

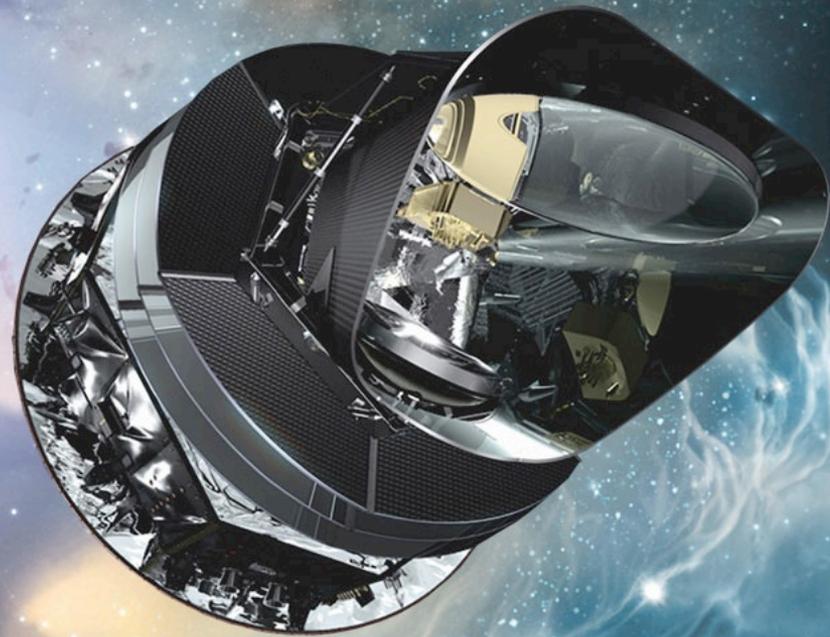
# Cosmologie & modèle du Big-Bang

## Premiers résultats cosmologiques de la mission Planck

### Mallette pédagogique

**Cécile Renault**

Laboratoire de Physique  
Subatomique et de Cosmologie  
Grenoble ([rcecile@in2p3.fr](mailto:rcecile@in2p3.fr))



# Le programme Cosmologie

## La cosmologie

- Nos connaissances actuelles
- Les observations
- Les questions ouvertes, les questions gênantes

## « Observer » le Big-Bang : mythe ou réalité

- **le satellite Planck**
- le LHC
- les futures observations

## « Avant », « ailleurs »

- les problèmes du Big-Bang
- quelques idées dans l'air
- science ou science-fiction ?

# Physique et cosmologie

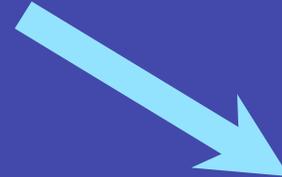
Physique = description et prédiction des phénomènes  
Rôle majeur de l'expérience --> reproductibilité

Astrophysique : uniquement observation passive

Cosmologie : un seul Univers à observer

Mais :

- même physique partout
- Univers isotrope et homogène



construire un modèle  
qui décrit au mieux  
notre Univers

Recherche (physique)

=

Coopération/confrontation entre théoriciens et observateurs

# La cosmologie : les questions

Histoire ?

Age, formation

Expansion infinie ou effondrement

Origine et évolution des structures

Contenu ?

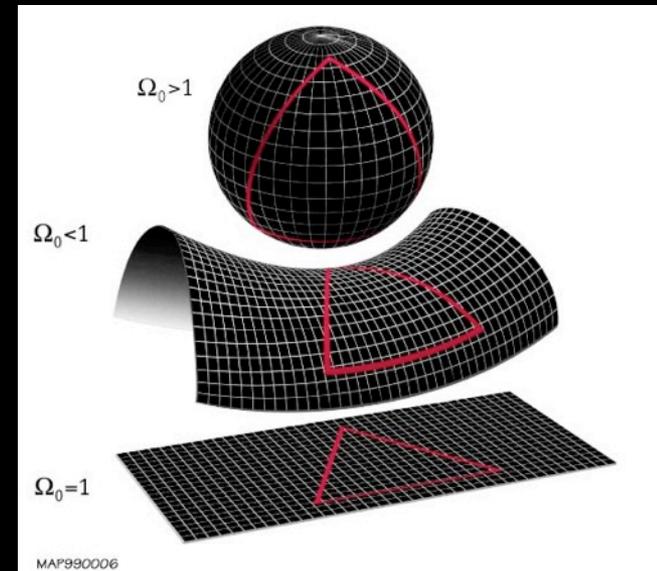
Matière ordinaire, photons

Matière sombre

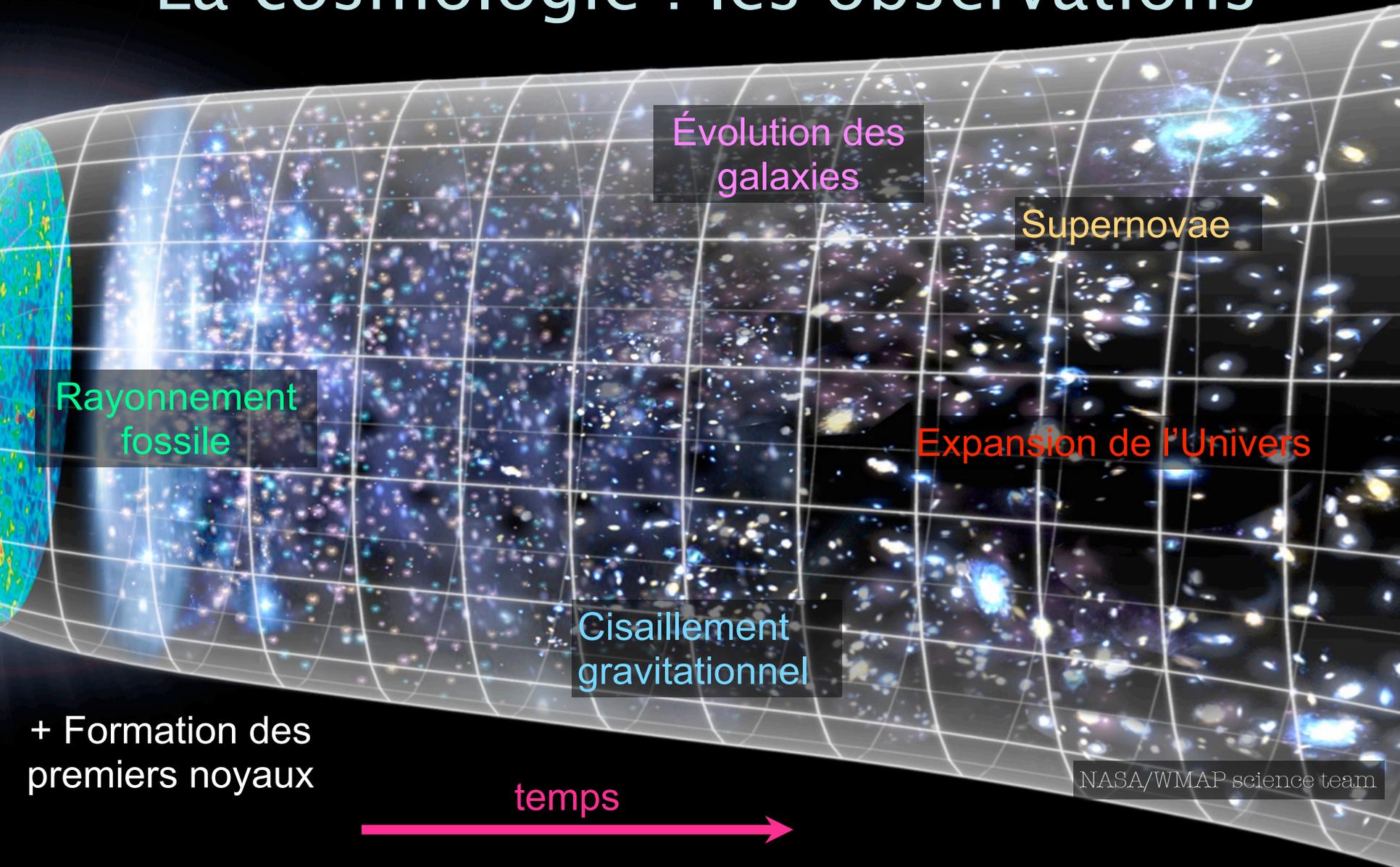
Energie sombre

Géométrie ?

Ouvert, plat, fermé



# La cosmologie : les observations



Le modèle du Big-Bang est en accord toutes ces observations

Observer des millions de galaxies et les positionner dans l'espace. Ce film met en image près de 500 000 galaxies observées par le télescope "Sloan Digital Sky Survey".



La limite de l'Univers observable est donnée par l'image du rayonnement fossile, première lumière de l'Univers. Au cours du <sup>7</sup> temps, la distance entre l'observateur et cette sphère augmente.

# Le modèle de concordance

Rayonnement  
fossile

Expansion de l'Univers

Formation des  
premiers noyaux

Cisaillement  
gravitationnel

Supernovae

Modèle du Big-Bang =

univers en expansion à partir d'un instant « initial » où l'Univers est arbitrairement petit, dense et chaud. Lois de la relativité générale.

+

Composition de l'Univers =

Aujourd'hui, en énergie :

5 % de matière ordinaire

26 % de matière noire

69 % d'énergie noire ou Cste cosmologique

+

Épisode d'inflation =

Dilatation exponentielle de l'Univers « juste après » le Big-Bang

+

Géométrie euclidienne (plate)

On peut ainsi décrire l'évolution de l'Univers de  $10^{-44}$  sec après «  $t=0$  » jusqu'à nos jours dans ses grandes lignes

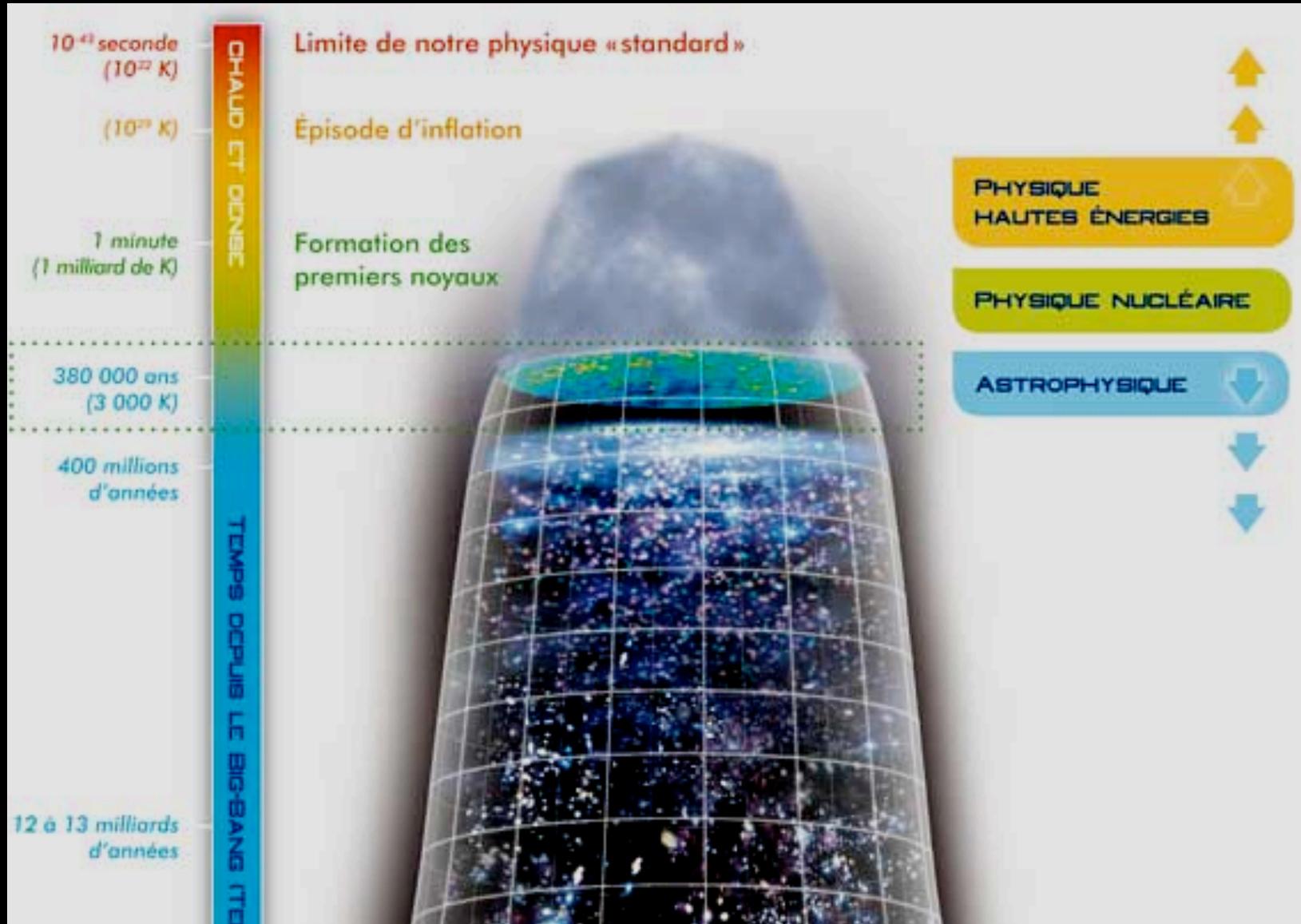
# Toutes nos connaissances en physique utilisées

$t=0$

Big-Bang

début de l'expansion

temps

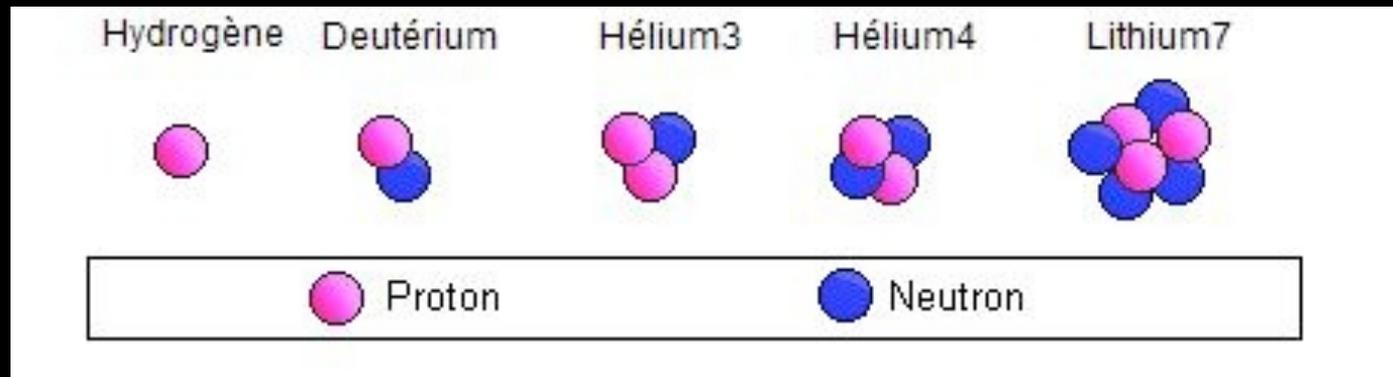


# La formation des premiers noyaux ou nucléosynthèse primordiale

Nombre de photons par proton  
+  
Modèle du Big-Bang  
(Univers en expansion, initialement très chaud)  
+  
Physique nucléaire

Quantité de  
noyaux légers

*produits dans les  
premières minutes  
de l'Univers*



La mesure de ces quantités est très difficile car il y a aussi la nucléosynthèse stellaire et pas/peu de très vieilles étoiles visibles

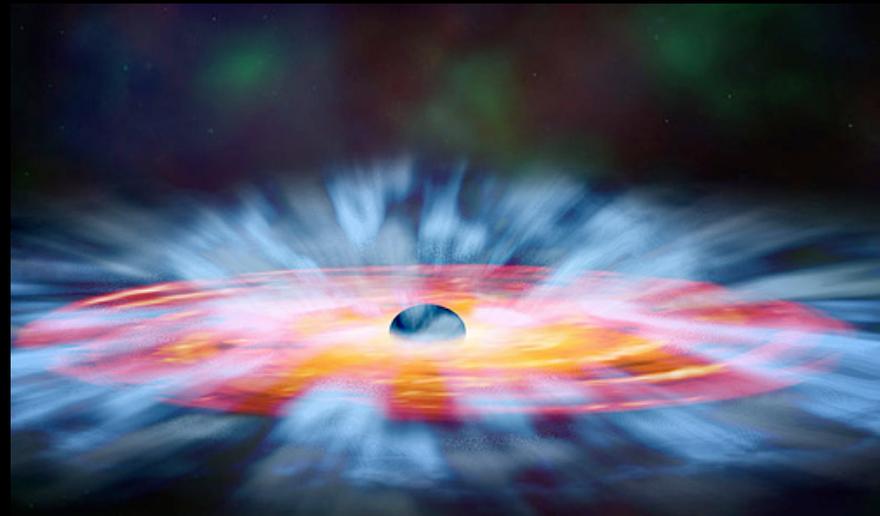
→ erreurs non négligeables sur les mesures

# Que nous apprend-elle ?

*Ce mécanisme de production est assez sensible à l'environnement extérieur.  
« Signature » la plus ancienne du Big-Bang que l'on ait détecté (3 minutes).*

Cette « fragilité » permet de contraindre très efficacement la présence de constituants exotiques : la nucléosynthèse primordiale a eu lieu et donc n'a été empêchée !

→ Par exemple des trous noirs primordiaux formés par des fluctuations quantiques au début de l'Univers auraient d'excellentes propriétés de matière sombre, mais leur évaporation aurait cassé ces premiers noyaux. Leur nombre est donc extrêmement limité.



# Le rayonnement fossile

3 minutes

Électrons libres du plasma et photons  
en interaction permanente :  
Univers opaque et brûlant

Température > millions de degrés

*pas d'image*

Les électrons se lient aux protons  
pour former les premiers atomes  
d'hydrogène :

Univers transparent et chaud

Température de milliers de degrés

380 000 ans

*image dans le visible*

L'énergie des photons diminue dans  
l'univers en expansion :

Univers transparent et froid

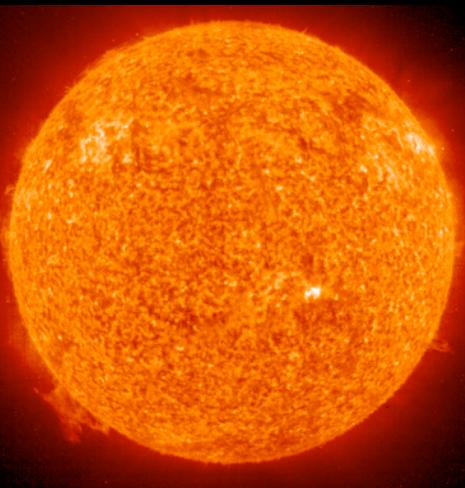
Température de quelques  
degrés au-dessus du zéro  
absolu (2.725 K aujourd'hui)

*image dans le submillimétrique*

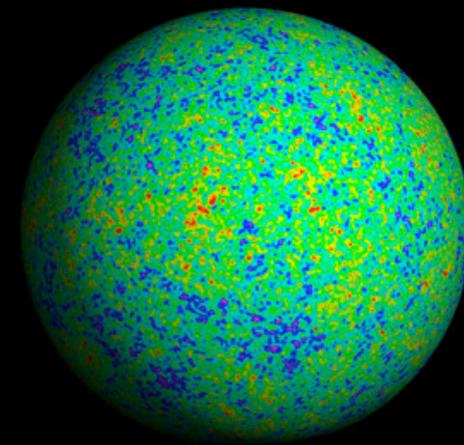
13,7 milliards d'années

# Que nous apprend-il ?

*Rayonnement fossile = LA plus vieille image du cosmos qui soit accessible*



De même que la surface du Soleil révèle ce qui se passe au cœur de l'étoile, le rayonnement fossile garde l'empreinte du contenu et de l'évolution de l'Univers depuis le Big-Bang.



Tegmark

→ en étudiant *très précisément* les détails de ces inhomogénéités, on accède à une description précise des « **paramètres cosmologiques** » (géométrie de l'espace-temps, vitesse d'expansion, quantité de matière ordinaire et de matière noire etc)

... d'où découlent toutes les informations (âge de l'Univers, contenu en énergie sombre mais aussi masse totale de neutrinos par exemple)



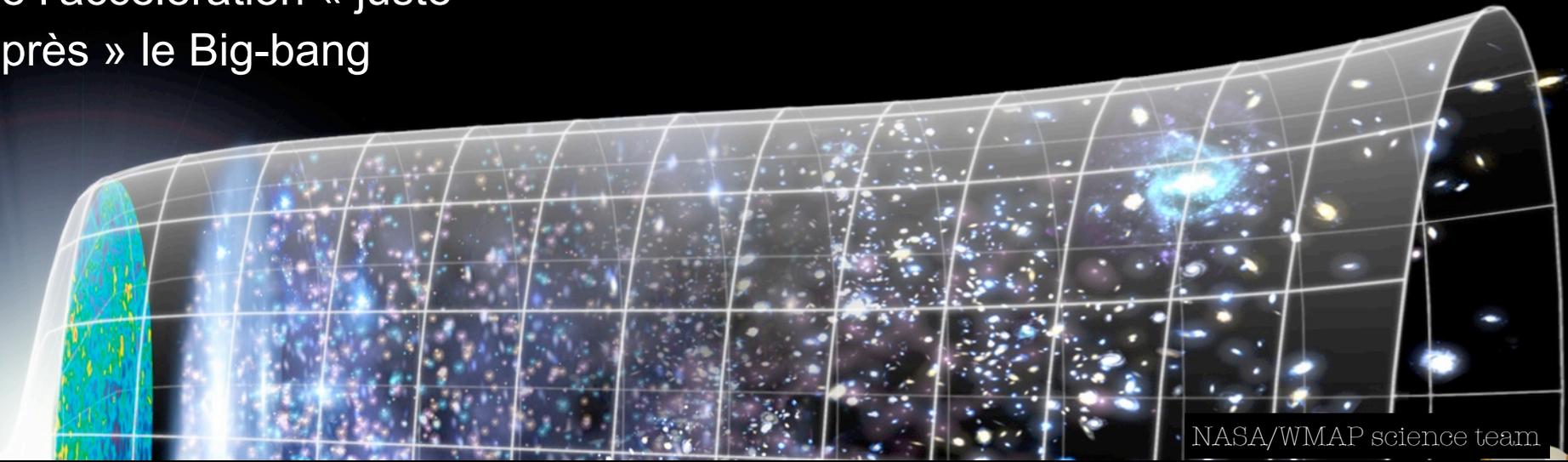
# Que nous apprennent-elles ?

## L'Univers est en expansion accélérée

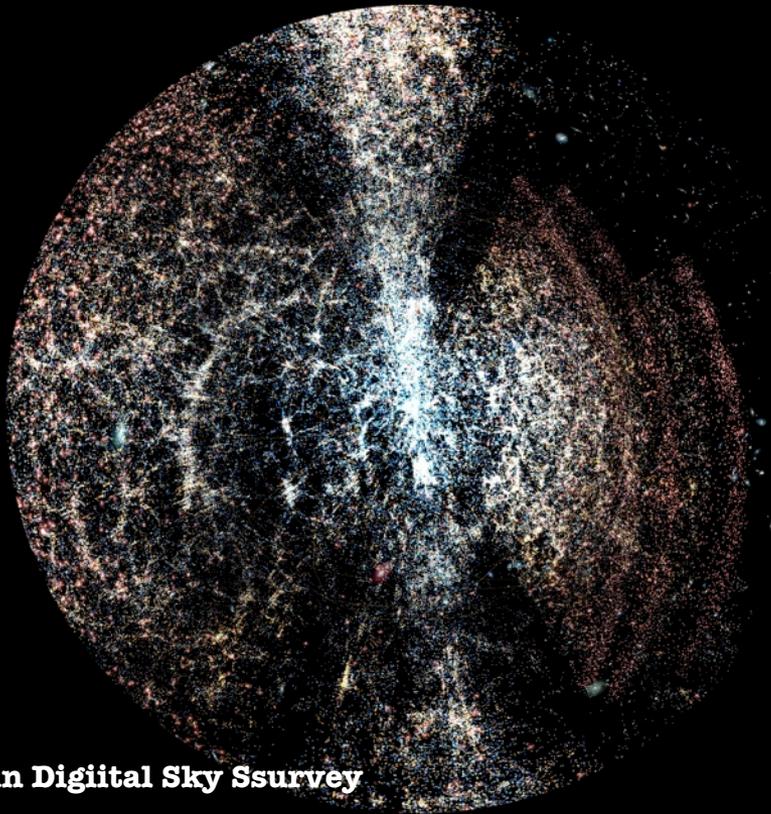
Le Big-Bang est le  
moteur de l'expansion

L'inflation est le moteur  
de l'accélération « juste  
après » le Big-bang

L'énergie sombre (ou  
constante cosmologique)  
est le moteur de  
l'accélération « récente »



# Les galaxies : distribution et évolution



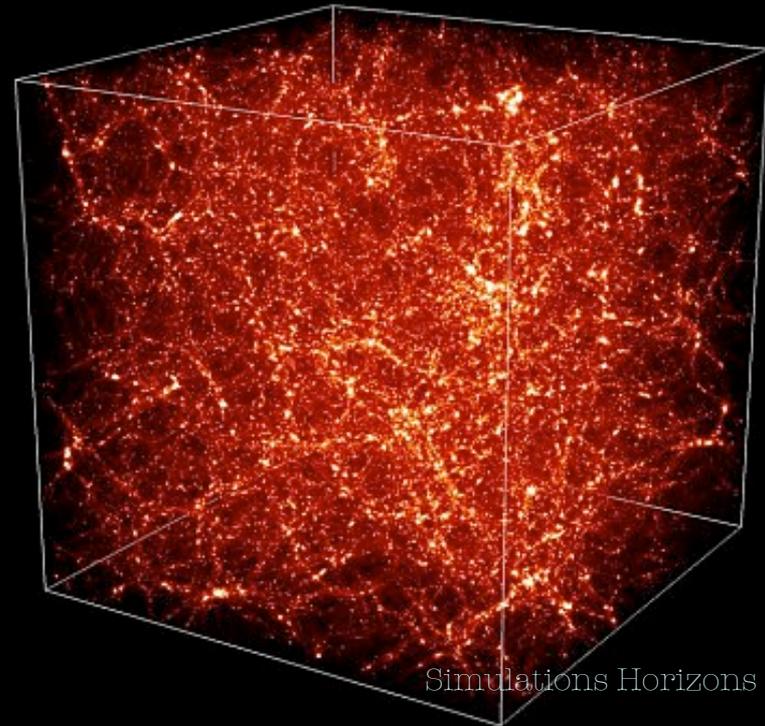
Sloan Digital Sky Survey

Observation de la  
distribution des galaxies

Difficulté : les « biais » observationnels et la complexité des simulations  
*on ne voit parce qu'il n'y a pas*

ou

*parce qu'on n'est pas capable de voir ?*



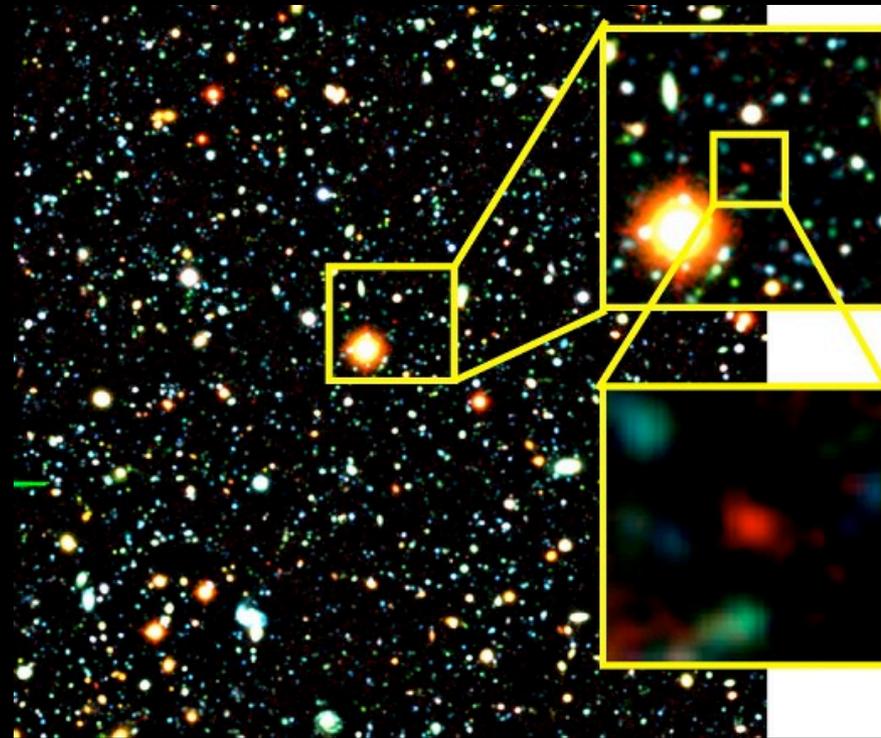
Simulation de distribution de  
matière sombre, gaz et étoiles

# Que nous apprennent-elles ?

Les galaxies lointaines sont différentes des galaxies proches  
→ évolution

Connecter les prédictions du modèle du Big-Bang + paramètres mesurés sur le rayonnement fossile aux observations des galaxies est une grande réussite du modèle de concordance.

L'une des galaxies les plus lointaines :  
l'Univers n'a que 750 millions d'années



# Question ouverte : l'inflation

Atout essentiel : 1 solution unique pour 3 problèmes

- Explique l'homogénéité quasi-parfaite sur tout le ciel
- Conduit « naturellement » à un espace plat (ou presque plat)
- Rend macroscopiques les fluctuations quantiques primordiales

Ex-défaut majeur : basé sur un type de particule jamais observé  
AUJOURD'HUI il y a le Higgs qui est aussi un champ scalaire !

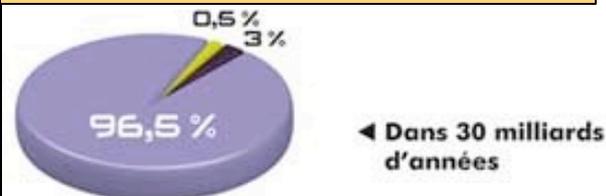
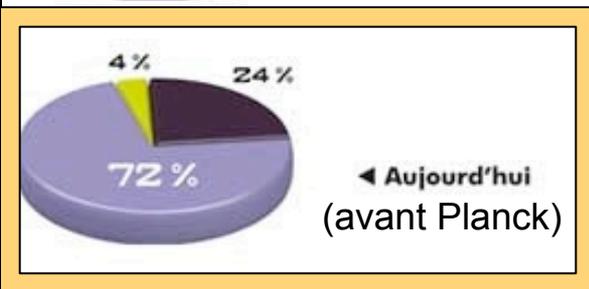
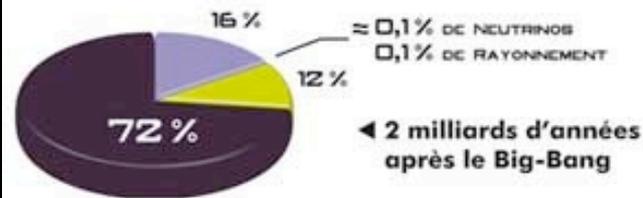
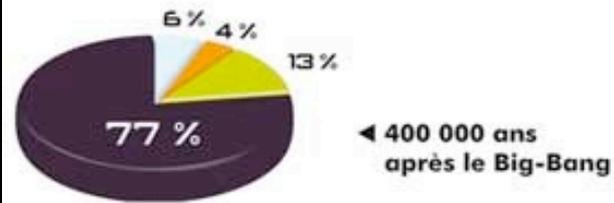
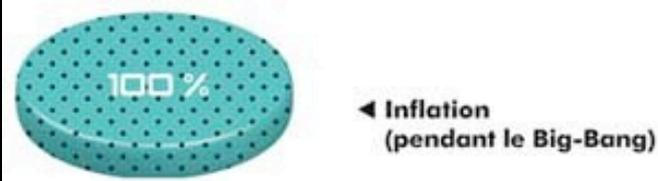
Actuellement, on n'a pas tellement mieux ...

Mais il existe des dizaines de familles de modèles d'inflation

Big-Bang = modèle effectif potentiellement valable jusqu'à  $10^{-44}$  seconde après  $t=0$   
Inflation = nom générique d'une foule de modèles pour un phénomène très bref qui a eu lieu  $\sim 10^{-30}$  seconde après  $t=0$

--> grand besoin de discriminer entre ces possibilités

# Questions gênantes : matière et énergie sombres



## Matière sombre :

- On a une particule « naturelle »
- Mais défie toutes les tentatives de détection directe depuis + de 20 ans
- ~Echec d'une modification à grande échelle de la loi de la gravitation

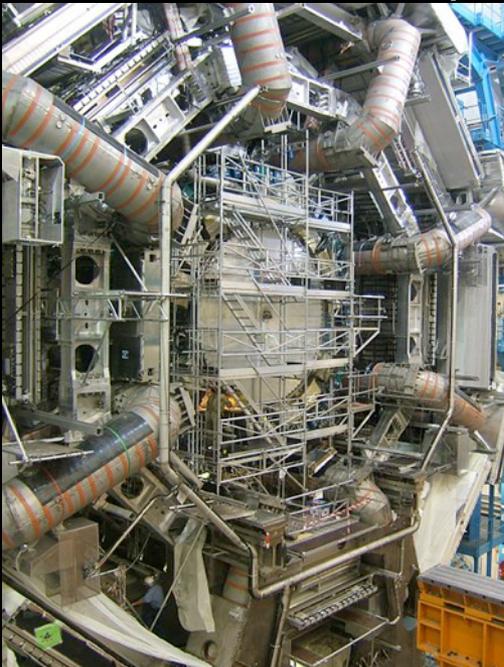
## Énergie sombre :

- Aucune particule « naturelle »
- Pourrait être une « simple » constante cosmologique
- Echec des tentatives d'explication microphysique

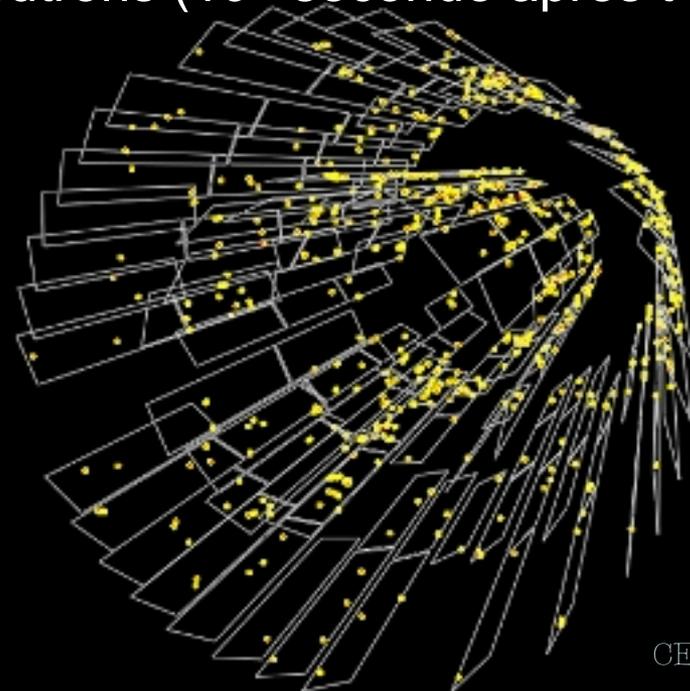
Mieux tracer leur évolution dans l'histoire de l'Univers pour mieux les contraindre, mieux les comprendre

# L'apport du LHC à la cosmologie

- Le champ de Higgs est être un champ scalaire (comme le champ d'inflatons).
- Le candidat « naturel » de la matière sombre est le neutralino, particule la plus légère de la supersymétrie. Aucun signe pour le moment, supersymétrie “simple” a priori exclue ...
- Le plasma quarks-gluons correspond à l'état de la matière lorsque se sont formés les protons et les neutrons ( $10^{-4}$  seconde après  $t=0$ ).



CERN / ATLAS



CERN / ALICE

# « Observer » le Big-Bang

2 pistes pour s'en approcher :

Les détails du rayonnement fossile contiennent l'empreinte de tout ce qui s'est passé depuis le Big-Bang (y compris l'inflation)

MAIS : certaines signatures sont très faibles  
signaux d'avant-plans, cisaillement gravitationnel  
--> pas facile ...

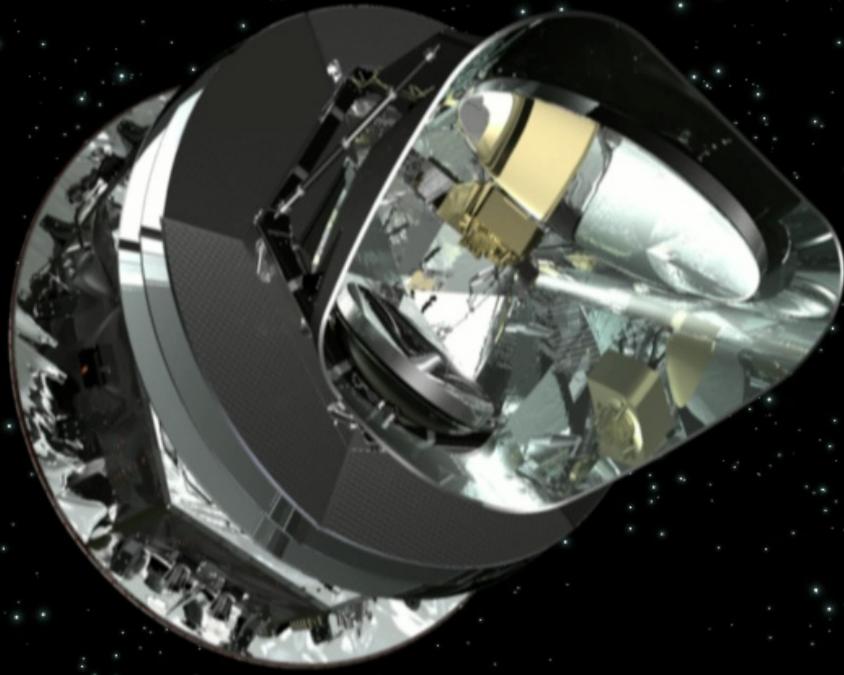
Accélérer des particules à des énergies très importantes pour chercher de nouvelles particules ou reproduire l'état de la matière à très haute température

MAIS on n'atteindra jamais les énergies de l'inflation

$$E_{\text{LHC}} \leftrightarrow E_{\text{univers}} \quad 10^{-12} \text{ sec. après } t=0 - E_{\text{LHC}} \leftrightarrow E_{\text{inflation}} / 10^{12}$$



# Le satellite Planck



sensibilité de  $2 \cdot 10^{-6} \Delta T / T$

mission ESA : premier satellite  
européen dédié à l'étude du CMB

1m50  $\varnothing$  télescope  
→ Résolution jusqu'à 5'

2 instruments :

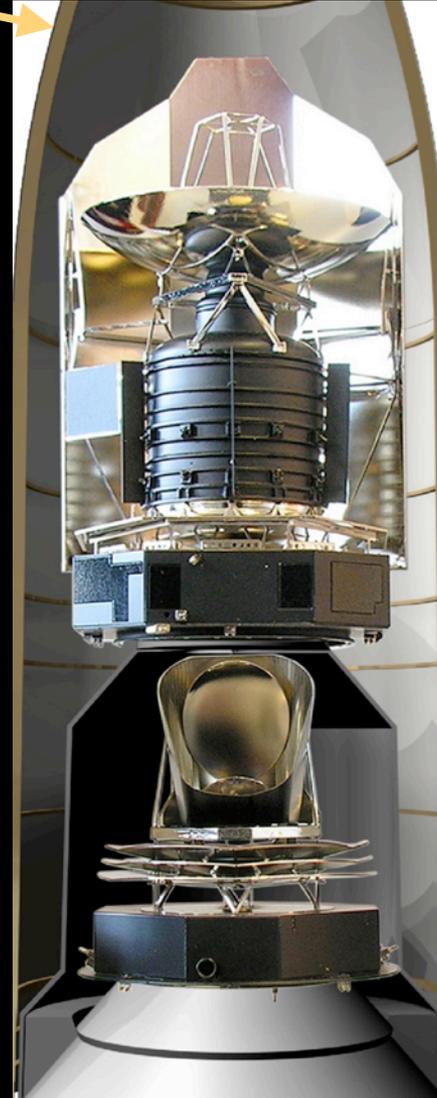
Low Frequency  
Instrument

30 to 70 GHz @ 20 K  
sous maîtrise d'oeuvre  
italienne

High Frequency  
Instrument

100 to 857 GHz @ 0.1 K  
sous maîtrise d'oeuvre  
française

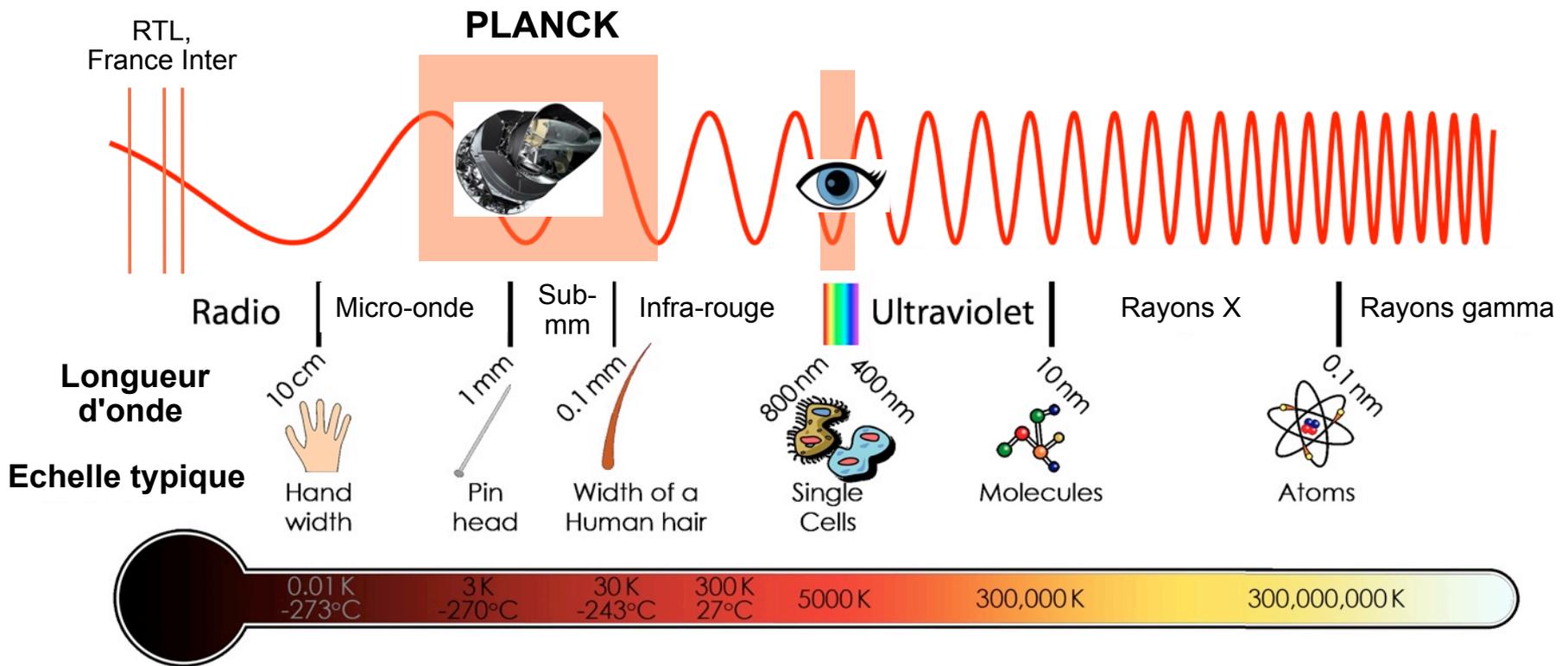
le 14 mai 2009,  
après 16 années de  
préparation



Herschel

Planck

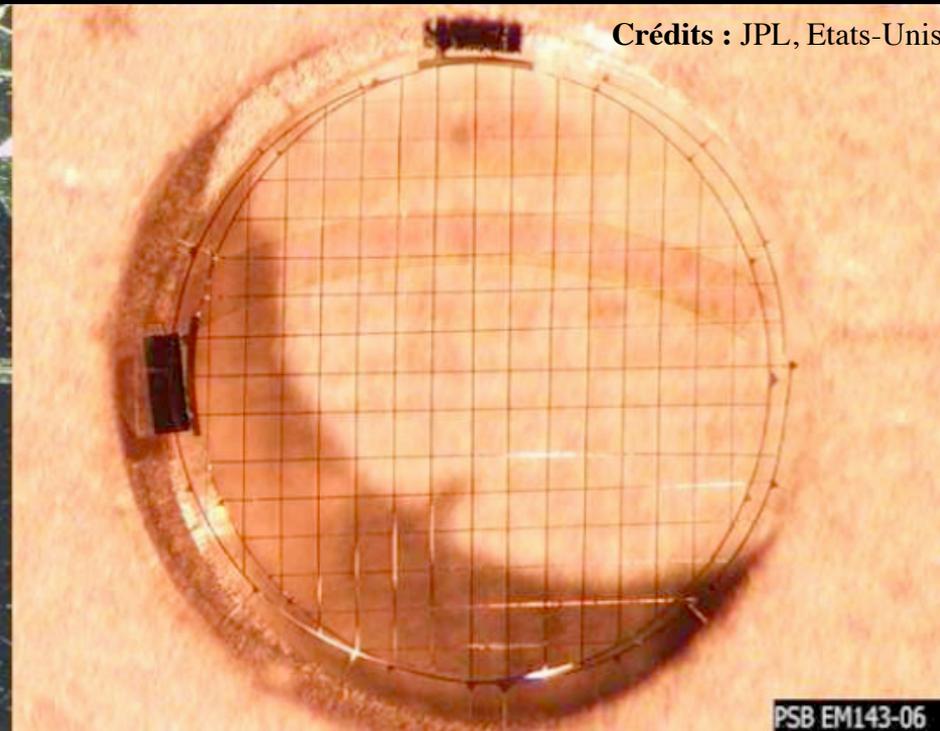
# Le domaine submillimétrique



# Détecteur = bolomètre

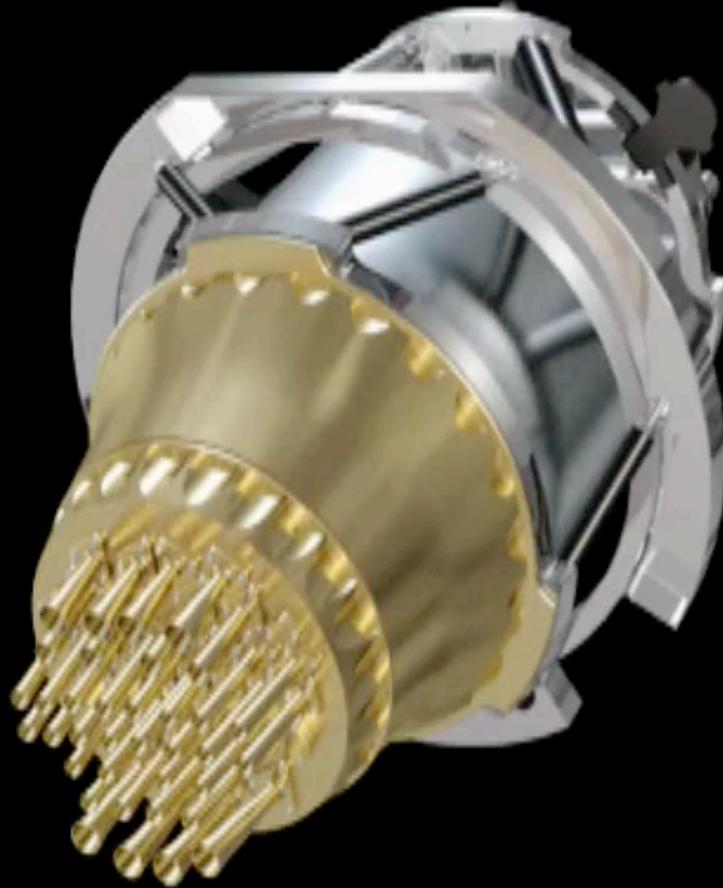


Bolomètre avec thermomètre au centre et grille en forme de toile d'araignée.  
Ce détecteur est uniquement sensible à l'intensité du signal.



2 bolomètres avec thermomètre au bord et grille en forme de quadrillage superposés orthogonalement.  
Ce détecteur est sensible à l'intensité et à la polarisation du signal : selon l'angle de polarisation du photon, il chauffera plutôt une grille ou l'autre.

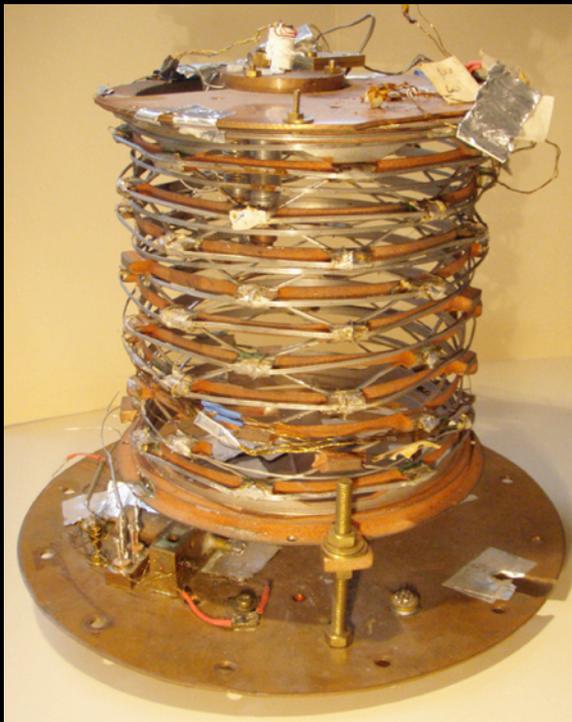
# Le satellite Planck



# Région grenobloise

- 3 laboratoires, 1 industriel
- 1995-2015 : instrumentation, analyse de données, astrophysique et cosmologie
- ~25 chercheurs, ingénieurs & techniciens

médaille de l'innovation du CNRS 2012



démonstrateur fait  
au labo



modèle de vol  
quelques années  
plus tard



# Un scientifique

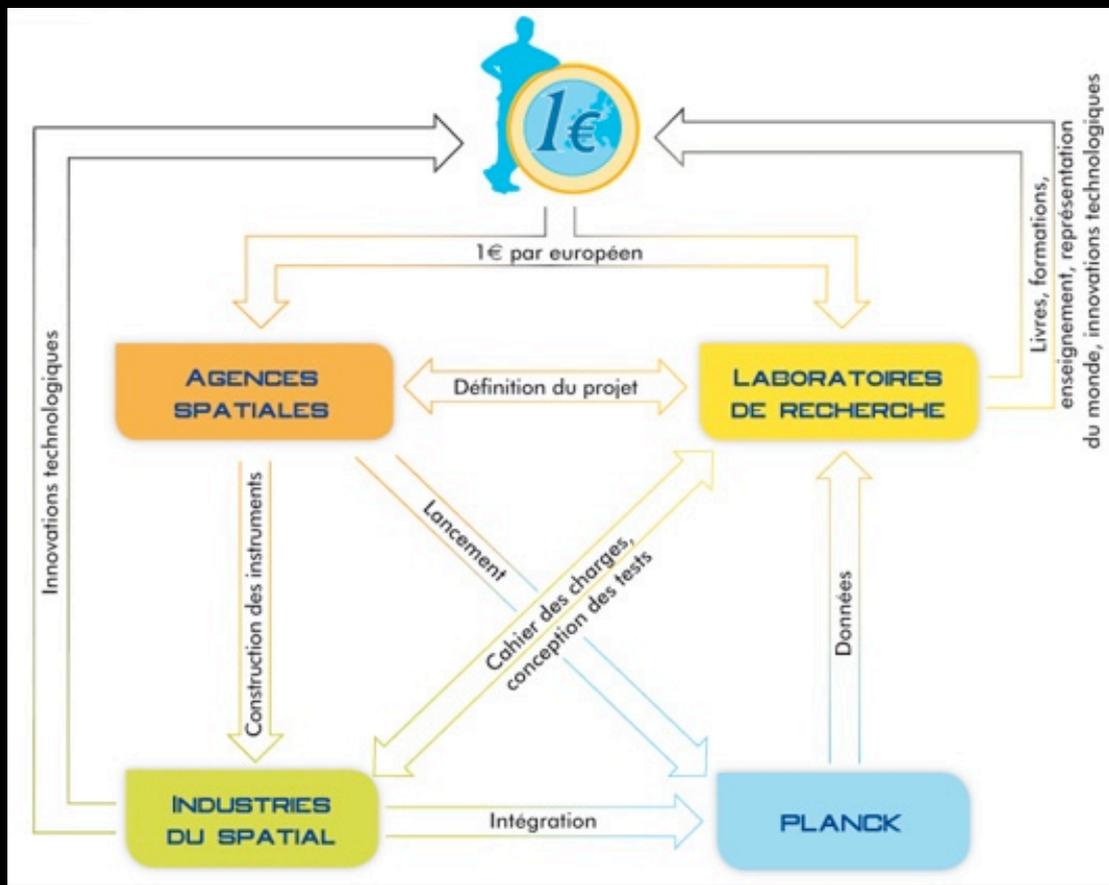


# Planck, c'est qui ?

Plus de 500 chercheurs

4 laboratoires aux États-Unis et 1 laboratoire au Canada participent également à HFI et LFI de façon majeure

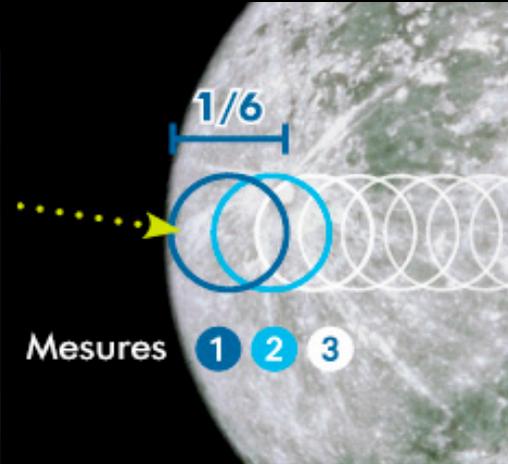
# Des milliers de partenaires



ont 9 français

Planck, à 1.5 millions de km de la Terre, cartographie tout le ciel

# Les différentes étapes de l'analyse des données



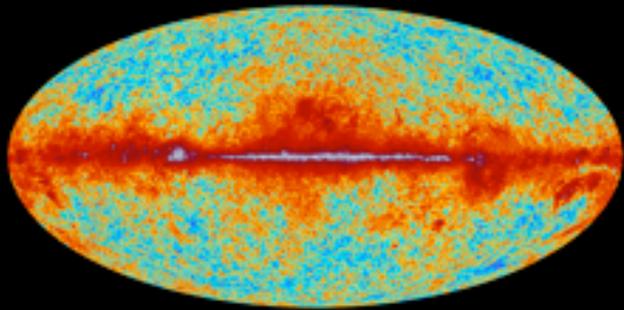
15 mois d'observation

2 ans d'analyse

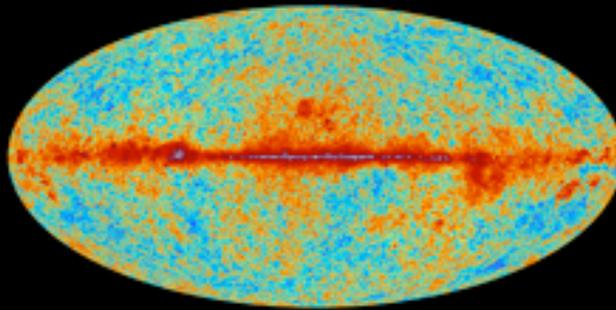
Résultats  
21 mars 2013



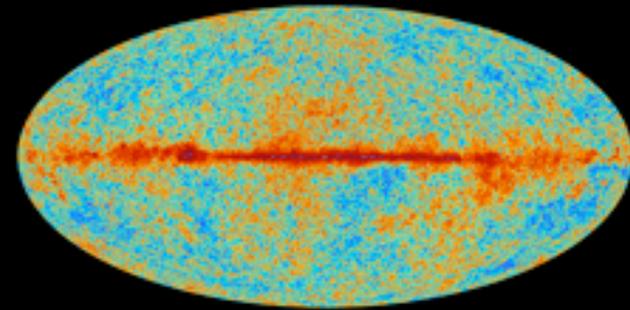
# Le ciel vu par Planck



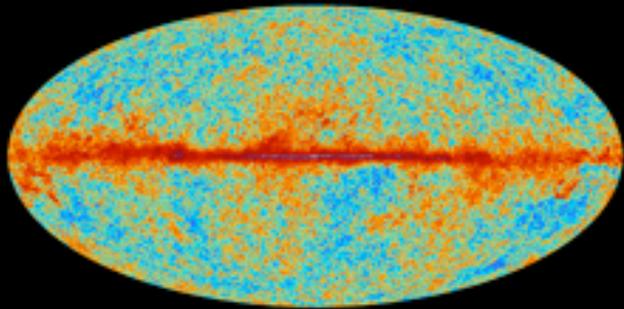
30 GHz



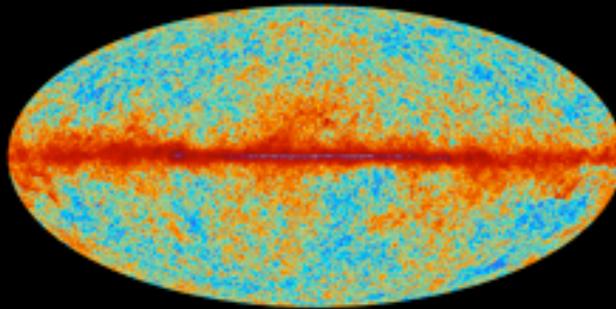
44 GHz



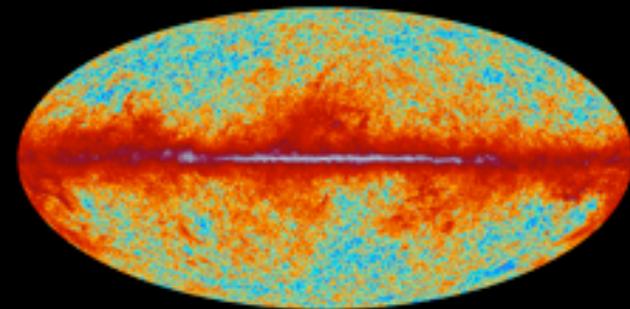
70 GHz



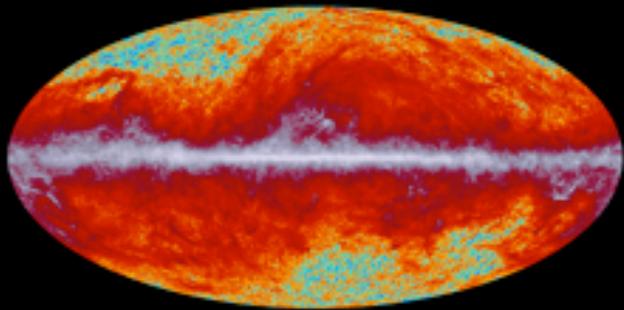
100 GHz



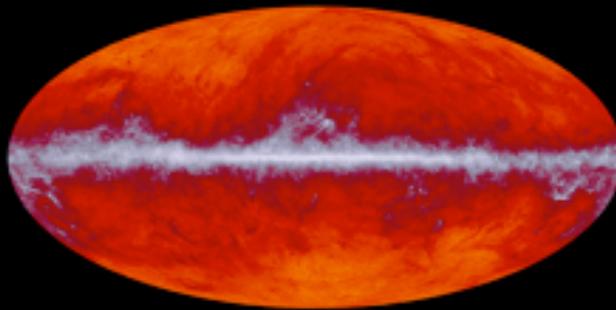
143 GHz



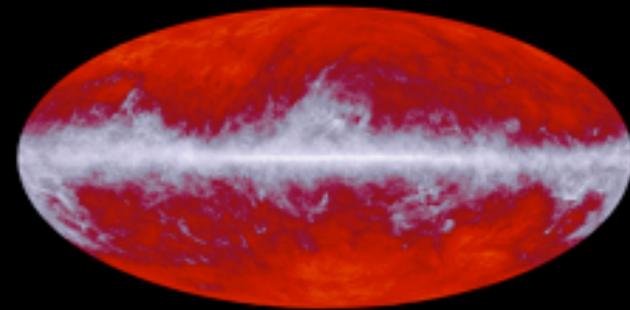
217 GHz



353 GHz



545 GHz



857 GHz

# Séparation des composantes

# Les anisotropies du rayonnement fossile

Ces cartes sont des mesures indépendantes de tout modèle cosmologique

−486  538  $\mu\text{K}_{\text{CMB}}$

Carte des écarts par rapport à la valeur moyenne de 2,7255 kelvin (COBE)

Un millième de degré du plus chaud au plus froid  
Sensibilité par pixel de quelques millièmes de degré

# Le rayonnement fossile

3 minutes

Électrons libres du plasma et photons  
en interaction permanente :  
Univers opaque et brûlant

Température > millions de degrés

*pas d'image*

Les électrons se lient aux protons  
pour former les premiers atomes  
d'hydrogène :

Univers transparent et chaud

Température de milliers de degrés

380 000 ans

*image dans le visible*

L'énergie des photons diminue dans  
l'univers en expansion :

Univers transparent et froid

Température de quelques  
degrés au-dessus du zéro  
absolu (2.725 K aujourd'hui)

*image dans le submillimétrique*

13,7 milliards d'années

# Température et époque de la recombinaison

Recombinaison : formation des atomes  $\rightarrow$  plus d'électrons libres  
Ne peut avoir lieu si  $T \gg 13.6 \text{ eV}$

équilibre chimique + hypothèse  $m_H = m_p \rightarrow$

$$\chi_e^2 / (1 - \chi_e) = 1 / (n_e + n_H) (m_e T / 2 \pi)^{3/2} e^{-\epsilon_0/T} \quad \text{éq. de Saha}$$

$$n_e = n_p = n_{\text{baryons}} = 10^{-10} n_\gamma = 10^{-10} T^3 \rightarrow$$

$$\chi_e^2 / (1 - \chi_e) \approx 10^{10} (m_e / T)^{3/2} e^{-\epsilon_0/T} \approx 10^{10} (0.5 \text{ MeV} / T)^{3/2} e^{-13.6 \text{ eV}/T}$$

$\rightarrow$  Quand  $T = 13.6 \text{ eV}$ ,  $\chi_e^2 / (1 - \chi_e) \approx 10^{17}$ , soit  $\chi_e \approx 1$  : la recombinaison n'a même pas commencé !

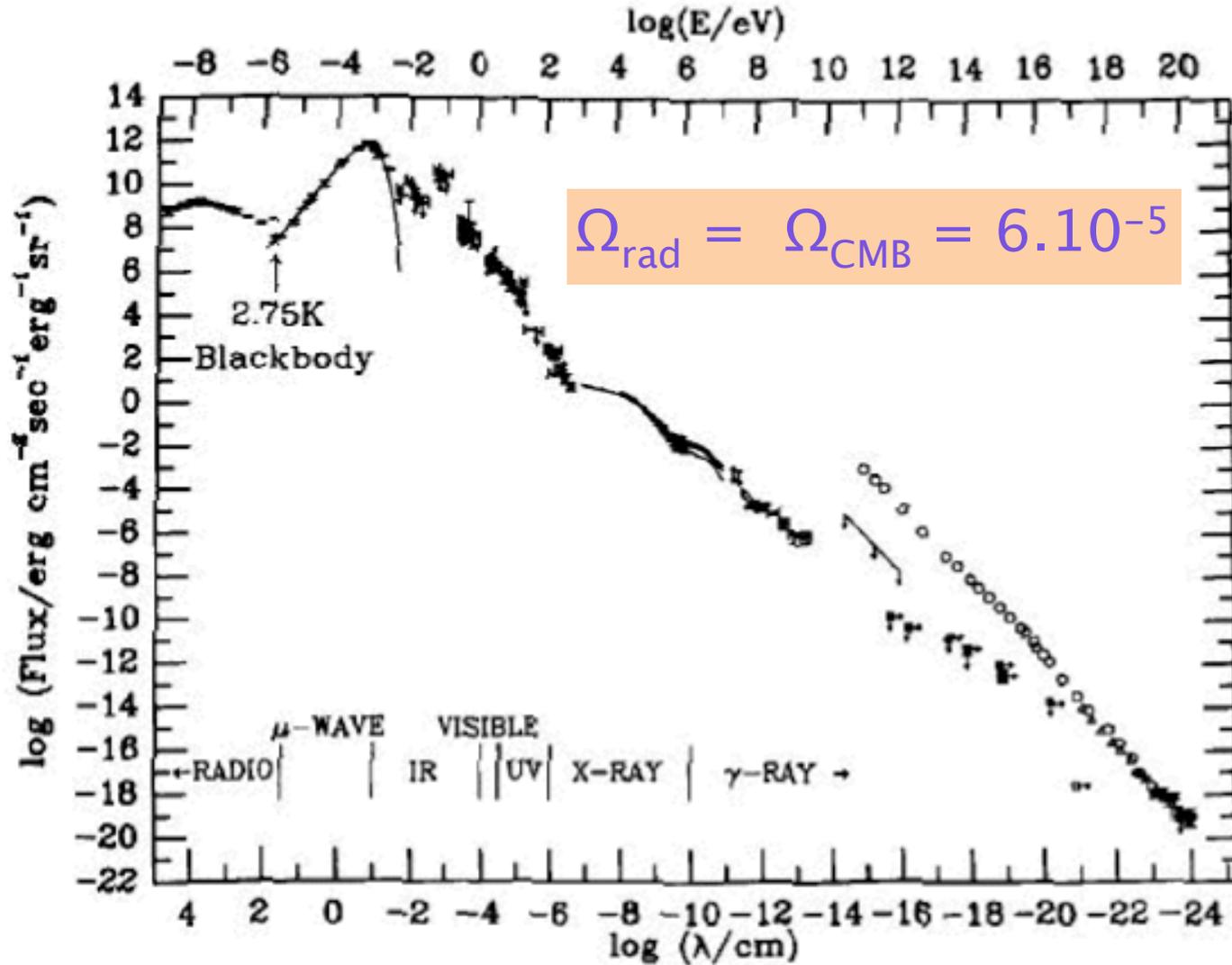
$\rightarrow$  il faut  $T \approx \mathbf{0.25 \text{ eV}}$  pour obtenir  $\chi_e \ll 1$

Aujourd'hui  $T = 2.725 \text{ K} = 2.725 \times 8.617 \cdot 10^{-5} \text{ eV}$  ( $k_B = h/2\pi = c = 1$ )

La température évolue en  $a^{-1} = (1+z)$

Donc  $\mathbf{z_{rec} \approx 1100} = 0.25 / (2.725 \times 8.617 \cdot 10^{-5}) - 1$

# Le rayonnement dominant



# La découverte

milieu 20<sup>e</sup> : modèles théoriques qui prédisent un rayonnement homogène, domaine microonde, très froid (G. Gamow, R. Alpher, ...)

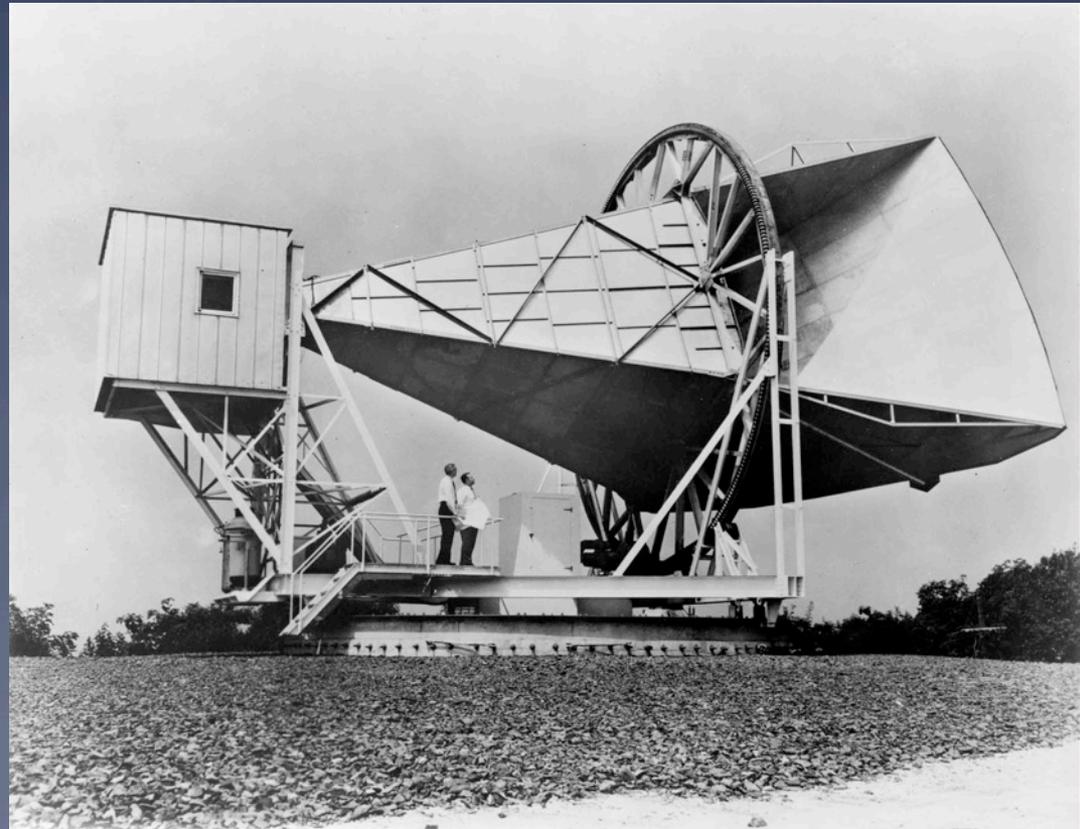
1964 : ce rayonnement pourrait être mesurable (A. G. Dorochkevitch, I. Novikov)

1960's : A. Penzias et A. W. Wilson, radio-astronomes des lab. Bell, mesurent un «bruit parasite»

1964 : R. Dicke, P.J.E. Peebles, P.G. Roll, D.T. Wilkinson, MIT : interprétation

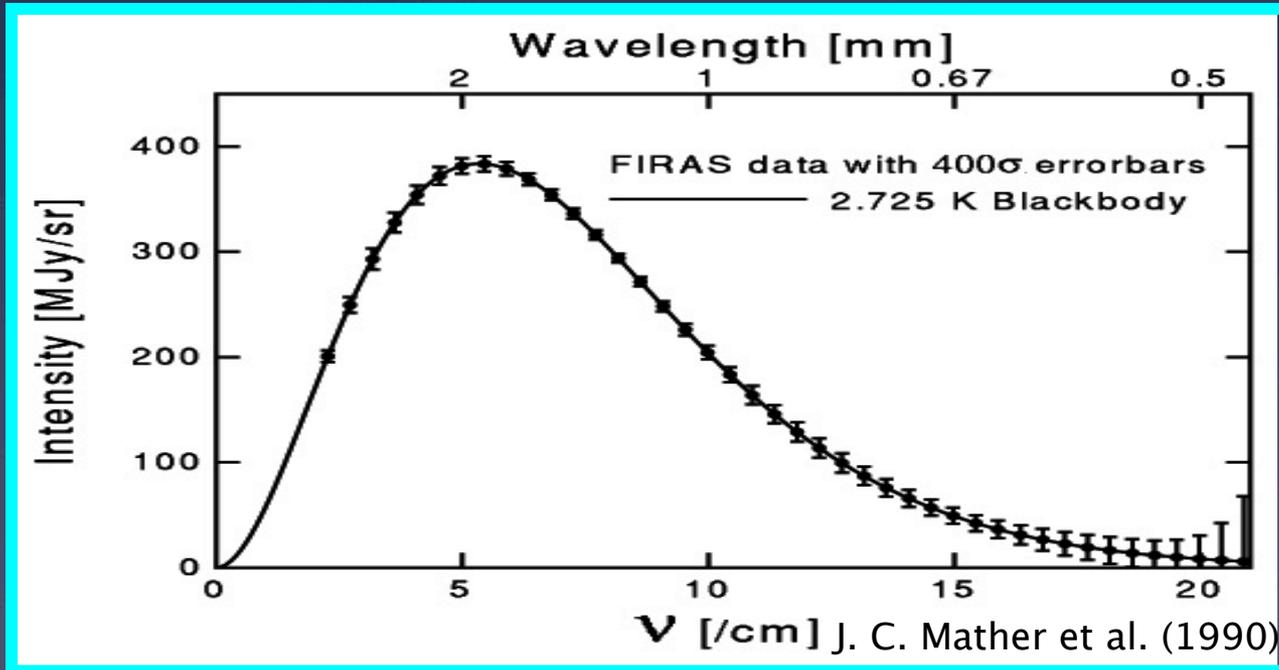
1970's : consensus sur sa nature

1978 : prix Nobel



# Un corps noir parfait

1992 : Satellite Cosmic Background Explorer : COBE



La fréquence des photons change en raison de l'expansion de l'Univers :

$$f = f_{\text{dec}} (1+z) / (1 + z_{\text{dec}})$$

Cela revient à modifier la température :  $T = T_{\text{dec}} (1+z) / (1 + z_{\text{dec}})$

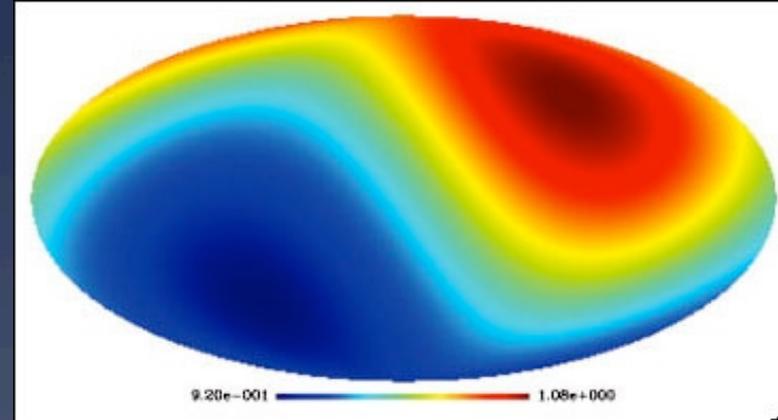
→ La forme de corps noir est conservée même s'il n'y a plus équilibre thermique

- COBE a mis des limites très strictes sur des phénomènes violents qui auraient pu perturber l'équilibre thermodynamique avant la recombinaison
- Besoin du modèle de Big-Bang chaud pour expliquer cette émission

# Anisotropies

- \* Dipôle : amplitude  $\Delta T / T = 10^{-3}$

Produit par le mouvement du Soleil dans la Galaxie (dipôle cosmologique, « constant » à l'échelle humaine) + mouvement de la Terre autour du Soleil (dipôle orbital = 1/10 dipôle cosmologique en amplitude)



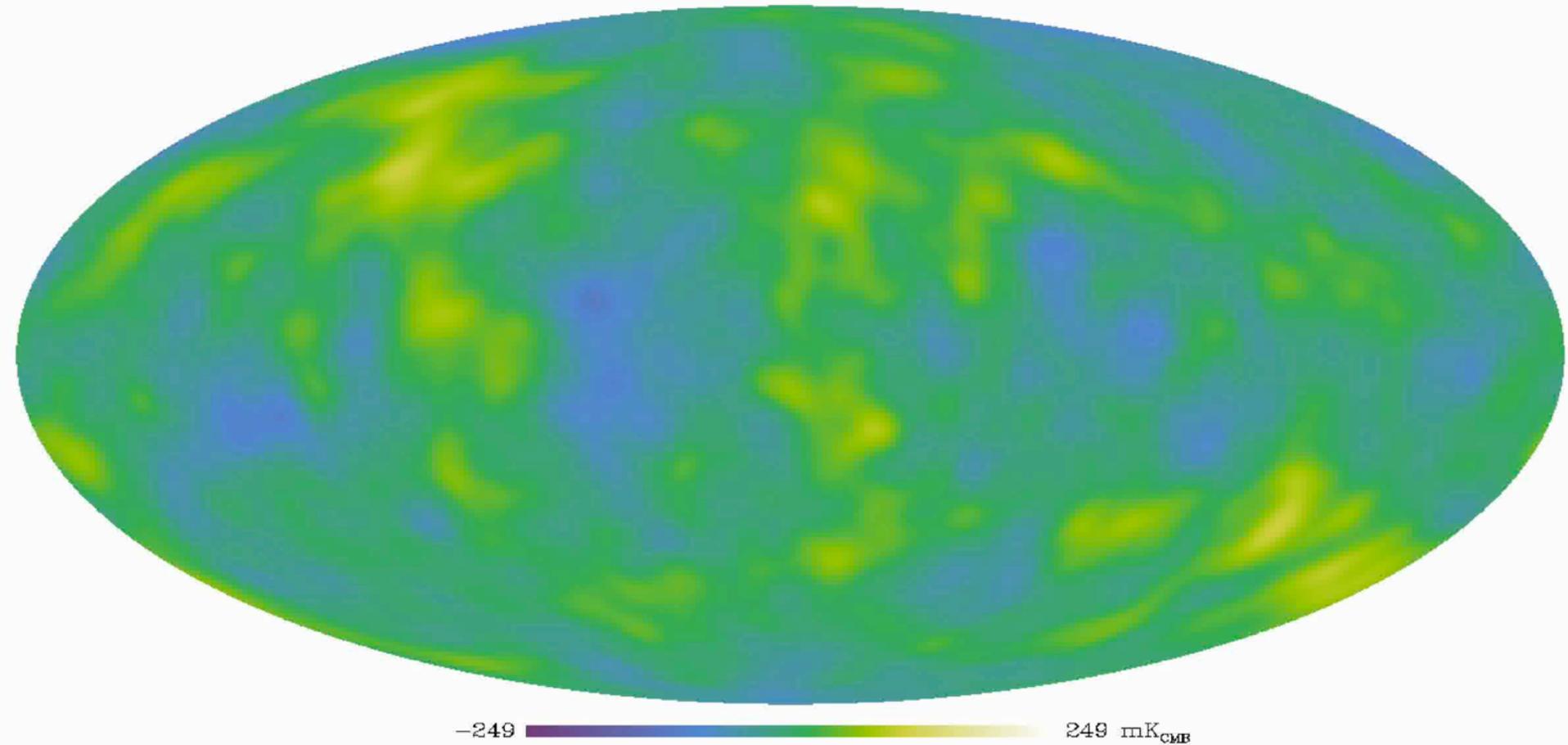
- \* Anisotropies primaires ou primordiales : amplitude typique  $\Delta T / T = 10^{-5}$

Conditions initiales possibles pour que ces fluctuations suivent exactement la loi de corps noir :

- perturbations isocourbures
  - matière et rayonnement se compensent
- perturbations adiabatiques
  - matière et rayonnement se comportent de la même façon

# Surface de dernière diffusion

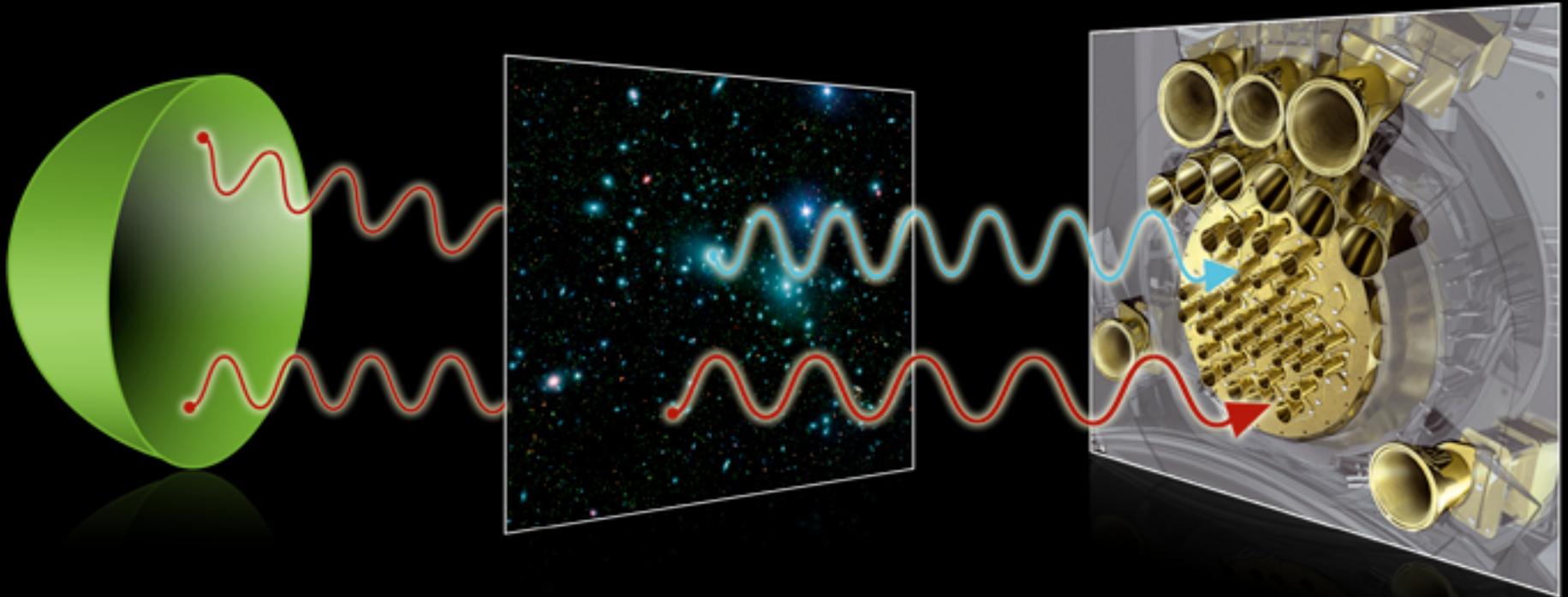
CMB 0.00100 Gyr after the Big Bang



La répartition des points froids et chauds est figée à la recombinaison, les photons se déplacent ensuite librement. Mais la distance de l'observateur à cette surface augmente au cours du temps : le « paysage » évolue !

→ surface de dernière diffusion = sphère centrée sur l'obs. située à  $z = 1100$

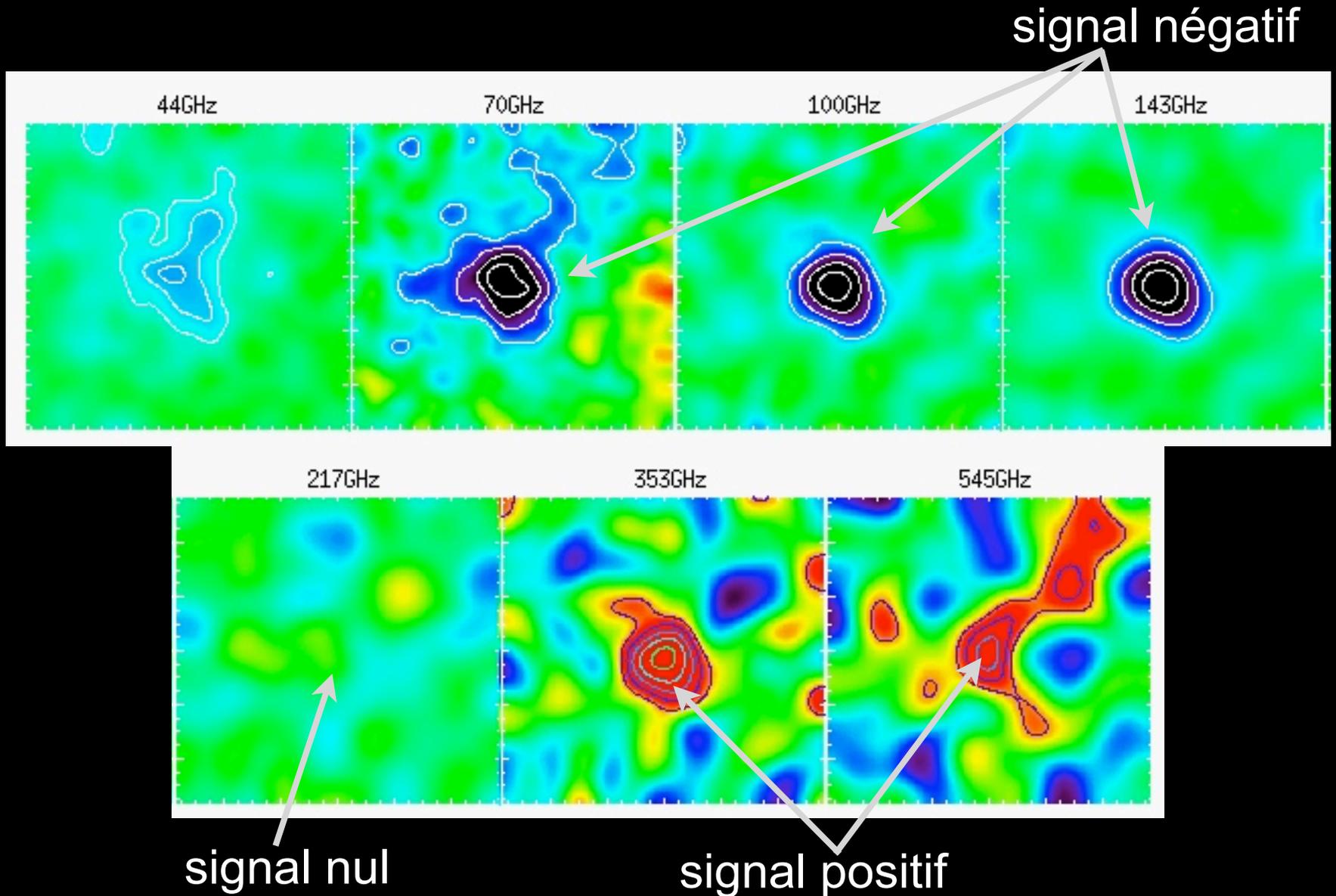
# L'effet Sunyaev-Zeldovich



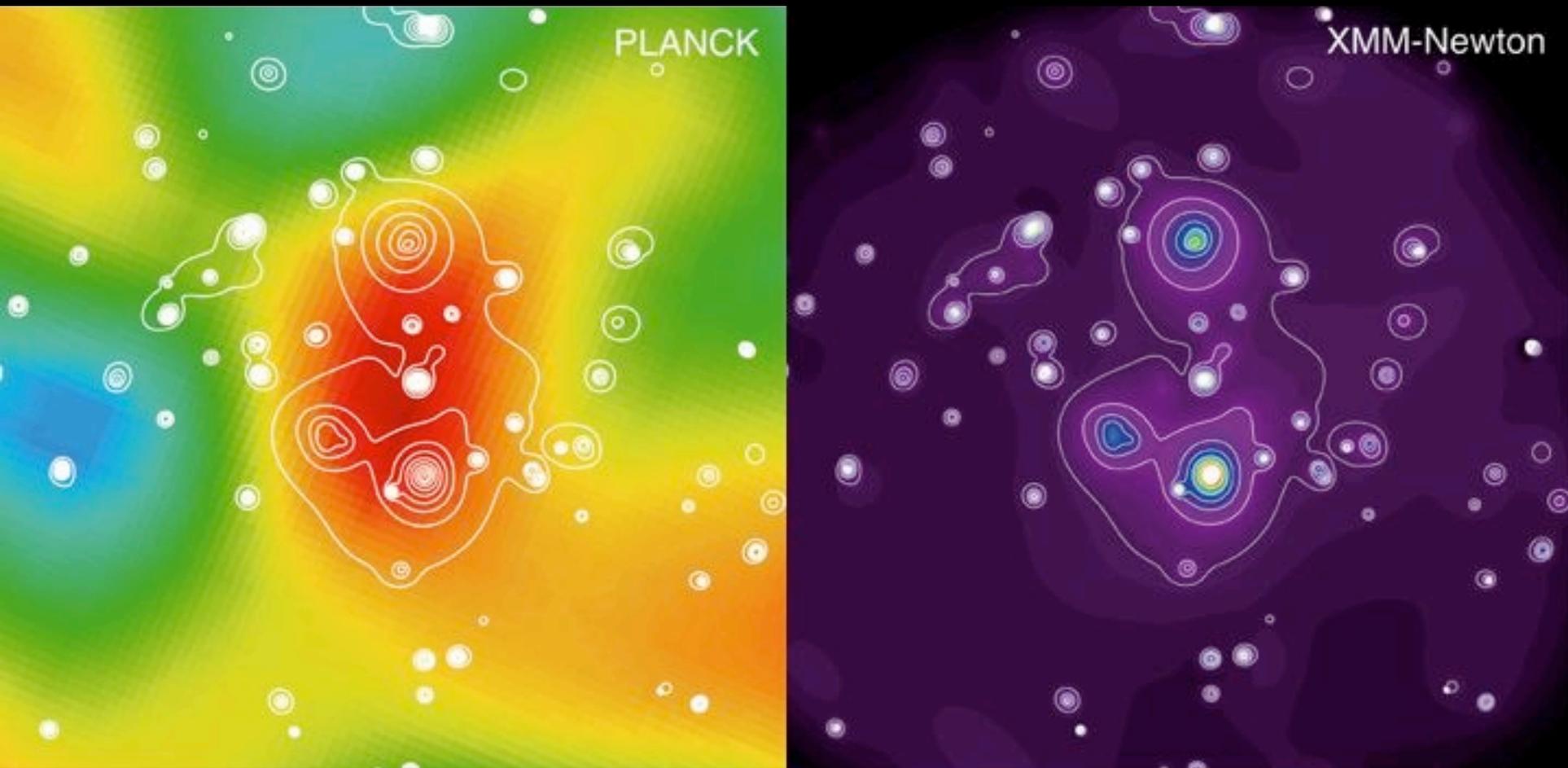
Les photons du rayonnement fossile diffusent sur le gaz chaud inter-amas et leur distribution en énergie est légèrement modifiée

- effet lié à la température et à la quantité d'électrons chauds
- indépendant de la distance des amas

# Planck conçu pour voir l'effet SZ

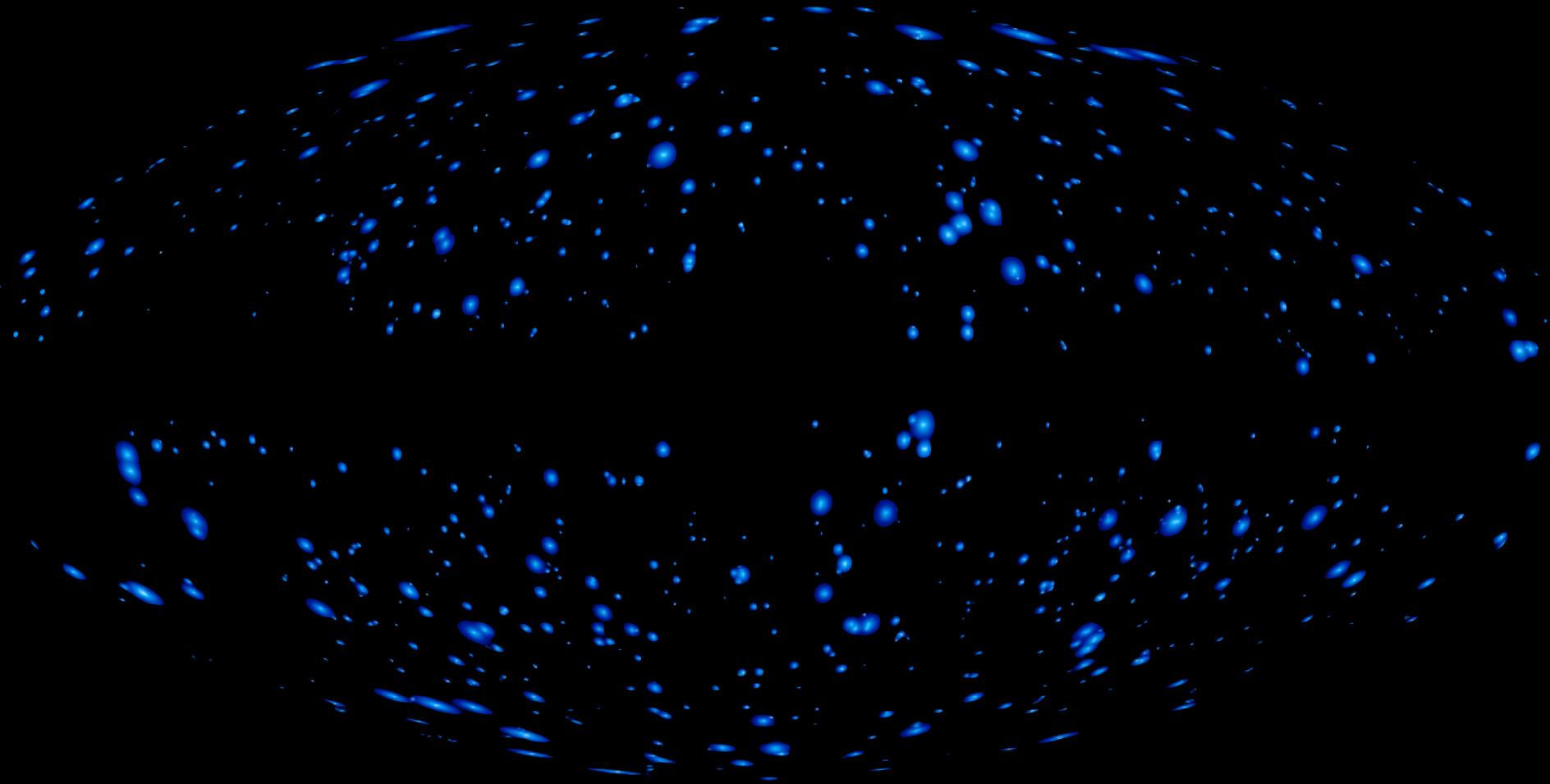


# Complémentarité avec l'observatoire XMM-Newton



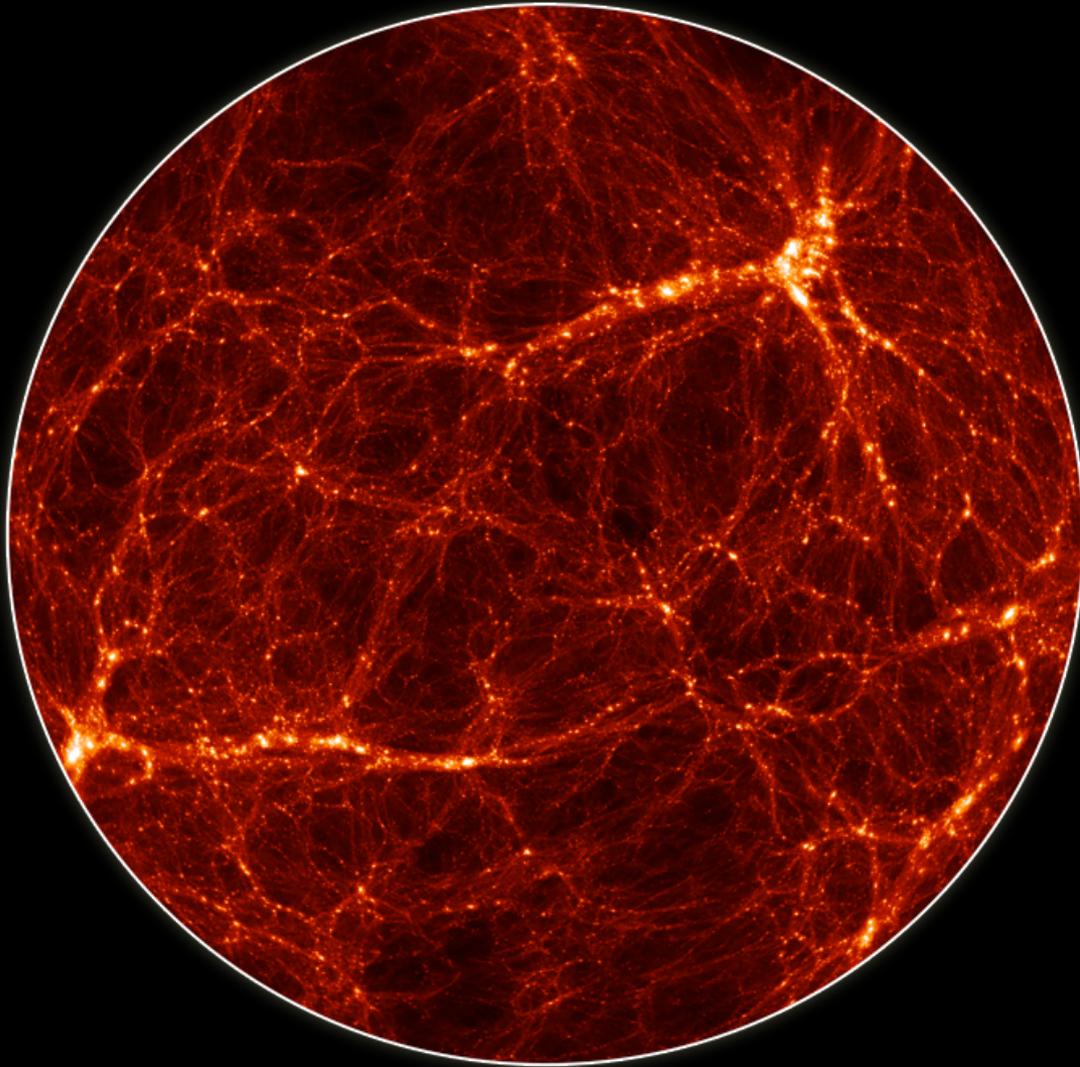
Observations complémentaires pour avoir la distance de l'objet

# 1227 amas et superamas (mars 2013)



- recherche sur 83.7% du ciel
- 683 amas connus + 178 amas découverts confirmés en X + 366 amas

# Une trace du milieu inter-amas ?



Environ la moitié de la matière ordinaire n'est directement observée.

Elle est probablement, au moins en grande partie, dans le milieu chaud entre les galaxies.

Ce gaz chaud de la "toile cosmique" pourrait laisser une empreinte sur le rayonnement fossile par effet SZ.

# Une paire d'amas de galaxies

Abell 399

Abell 401

## **Première détection du milieu inter-amas par effet SZ**

Paire d'amas située environ à un milliard d'années-lumières de nous.

Le “pont” de gaz reliant les deux amas s'étend sur une dizaine de millions d'années-lumière. Sa température est de l'ordre de 80 millions de degrés.

# Le modèle de concordance des années 2000

## Modèle du Big-Bang

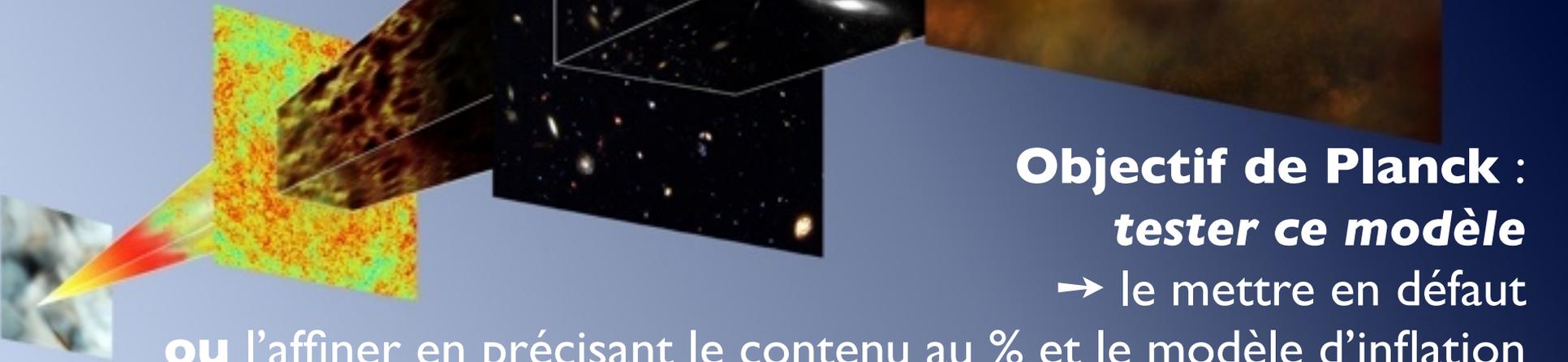
Univers en expansion régi par les lois de la Relativité Générale

## Composition de l'Univers

matière ordinaire+ matière noire froide  
+ constante cosmologique

## Épisode d'inflation

Dilatation exponentielle de l'Univers  
« juste après » le Big-Bang



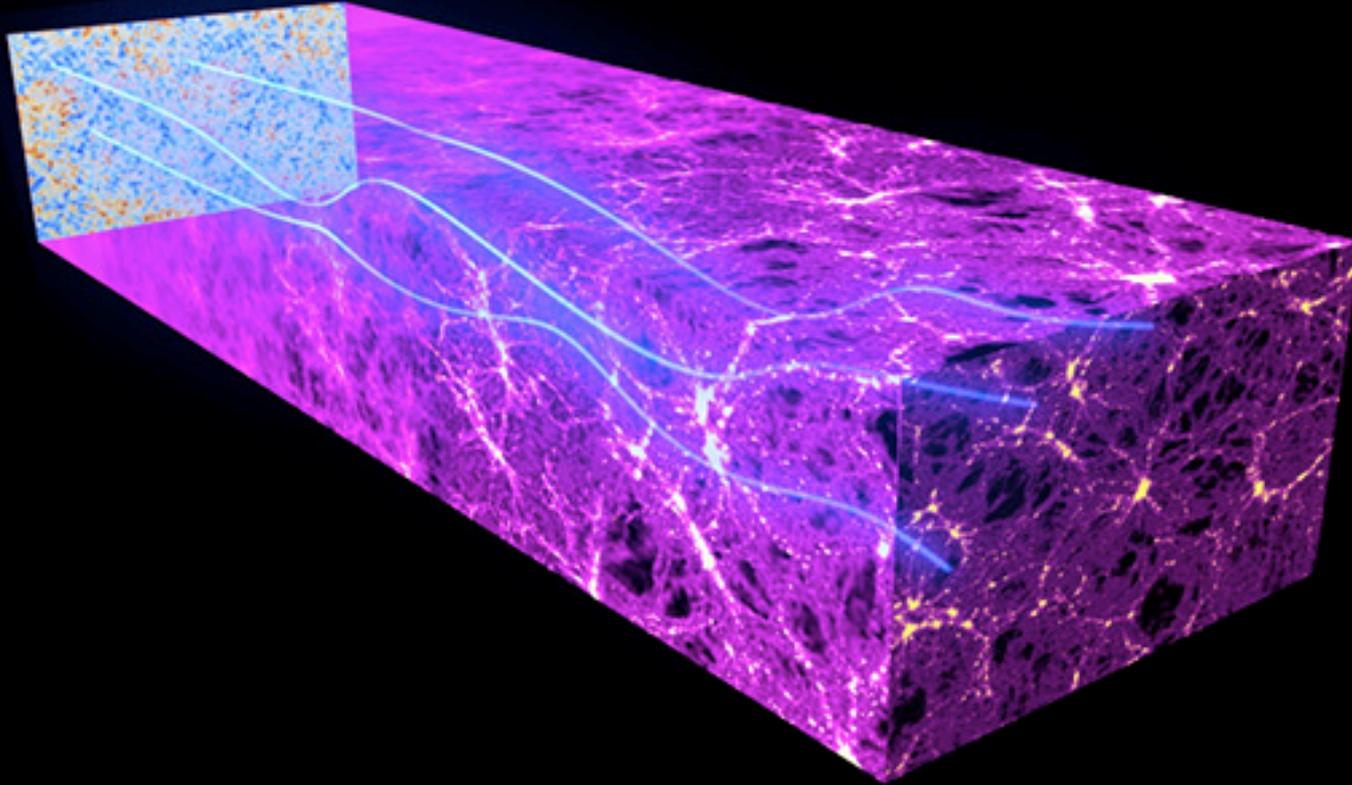
**Objectif de Planck :**

***tester ce modèle***

→ le mettre en défaut

**ou** l'affiner en précisant le contenu au % et le modèle d'inflation

# Ce qui s'est passé après 380 000 ans

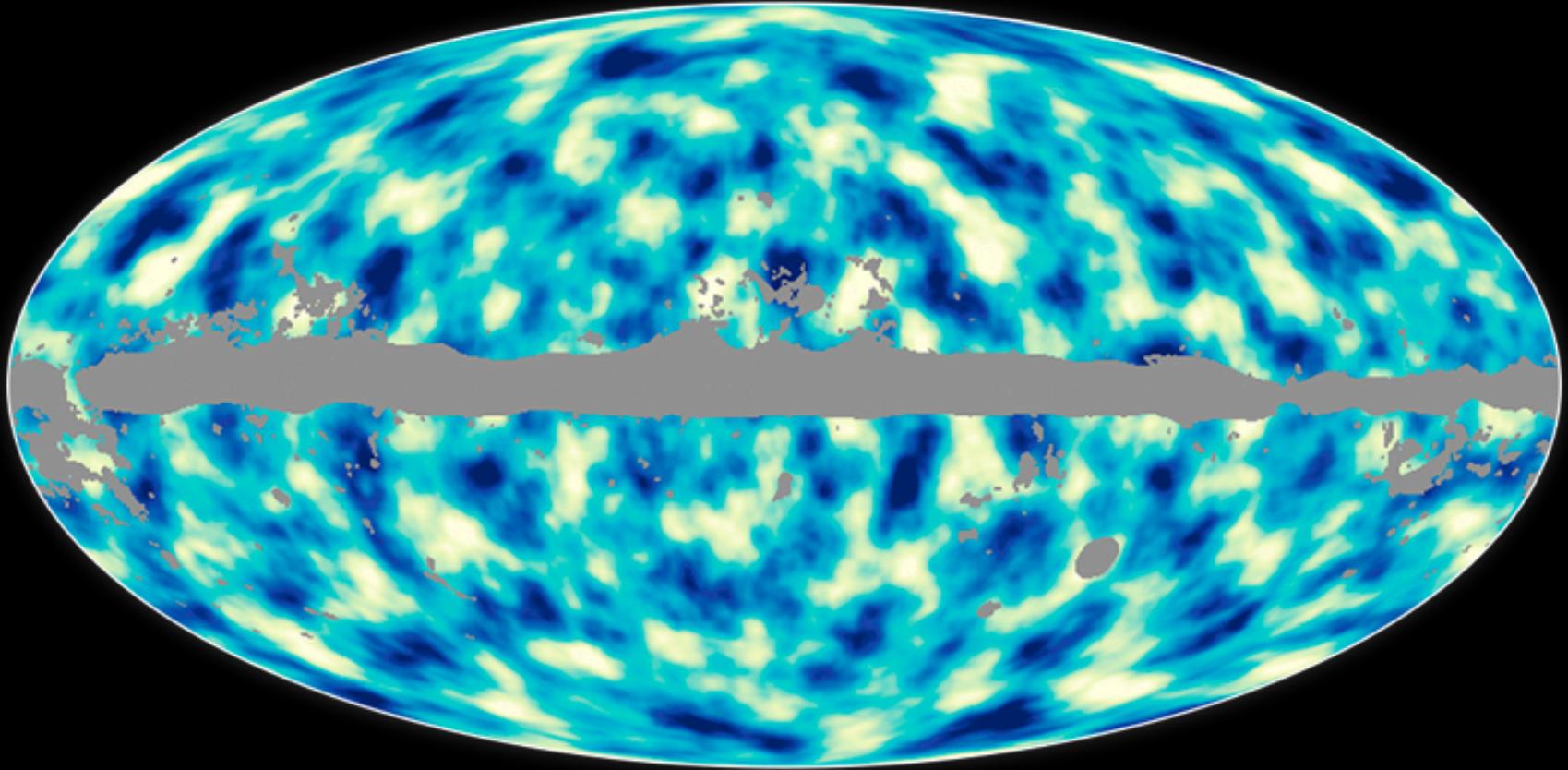


La masse présente entre le rayonnement fossile et nous va brouiller l'image.

→ il faut prendre en compte cet effet

→ il donne une **information sur la distribution de la masse 2-3 milliards d'années après** l'émission du rayonnement fossile

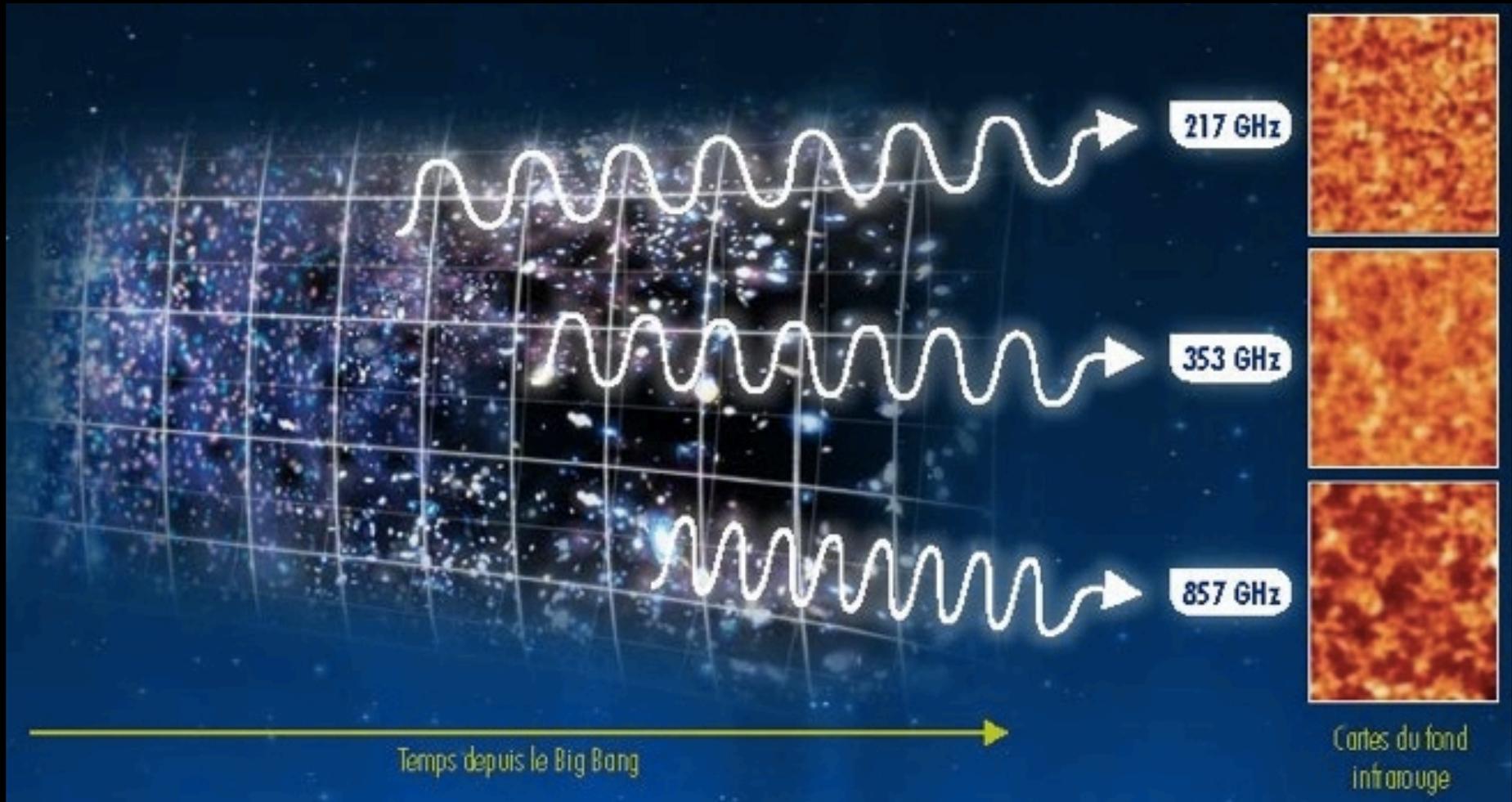
# Carte de la distribution de masse intégrée sur la ligne de visée



Carte du potentiel gravitationnel issue de la déflexion moyenne subie par le rayonnement fossile

Rayonnement fossile par Planck =  
image TRES PRECISE des structures 380 000 ans après le Big-Bang  
+ image des structures quelques milliards d'années d'expansion et d'évolution plus tard

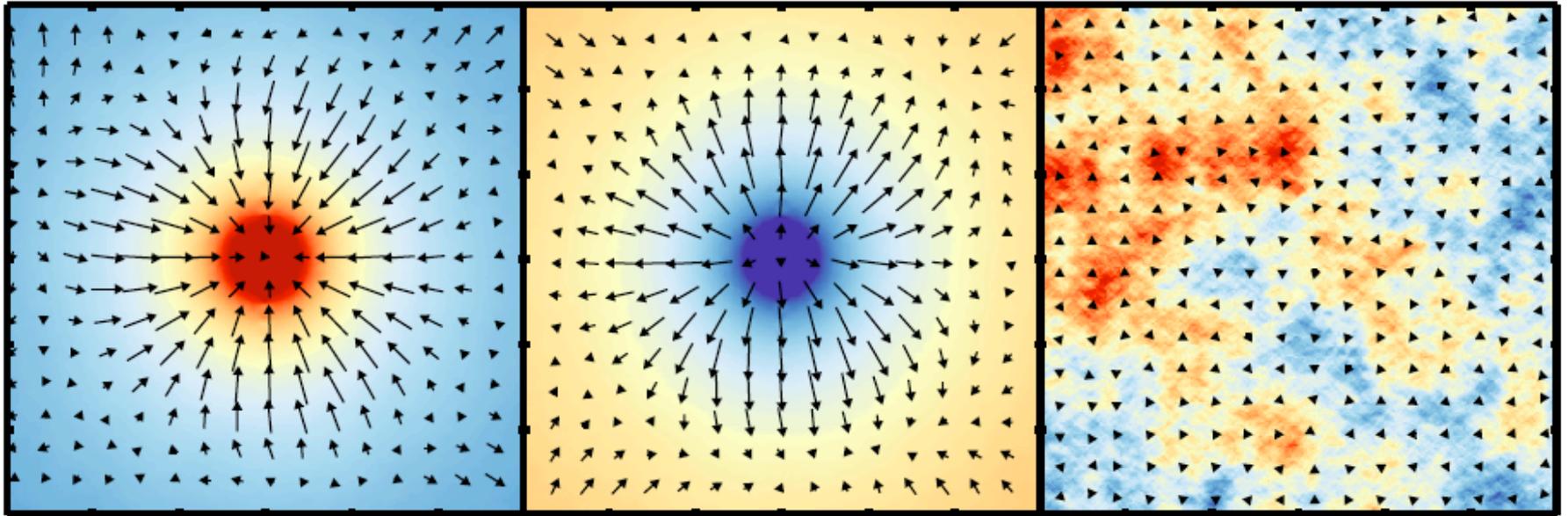
# Structures du fond infrarouge



Projection de l'histoire de la formation des étoiles pendant 10 milliards d'années

# Identification des sources

On compare la distribution de masse par effet de lentille gravitationnelle à la distribution de matière du fond diffus infrarouge.



Les concentrations de galaxies focalisent la lumière du rayonnement fossile

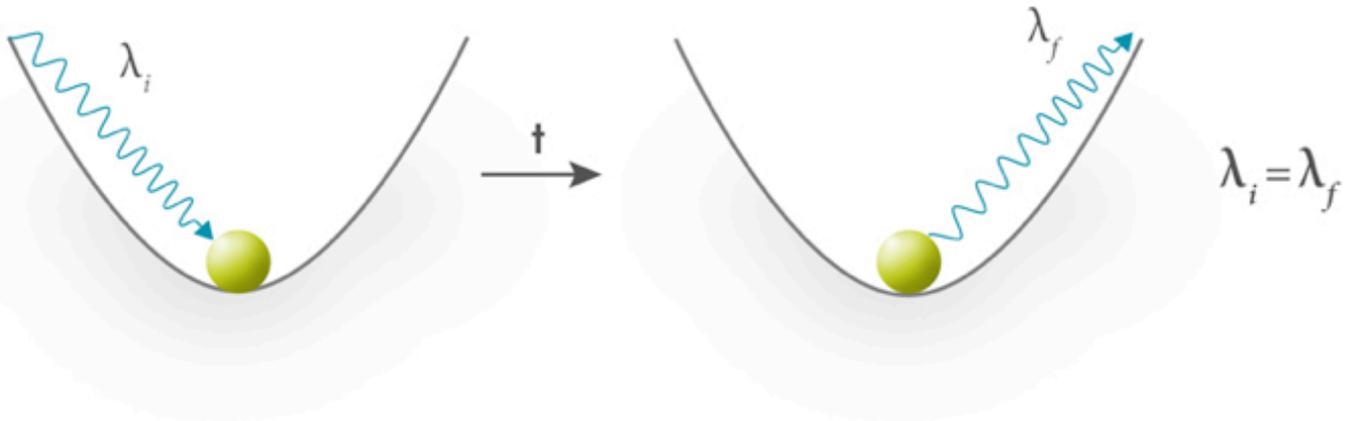
Les “vides” dispersent la lumière du rayonnement fossile

Pas de mouvement global là où il y a un niveau moyen de nombre de galaxies

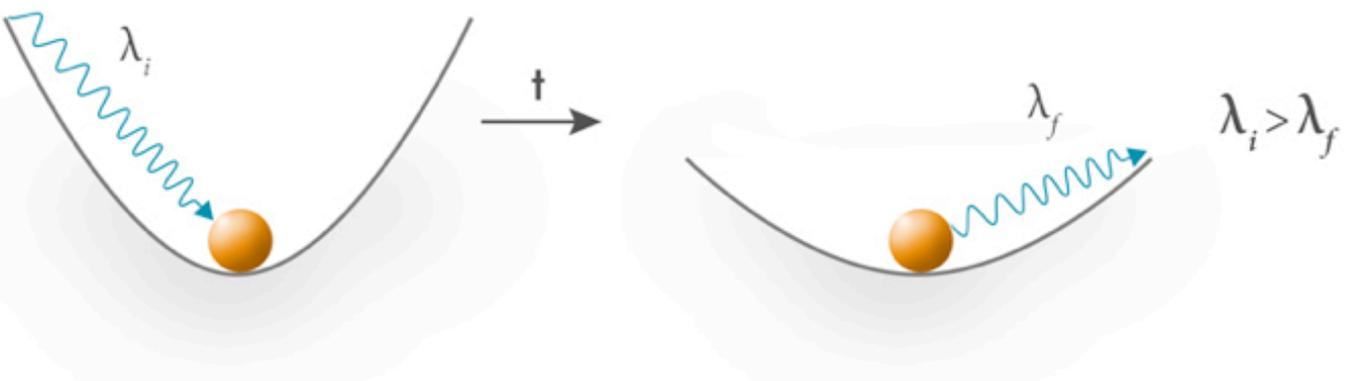
*distribution de masse représentative de la distribution des galaxies*

# Effet Sachs-Wolf intégré

Potentiel stable

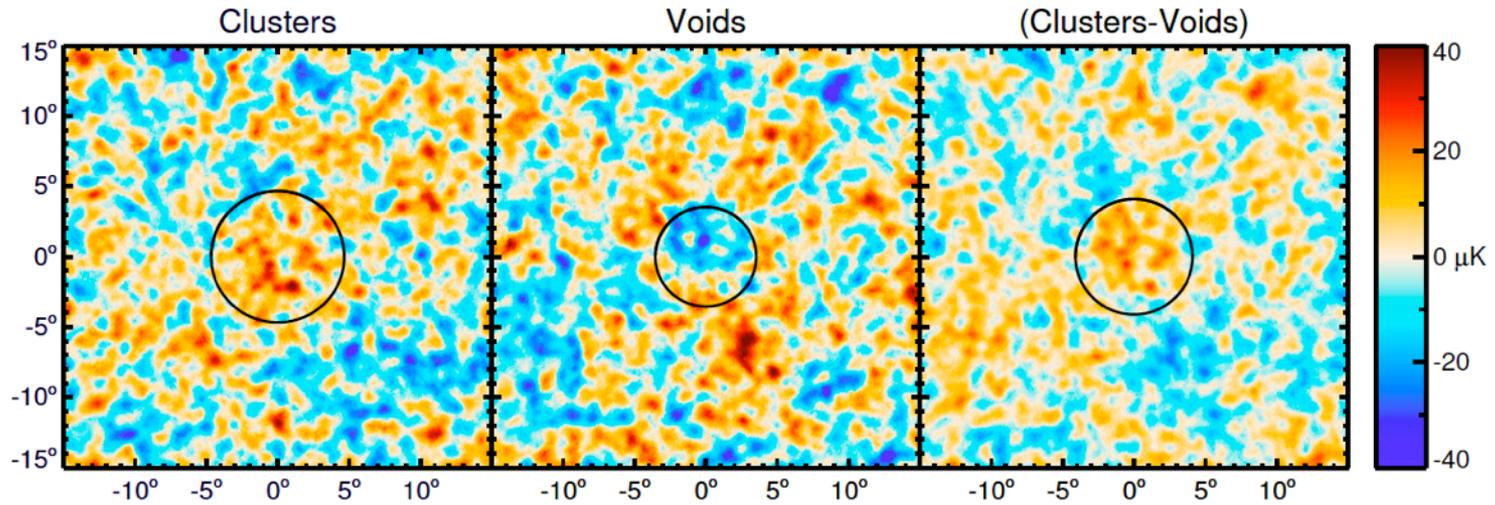


Potentiel de moins en moins profond

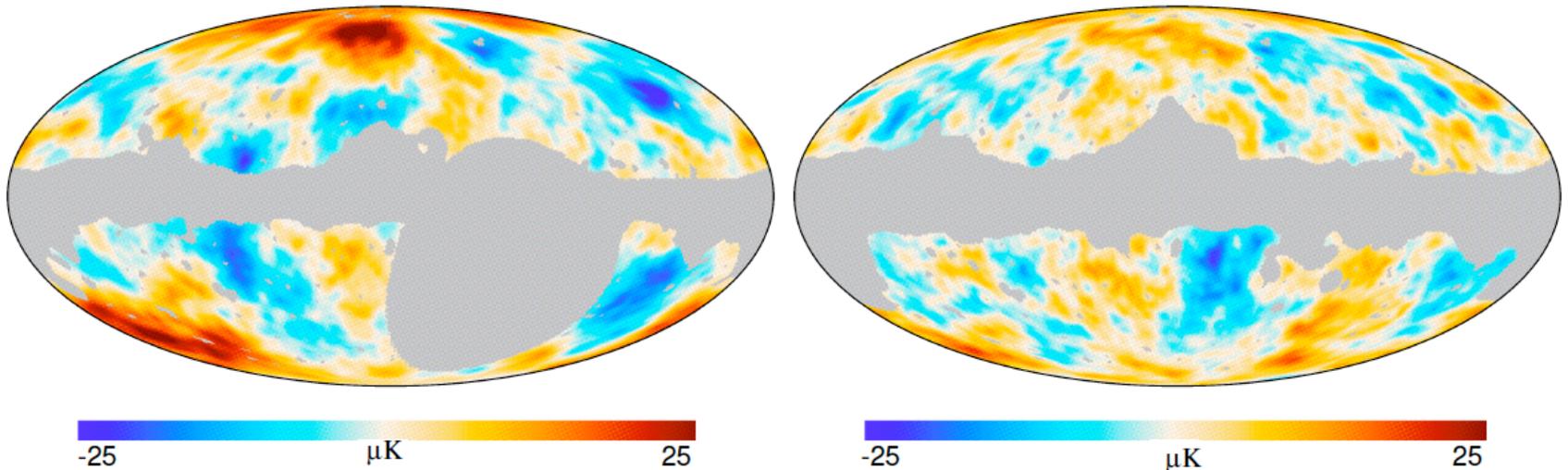


L'énergie du rayonnement fossile est affectée si les structures évoluent le temps de la traversée. Effet très faible ...

# Effet Sachs-Wolf intégré : détection

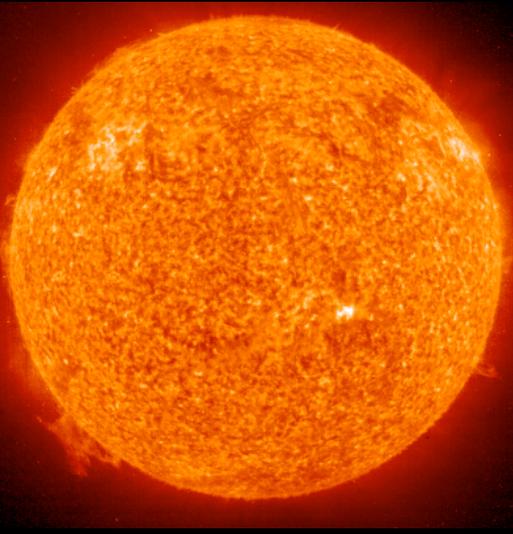


→ statistiquement plus d'énergie dans la direction des 50 plus grandes structures.

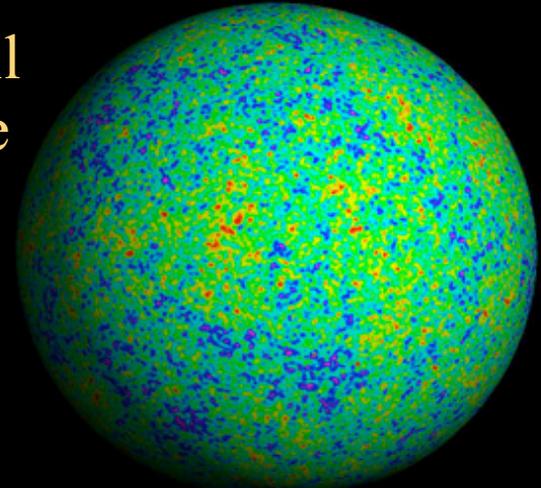


→ cartes de l'effet ISW d'après Planck CMB/catalogues ou CMB/lentille

# Ce qui s'est passé avant 380 000 ans



De même que la surface du Soleil révèle ce qui se passe au cœur de l'étoile, le rayonnement fossile garde l'empreinte du contenu et de l'évolution de l'Univers depuis le Big-Bang



Tegmark

→ en étudiant *très précisément* les détails de ces inhomogénéités, on accède à une description précise des « **paramètres cosmologiques** » (géométrie de l'espace, vitesse d'expansion, quantité de matière ordinaire et de matière noire etc.)

... d'où découlent toutes les informations (âge de l'Univers, contenu en énergie noire mais aussi masse totale de neutrinos par exemple)

# Sources primaires de perturbation

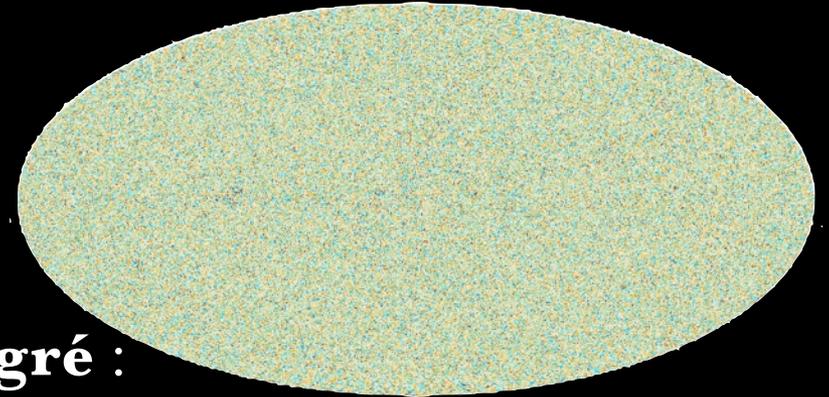
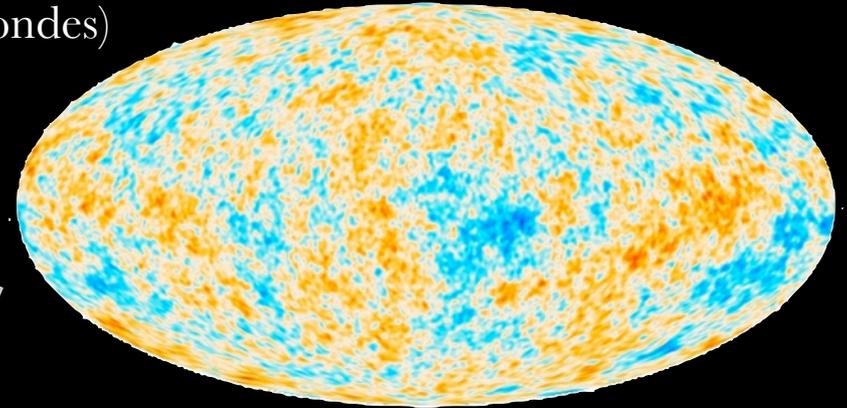
- \* Changement intrinsèque de température (compression → échauffement). Cause = fluctuations de densité, défauts topologiques ...
- \* Décalage Doppler quand la source se déplace par rapport à l'observateur. Cause : perturbation de densité → perturbation de vitesse
- \* Décalage gravitationnel quand la source et l'observateur ne sont pas au même potentiel gravitationnel.

Tous conservent les propriétés spectrales.

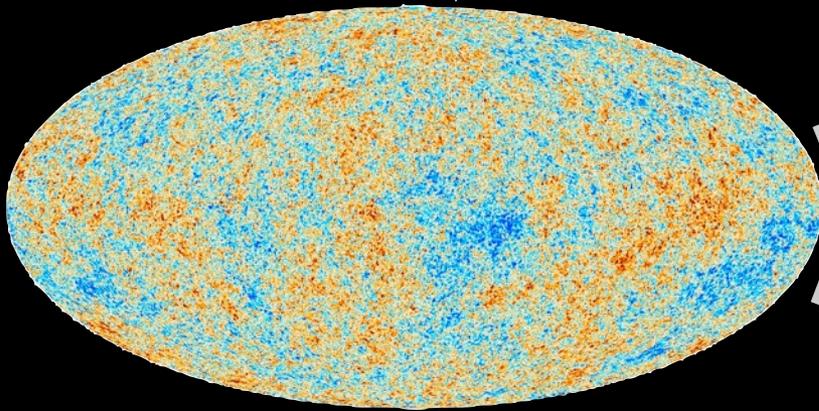
Dépendent des paramètres cosmologiques

# Informations aux différentes échelles

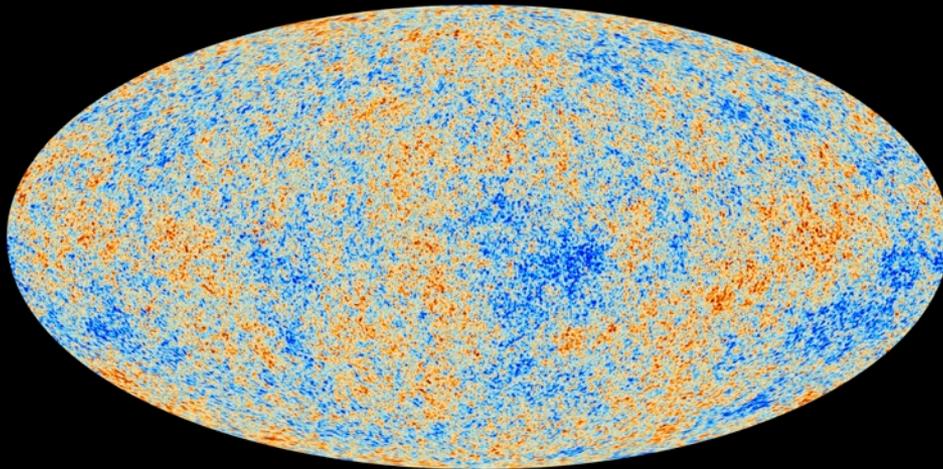
**Echelles > 1 degré :**  
**empreinte “originelle” des fluctuations quantiques**  
(Univers entre  $10^{-30}$  et  $10^{-12}$  secondes)



**Echelles < 1 degré :**  
**contenu de l'univers**  
(oscillations acoustiques dans un rayon  $< ct$  à  $t=380\,000$  ans soit  $\sim 150$  Mpc aujourd'hui) + lentille gravitationnelle

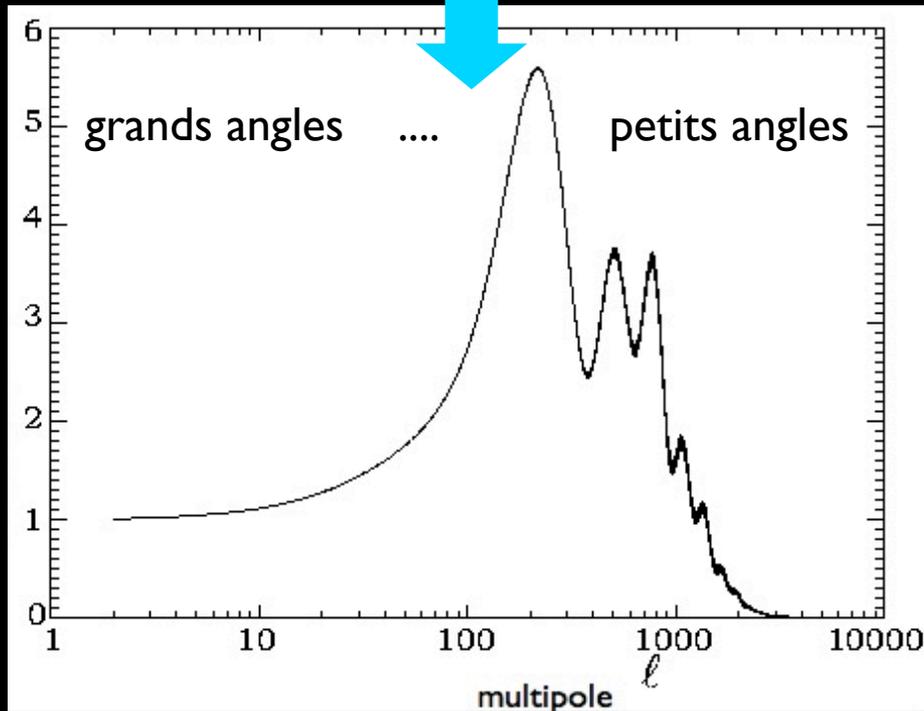


# De la carte au spectre de puissance



hypothèse de “**gaussianité**” :  
lien particulier entre taille et  
amplitude des grumeaux

**Statistique de l'amplitude  
des anisotropies en fonction  
de leur taille**

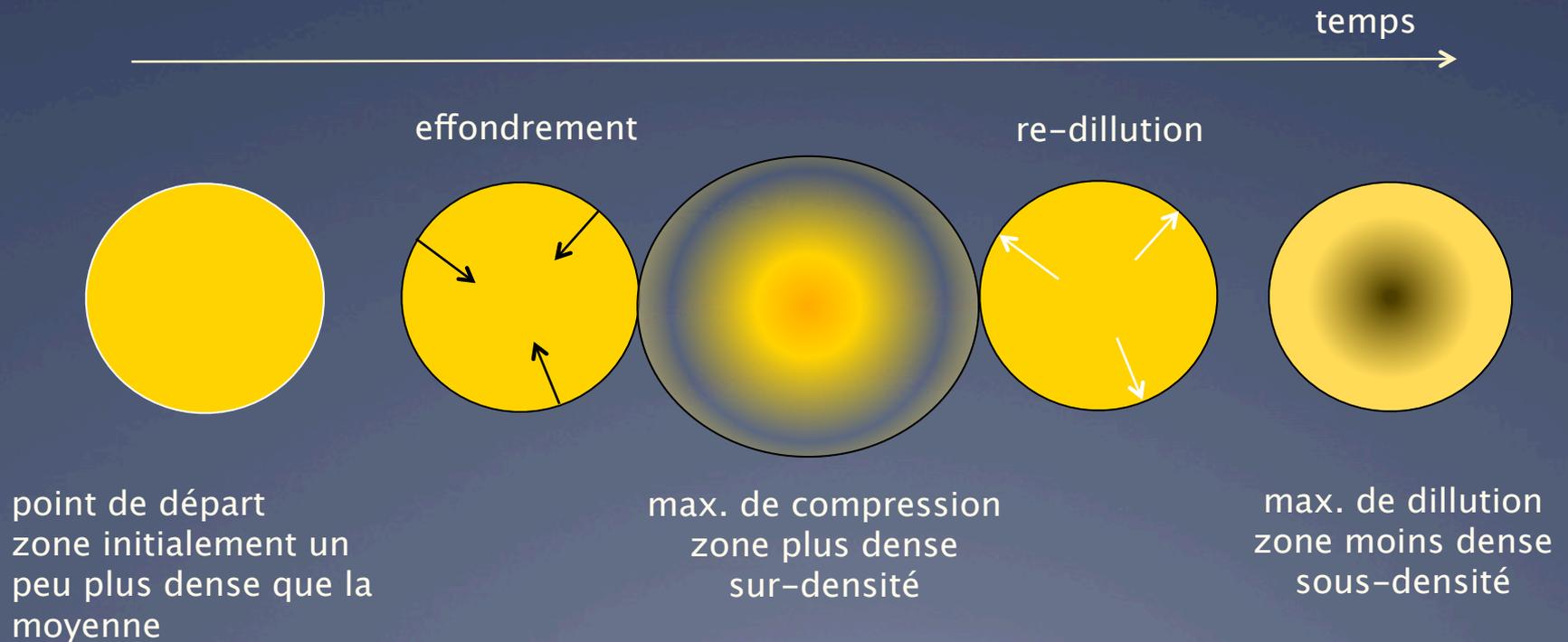


⇒ *toutes les informations  
statistiques contenues dans  
la carte à 2 dimensions sont  
contenues dans une courbe à  
une dimension.*

# Les anisotropies du CMB

Deux forces modèlent le fluide primordial : la gravité et la pression de radiation  
Des ondes sonores se propagent dans le fluide primordiale : les oscillations acoustiques

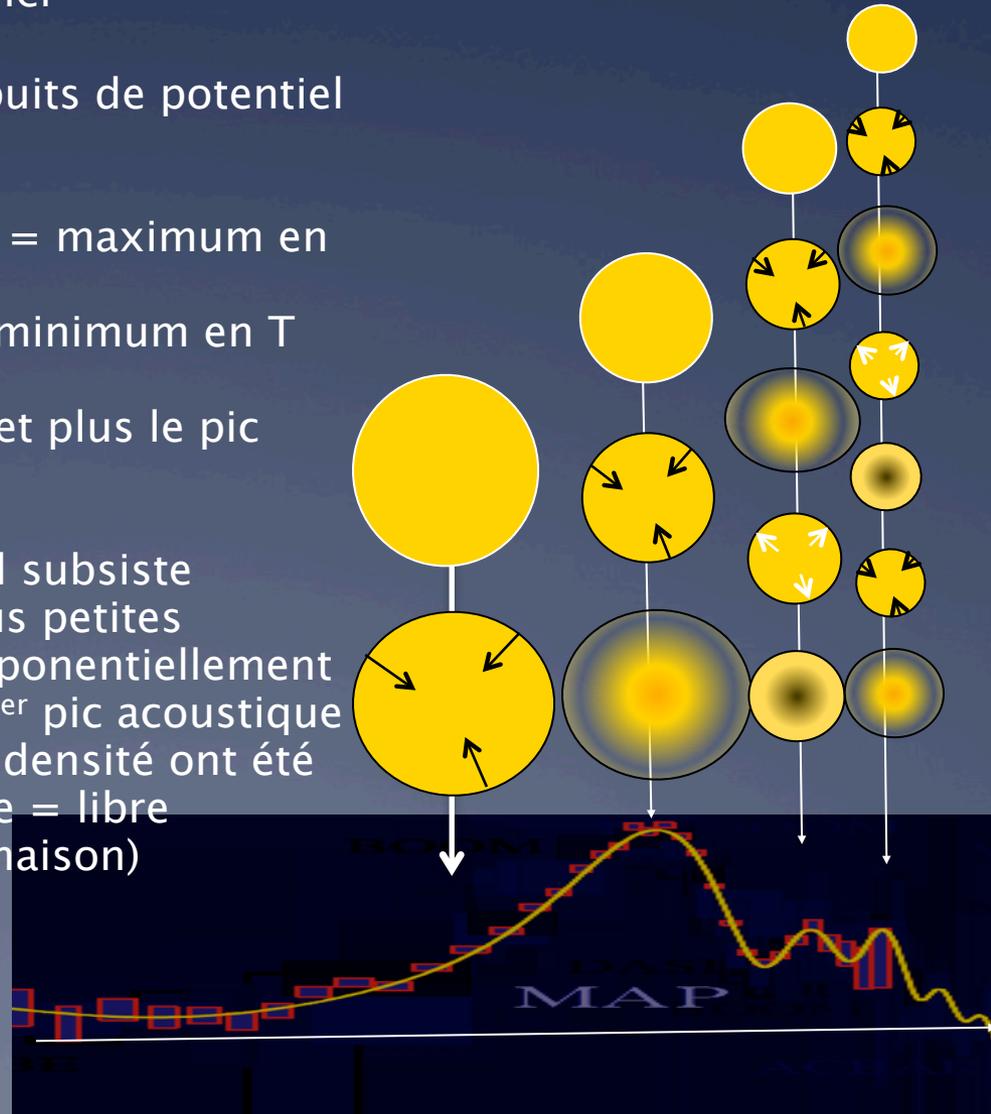
La vitesse du son est liée à la composition du milieu (baryons, matière noire, rayonnement, neutrinos ...).



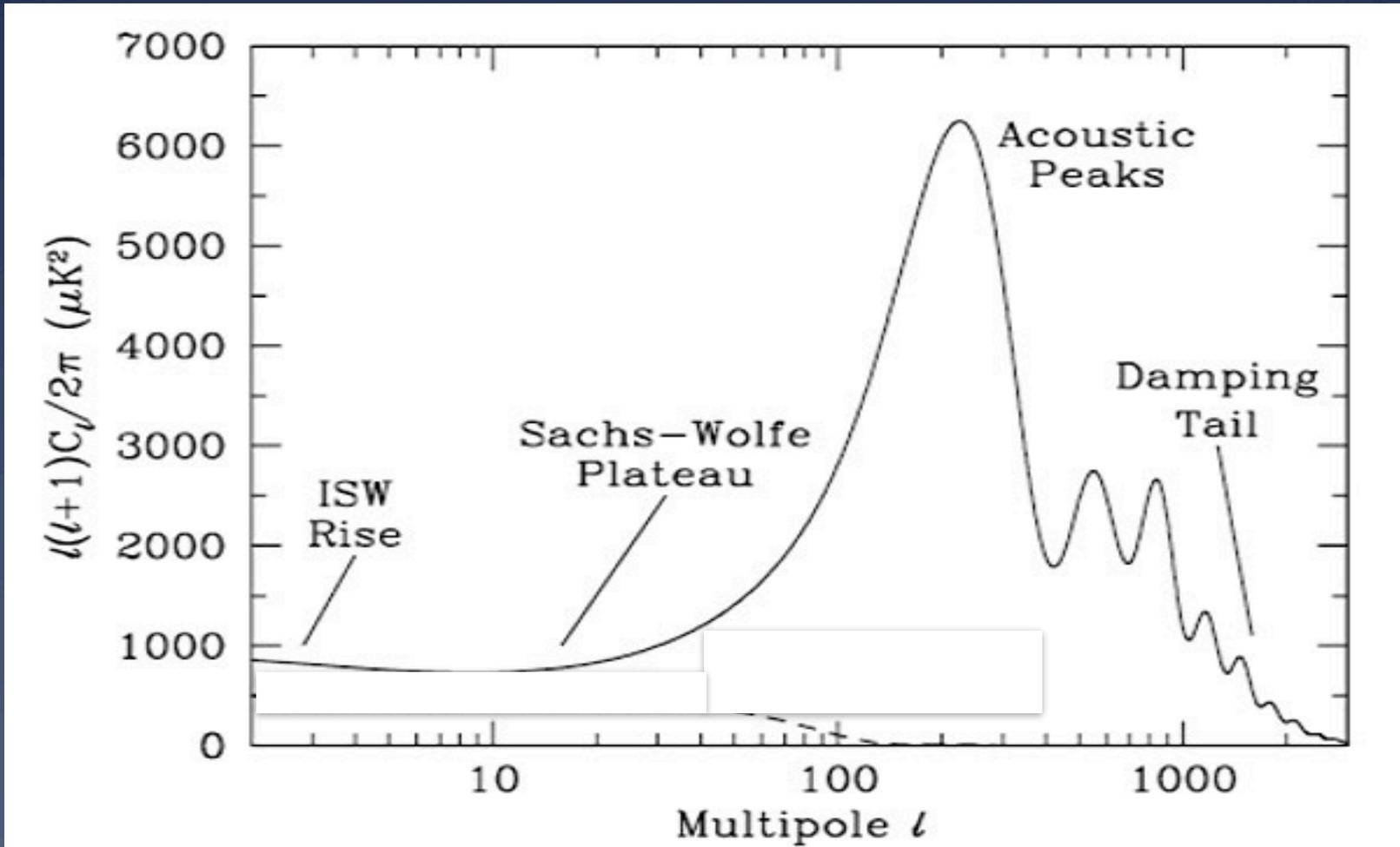
# Oscillations acoustiques

Le fluide photons – baryons s’effondre sur lui-même dans les zones de surdensité = puits de potentiel gravitationnel

- oscillations acoustiques : atténuation des puits de potentiel dans un univers en expansion
  - pics impairs = compression maximale = maximum en  $T$
  - pics pairs = compression minimale = minimum en  $T$
- plus une surdensité a connu d’oscillations et plus le pic correspondant est atténué
- la recombinaison n’est pas instantanée et il subsiste quelques diffusions qui vont gommer les plus petites échelles. Les fluctuations de densité sont exponentiellement amorties pour les échelles angulaires  $<$  au 1<sup>er</sup> pic acoustique (**amortissement de Silk**, les fluctuations de densité ont été exponentiellement amorties sur une distance = libre parcours moyen des photons avant recombinaison)



# Allure du spectre de puissance



Fluctuations de taille supérieure à l'horizon  $L_{dec}$  n'ont pas eu le temps d'osciller : plateau SW

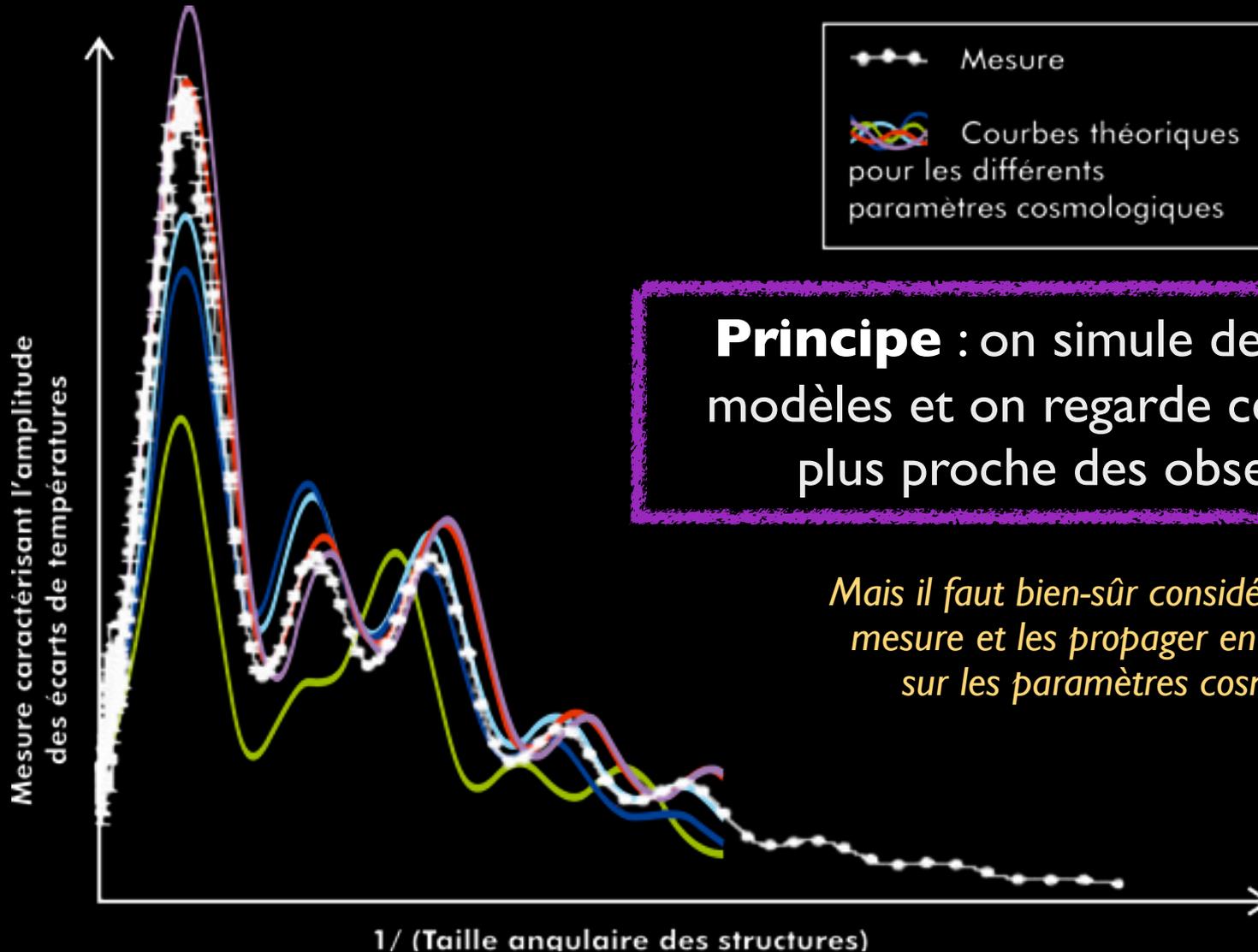
Les autres ont oscillées et sont figées à la recombinaison.

→ Les pics sont à  $L = L_{dec} / n$

→ Pic max à  $n=1$ , ensuite amortissement

# Du spectre aux paramètres

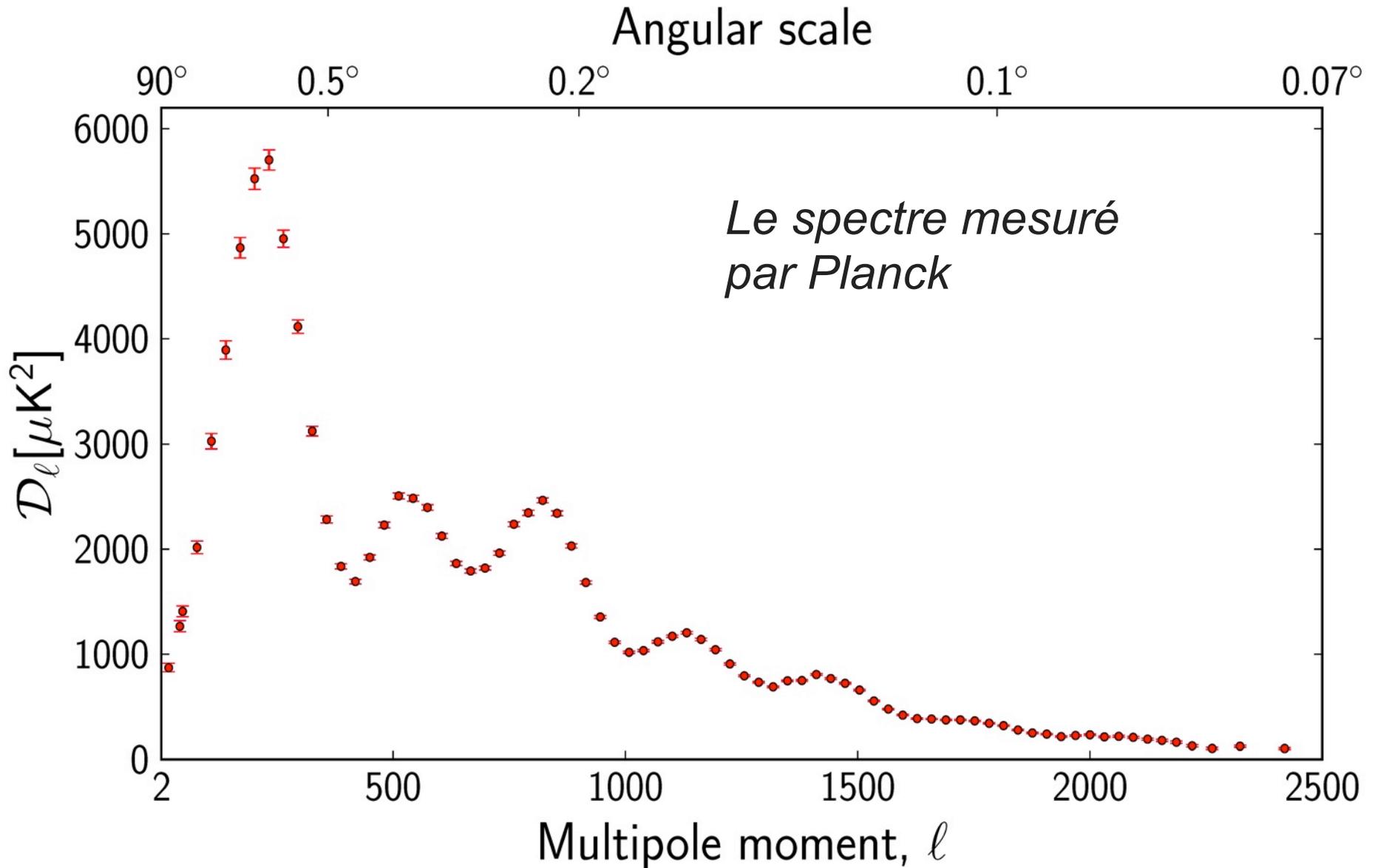
Paramètres cosmologiques = contenu, géométrie, fluctuations primordiales



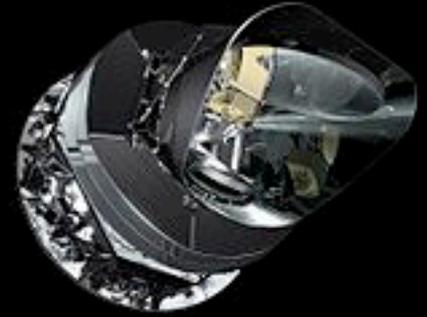
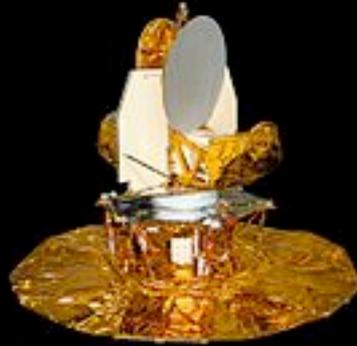
**Principe** : on simule des millions de modèles et on regarde celui qui est le plus proche des observations.

*Mais il faut bien-sûr considérer les erreurs de mesure et les propager en terme d'erreurs sur les paramètres cosmologiques ...*

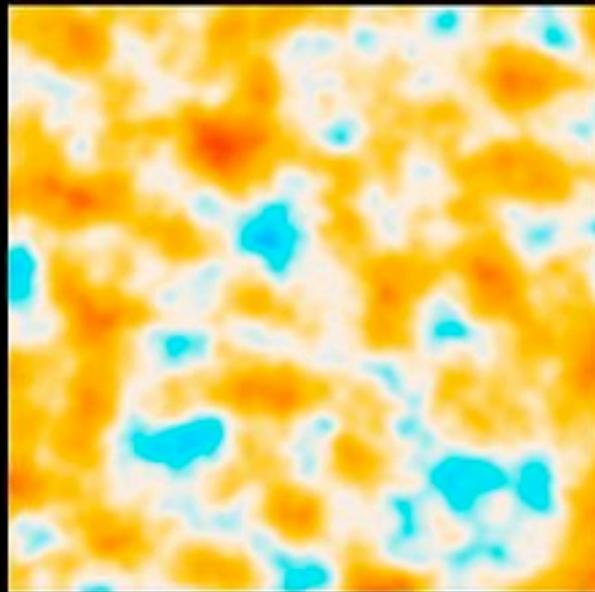
# Le spectre en température



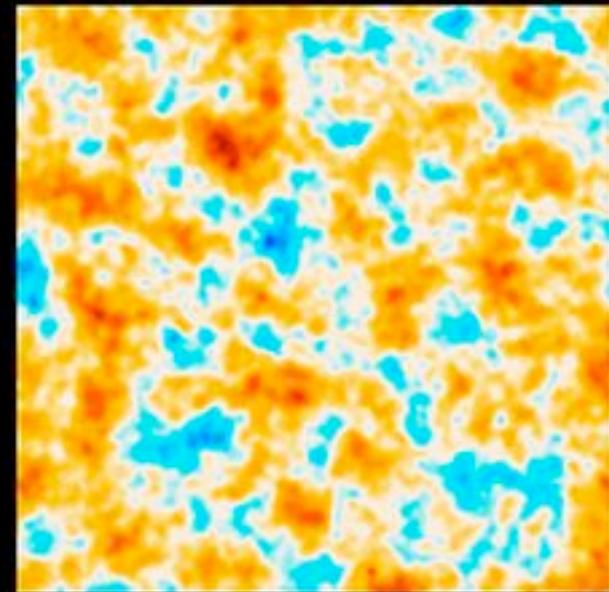
# Fluctuations : de la découverte à l'étude fine



COBE

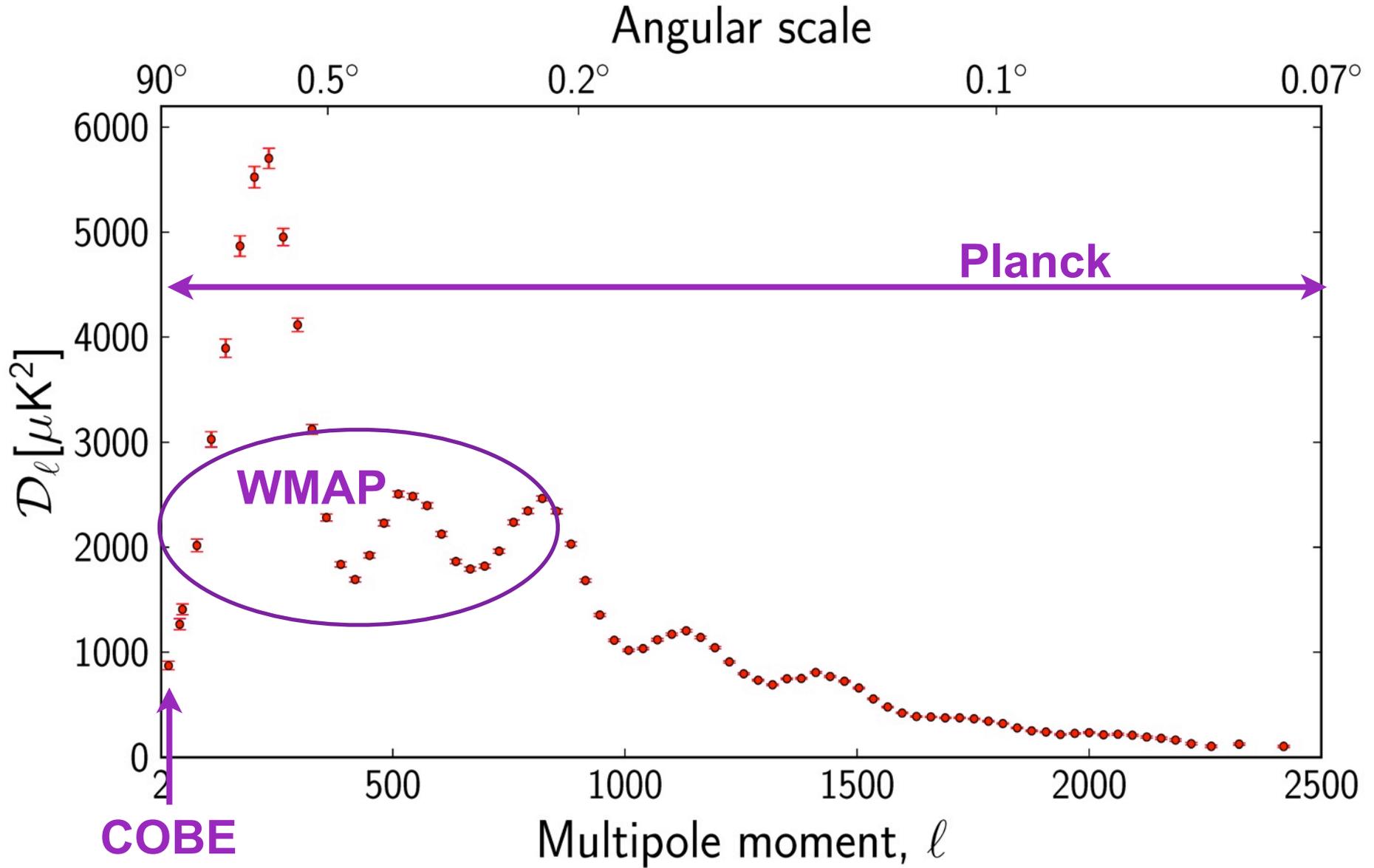


WMAP

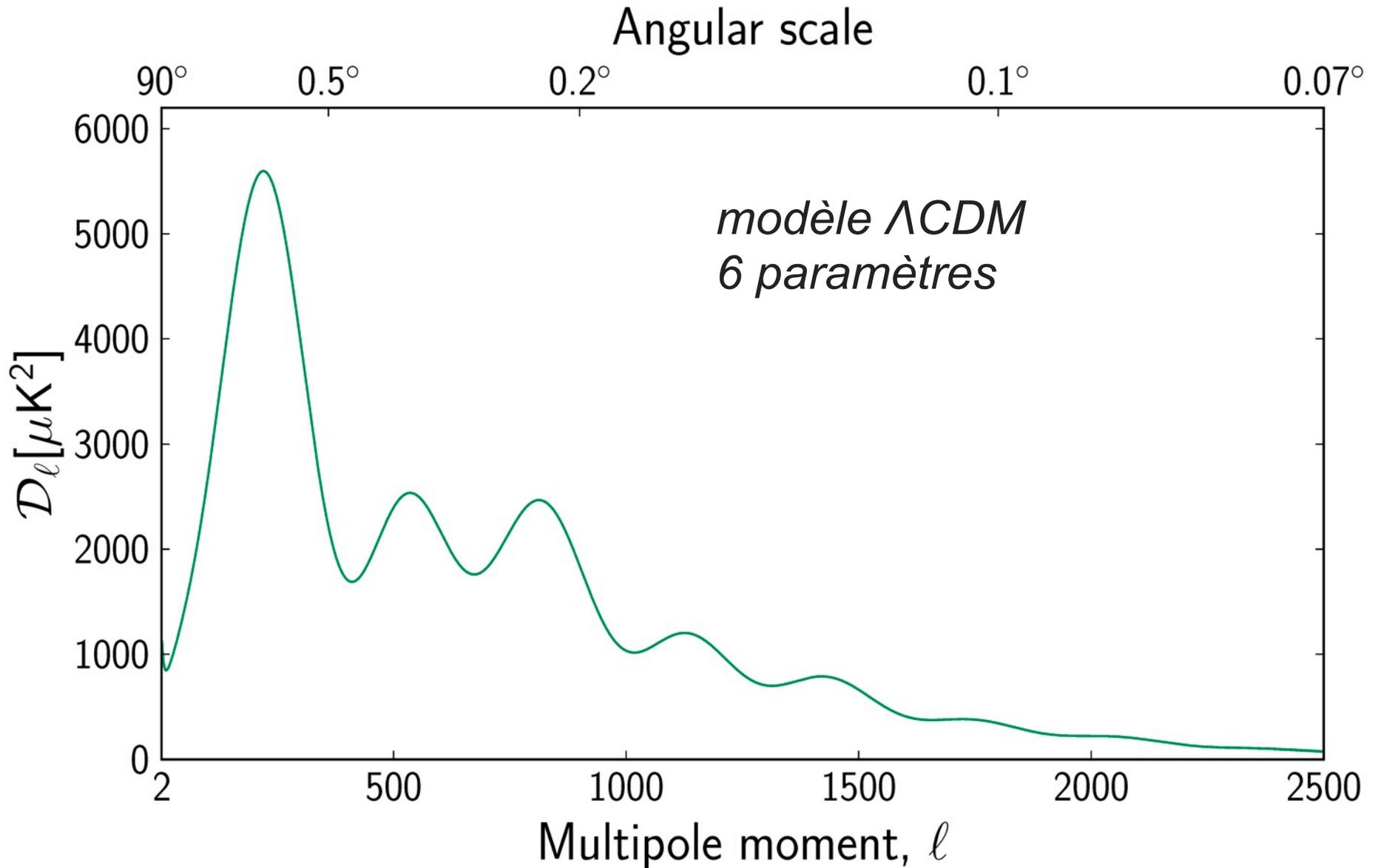


Planck

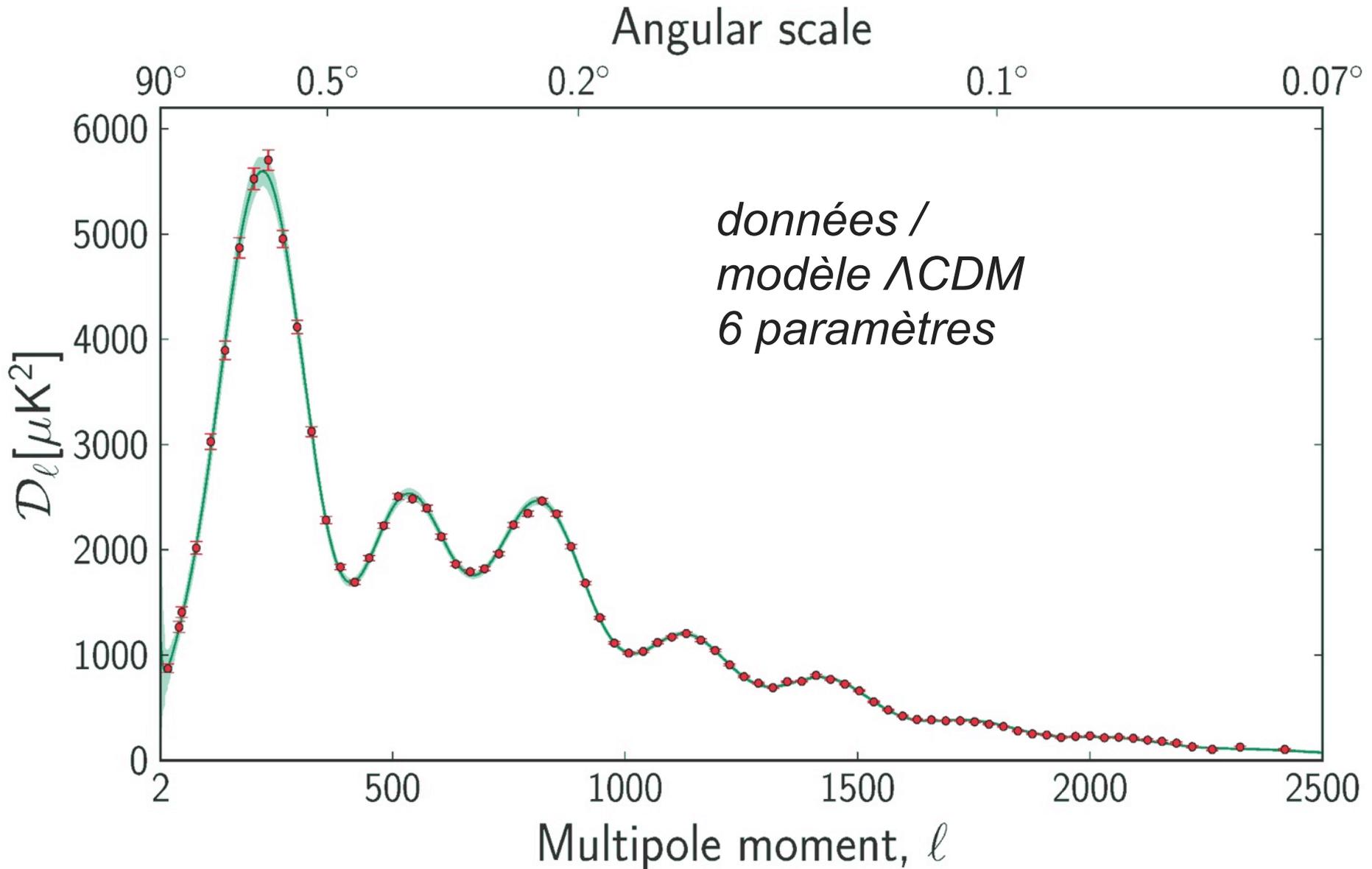
# Le spectre en température



# Le spectre en température



# Un accord “parfait” !



# Quels sont les paramètres du modèle $\Lambda$ CDM ?

$\Omega_b h^2$	Densité de baryons aujourd'hui
$\Omega_C h^2$	Densité de matière noire froide aujourd'hui
$\Theta_{MC}$	Taille angulaire apparente de l'horizon du son au moment du découplage matière-rayonnement

## CONTENU

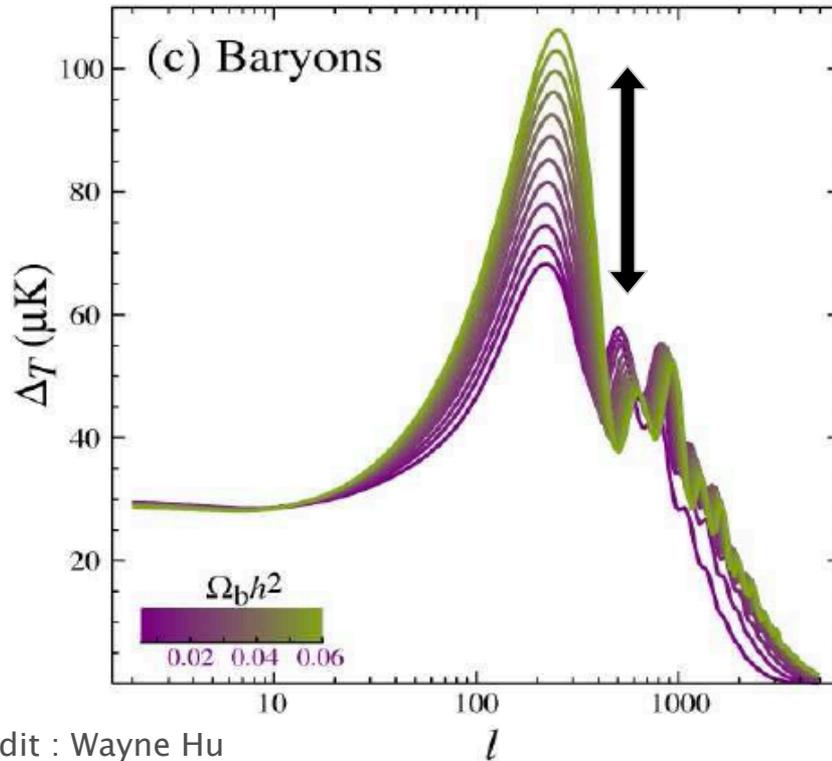
## FLUCTUATIONS PRIMORDIALES

$n_S$	Indice spectral des perturbations adiabatiques primordiales (défini à l'échelle pivot de $0.05 \text{ Mpc}^{-1}$ )
$A_S$	Amplitude du spectre des perturbations adiabatiques primordiales (défini à l'échelle pivot de $0.05 \text{ Mpc}^{-1}$ )

$\tau$	Épaisseur optique par diffusion Thomson due à la réionisation
--------	---

## EVOLUTION

# Influence des baryons et de la matière noire



crédit : Wayne Hu

Les baryons attirent la matière noire dans les puits de potentiel : ils renforcent les pics de compression (pics 1, 3, 5) par rapport aux pics de raréfaction (pic 2, 4, 6)

→ Le rapport d'amplitude pic 2 / pic 1 est inversement proportionnel à la quantité de baryons

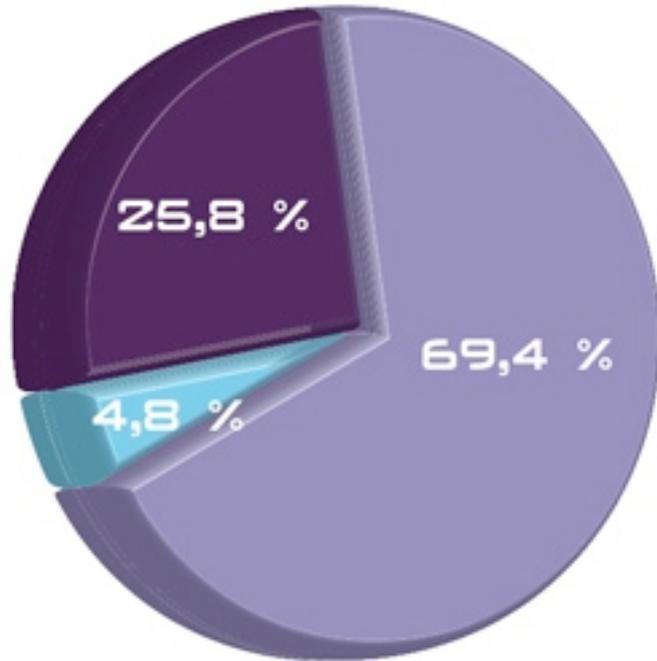
Plus de baryons : amplification de l'effet de la gravité sans augmentation de pression

→ amplification accentuée des surdensités

La densité de matière totale va influencer sur la hauteur des pics : elle influence sur l'époque de l'égalité matière-rayonnement, et donc sur le temps qu'ont eu les perturbations pour osciller

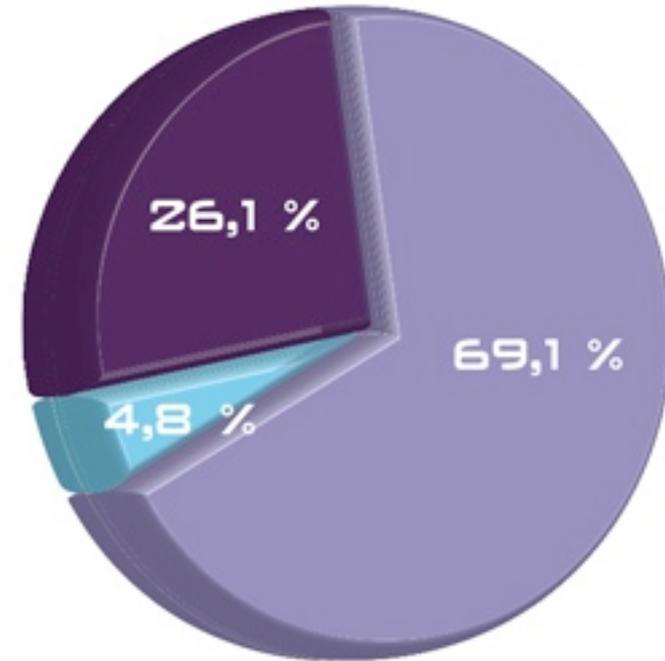
# Contenu en matières de l'Univers aujourd'hui

Après Planck



■ Matière noire ■ Baryons ■ Energie noire

Avec BAO



■ Matière noire ■ Baryons ■ Energie noire

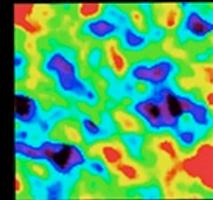
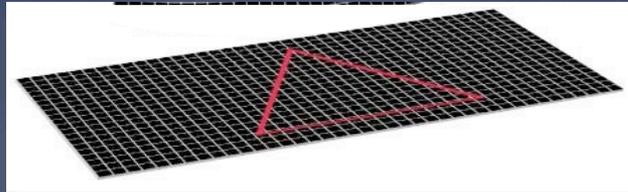
hypothèse : pas de courbure, pas de neutrinos

# Contrainte sur la courbure

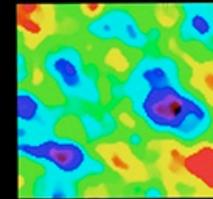
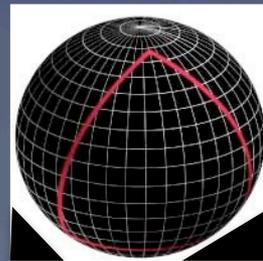
- Une fluctuation qui a fait  $\frac{1}{2}$  oscillation à  $z = z_{\text{dec}}$  a une longueur d'onde égale à l'horizon sonore
  - on connaît sa distance :  $z_{\text{dec}}$
- De la distance physique et de la taille apparente on déduit l'angle qui le sous-tend. Ce triangle est dessiné par les photons du CMB qui suivent les géodésiques de l'espace-temps.

On a ainsi accès à la courbure de l'espace-temps grâce à la position du 1<sup>er</sup> pic

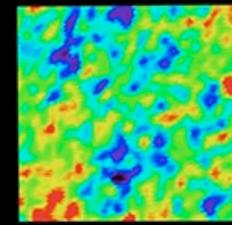
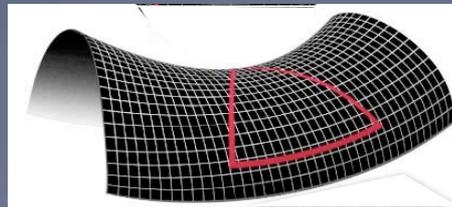
= Plat  
Courbure nulle



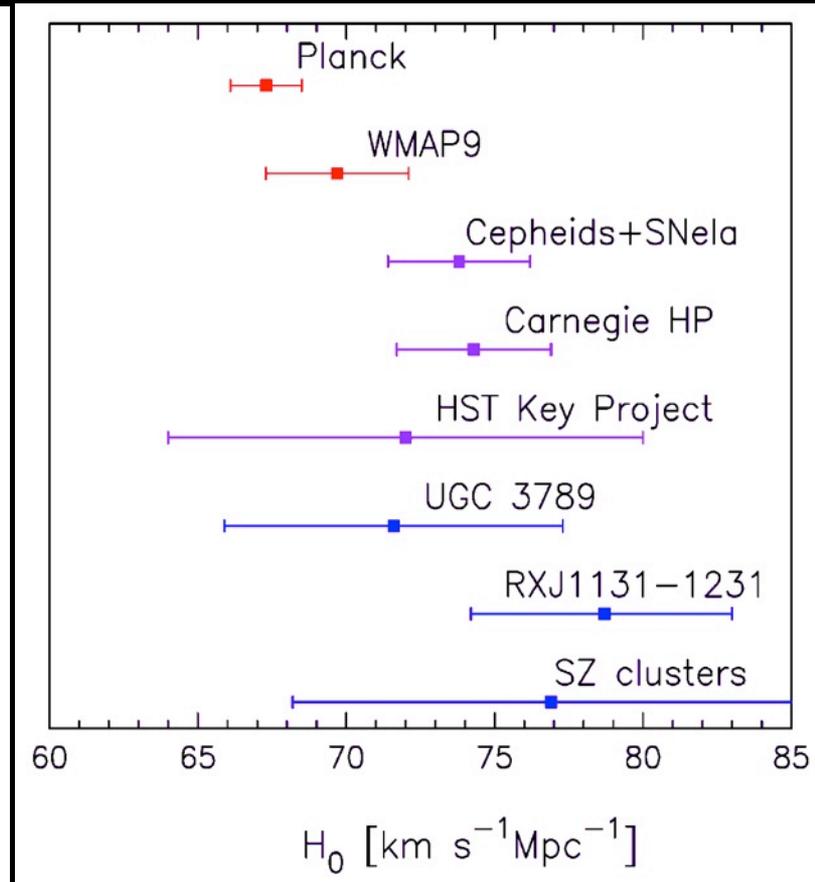
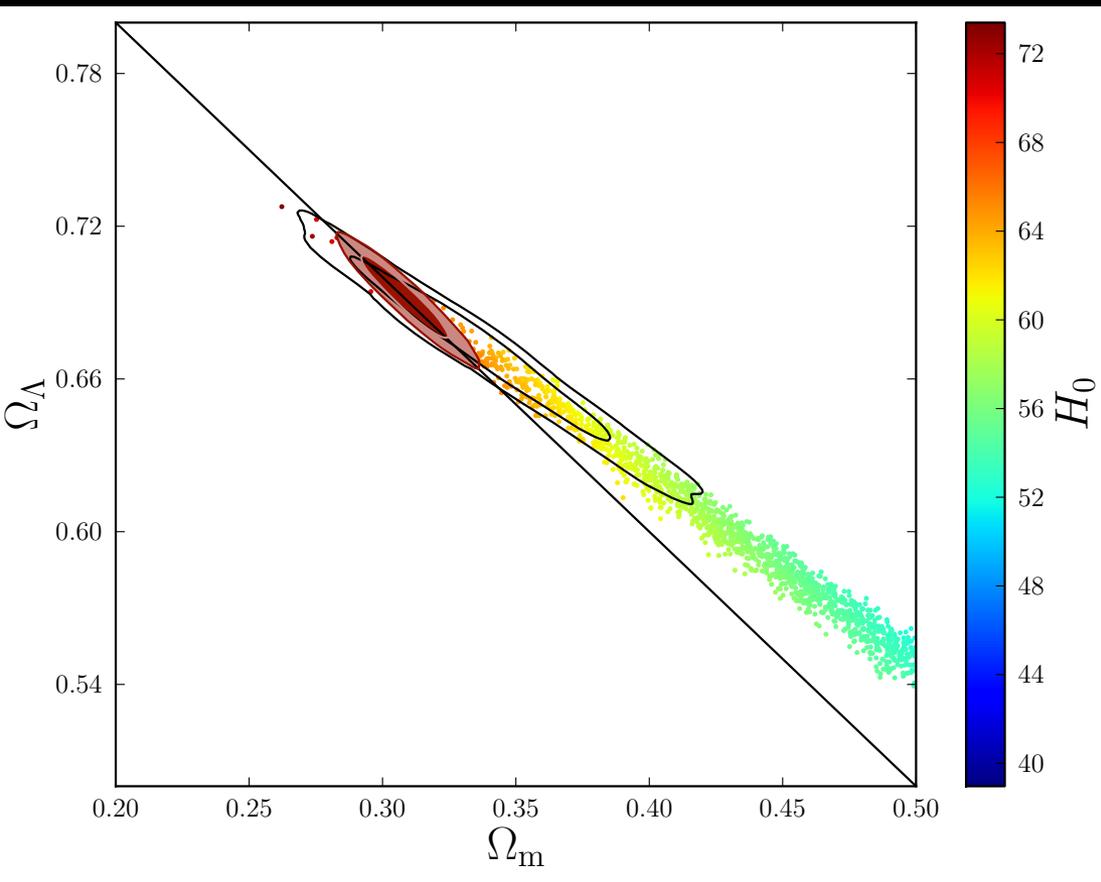
> Fermé  
Courbure positive



< Ouvert  
Courbure négative



# Vitesse d'expansion de l'Univers aujourd'hui



Lien très fort entre courbure de l'espace et expansion de l'Univers  
Planck+BAO = **espace euclidien** + vitesse d'expansion modérée

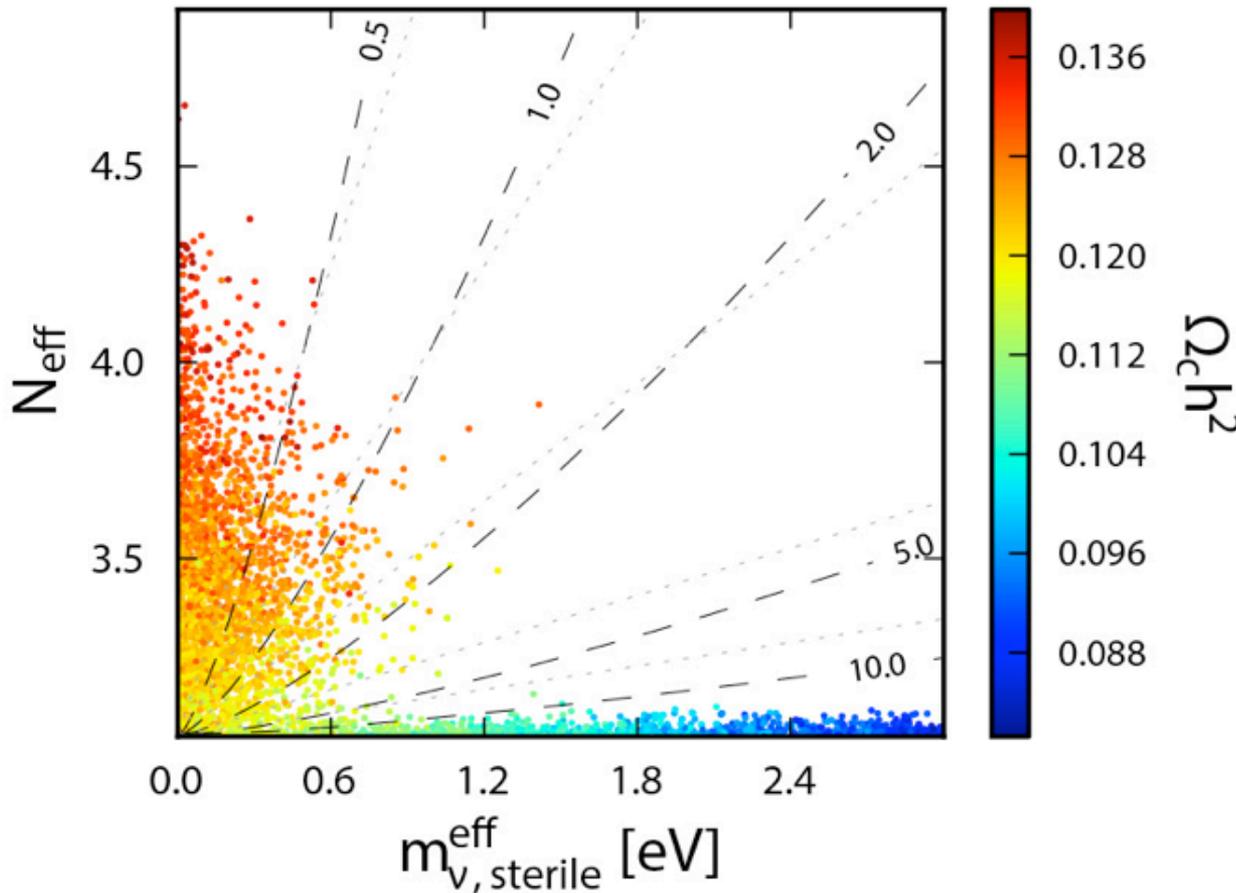
**$-0.0074 < \Omega_K < +0.0057$  à 95 % de niveau de confiance**

Après des années de mesures,  **$H_0$  est enfin connu au %**  
 $H_0 = 67.8 \pm 0.77 \text{ km.s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

# Les neutrinos

Au début, relativistes : lissent les petites structures

Ensuite, non-relativistes : renforcent le contraste des petites structures



La cohérence du rayonnement fossile avec les grandes structures (BAO) permet de contraindre fortement ces particules fantômes :

- 3 espèces de neutrinos
- masse totale  $< 0.23$  eV
- pas d'indication d'un neutrino stérile

# Le modèle d'inflation

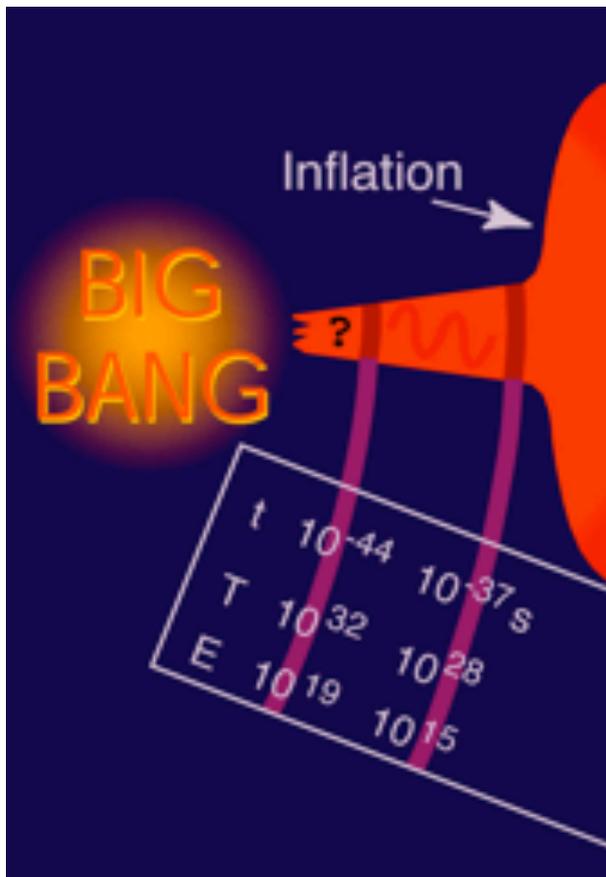
Croissance gigantesque de l'univers juste après le Big-Bang

Avantage : 1 solution à 3 problèmes (Pourquoi l'espace est-il plat ?

Pourquoi tout l'univers observable est à la même température ?

D'où viennent les fluctuations macroscopiques présentes 400 000 ans après le Big-Bang ?)

Les illustrations donnent une piètre idée de l'effet de l'inflation cosmique ...

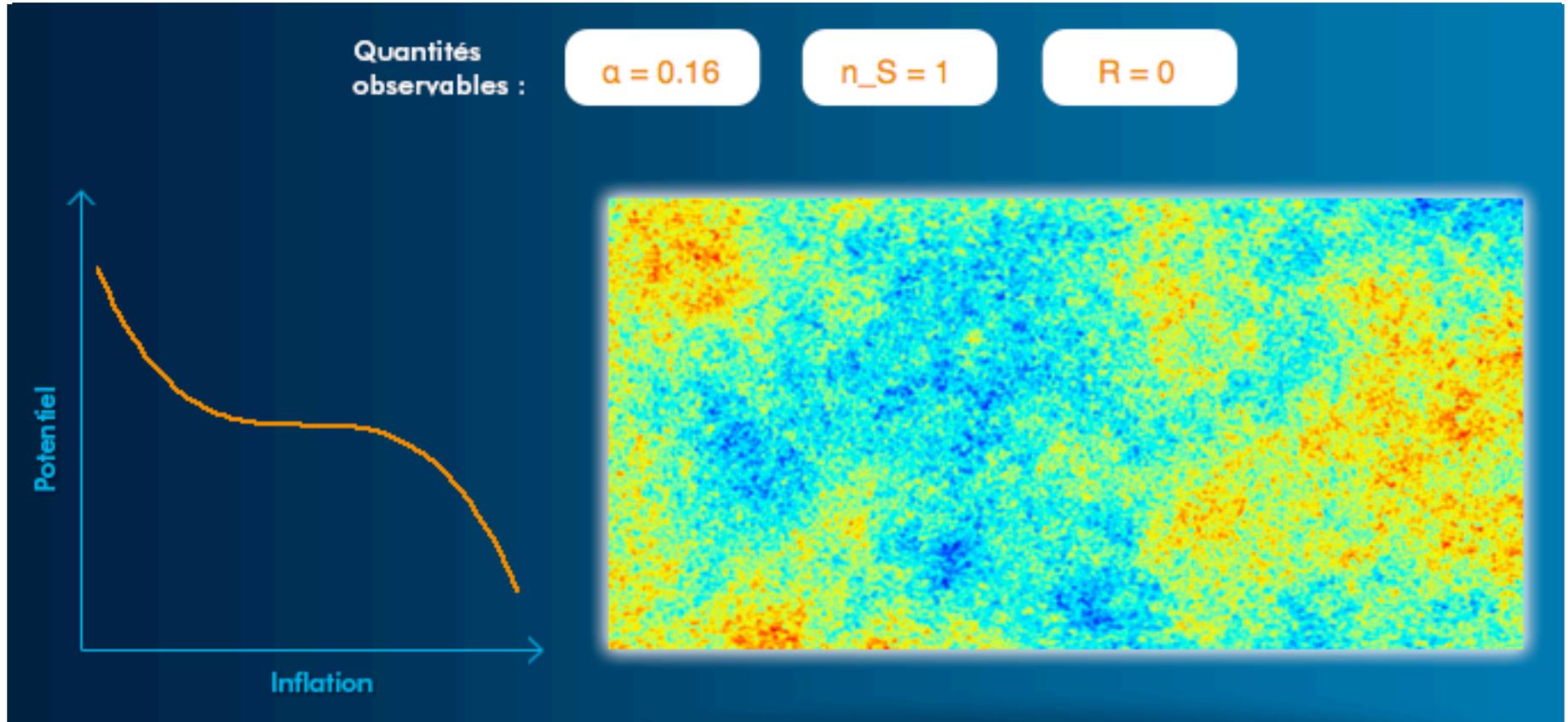


L'inflation devrait avoir commencé au plus tôt  $10^{-36}$  seconde après le Big-Bang et avoir fini au plus tard  $10^{-30}$  seconde après le Big-Bang. Chaque dimension d'espace devrait avoir grandi d'un facteur au moins égal à  $10^{26}$ , soit un volume multiplié par  $10^{78}$  pendant l'ère inflationnaire ...

La présence de pics marqués a écarté l'hypothèse de défauts topologiques comme source importante de fluctuations primordiales (pas en phase → pas de pics nets)

# Le modèle d'inflation

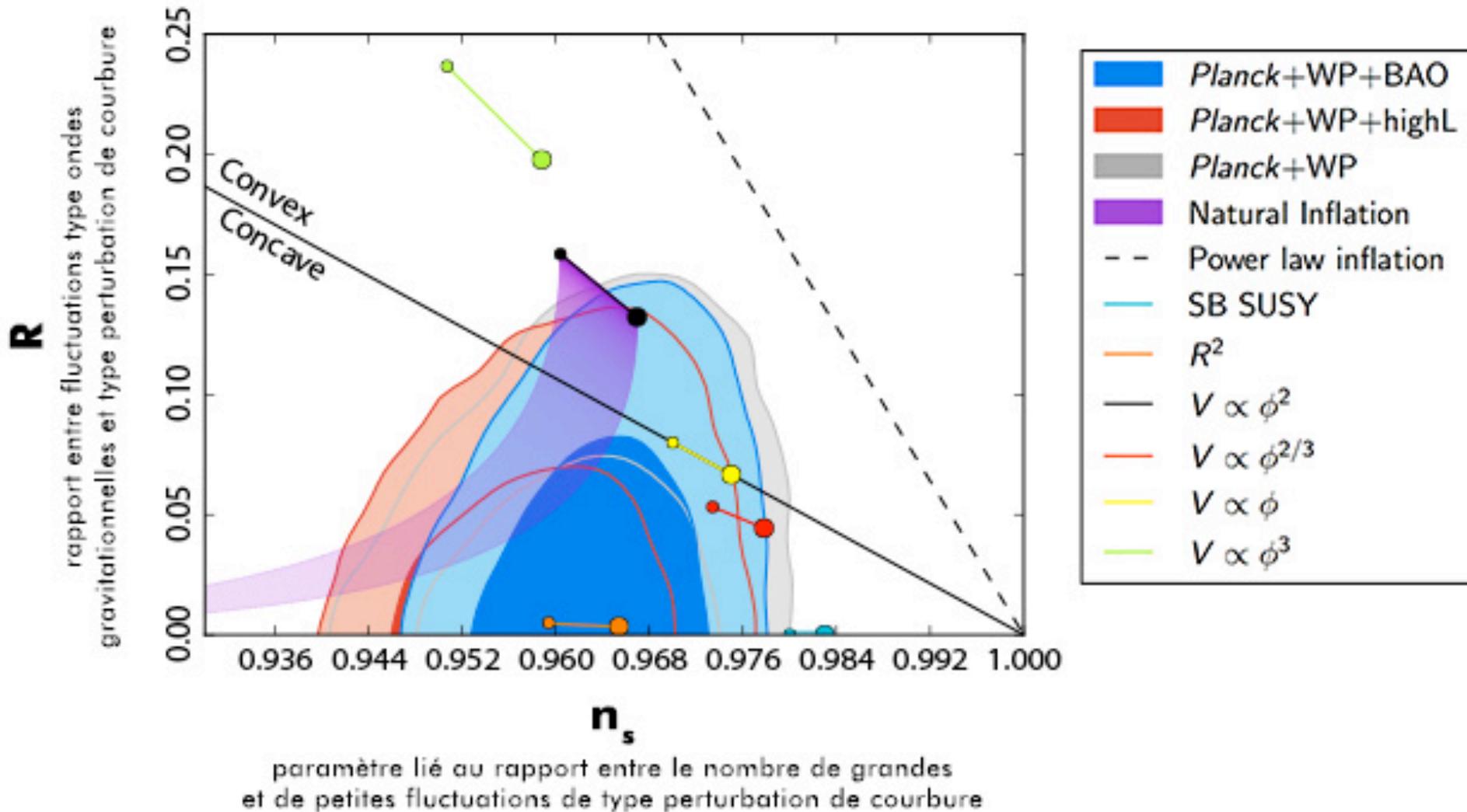
Le potentiel que suit l'inflaton est relié à des observables dans le rayonnement fossile



Simulations de cas “extrêmes” !

La carte contient l’empreinte de la physique  $\sim 10^{-30}$  seconde après le Big-Bang.

# Les fluctuations primordiales

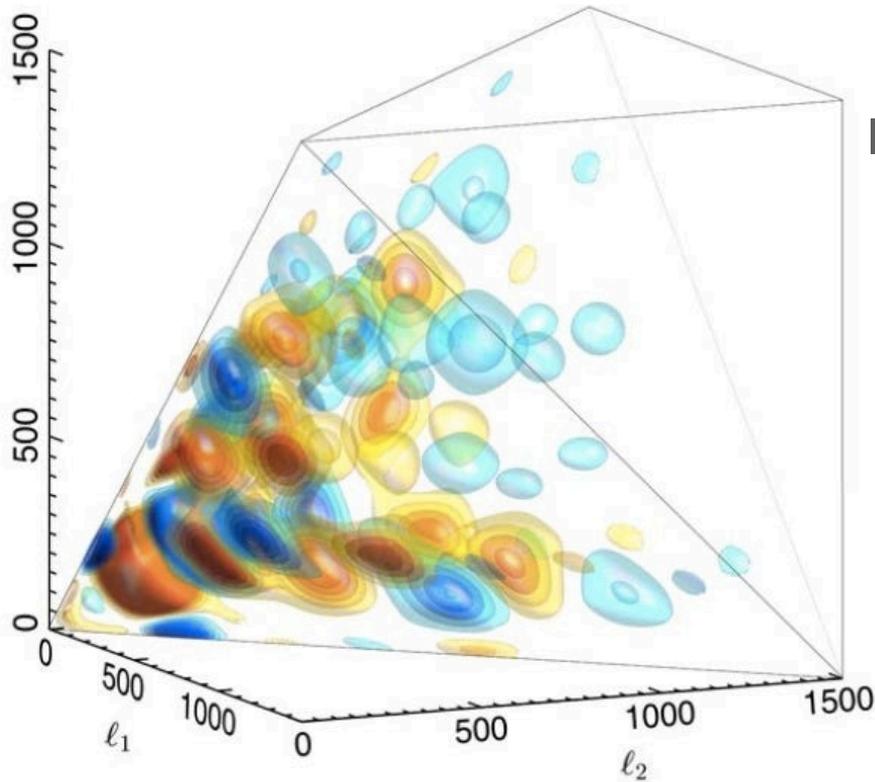


Modèle naïf : spectre dit “invariant d’échelle” ( $n_s = 1$ )

Prédiction de l’inflation :  $n_s < 1 \rightarrow$  **Planck le prouve**

Nombreuses familles de modèles d’inflation  $\rightarrow$  **Planck commence le tri**

# Test de la gaussianité



Planck ne détecte aucun signe de non-gaussianité

## L'inflation prédit des fluctuations gaussiennes au premier ordre

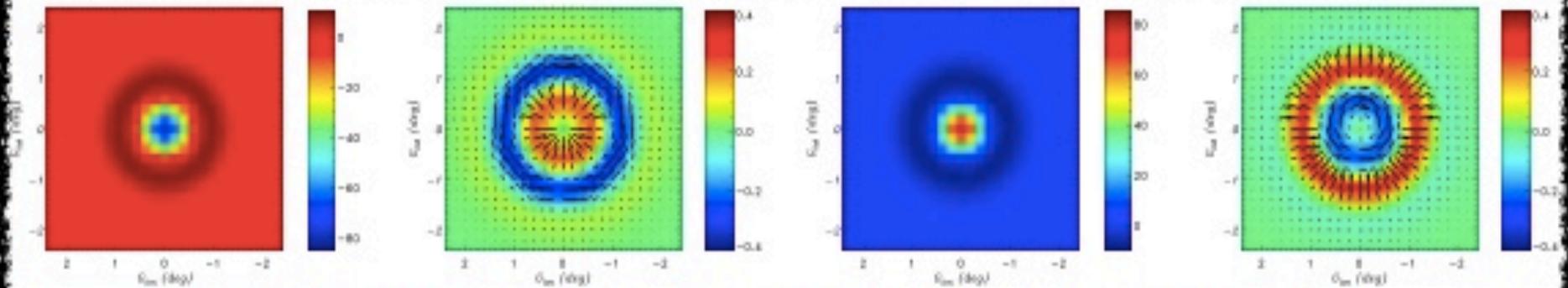
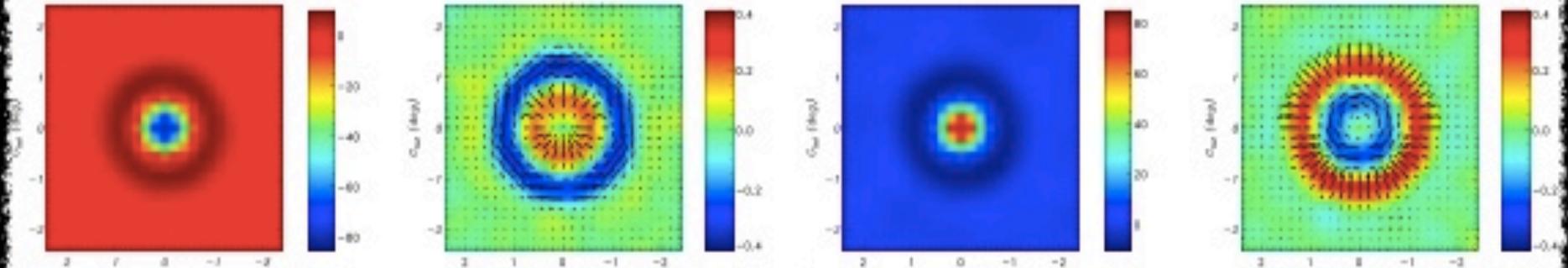
- certains modèles d'inflation prédisent des non-gaussianités détectables avec Planck
- la plupart des modèles alternatifs à l'inflation prédisent un niveau de non-gaussianité plus important

Etude délicate : plusieurs méthodes d'extraction de la carte du rayonnement fossile testées, plusieurs méthodes d'estimation de la non-gaussianité utilisées.

**Planck défavorise fortement les modèles ekpyrotiques/cycliques** qui exigent un niveau de non-gaussianité qui était marginalement compatibles avec les résultats de WMAP, qui n'est plus compatible avec les résultats de Planck.

# Un avant-goût de la polarisation

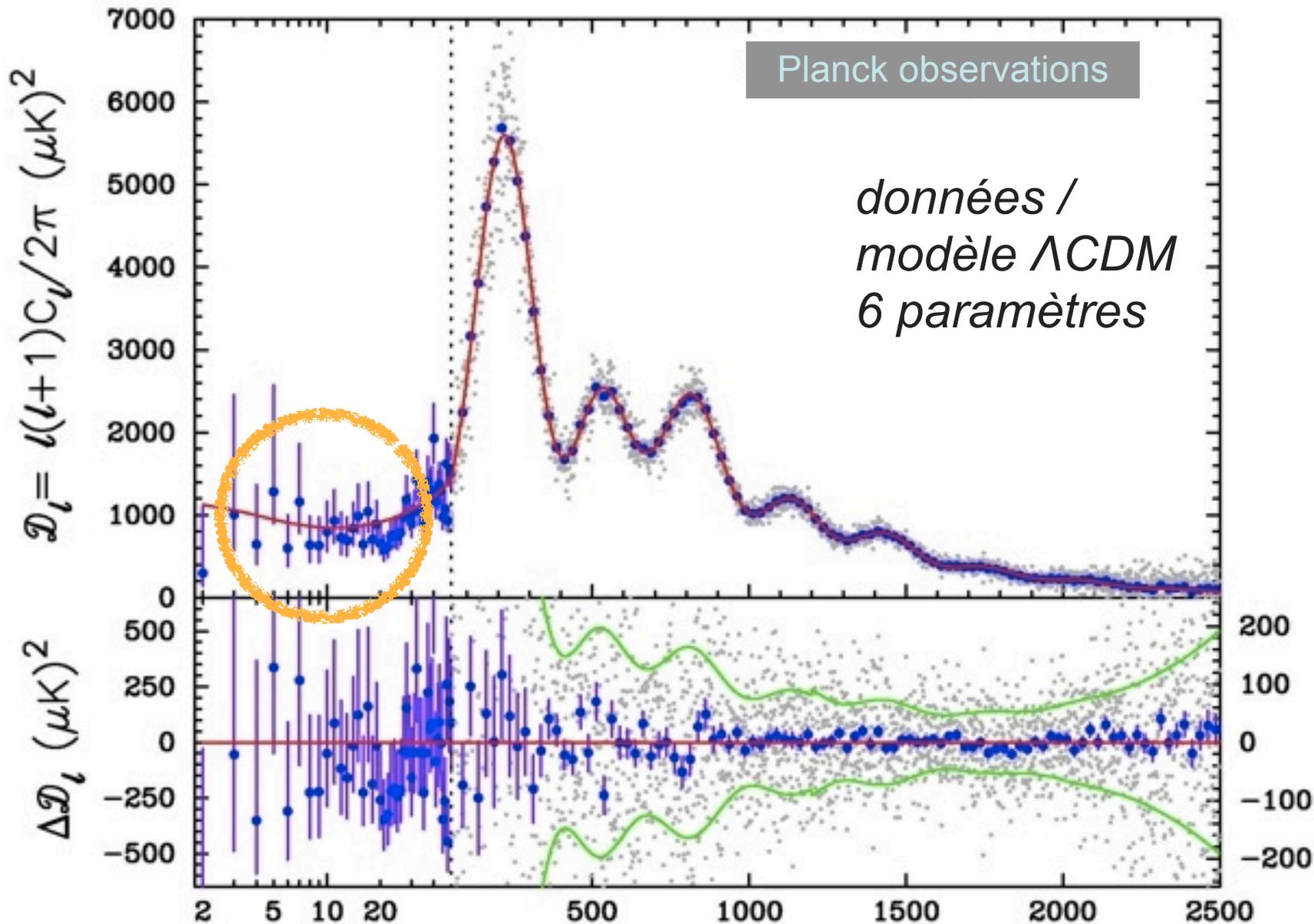
Observations faites par la collaboration Planck



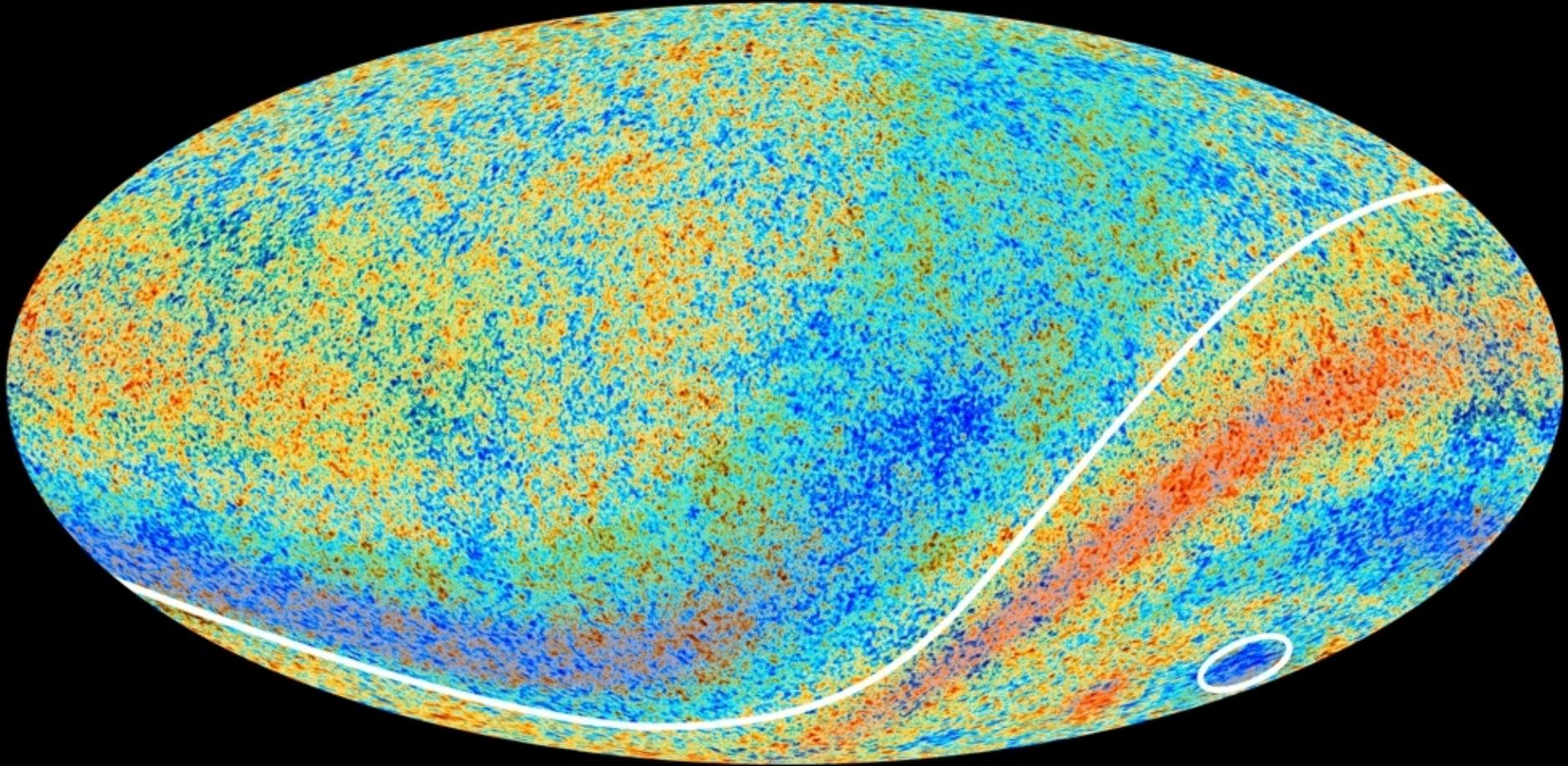
Simulations dans le cadre du meilleur modèle de notre univers

*Prochaine épisode en 2014 ...*

# Un accord “presque parfait” ...

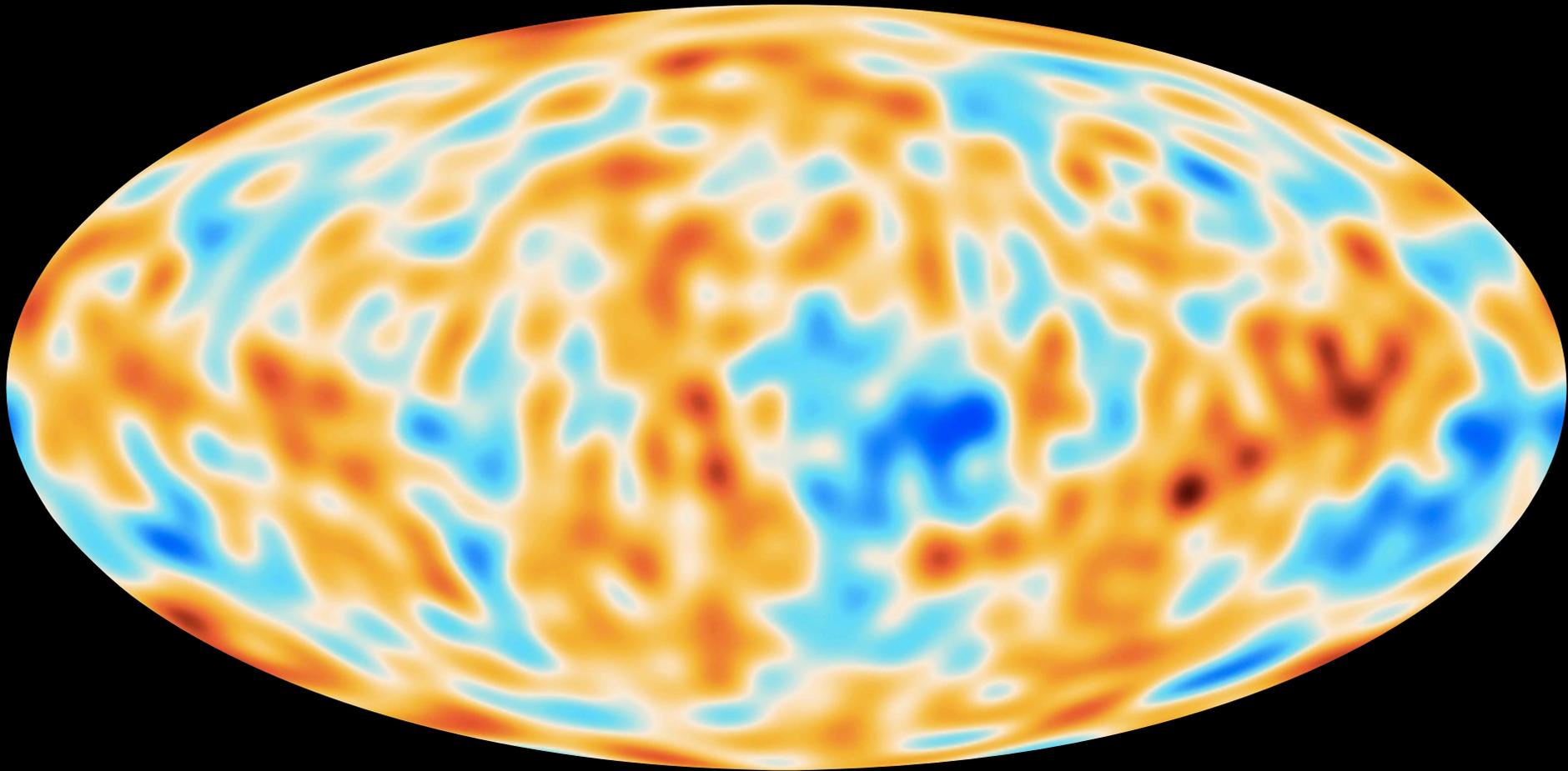


# Univers de Bianchi : univers homogène mais non isotrope



Reproduit bien les grandes échelles ... mais avec des paramètres cosmologiques incompatibles avec "tout le reste"

# Ce qui pourrait manquer

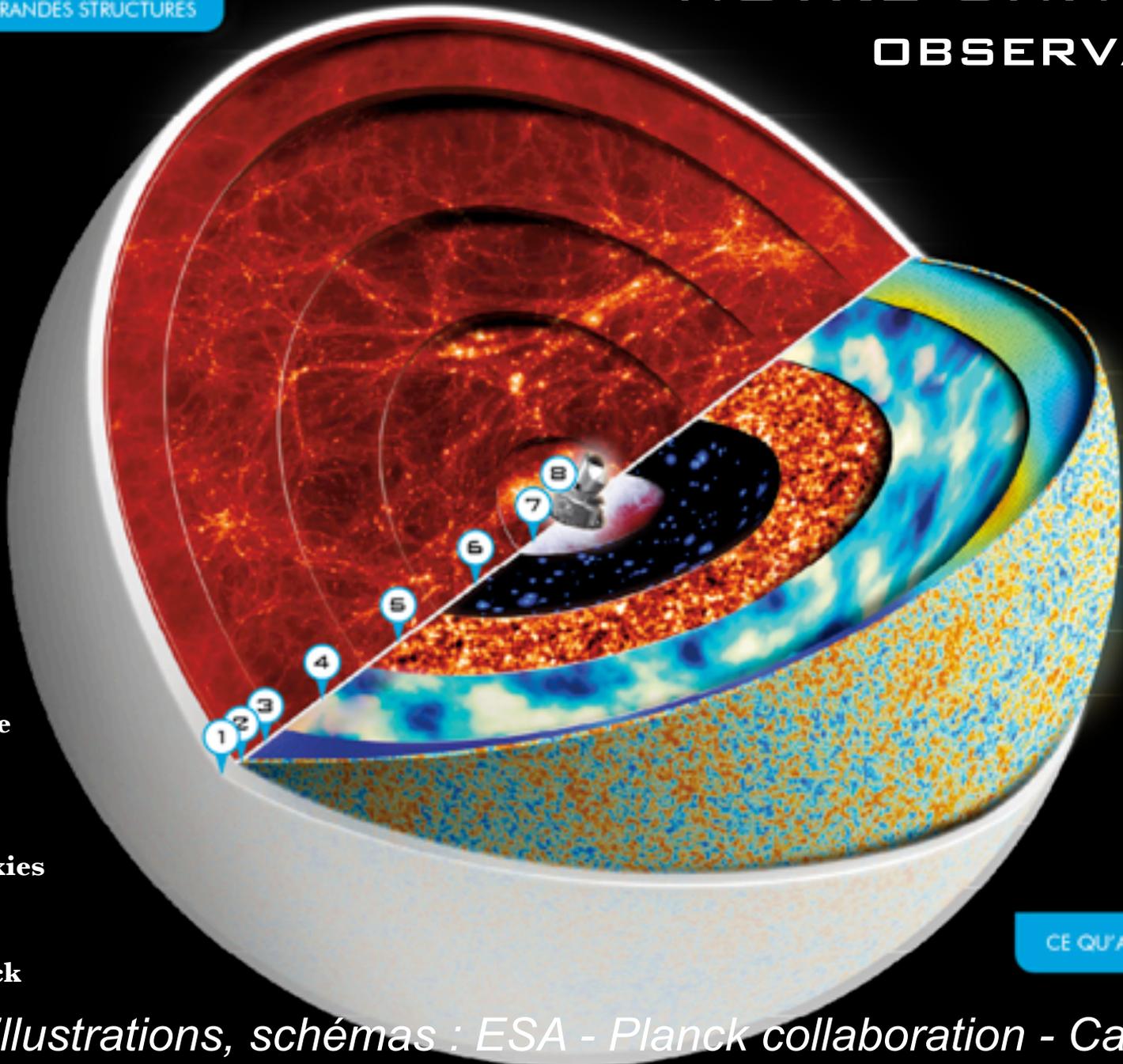


-9,3  $\mu\text{K}$  ————— +8,0  $\mu\text{K}$

Accord WMAP,  
LFI, HFI

Différence entre ce que l'on observe et ce qu'on attend d'après le modèle, dans le cas "moyen".  
"Pas de chance" ou précieux indice ?

- (1) Big-Bang
- (2) Rayonnement fossile
- (3) Réionisation
- (4) Matières noire et ordinaire
- (5) Poussières
- (6) Amas de galaxies
- (7) Notre Galaxie
- (8) Satellite Planck



CE QU'A VU PLANCK

# Les limites du Big-Bang

Notre Univers (espace-temps, incluant le contenu) est né avec le Big-Bang à  $t=0$  *par définition*.

Plusieurs problèmes :

- notre physique ne fonctionne pas jusqu'à  $t=0$  : « gravité quantique » à découvrir
- la géométrie, la répartition du contenu sont liées aux conditions initiales : c'est contraire au fonctionnement habituel de la physique
- on a envie de savoir « avant », « ailleurs »

**MAIS** aucune observation directe, aucune reproduction en laboratoire n'est seulement imaginable

# Et ailleurs ?

## Physique « standard » :

- un temps fini n'est pas incompatible avec un espace infini
  - 2 des 3 géométries possibles sont infinies, dont la géométrie euclidienne qui est conforme aux observations
- inflation éternelle : dans cet espace infini, toujours un endroit où l'inflation se poursuit
  - infinité d'univers-bulles

*Ce qui n'a pas une probabilité nulle se produit nécessairement dans un espace infini*

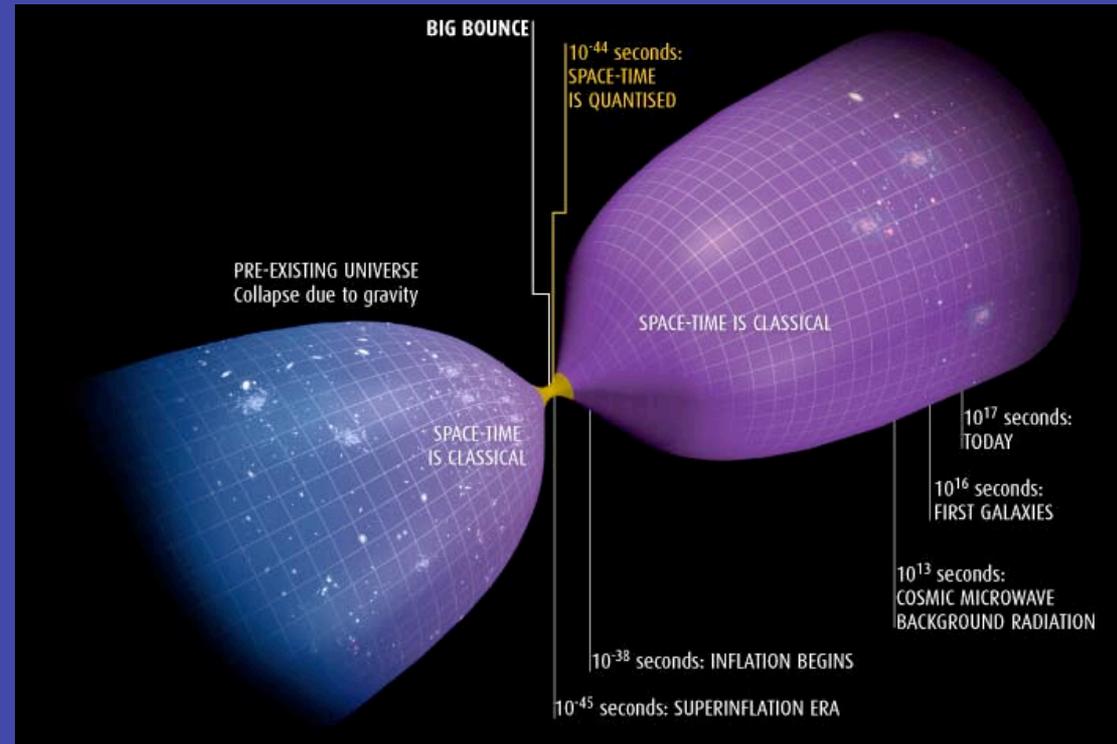
## Physique spéculative:

- en théorie des cordes, strate supplémentaire d'univers aux lois de la physique différentes
- lois et constantes de la physique ne découlent plus de conditions nécessaires mais sont là « par hasard »

# Et avant ?

Les théories (**très spéculatives, en construction**) les plus avancées apportent des réponses à ces problèmes :

- « gravité quantique » : c'est leur raison d'être !
- certaines conduisent naturellement à de l'inflation



## MAIS est-ce testable?

de façon statistique oui :

- produisent-ils au moins 1 univers comme le nôtre ?
- produisent-ils majoritairement des univers semblables au nôtre ?  
(« calcul avec contingence anthropique »)



Une planète ordinaire autour d'une étoile ordinaire  
dans une galaxie ordinaire.  
Une espèce vivante ordinaire dans un univers ordinaire ? ...

# 1 La mallette pédagogique



- développement initial dans le cadre d'un **partenariat avec le CVC** (Centre de Vulgarisation des Connaissances)
- synthèse de nombreux outils mis au point (maquettes, quizz en ligne, films ...)
- documents de présentation ppt pour les profs pour chaque séance
- inclus les résultats (dans ppt + quizz résultats)

# 1 La mallette pédagogique

- issue d'une première expérience de 12 mallettes, de travail en collège, lycée, animation etc + interventions en collèges / lycée + animations grand public & scolaires
- au 01/07/2013 diffusée pour 327 élèves de lycée + clubs astro + animation fac du Havre
- actuellement diffusion en France, Afrique, Australie
- possibilité d'intervention d'un(e) Planckien(ne) en région IdF, Grenoble, Toulouse (autre nous demander)

