
As the Universe expands, particles collide less frequently



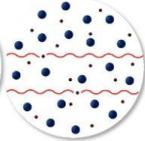
Last scattering of light off electrons
→ **Polarisation**



The Universe is dark as stars and galaxies are yet to form



Light from first stars and galaxies breaks atoms apart and "reionises" the Universe



Light can interact again with electrons
→ **Polarisation**

La théorie du Big Bang

Notre univers est en expansion et il a eu **une origine dans le passé** (13,8 milliards d'années)

Il était très chaud et dense.

Sa dynamique est décrite par la relativité générale.

La théorie du Big Bang explique :

l'abondance des éléments légers

l'isotropie du fond diffus cosmologique et son spectre

la formation et l'évolution des structures

Mais il faut ajouter :

la matière noire non baryonique

une constante cosmologique positive (ou de l'énergie noire)

l'inflation pour justifier l'origine des structures et quel modèle

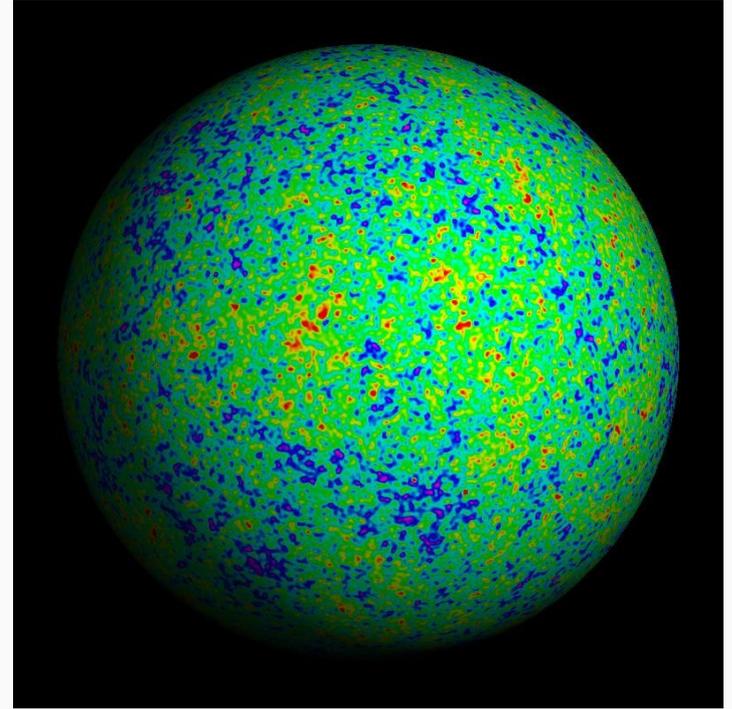
Le modèle standard Λ CDM est compatible avec différentes observations indépendantes.

La théorie du Big Bang n'explique pas tout.

Y-a-t-il eu une phase précédente ? Est-il un événement qui n'est pas unique ?

Est-ce que l'histoire se répète ?

Schema huius præmissæ diuisionis Sphærarum .



Il y a une théorie qui dit que si un jour on découvre à quoi sert l'univers et pourquoi il est là, il disparaîtra immédiatement pour être remplacé par quelque chose d'encore plus bizarre et inexplicable.

Une autre théorie dit que cela s'est déjà passé.

Douglas Adams
Le dernier restaurant à la fin du monde

