

# Planck HFI : le compte à rebours a commencé!

O. Perdereau



Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire  
IN2P3-CNRS et Université de Paris-Sud 11

Produced with PDF<sub>L</sub>TEX (style beamer) within GNU-Linux

LAL - 16/04/2009

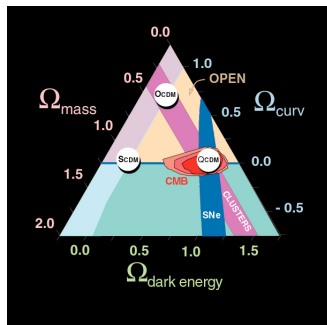
- 1 Introduction
  - Cosmologie
  - Le CMB
  - Anisotropies du CMB
  - Pourquoi des anisotropies?
- 2 Planck-HFI
  - La mission Planck
  - Physique de Planck
  - L'instrument haute fréquence (HFI)
  - Etalonnage de HFI
- 3 Conclusions
- 4 Back-up slides



# La cosmologie

Questions :

- Quel est l'age de l'univers ?
- Son passé ? son avenir ?
- De quoi est-il rempli ?
- Qu'est-ce qui "fait" la matière noire ? l'énergie noire ?
- ...



⇒ *modèle de concordance* dit du "Big-Bang model"

base : *Relativité Générale*

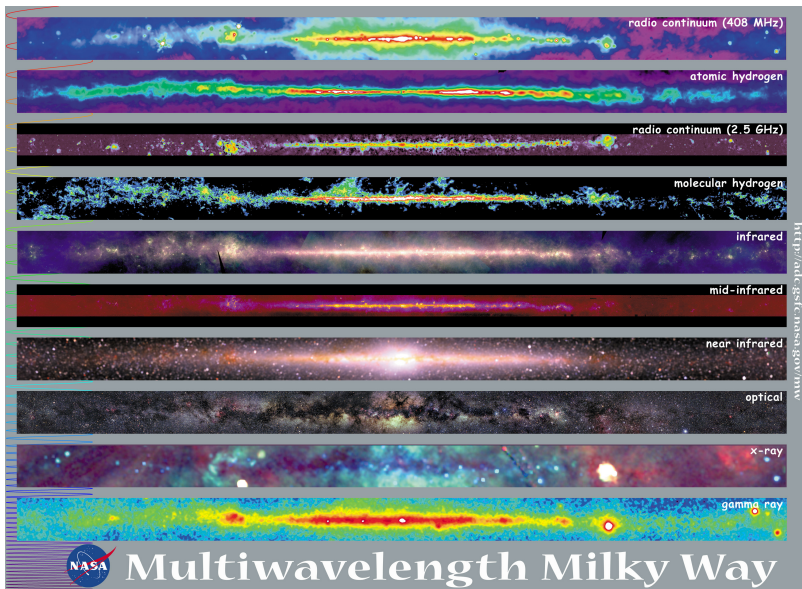
~ 10 "paramètres cosmologiques" étudiés par des

*techniques/observables complémentaires*

# Remarques

- Messenger = lumière (photons)
- Différentes longueurs d'onde  $\Rightarrow$  différentes sources (à des distances différents)
- $c$  (vitesse de la lumière) est finie  $\Rightarrow$  en général "loin"  $\Leftrightarrow$  "vieux"
- Distance  $\rightarrow$  année-lumière (1 al = 9500 Milliards de km)  
Distances "cosmologiques" en Giga-a.l. i.e. en  $10^9$  a.l.
- Luminosité apparente  $\propto 1/(\text{distance})^2$   
 $\Rightarrow$  faible luminosité  $\simeq$  loin
- si luminosité intrinsèque (absolue) connue :  
luminosité apparente  $\Leftrightarrow$  distance

# Différents visages de l'Univers



# Les "trois piliers" du Big-Bang

Trois observations :

- 1 "Récession" des galaxies lointaines (Univers en expansion)
  - ▶ Les galaxies lointaines s'"éloignent" de nous
  - ▶ Plus elles sont loin, plus elles s'"éloignent" vite
  - ▶  $\Rightarrow$  dilatation globale de l'Univers

# Les "trois piliers" du Big-Bang

Trois observations :

- 1 "Récession" des galaxies lointaines (Univers en expansion)
  - ▶ Les galaxies lointaines s'"éloignent" de nous
  - ▶ Plus elles sont loin, plus elles s'"éloignent" vite
  - ▶ ⇒ **dilatation globale de l'Univers**
- 2 Abondances primordiales des éléments légers
  - ▶ Helium, Deuterium (...) présents dans les objets les plus vieux ( $\approx 20-25\%$  d'Helium)
  - ▶ comment se sont-ils formés?
  - ▶ ⇒ **fusion thermonucléaire de l'Hydrogène dans une phase primordiale dense et chaude**

# Les "trois piliers" du Big-Bang

Trois observations :

- 1 "Récession" des galaxies lointaines (Univers en expansion)
  - ▶ Les galaxies lointaines s'"éloignent" de nous
  - ▶ Plus elles sont loin, plus elles s'"éloignent" vite
  - ▶ ⇒ **dilatation globale de l'Univers**
- 2 Abondances primordiales des éléments légers
  - ▶ Helium, Deuterium (...) présents dans les objets les plus vieux (≈20-25% d'Helium)
  - ▶ comment se sont-ils formés ?
  - ▶ ⇒ **fusion thermonucléaire de l'Hydrogène dans une phase primordiale dense et chaude**
- 3 Rayonnement de fond (Fond Diffus Cosmologique, CMB...)
  - ▶ Rayonnement isotrope (micro-onde radio / IR lointain) de "corps noir"
  - ▶ image de l'univers "jeune" (300000 ans)
  - ▶ **signature d'un état dense, chaud et homogène**

# Les "trois piliers" du Big-Bang

Trois observations :

- 1 "Récession" des galaxies lointaines (Univers en expansion)
  - ▶ Les galaxies lointaines s'"éloignent" de nous
  - ▶ Plus elles sont loin, plus elles s'"éloignent" vite
  - ▶ ⇒ **dilatation globale de l'Univers**
- 2 Abondances primordiales des éléments légers
  - ▶ Helium, Deuterium (...) présents dans les objets les plus vieux (≈20-25% d'Helium)
  - ▶ comment se sont-ils formés ?
  - ▶ ⇒ **fusion thermonucléaire de l'Hydrogène dans une phase primordiale dense et chaude**
- 3 Rayonnement de fond (Fond Diffus Cosmologique, CMB...)
  - ▶ Rayonnement isotrope (micro-onde radio / IR lointain) de "corps noir"
  - ▶ image de l'univers "jeune" (300000 ans)
  - ▶ **signature d'un état dense, chaud et homogène**

⇒ Il y a eu une "explosion" ? ...

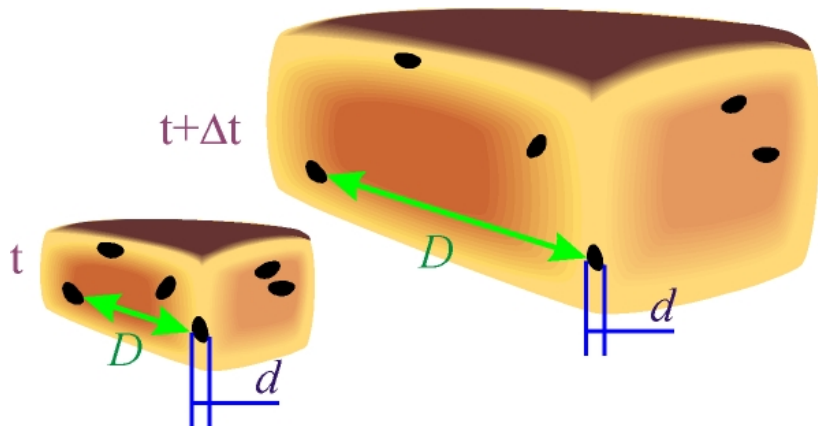
# Le Big Bang

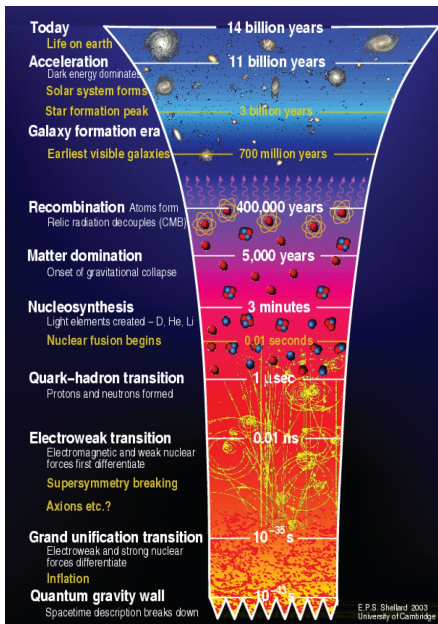


Quoi, c'est ça le Big-Bang? (S. Harris)



# Une dilatation d'échelle





(5) formation des structures (galaxies, étoiles, ...) par la gravitation

(4) "Libération" des photons =  
découplage (à  
~3-400000 ans)  
→ émission du CMB

(3) Nucléosynthèse (de 3 à 30 mn) (→ éléments légers)

(2) expansion "lente" :  
apparition  
de quarks, leptons  
(electrons) puis  
nucléons (p,n)

(1) inflation

(0) état initial (??)

# Si l'univers avait un an

Selon la théorie du Big Bang, notre Univers a environ quinze milliards d'années. Une échelle de temps difficile à appréhender sauf si l'on imagine que l'Univers n'a qu'un an....

1er janvier à 0h 00'



Big Bang

9 septembre



Naissance du système solaire

29 septembre



Premières cellules vivantes

19 décembre



Apparition des plantes

20 décembre



Apparition des poissons

21 décembre



Apparition des insectes

24 décembre



Apparition des dinosaures

26 décembre



Apparition des mammifères

27 décembre



Apparition des oiseaux

28 décembre



Extinction des dinosaures

Quant à l'homme, toute son histoire se déroulerait dans la seule soirée du **31 décembre**

22h 30'



Premiers hommes

23h 59'



Lascaux

23h 59' 50"



Début de la civilisation égyptienne

23h 59' 56"



Naissance du Christ

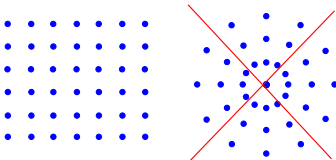
minuit



Début du XX<sup>ème</sup> siècle

# Principes de base

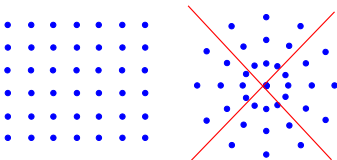
## ① L'univers est homogène



Même "aspect" en n'importe quel point.  
Ex. : distribution spatiale des galaxies

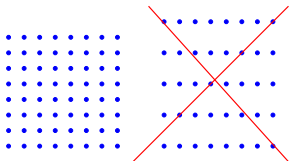
# Principes de base

## 1 L'univers est homogène



Même "aspect" en n'importe quel point.  
Ex. : distribution spatiale des galaxies

## 2 L'univers est isotrope



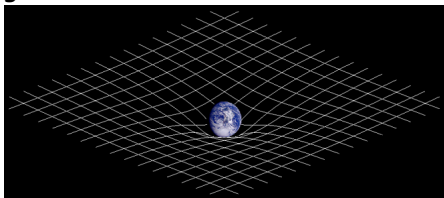
Même "aspect" dans toutes les directions  
Ex. : sources distantes, température du CMB

(1+2 = "Principe cosmologique" - Einstein)

Éléments du modèle :

① **Relativité générale** (Einstein ~ 1917) :

- ▶ description **géométrique** de l'univers ("métrique")
- ▶ équations (dites "d'Einstein") → structure+évolution; incluent la gravitation



② **Thermodynamique & Mécanique quantique** (+Physique Nucléaire et des Particules) → comportement des composants ("équation d'état")

# Géométries possibles de l'univers

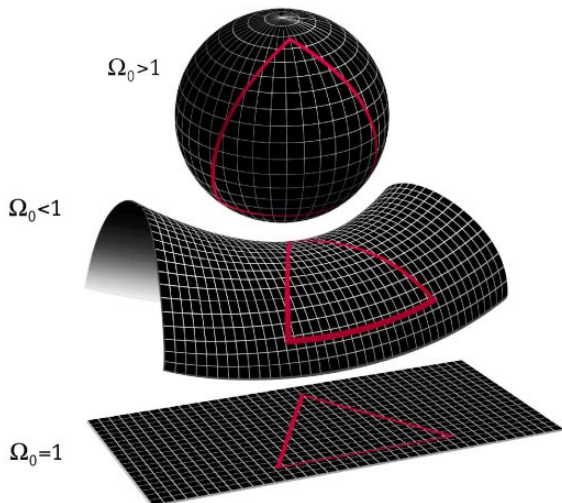
RG  $\Rightarrow$  3 familles d'espaces homogènes & isotropes (indexées par  $k$ )  
A 2 dimensions spatiales (+ le temps) :

- Plan ( $k = 0$ )
- Sphère ( $k = 1$ ) : courbure positive i.e.  
 $\sum(\text{angles d'un triangle}) \geq 180^\circ$
- Plan hyperbolique ( $k = -1$ ) "selle de cheval", courbure négative

géométrie locale sur ces surfaces  $\leftrightarrow$  structure globale

Mêmes catégories à 3 dimensions spatiales

# Géométrie(s) de l'univers (bis)



MAP990006



# Densité critique

Relativité Générale  $\Leftrightarrow$  Description géométrique de la Gravitation  
Lien (quantitatif) entre

- **géométrie (et son évolution)** (macroscopique)
- **densité(s) d'énergie(s)** (microscopique)

Un paramètre cosmo important (parmi  $\sim 10$ ) : **densité totale**  
d'énergie  $\Omega_0 = \frac{\rho_0}{\rho_{critique}}$

$$\Omega_0 = 1 \Leftrightarrow \text{Univers "plat" (euclidien)}$$

$$\Leftrightarrow \rho_0 = \rho_{critique} \sim 10^{-29} \text{ g.cm}^{-3} \sim 1 - 5 m_{proton} \text{ m}^{-3}$$

# Cosmologie "classique"

Si on mesure  $H_0$ ,  $\Omega_0$  et  $\Omega_\Lambda \Rightarrow$  géométrie (courbure) et dynamique de l'univers "déterminés"

$\rightarrow$  tests cosmologiques "classiques" :

- **luminosité apparente de "chandelles standard"** :

luminosité absolue (intrinsèque)  $\mathcal{L}$  connue  $\Rightarrow$  flux apparent

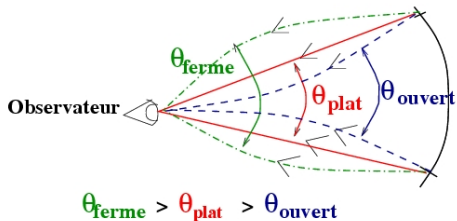
$$\Phi \propto 1/R^2$$

$$\text{Distance de luminosité } d_L^2 = \frac{\mathcal{L}}{4\pi\Phi}$$

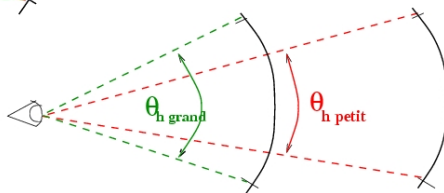
- Taille apparente de "règles standard" ...
- Comptage de galaxies (variation de l'élément de volume)
- ...

Age, taille de l'univers  $\Rightarrow$  cohérence du modèle

## Geometrie de l'Univers et taille angulaire



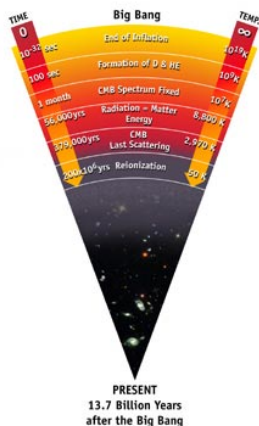
## Effet de l'expansion



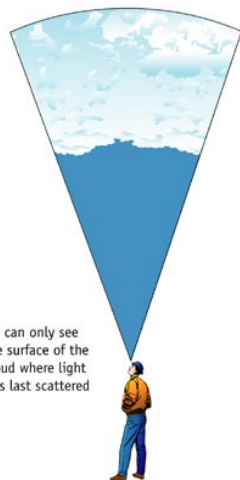
D'après C. Lineweaver

# Emission du CMB

- 1 Univers primordial ( $t < 300000$  ans,  $T > 3000^\circ\text{K}/2700^\circ\text{C}$ )  
électrons, protons (noyaux) et photons/rayonnement
  - ▶ T élevée  $\Rightarrow$  pas d'atomes
  - ▶ photons réfléchis ou absorbés : **Univers opaque**
- 2 Quand  $T \approx 3000^\circ\text{K}$  les électrons se lient aux noyaux  
 $\Rightarrow$  **Univers transparent** :  
émission du CMB
- 3 Expansion de l'univers  $\Rightarrow$   
Décalage vers le rouge  
"cosmologique" :  $T_{\text{CMB}}$   
**apparente**  $\rightarrow 2.7^\circ\text{K}$   $\Rightarrow$  CMB  
dans l'infra-rouge lointain



The cosmic microwave background Radiation's "surface of last scatter" is analogous to the light coming through the clouds to our eye on a cloudy day.



- Prédiction : *G. Gamow* (1948)



- Prédiction : *G. Gamow (1948)*
- Découverte fortuite en 1965 (*Penzias & Wilson*)  
manip "dédiée" en construction!

## DISCOVERY OF COSMIC BACKGROUND



Microwave Receiver



MWP990045

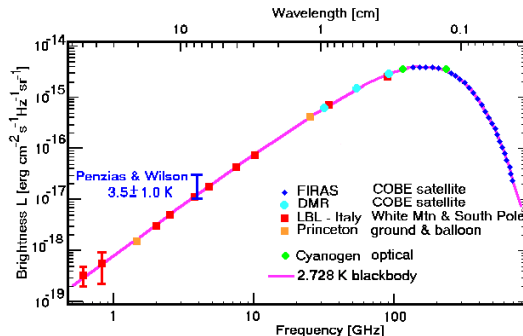
Robert Wilson



Arno Penzias

# Le CMB

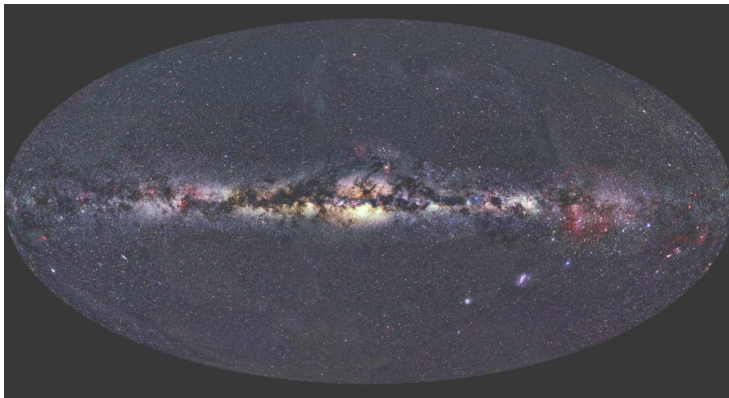
- Prédiction : *G. Gamow (1948)*
- Découverte fortuite en 1965 (*Penzias & Wilson*)
- Rayonnement quasi-**isotrope**



- Spectre = "**corps noir**"
- pic à 100GHz  
TV sat  $\sim 10\text{GHz}$   
portable  $\sim 2.5\text{GHz}$
- 400 photons/ $\text{cm}^3$
- ... qq % du bruit d'une TV

# Des anisotropies dans le CMB!

$T_{CMB}$  dans chaque direction  $\rightarrow$  carte du "ciel" (couleur  $\leftrightarrow$  T)

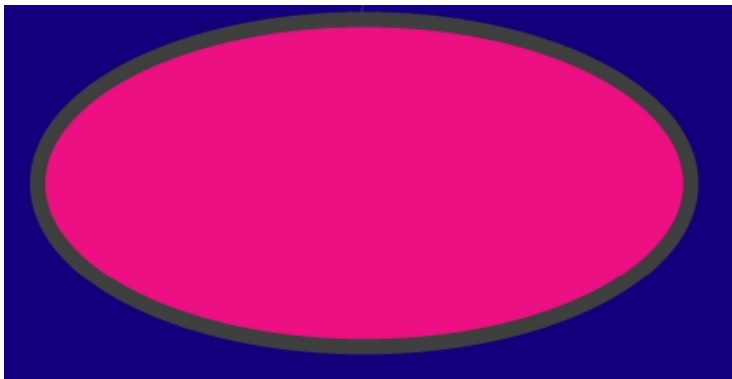


Le ciel nocturne (visible)



# Des anisotropies dans le CMB!

$T_{CMB}$  dans chaque direction  $\rightarrow$  carte du "ciel" (couleur  $\leftrightarrow$  T)

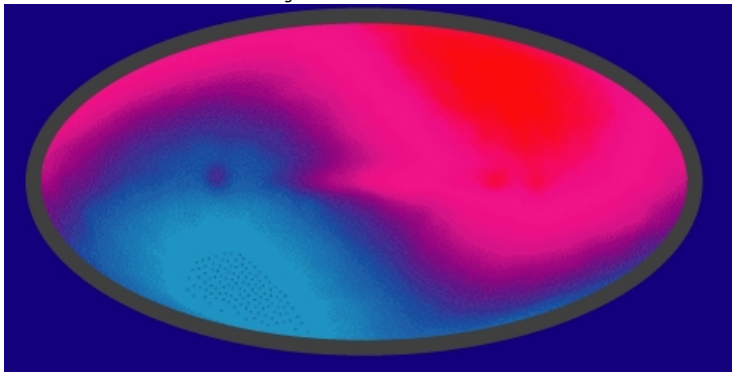


*CMB très uniforme (à 1/1000 près)*

# Des anisotropies dans le CMB!

$T_{CMB}$  dans chaque direction  $\rightarrow$  carte du "ciel" (couleur  $\leftrightarrow$  T)

rouge  $\leftrightarrow$  chaud ; bleu  $\leftrightarrow$  froid



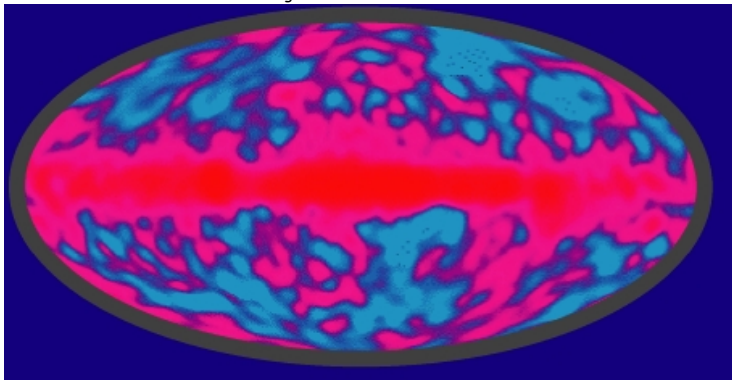
$$(\delta T/T \sim 10^{-3})$$

mvt de la Terre  $\Rightarrow$  effet Doppler  
 $\sim 400$  km/s ( $\sim$  mvt orbital galactique)

# Des anisotropies dans le CMB!

$T_{CMB}$  dans chaque direction  $\rightarrow$  carte du "ciel" (couleur  $\leftrightarrow$  T)

rouge  $\leftrightarrow$  chaud; bleu  $\leftrightarrow$  froid

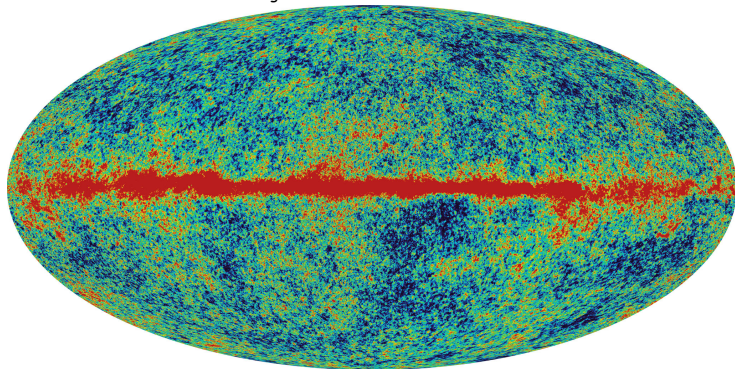


Fluctuations primordiales ( $\delta T/T \sim 10^{-5}$ ) + Galaxie  
COBE (1992)

# Des anisotropies dans le CMB!

$T_{CMB}$  dans chaque direction  $\rightarrow$  carte du "ciel" (couleur  $\leftrightarrow$  T)

rouge  $\leftrightarrow$  chaud; bleu  $\leftrightarrow$  froid

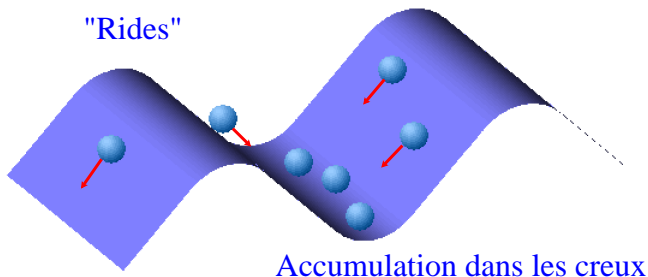


Fluctuations primordiales ( $\delta T/T \sim 10^{-5}$ ) + Galaxie  
WMAP (2003)

# Des fluctuations aux anisotropies

*Ou comment naissent les structures*

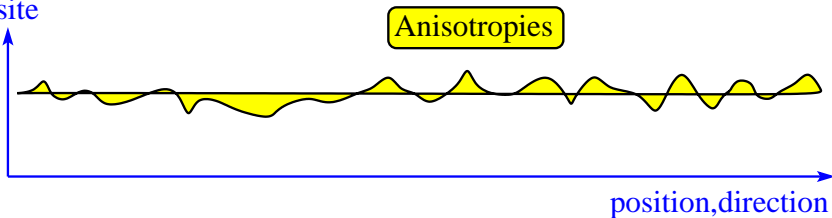
- Dans l'univers "quantique"  $\Rightarrow$  fluctuations de densité ( $d = f(x, t)$ )
  - Inflation  $\Rightarrow$  dilatation très rapide
- $\Rightarrow$  "gel" des fluctuations  $\rightarrow$  anisotropies de densité  
**graines** des grandes structures (amas, galaxies,...)



# Le plasma primordial

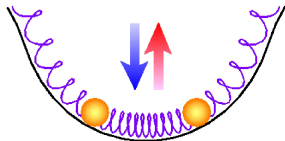
- milieu composé de protons (+ qq noyaux He,...), d'électrons ("libres") et de photons (rayonnement) : **plasma**
  - ▶ composante dominante = le rayonnement (photons)
  - ▶ interaction (électromagnétique) entre photons et électrons/protons
  - ▶  $\Rightarrow$  pression "de radiation"
- milieu "**presque**" isotrope

température,  
densité

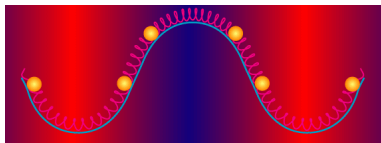


# Des ondes acoustiques

- la matière "tombe" vers les sur-densités (gravitation)
- ... mais la pression réagit



⇒ apparition d'oscillations (**ondes acoustiques**) ds le plasma primordial (Vitesse des ondes  $\leftrightarrow$  composition, densité du milieu, ... )

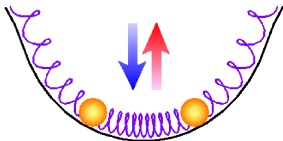


▶ Replay

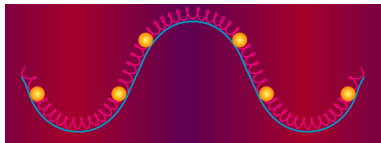
- ⇒ anisotropies de température

# Des ondes acoustiques

- la matière "tombe" vers les sur-densités (gravitation)
- ... mais la pression réagit



⇒ apparition d'oscillations (**ondes acoustiques**) ds le plasma primordial (Vitesse des ondes  $\leftrightarrow$  composition, densité du milieu, ... )



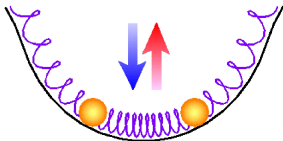
▶ Replay

- ⇒ anisotropies de température

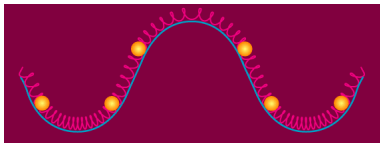


# Des ondes acoustiques

- la matière "tombe" vers les sur-densités (gravitation)
- ... mais la pression réagit



⇒ apparition d'oscillations (**ondes acoustiques**) ds le plasma primordial (Vitesse des ondes  $\leftrightarrow$  composition, densité du milieu, ... )

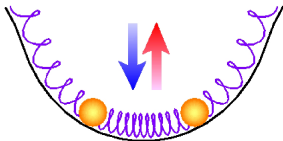


▶ Replay

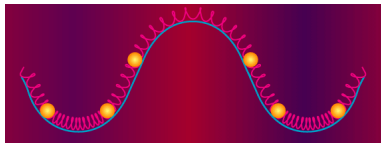
- ⇒ anisotropies de température

# Des ondes acoustiques

- la matière "tombe" vers les sur-densités (gravitation)
- ... mais la pression réagit



⇒ apparition d'oscillations (**ondes acoustiques**) ds le plasma primordial (Vitesse des ondes  $\leftrightarrow$  composition, densité du milieu, ... )

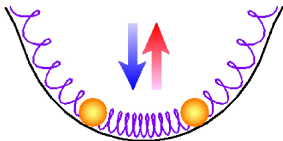


▶ Replay

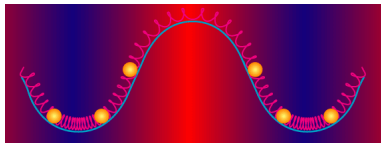
- ⇒ anisotropies de température

# Des ondes acoustiques

- la matière "tombe" vers les sur-densités (gravitation)
- ... mais la pression réagit



⇒ apparition d'oscillations (**ondes acoustiques**) ds le plasma primordial (Vitesse des ondes  $\leftrightarrow$  composition, densité du milieu, ... )

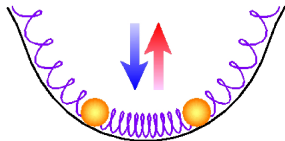


▶ Replay

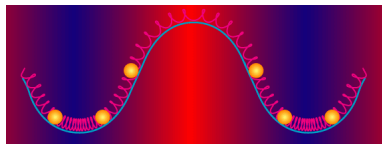
- ⇒ anisotropies de température

# Des ondes acoustiques

- la matière "tombe" vers les sur-densités (gravitation)
- ... mais la pression réagit



⇒ apparition d'oscillations (**ondes acoustiques**) ds le plasma primordial (Vitesse des ondes  $\leftrightarrow$  composition, densité du milieu, ... )

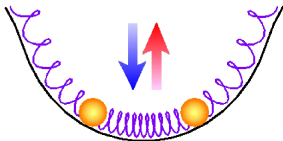


▶ Replay

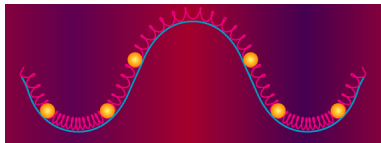
- ⇒ anisotropies de température

# Des ondes acoustiques

- la matière "tombe" vers les sur-densités (gravitation)
- ... mais la pression réagit



⇒ apparition d'oscillations (**ondes acoustiques**) ds le plasma primordial (Vitesse des ondes  $\leftrightarrow$  composition, densité du milieu, ... )

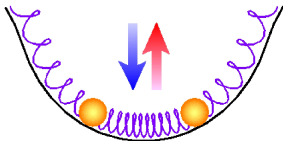


▶ Replay

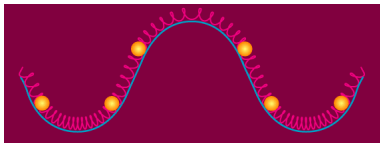
- ⇒ anisotropies de température

# Des ondes acoustiques

- la matière "tombe" vers les sur-densités (gravitation)
- ... mais la pression réagit



⇒ apparition d'oscillations (**ondes acoustiques**) ds le plasma primordial (Vitesse des ondes  $\leftrightarrow$  composition, densité du milieu, ... )

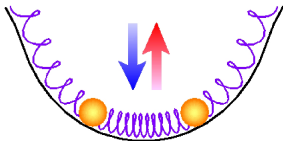


▶ Replay

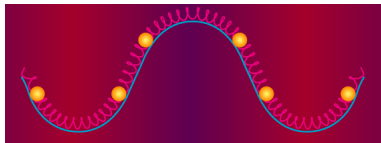
- ⇒ anisotropies de température

# Des ondes acoustiques

- la matière "tombe" vers les sur-densités (gravitation)
- ... mais la pression réagit



⇒ apparition d'oscillations (**ondes acoustiques**) ds le plasma primordial (Vitesse des ondes  $\leftrightarrow$  composition, densité du milieu, ... )

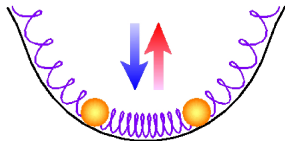


▶ Replay

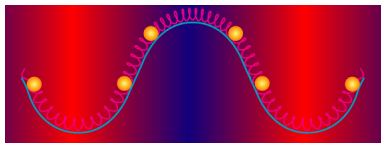
- ⇒ anisotropies de température

# Des ondes acoustiques

- la matière "tombe" vers les sur-densités (gravitation)
- ... mais la pression réagit



⇒ apparition d'oscillations (**ondes acoustiques**) ds le plasma primordial (Vitesse des ondes  $\leftrightarrow$  composition, densité du milieu, ... )



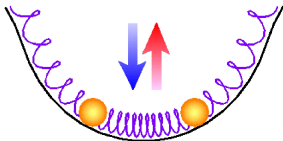
▶ Replay

- ⇒ anisotropies de température

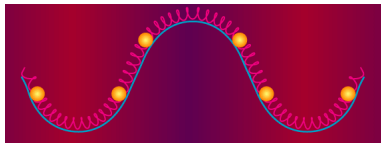


# Des ondes acoustiques

- la matière "tombe" vers les sur-densités (gravitation)
- ... mais la pression réagit



⇒ apparition d'oscillations (**ondes acoustiques**) ds le plasma primordial (Vitesse des ondes  $\leftrightarrow$  composition, densité du milieu, ... )

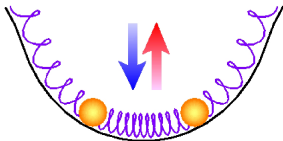


▶ Replay

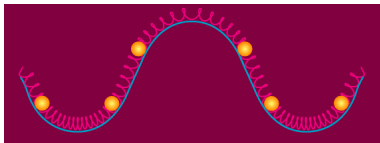
- ⇒ anisotropies de température

# Des ondes acoustiques

- la matière "tombe" vers les sur-densités (gravitation)
- ... mais la pression réagit



⇒ apparition d'oscillations (**ondes acoustiques**) ds le plasma primordial (Vitesse des ondes  $\leftrightarrow$  composition, densité du milieu, ... )

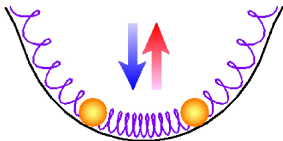


▶ Replay

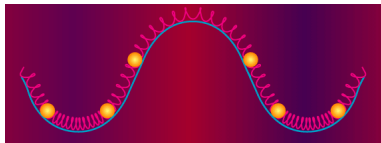
- ⇒ anisotropies de température

# Des ondes acoustiques

- la matière "tombe" vers les sur-densités (gravitation)
- ... mais la pression réagit



⇒ apparition d'oscillations (**ondes acoustiques**) ds le plasma primordial (Vitesse des ondes  $\leftrightarrow$  composition, densité du milieu, ... )

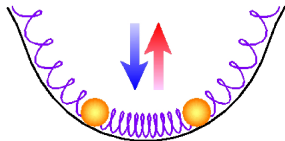


▶ Replay

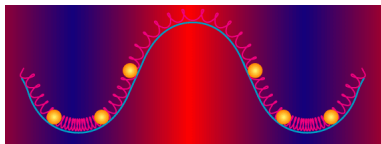
- ⇒ anisotropies de température

# Des ondes acoustiques

- la matière "tombe" vers les sur-densités (gravitation)
- ... mais la pression réagit



⇒ apparition d'oscillations (**ondes acoustiques**) ds le plasma primordial (Vitesse des ondes  $\leftrightarrow$  composition, densité du milieu, ... )

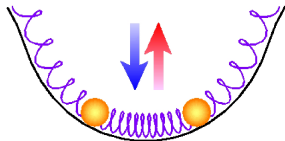


▶ Replay

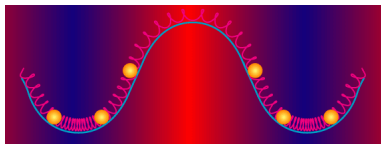
- ⇒ anisotropies de température

# Des ondes acoustiques

- la matière "tombe" vers les sur-densités (gravitation)
- ... mais la pression réagit



⇒ apparition d'oscillations (**ondes acoustiques**) ds le plasma primordial (Vitesse des ondes  $\leftrightarrow$  composition, densité du milieu, ... )

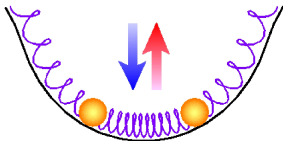


▶ Replay

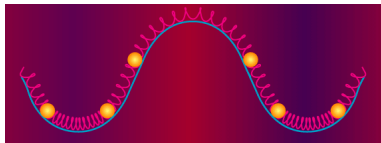
- ⇒ anisotropies de température

# Des ondes acoustiques

- la matière "tombe" vers les sur-densités (gravitation)
- ... mais la pression réagit



⇒ apparition d'oscillations (**ondes acoustiques**) ds le plasma primordial (Vitesse des ondes  $\leftrightarrow$  composition, densité du milieu, ... )

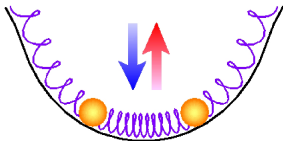


▶ Replay

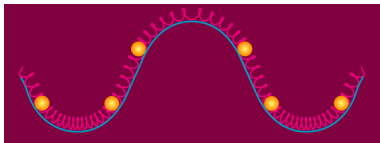
- ⇒ anisotropies de température

# Des ondes acoustiques

- la matière "tombe" vers les sur-densités (gravitation)
- ... mais la pression réagit



⇒ apparition d'oscillations (**ondes acoustiques**) ds le plasma primordial (Vitesse des ondes  $\leftrightarrow$  composition, densité du milieu, ... )

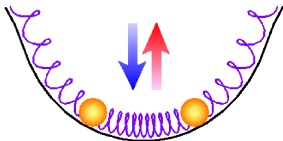


▶ Replay

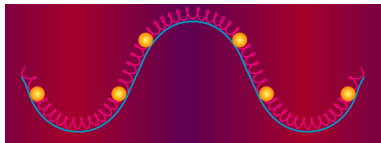
- ⇒ anisotropies de température

# Des ondes acoustiques

- la matière "tombe" vers les sur-densités (gravitation)
- ... mais la pression réagit



⇒ apparition d'oscillations (**ondes acoustiques**) ds le plasma primordial (Vitesse des ondes  $\leftrightarrow$  composition, densité du milieu, ... )



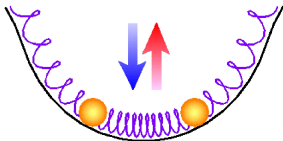
▶ Replay

- ⇒ anisotropies de température

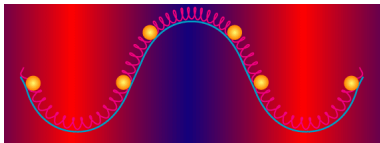


# Des ondes acoustiques

- la matière "tombe" vers les sur-densités (gravitation)
- ... mais la pression réagit



⇒ apparition d'oscillations (**ondes acoustiques**) ds le plasma primordial (Vitesse des ondes  $\leftrightarrow$  composition, densité du milieu, ... )

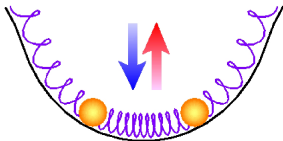


▶ Replay

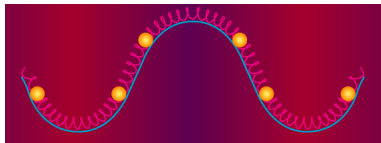
- ⇒ anisotropies de température

# Des ondes acoustiques

- la matière "tombe" vers les sur-densités (gravitation)
- ... mais la pression réagit



⇒ apparition d'oscillations (**ondes acoustiques**) ds le plasma primordial (Vitesse des ondes  $\leftrightarrow$  composition, densité du milieu, ... )

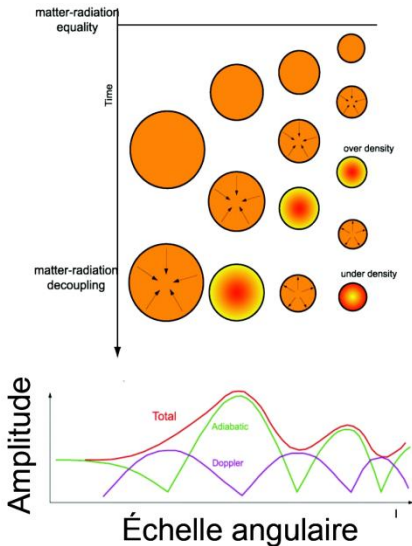


▶ Replay

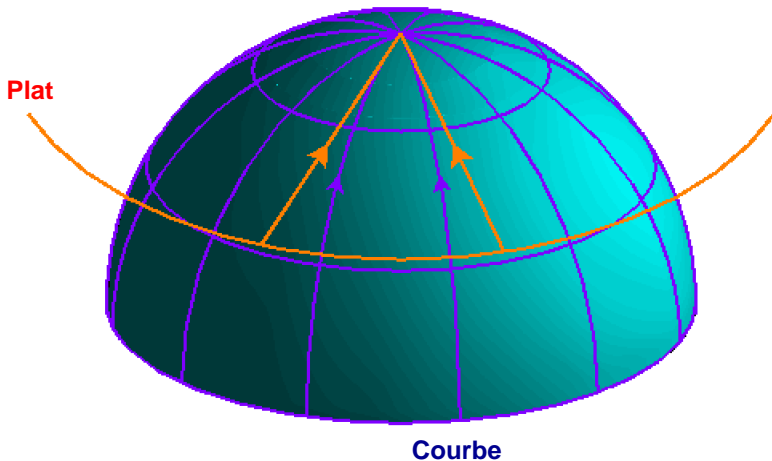
- ⇒ anisotropies de température

# Formation du spectre de puissance

- Début de l'évolution quand  $\rho(\text{matière}) \sim \rho(\text{rayonnement})$  (équivalence)
- petites structures commencent à évoluer "plus tôt" ( $\exists$  lien causal)
- temps total fixé (par l'expansion)
- au **découplage**  $\Rightarrow$  arrêt des oscillations
- état final : pics dans le spectre de puissance (amplitude des structures vs taille angulaire)

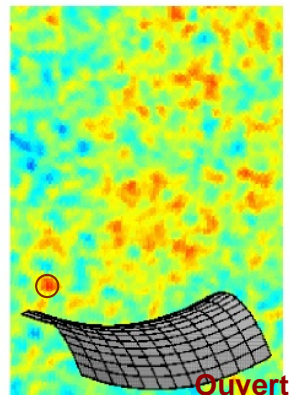
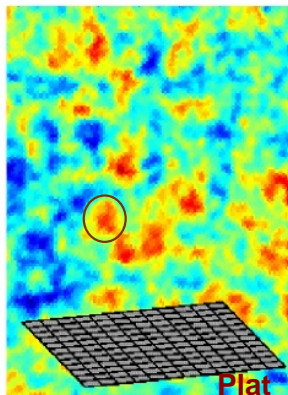
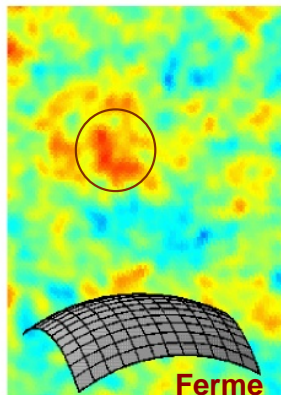


# Propagation du CMB



La taille (apparente) angulaire des anisotropies est modulée par la géométrie de l'Univers

# Géométries et anisotropies



Cartes simulées : même surface du ciel ( $\sim 100 \text{ deg}^2$ ) observée dans 3 géométries différentes

# Statistique des anisotropies

Décomposition de  $\delta T/T(\theta, \varphi)$  sur la base des harmoniques sphériques

$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \varphi) = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{m=\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta, \varphi)$$

⇒ Spectre de puissance

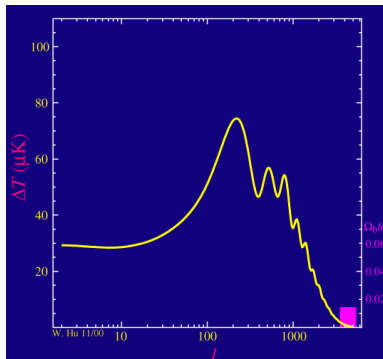
$$C_{\ell} = \langle |a_{\ell m}|^2 \rangle = \frac{1}{\ell+1} \sum_m |a_{\ell m}|^2$$

contient toute l'information *si* statistique des  $a_{\ell m}$  gaussienne

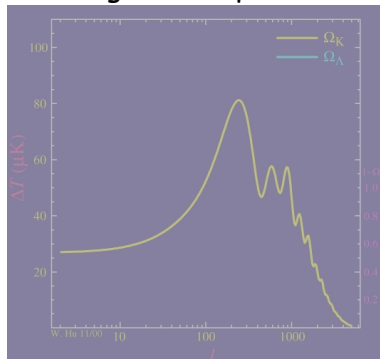


# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



► Replay

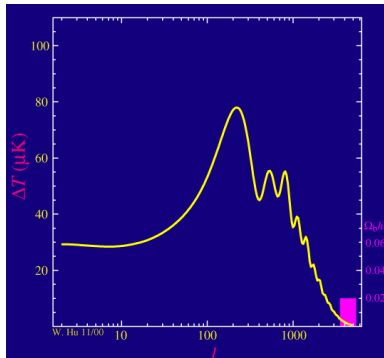


► Replay

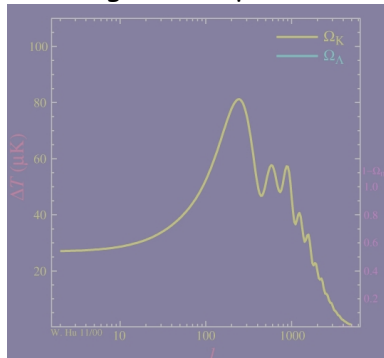


# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



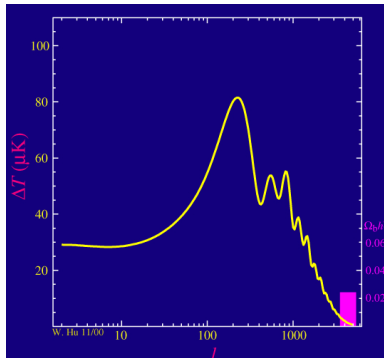
► Replay



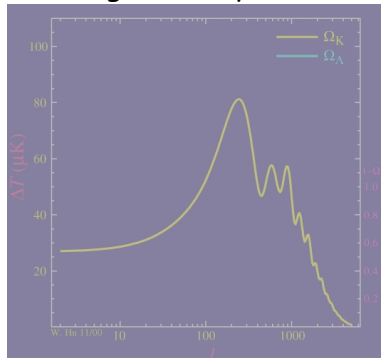
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



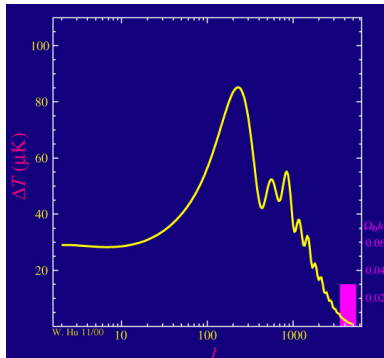
► Replay



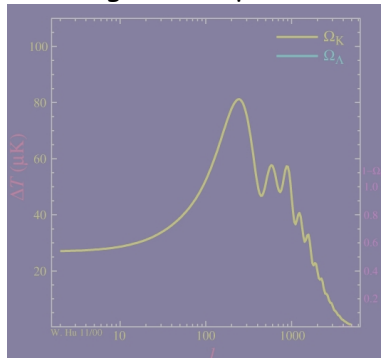
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



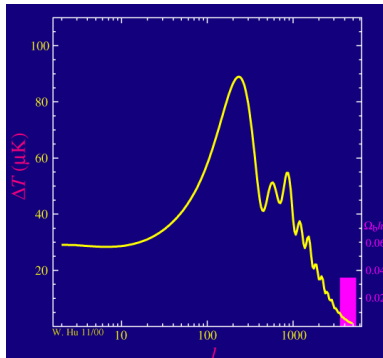
► Replay



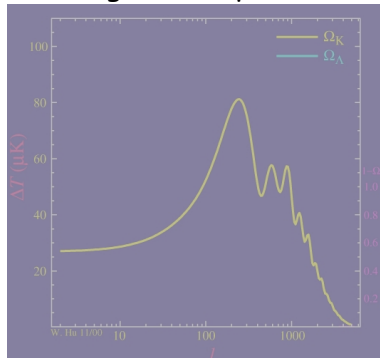
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



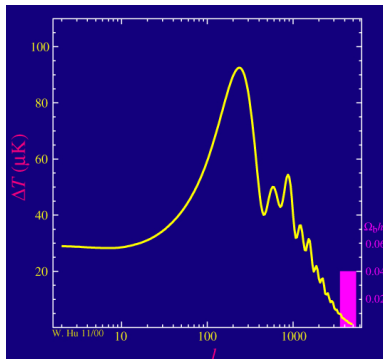
► Replay



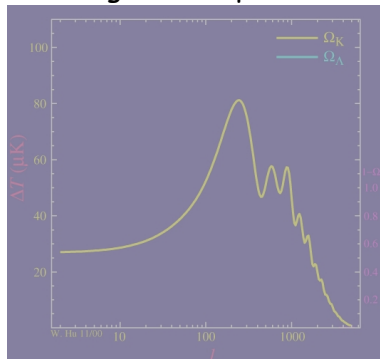
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



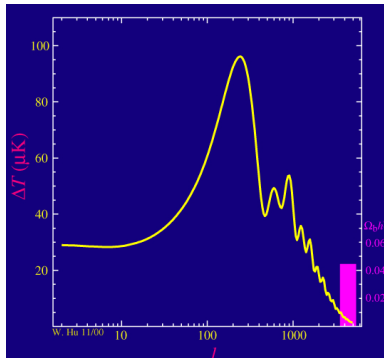
► Replay



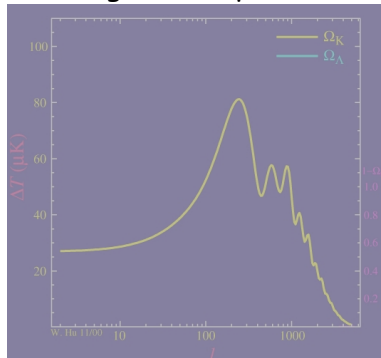
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



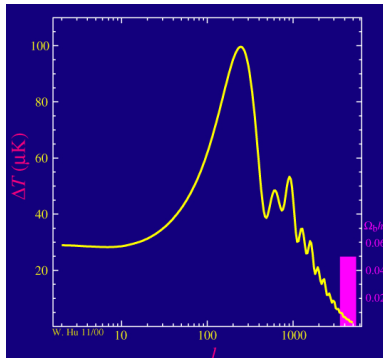
► Replay



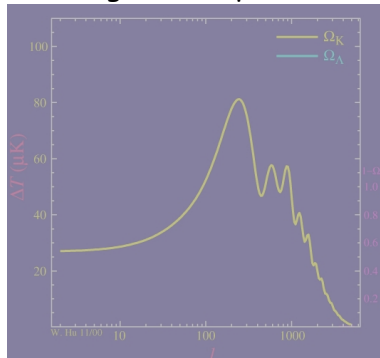
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



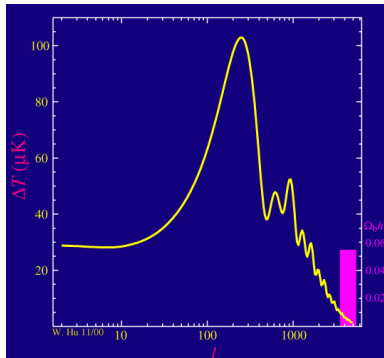
► Replay



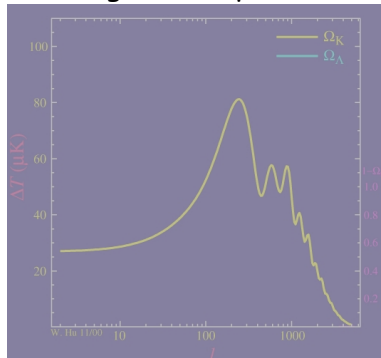
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



► Replay

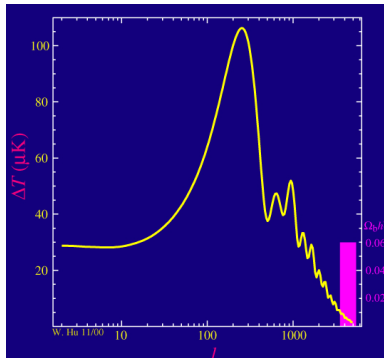


► Replay

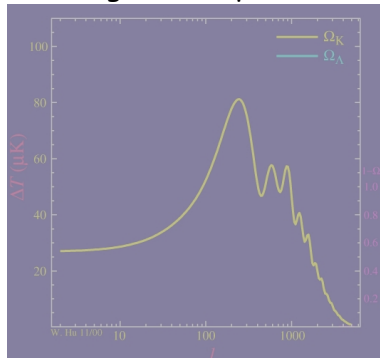


# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



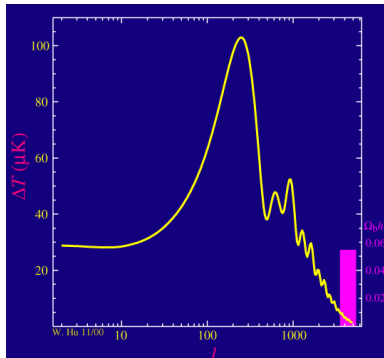
► Replay



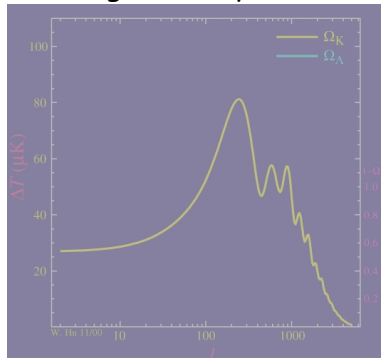
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



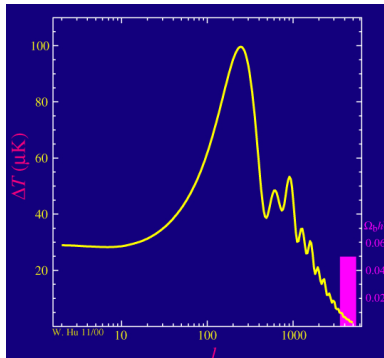
► Replay



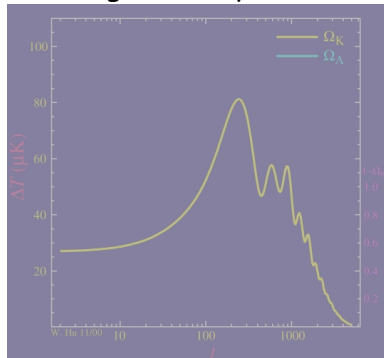
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



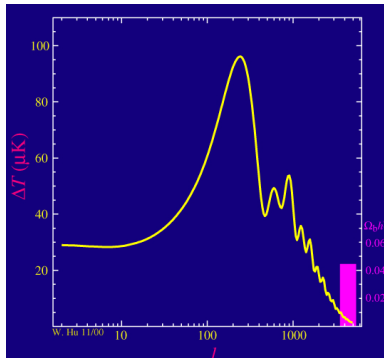
► Replay



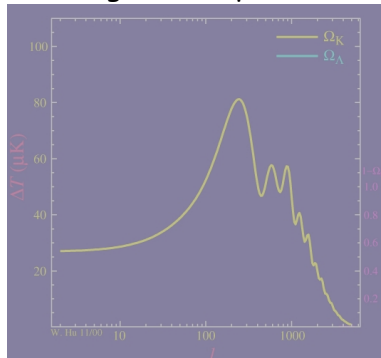
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



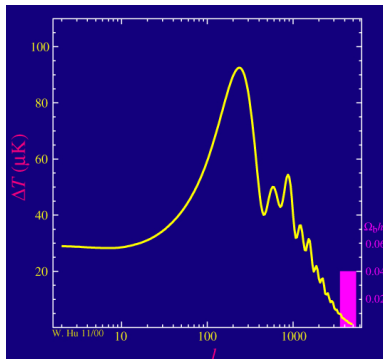
► Replay



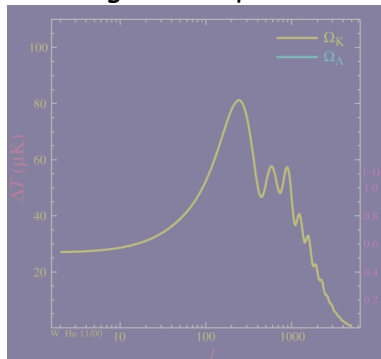
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



► Replay

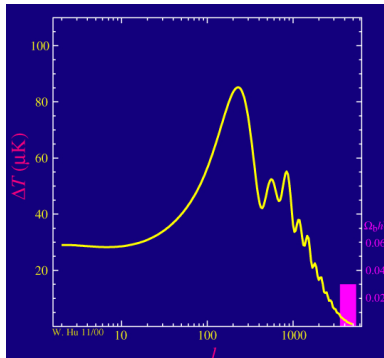


► Replay

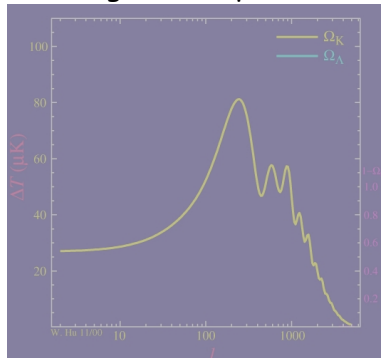


# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



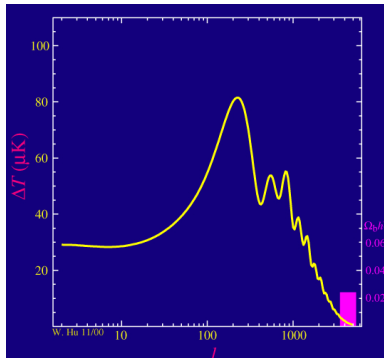
► Replay



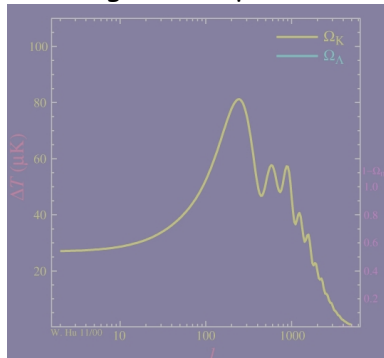
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



► Replay

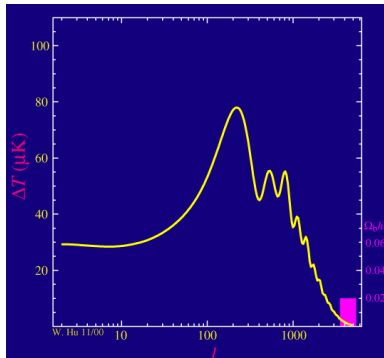


► Replay

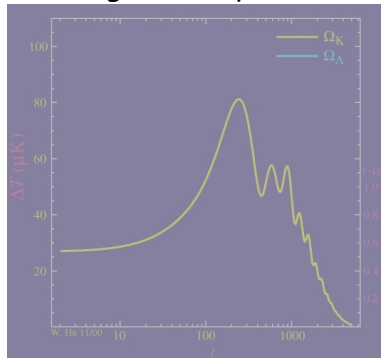


# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



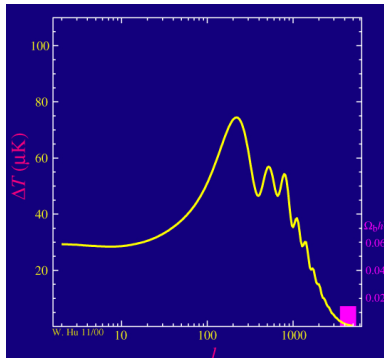
▶ Replay



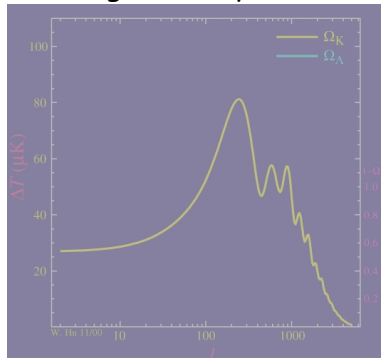
▶ Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



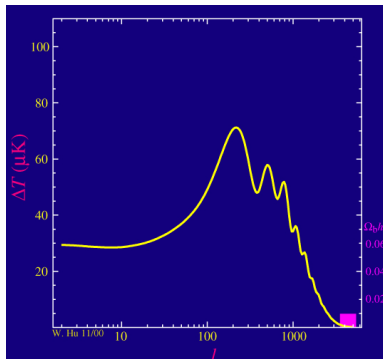
► Replay



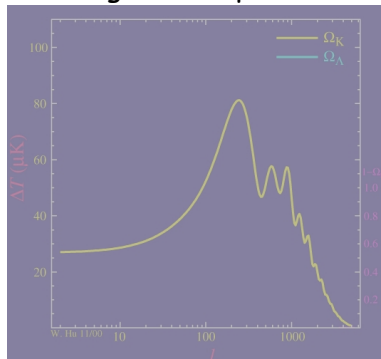
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



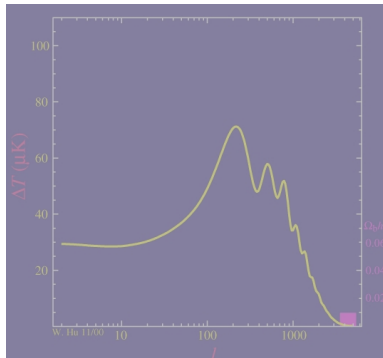
► Replay



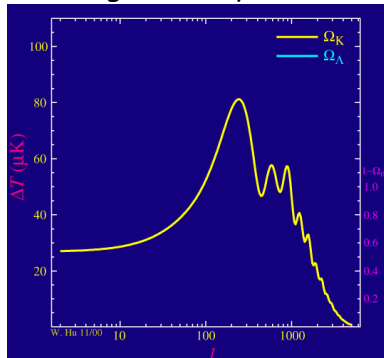
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



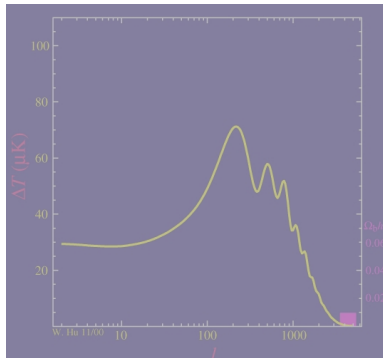
► Replay



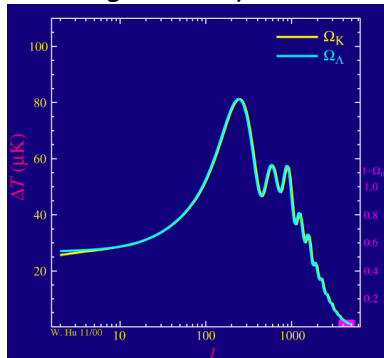
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



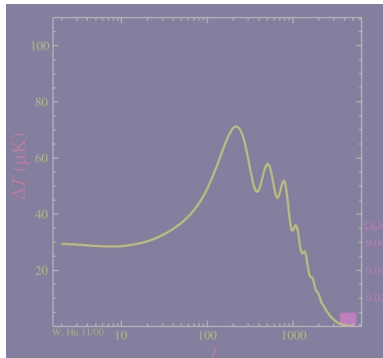
► Replay



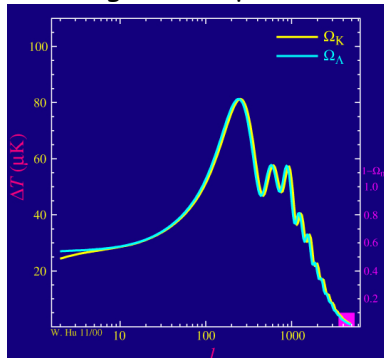
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



► Replay



► Replay



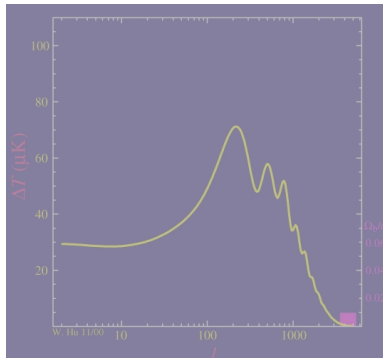




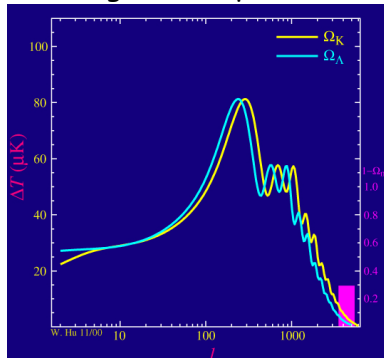


# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



► Replay

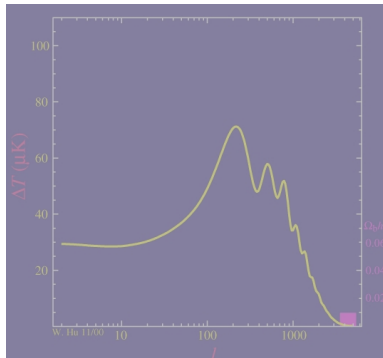


► Replay

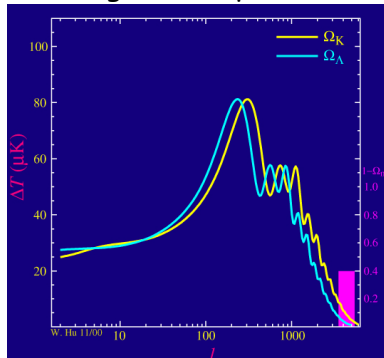


# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



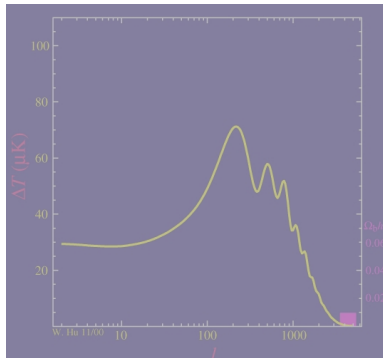
► Replay



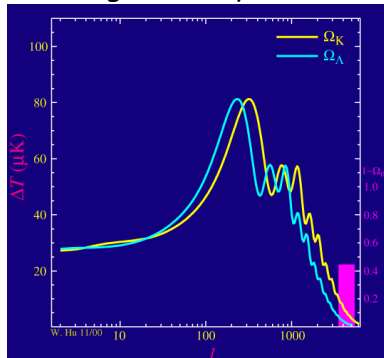
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



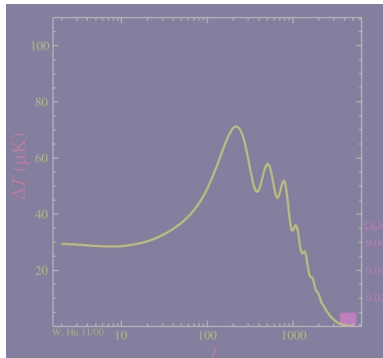
► Replay



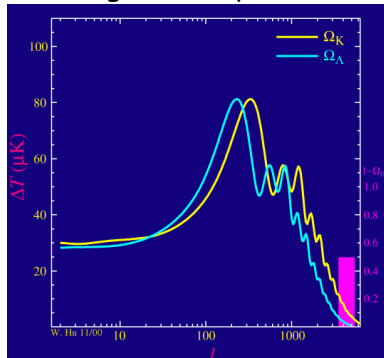
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



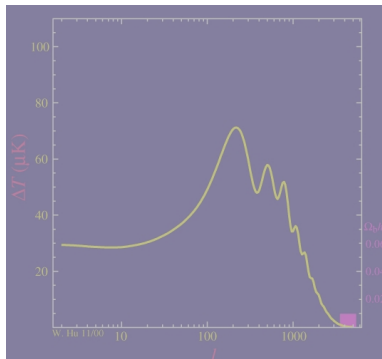
► Replay



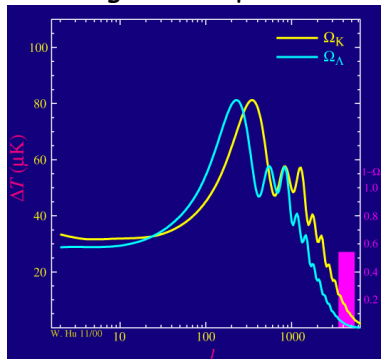
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



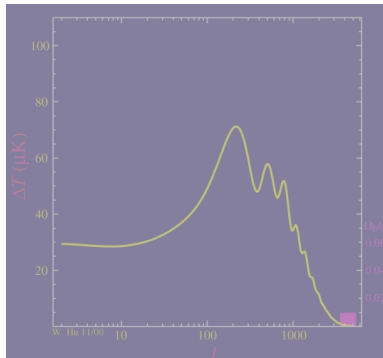
► Replay



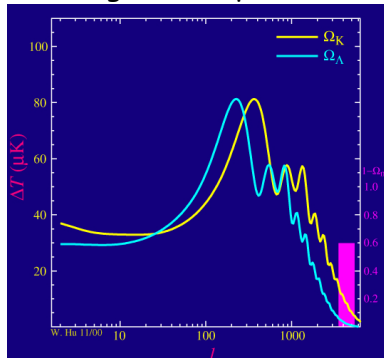
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



► Replay

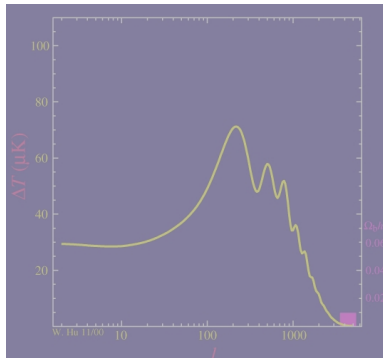


► Replay

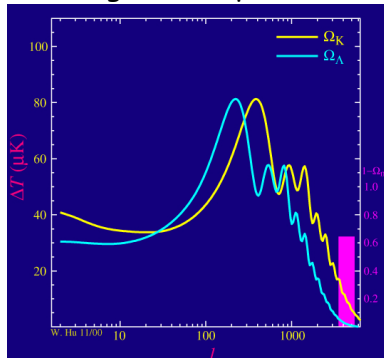


# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



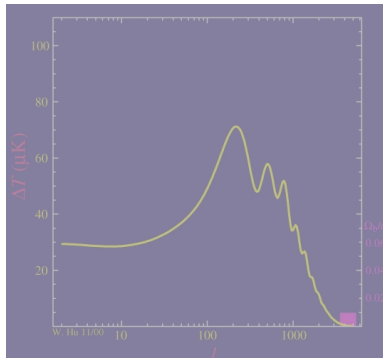
► Replay



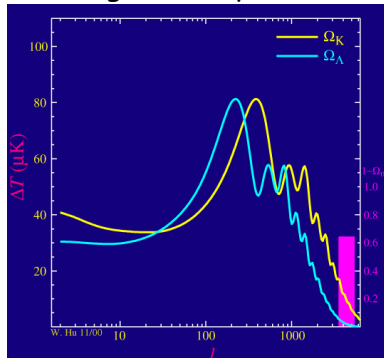
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



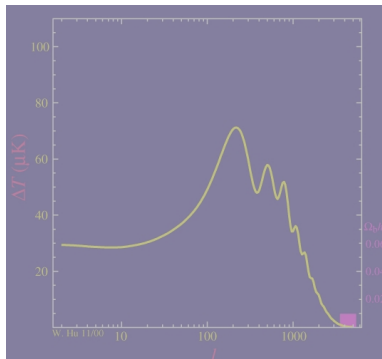
► Replay



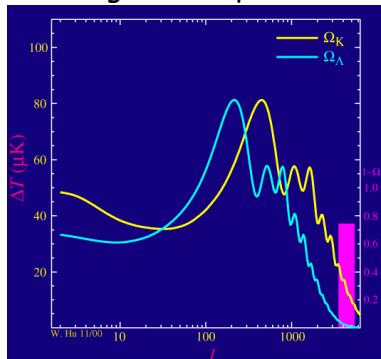
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



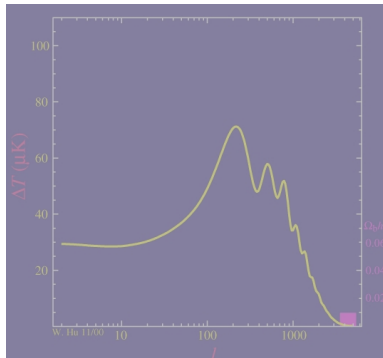
► Replay



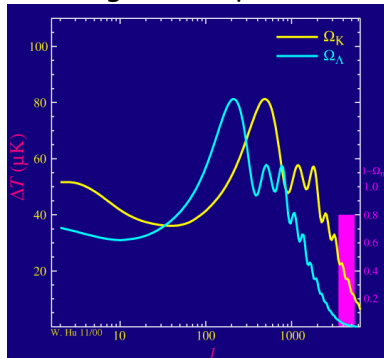
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



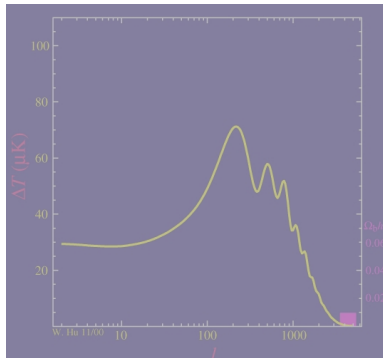
► Replay



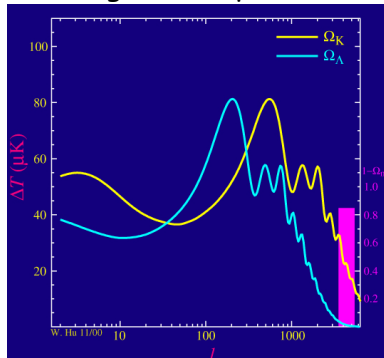
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



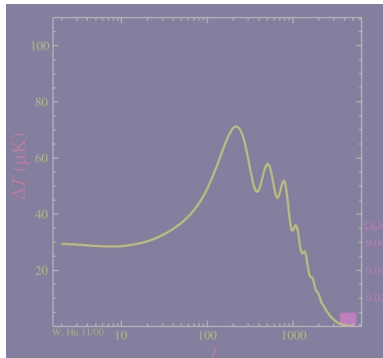
► Replay



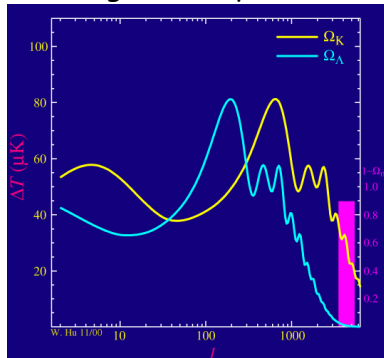
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



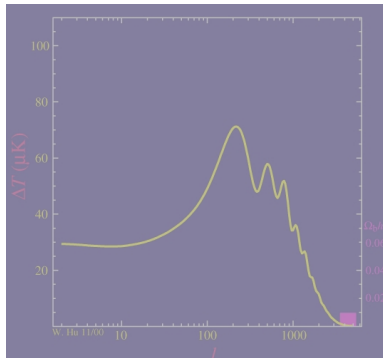
► Replay



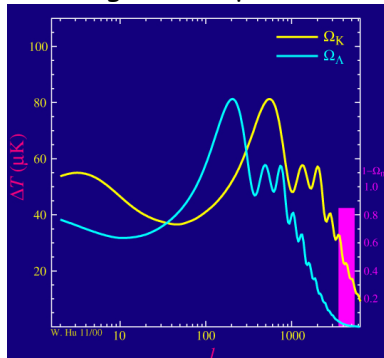
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



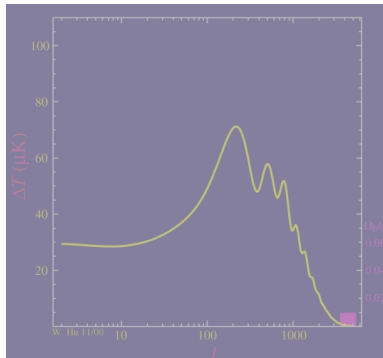
► Replay



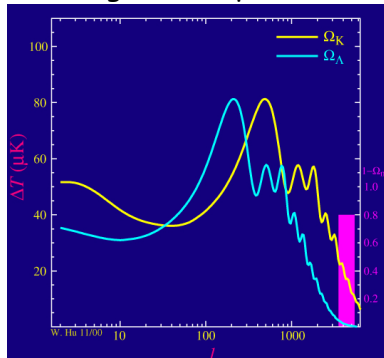
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



► Replay

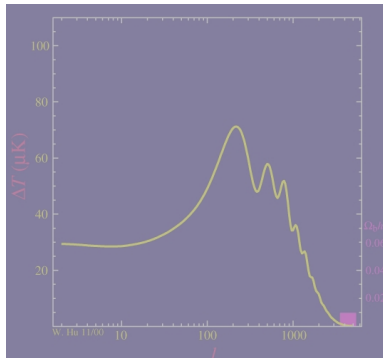


► Replay

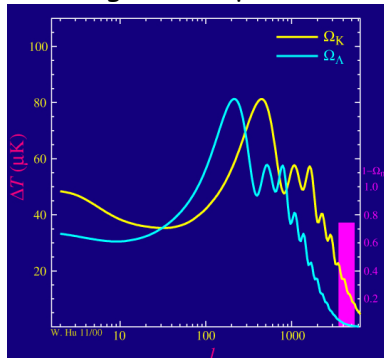


# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



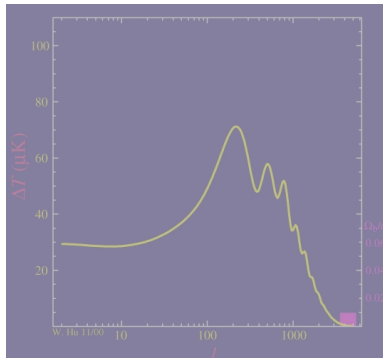
► Replay



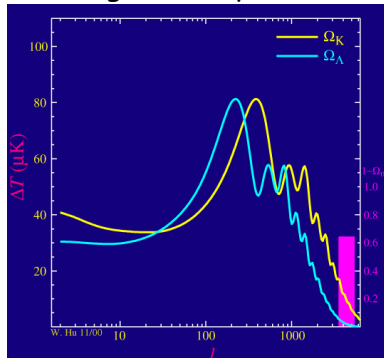
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



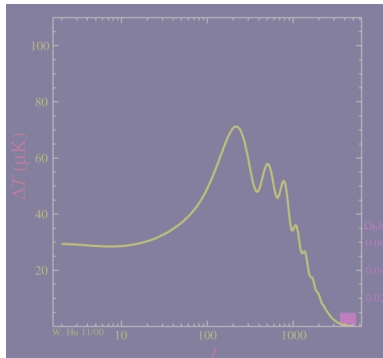
► Replay



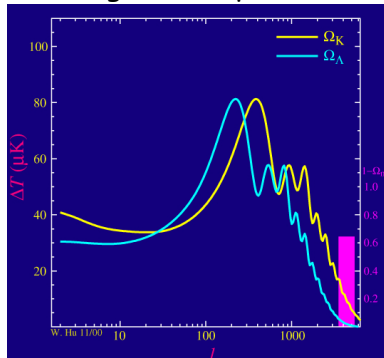
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



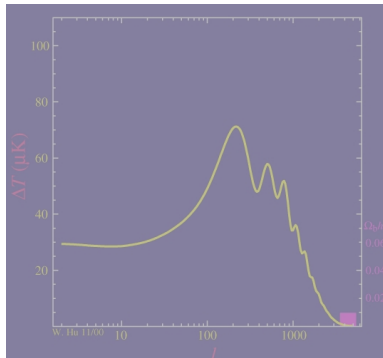
► Replay



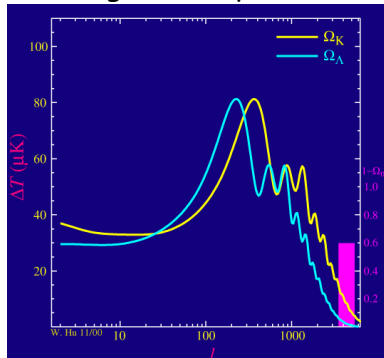
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



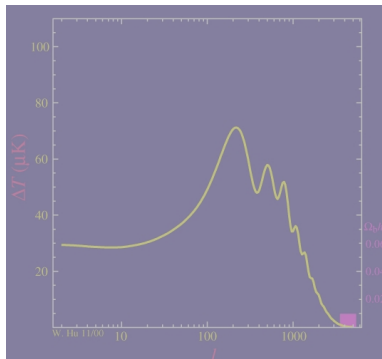
► Replay



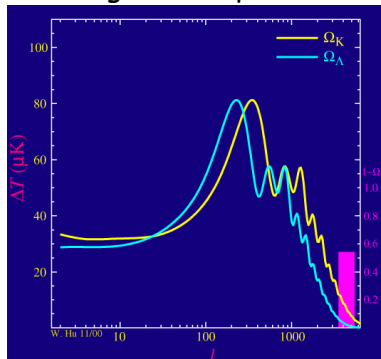
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



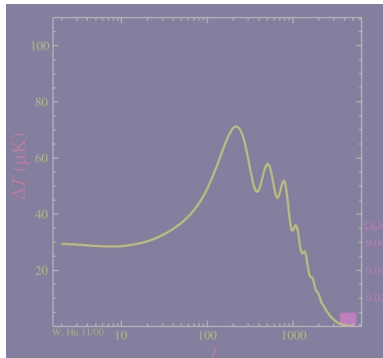
► Replay



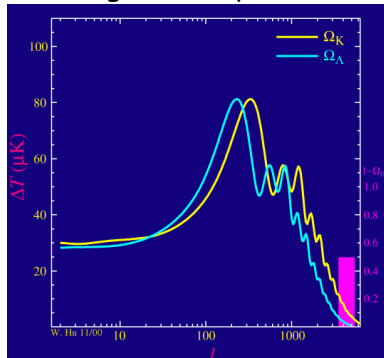
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



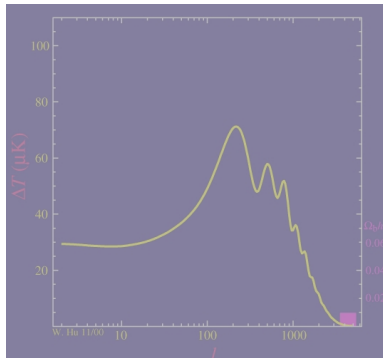
► Replay



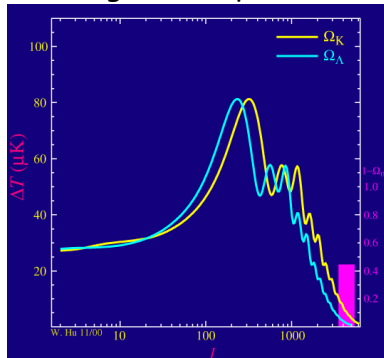
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



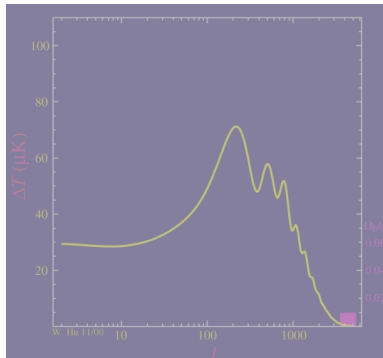
► Replay



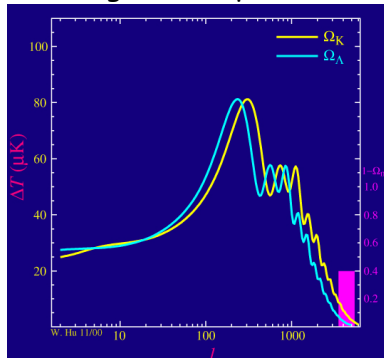
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



► Replay



► Replay







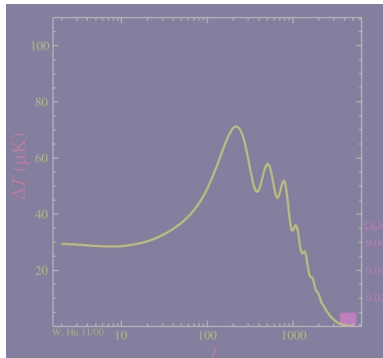




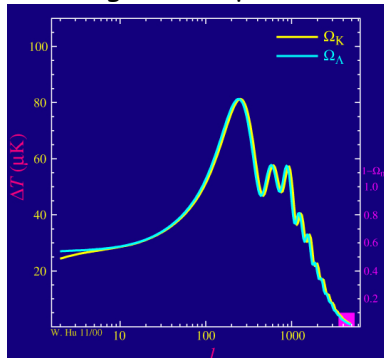


# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



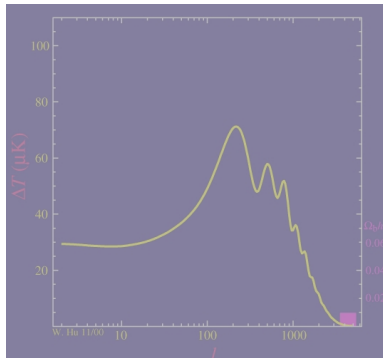
► Replay



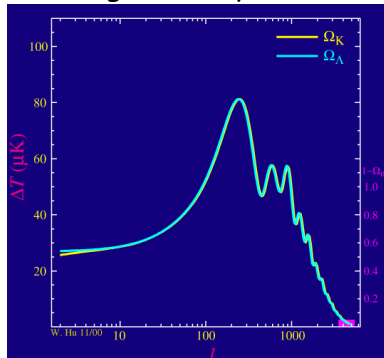
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



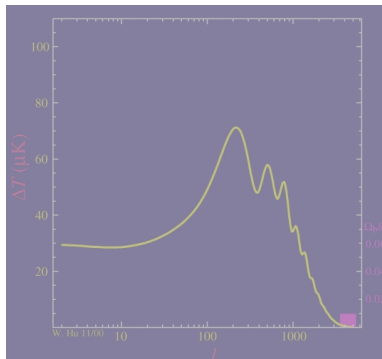
► Replay



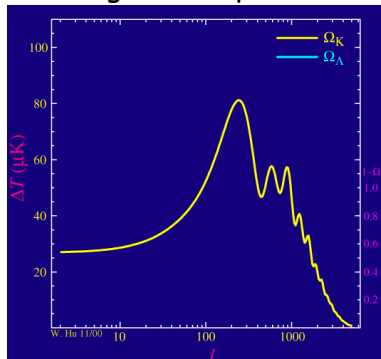
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



► Replay



► Replay



# Une mesure de ... tout!?

Les anisotropies du CMB combinent :

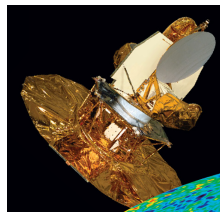
- 1 des informations "pre" ou sur l'**inflation** (modes B de polarisation)
- 2 des manifestation de la physique ("simple") du plasma primordial (**ondes acoustiques**) et de ses paramètres
- 3 les effets de la **géométrie** de l'univers
- 4 ... des indications sur l'inflation?

Il s'agit donc d'une mesure clef de la cosmologie (sensible à  $\sim$  tous les paramètres!)

# Aperçu expérimental

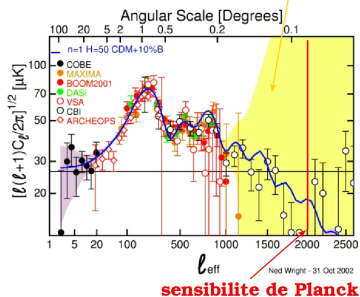
- COBE-DMR (1992) anisotropies (radio, espace)
- Boomerang, Maxima (1998, ballon + bolomètres) : 1eres mesures de  $\Omega_0$  avec le CMB
- Archéops (2002) (ballon + bolomètres)
- CBI, VSA, DASI (interférométrie radio, sol, 2000-2) : petites échelles
- WMAP 2003(-7-?) (radio, espace)  
Mesures de  $\delta T/T$  jusqu'à 0.4-0.3 deg (0.2 ultimement)
- Boomerang-pol/B2k, MAXI-Pol (2000-3, bolomètres + ballon) : mesures des anisotropies de polarisation
- Planck 2007(-8)  $\delta T/T \rightarrow \sim .1deg$

COBE×1000, WMAP×10, "cosmologie au pourcent"

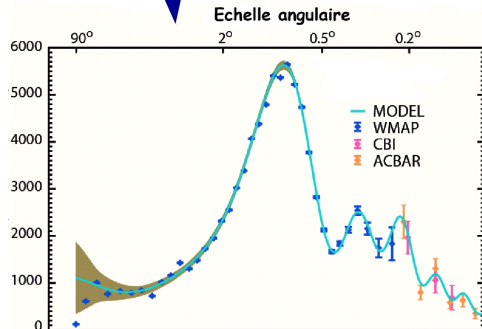


# Les $C_\ell$ hier et aujourd'hui

sensibilite (prevue) de WMAP



Resultats de WMAP



# Planck

missions de l'ESA

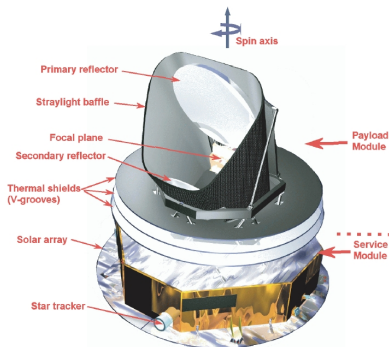
Lancement : 06/05/2009 (?)

(avec Hershell)

Durée garantie : 14 mois (2 sur-veys) @ L2 (1.5Mkm)

- 1 Telescope (1.5m) - consortium danois
- 2 LFI (HEMTS 30-70GHz, beam 10-25 arcmin) - consortium coordonné par U. Bologna
- 3 HFI (bolomètres 100-857 GHz, beam 10-5 arcmin) - consortium dirigé par l'IAS (PI J.L. Puget); instituts Ca, CH, Ge, Fr, Irl, It, NL, Sp, US, UK  
concepts testé par Archéops

Coût : ~ 600Meuros  
(HFI ~ 150Meuros)



# Planck

missions de l'ESA

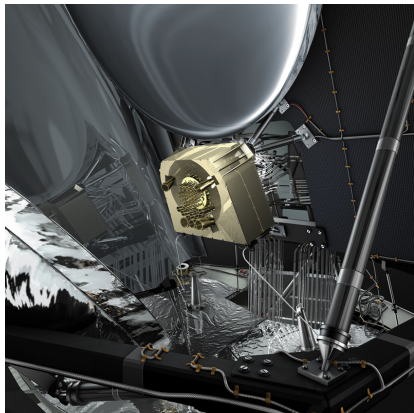
Lancement : 06/05/2009 (?)

(avec Herschell)

Durée garantie : 14 mois (2 surveys) @ L2 (1.5Mkm)

- 1 Telescope (1.5m) - consortium danois
- 2 LFI (HEMTS 30-70GHz, beam 10-25 arcmin) - consortium coordonné par U. Bologna
- 3 HFI (bolomètres 100-857 GHz, beam 10-5 arcmin) - consortium dirigé par l'IAS (PI J.L. Puget); instituts Ca, CH, Ge, Fr, Irl, It, NL, Sp, US, UK  
concepts testé par Archéops

Coût : ~ 600Meuros  
(HFI ~ 150Meuros)



missions de l'ESA

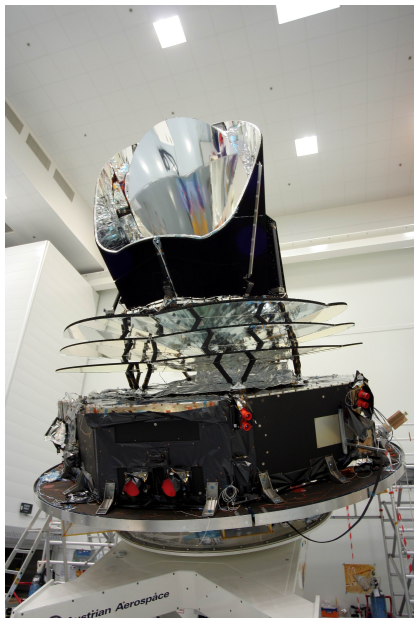
Lancement : 06/05/2009 (?)

(avec Herschell)

Durée garantie : 14 mois (2 surveys) @ L2 (1.5Mkm)

- 1 Telescope (1.5m) - consortium danois
- 2 LFI (HEMTS 30-70GHz, beam 10-25 arcmin) - consortium coordonné par U. Bologna
- 3 HFI (bolomètres 100-857 GHz, beam 10-5 arcmin) - consortium dirigé par l'IAS (PI J.L. Puget); instituts Ca, CH, Ge, Fr, Irl, It, NL, Sp, US, UK  
concepts testé par Archéops

Coût : ~ 600Meuros  
(HFI ~ 150Meuros)



missions de l'ESA

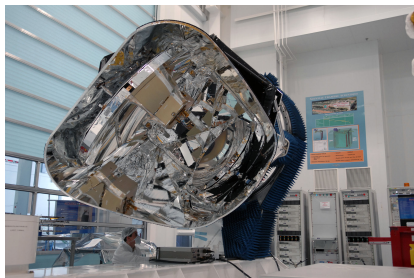
Lancement : 06/05/2009 (?)

(avec Hershell)

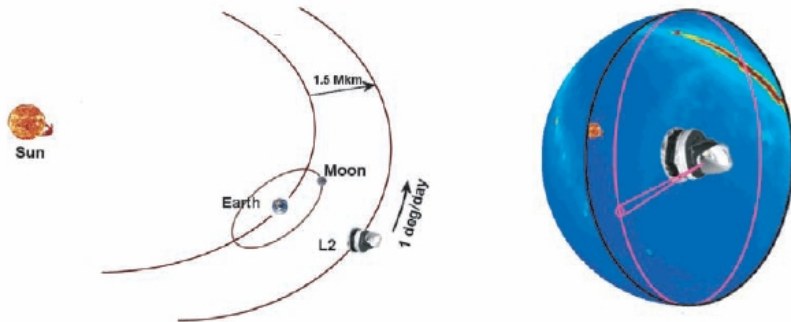
Durée garantie : 14 mois (2 sur-veys) @ L2 (1.5Mkm)

- 1 Telescope (1.5m) - consortium danois
- 2 LFI (HEMTS 30-70GHz, beam 10-25 arcmin) - consortium coordonné par U. Bologna
- 3 HFI (bolomètres 100-857 GHz, beam 10-5 arcmin) - consortium dirigé par l'IAS (PI J.L. Puget); instituts Ca, CH, Ge, Fr, Irl, It, NL, Sp, US, UK  
concepts testé par Archéops

Coût : ~ 600Meuros  
(HFI ~ 150Meuros)



# Planck à L2



observations en continu (7 mois → tout le ciel)  
redondances à des époques différentes (systématiques)



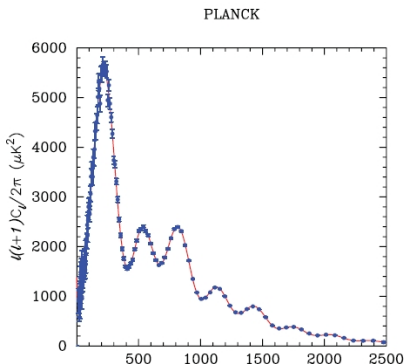
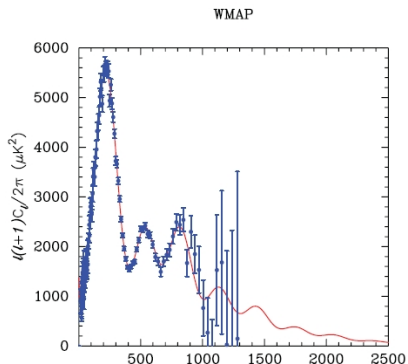
# Objectifs de physique

- $\delta T$  : cartes ds 9 bandes entre 30 and 857 GHz
- polarisation : cartes (30 to 353 GHz)
- cartes des  $\sim 6$  composantes astro principales + sources (catalogues)
- CMB : spectre temp. + polar (modes E, sensibilité aux modes B?); contraintes sur les paramètres cosmo limitées par le bruit de photon + *avant-plans*
- **et aussi** :
  - ▶ domaine extragalactique (SZ, amas de galaxies, ..)
  - ▶ domaine galactique (synchrotron, free-free; propriétés de la poussière - 1ères cartes complètes entre 100 et 857 GHz)
  - ▶ système solaire (planètes, astéroïdes, lumière zodiacale, ...)

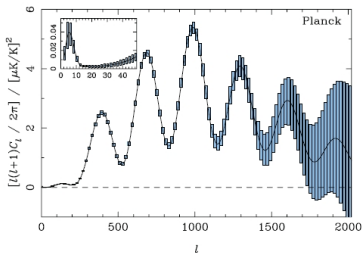
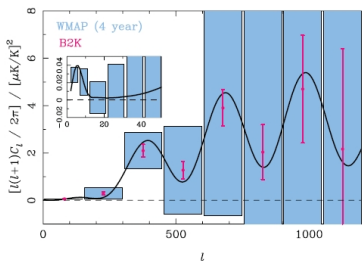
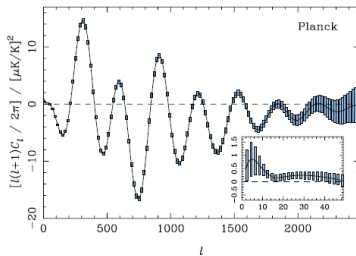
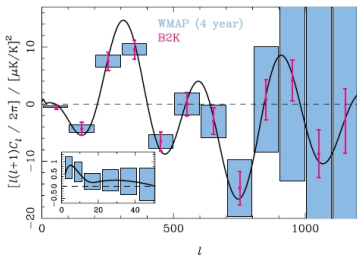
cf Planck Blue Book



# Planck vs WMAP (Temperature)

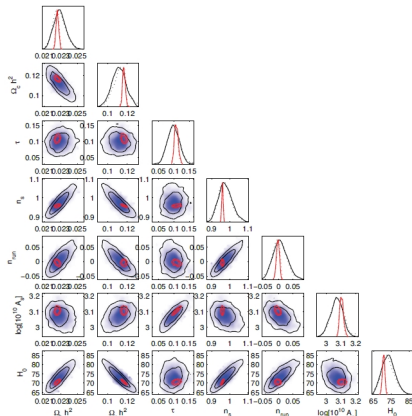


# Planck vs WMAP (spectres TE and EE)



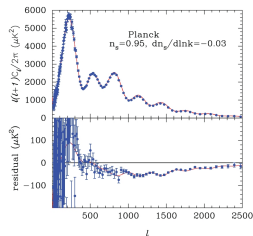
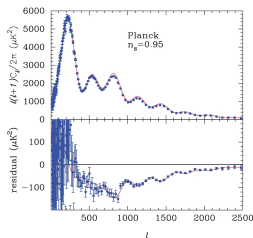
# Contraintes cosmologiques

- large intervalle de  $\ell \Rightarrow$ 
  - ▶ moins de dégénérescences
  - ▶ meilleure sensibilité p.ex. au spectre primordial
- grande précision  $\Rightarrow$  lensing du CMB accessible ( $C_\ell$ , non gaussianités):
  - ▶ source fixe
  - ▶ sensible au lensing par champs gravitationnels ( $z \sim 2 - 10$ ):  
masse des neutrinos ( $\sim .15$  eV),  
énergie noire (eq. d'état), ...
- combinaison avec d'autres mesures (SN, BAO, WL, ...)



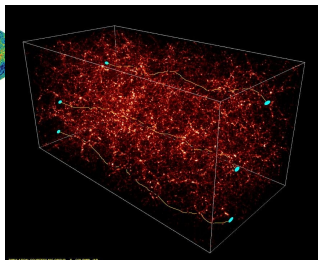
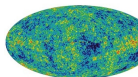
# Contraintes cosmologiques

- large intervalle de  $\ell \Rightarrow$ 
  - ▶ moins de dégénérescences
  - ▶ meilleure sensibilité p.ex. au spectre primordial
- grande précision  $\Rightarrow$  lensing du CMB accessible ( $C_\ell$ , non gaussianités):
  - ▶ source fixe
  - ▶ sensible au lensing par champs gravitationnels ( $z \sim 2 - 10$ ):  
masse des neutrinos ( $\sim .15$  eV),  
énergie noire (eq. d'état), ...
- combinaison avec d'autres mesures (SN, BAO, WL, ...)



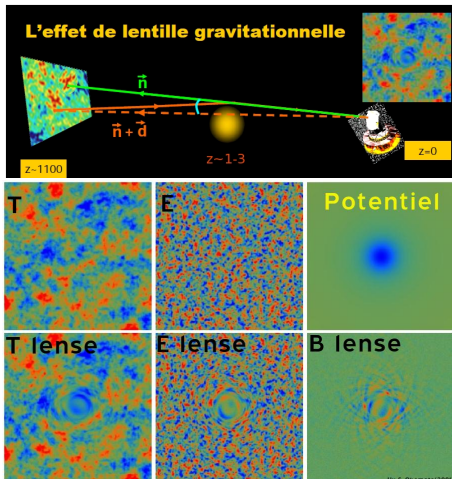
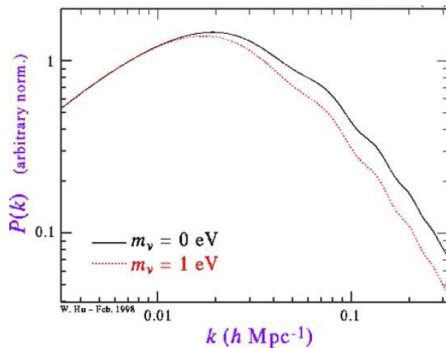
# Contraintes cosmologiques

- large intervalle de  $\ell \Rightarrow$ 
  - ▶ moins de dégénérescences
  - ▶ meilleure sensibilité p.ex. au spectre primordial
- grande précision  $\Rightarrow$  **lensing du CMB** accessible ( $C_\ell$ , non gaussianités) :
  - ▶ source fixe
  - ▶ sensible au lensing par champs gravitationnels ( $z \sim 2 - 10$ ) :  
masse des neutrinos ( $\sim .15$  eV),  
énergie noire (eq. d'état) ,...
- combinaison avec d'autres mesures (SN, BAO, WL, ...)



# Lensing du CMB

Effet des neutrinos sur les grandes structures

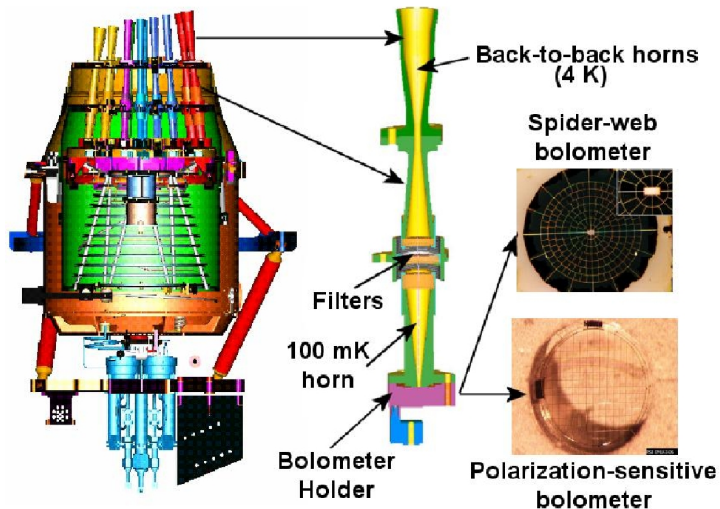




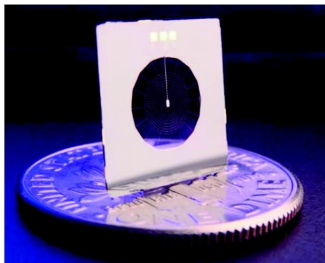
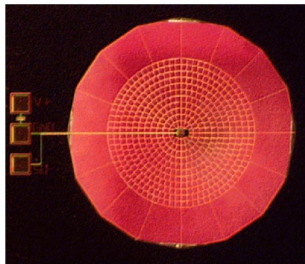
# Calendrier de HFI

- 1992 : premières études (projet Samba)
- 1996 : selection de Cobra(LFI)/Samba(HFI) par l'ESA (mission M3)
- 1997 : Announcement for Opportunity par l'ESA pour les instruments de Planck
- 1999 : acceptation de LFI et HFI par l'ESA
- 11-2004 calibration du CQM de HFI à l'IAS
- 2005 tests cryogéniques du CQM de Planck au CSL (Liège, Bel.)
- 03/07-2006 calibrations du PFM à IAS
- 07/2008 : tests finaux de Planck (FM) au CSL (Liège, Bel.)
- 2009 (06 mai  $\pm$  qq j) Lancement par une Ariane 5 (avec Hershell)
- 2012(?) fin de la période propriétaire (data release)  $\rightarrow$  1ers résultats ...

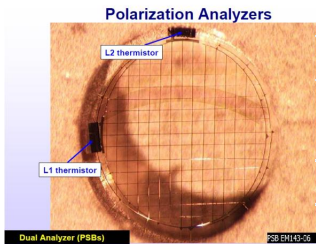
# L'instrument haute fréquence (HFI)



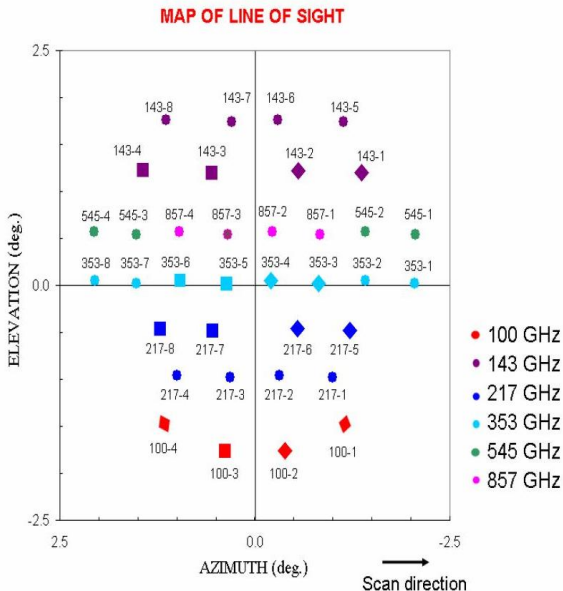
# Bolomètres



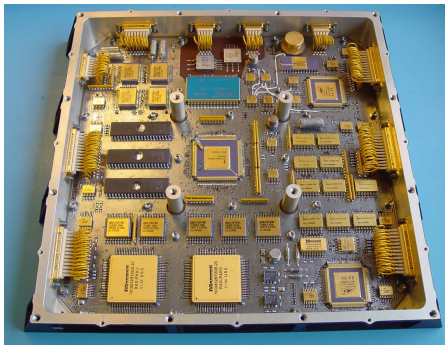
- diamètre  $\sim 5\text{mm}$
- "fils"  $4 \times 1\mu\text{m}$  (Au)
- $T \sim 100\text{mK}$  (bon S/N) par un système à dilution  $^3\text{He}/^4\text{He}$
- fabrication : JPL/Caltech (USA)
- existe aussi sous forme sensible à la polarisation (PSB)



# Plan focal de HFI

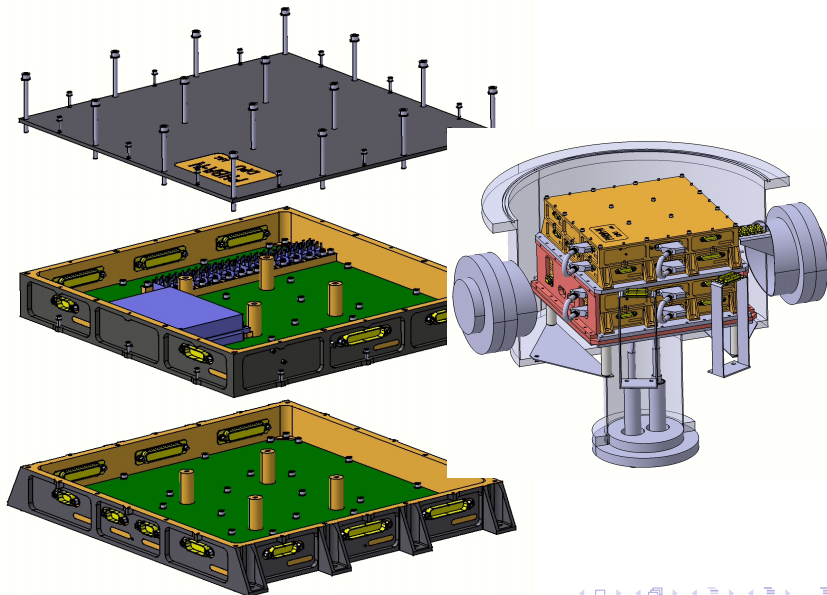


# Le DPU

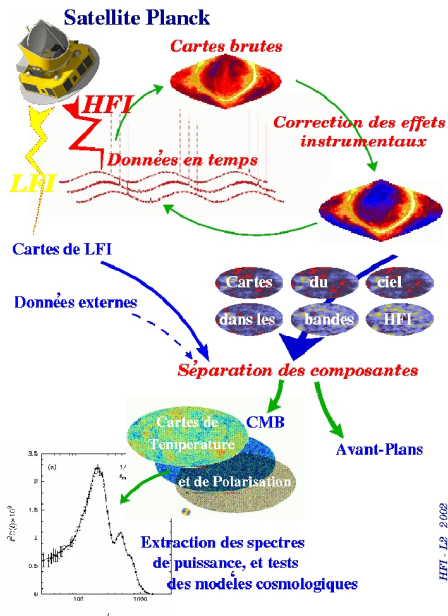


- conception hard- + software (logiciels de boot + application)
- banc-test (tests en vide thermiques)
- suivi lors des tests sous-systèmes (vibrations) et systèmes (étalonnage HFI & satellite) et intégrations successives (HFI, satellite) ... et **vol**
- ... documentation (détaillée)
- point sensible **algorithme de compression des données**
- ~ 70 FTE au LAL

# Autour du DPU

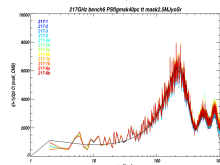
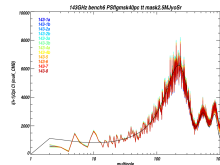
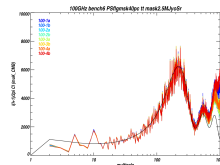
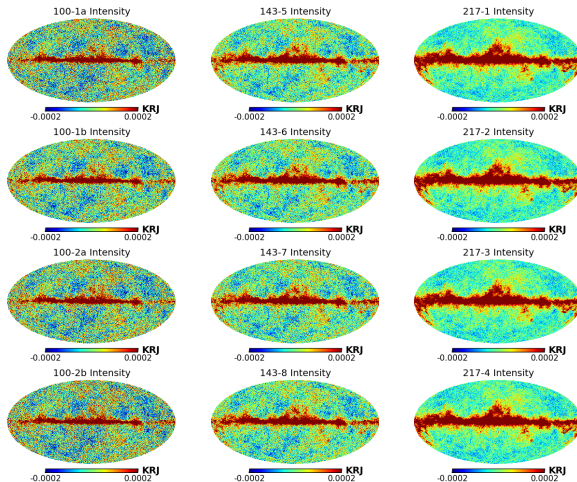


# Analyse des données



- Echantillonnage à  $\sim 200$  Hz ; données de 14 mois :  $\sim 1 - 2 T_0$  par canal
- 1er niveau (Level 1) : mise en forme et filtrages des données en temps
- 2d niveau (Level 2) : reconstruction de **cartes** (pour chaque détecteur, combinaison par fréquence) ; premier catalogue de sources
- 3ème niveau (Level 3) : séparation des composantes, extraction des **spectres de puissance** finaux ; contraintes cosmo ; catalogues de sources
- **distribution des données à la communauté scientifique  $\sim 2$  ans après la fin du survey ; tout doit être prêt!**

# Tests du map-making

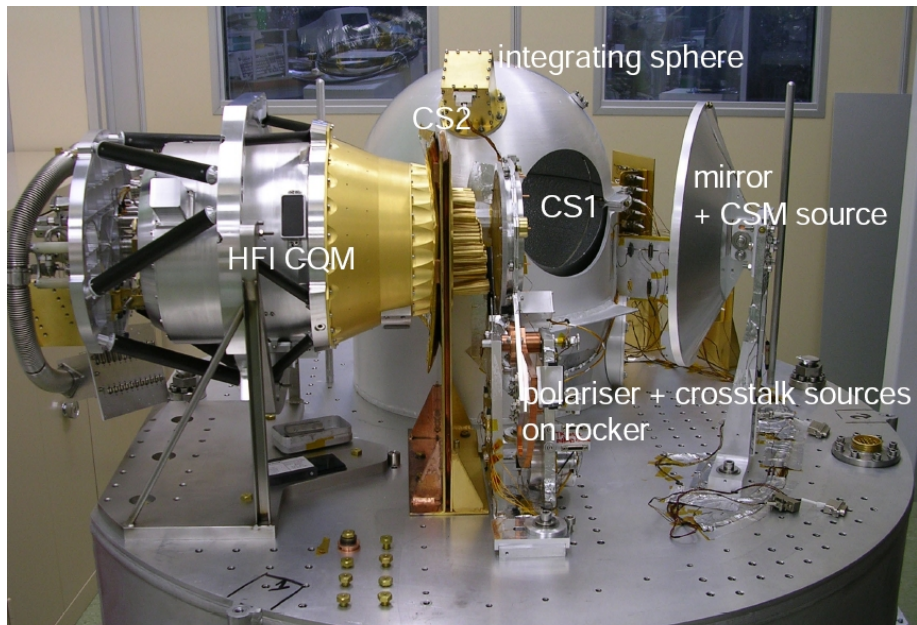




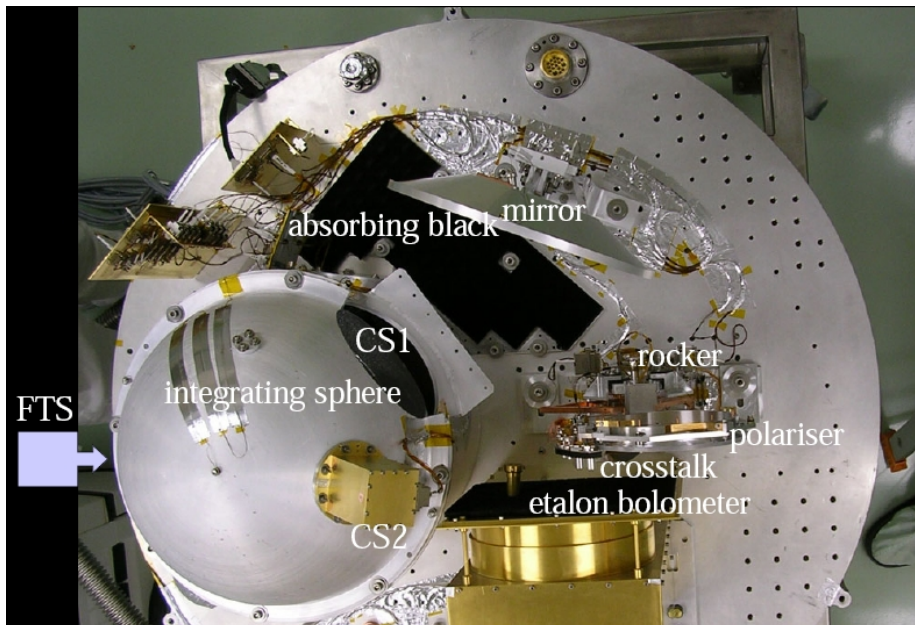
# Stratégie d'étalonnage de HFI

	Subsystem	HFI focal plane	In flight
Main beam	●		●
Far side lobes			●
Spectral response	●	●	
Time response	●	●	
Optical polarisation	●	●	●
Sensitivity (T, bkg)	●	●	●
Linearity	●	●	
Absolute response	●	●	●
Detection noise	●	●	●
Crosstalk	●	●	●

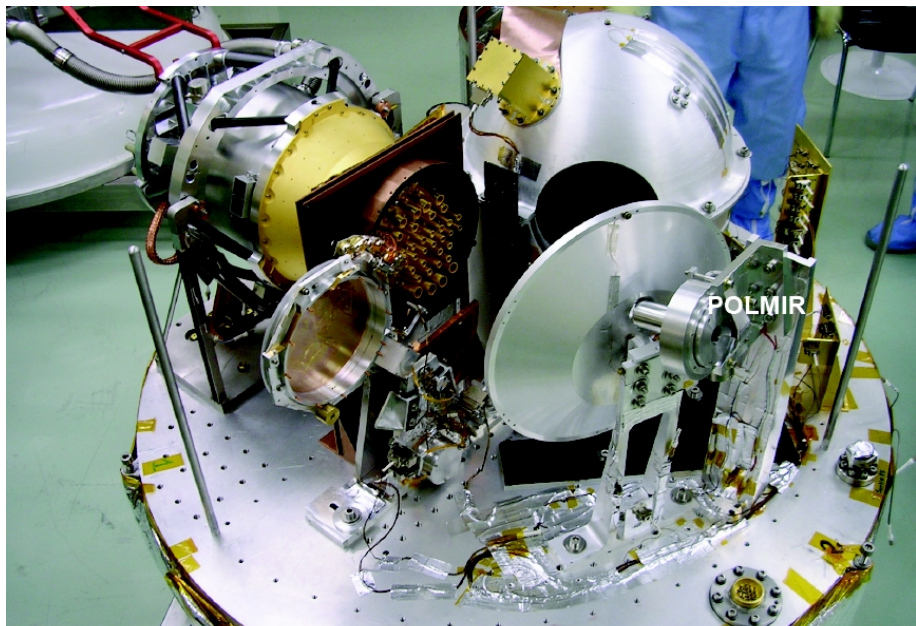
# Les setups (version CQM)



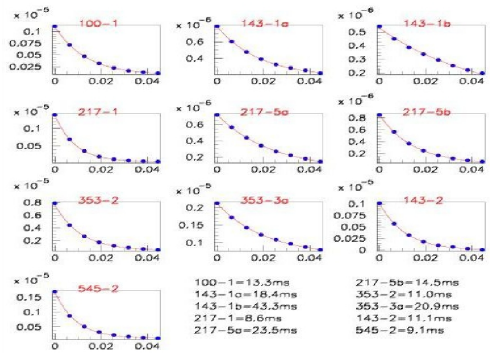
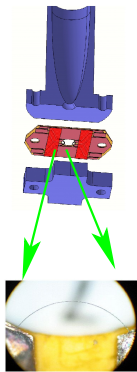
# Les setups (version CQM)



# Le setup (version PFM)



# Fibres de carbone (LAL)



C fibers (6 micron diameter)  
 (optical X-talk, bolos **time constants** and linearity, ...)

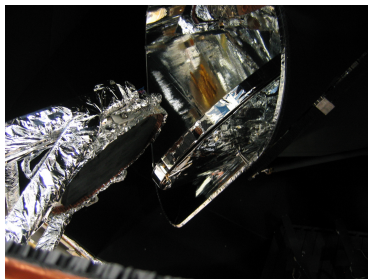
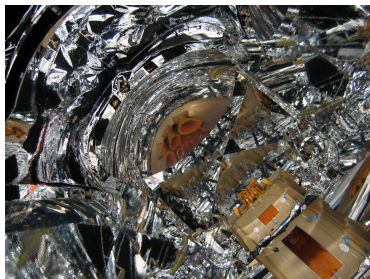
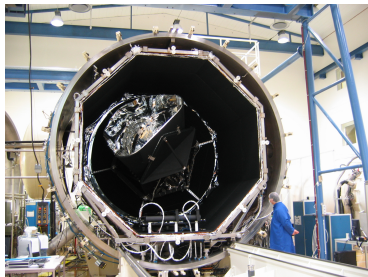
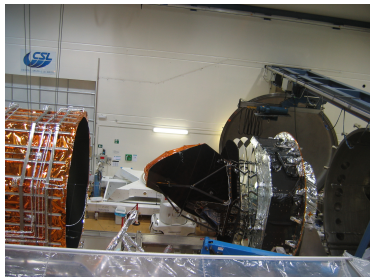
# Etalonnage du PFM (HFI)

- tests intensifs (juin-juillet 2006) - excellent S/N
- Bcp de caractéristiques mesurées "comme prévu" (acceptance spectrale, efficacité, bruit, caractéristique électrique "V(I)",...)
- **comportement de HFI globalement nominal (et souvent mieux)**
- **MAIS ...**
  - ▶ réponse des canaux polarisés : mesures moins précises que prévu  $\Rightarrow$  **effort à faire sur la reconstruction/étalonnage en vol**
  - ▶ réponse temporelle plus complexe qu'une exponentielle  $\Rightarrow$  **effet sur les produits élaborés (cartes, spectres,...)?**
- campagne de Liège (juillet 2008) - des sources du "LAL" ajoutées au setup

# Etalonnage du PFM (HFI)

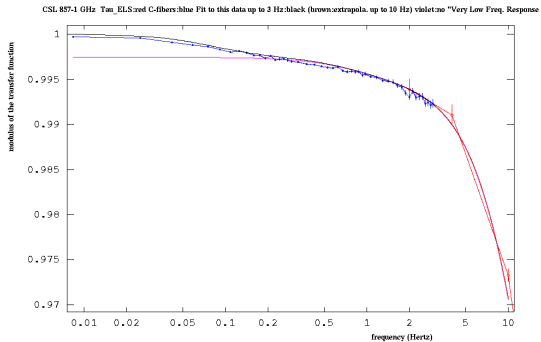
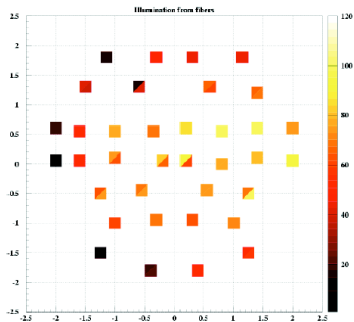
- tests intensifs (juin-juillet 2006) - excellent S/N
- Bcp de caractéristiques mesurées "comme prévu" (acceptance spectrale, efficacité, bruit, caractéristique électrique "V(I)", ...)
- **comportement de HFI globalement nominal (et souvent mieux)**
- **MAIS ...**
  - ▶ réponse des canaux polarisés : mesures moins précises que prévu ⇒ **effort à faire sur la reconstruction/étalonnage en vol**
  - ▶ réponse temporelle plus complexe qu'une exponentielle ⇒ **effet sur les produits élaborés (cartes, spectres,...)?**
- campagne de Liège (juillet 2008) - des sources du "LAL" ajoutées au setup

# CSL (1)

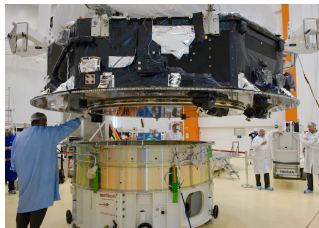
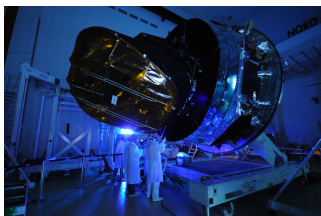




# CSL (2)



# A Kourou



# Les opérations

- voyage vers L2 :  $\sim 45$  jours
- données transmises au sol  $\sim 2h/j$  (**compression!**)  
"vue directe"  $\sim 30mn/j!$   
trajet Australie (antenne)  $\rightarrow$  ESOC (Darmstadt)  $\rightarrow$  IAS  
(surveillance "en ligne")  $\rightarrow$  IAP (DPC)  $\rightarrow$  CCin2p3 + ...
- lancement à chaud -  $T \sim 100mK$  en  $\sim 30 - 40j$  (cf CSL)
- 1ère phase (CPV) : **vérification et réglages des paramètres**  
**(compression!)  $\sim$  un mois** (dont 'mini-survey')
- Mode "routinier" (survey) tout le ciel est couvert en  $\sim 7$  mois -  
autonomie probable  $\sim 38$  mois  
... "shifts" à l'IAS

# Conclusions

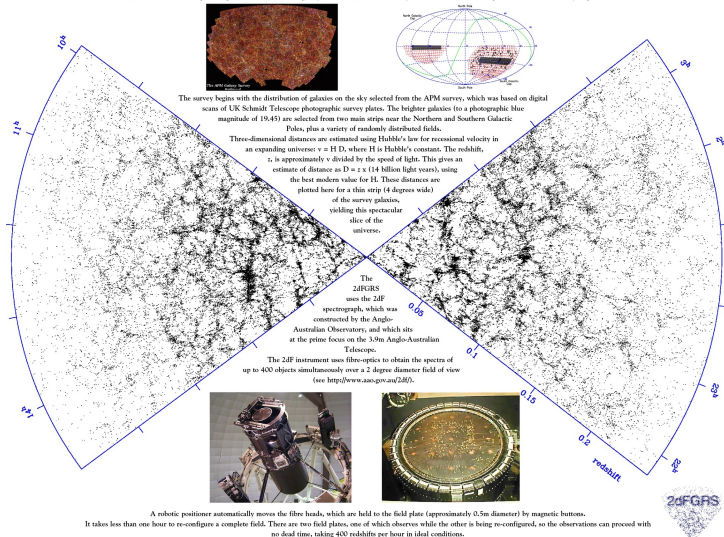
- CMB : source d'informations **très riche** sur l'univers primordial (et + si affinités!)
- **Planck** va bientôt apporter des **mesures "ultimes"** des spectres des anisotropies de températures et des modes E (polarisation) ... et peut-être 'voir' les modes B?
- **travaux en cours** : exploitation des mesures d'étalonnage, préparation et perfectionnement des outils de reconstruction et d'extraction des paramètres "physiques" ( $m_\nu$ ),... avant les opérations!
- RDV le 6 mai (lancement) & 2011-12 (premiers résultats)
- ... MERCI à toutes celles et tous ceux qui ont contribué à ce beau projet!



# Carte de l'univers (observation)

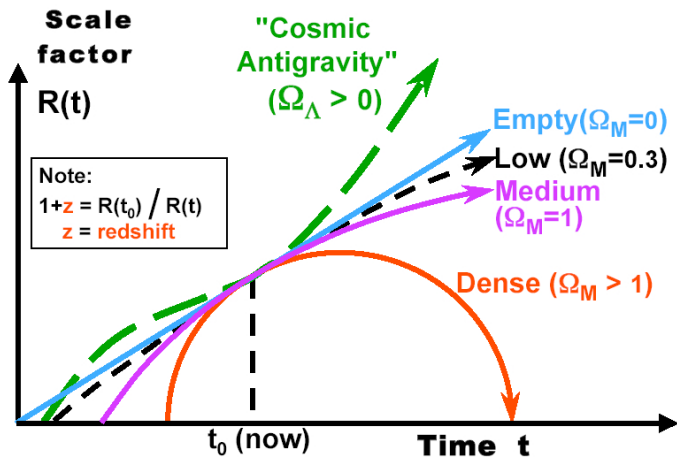
## Mapping The Universe

This picture shows the distribution of approximately 75,000 galaxies from the 2dF Galaxy Redshift Survey (2dFGRS). This survey was the first to measure the three-dimensional positions of over 100,000 galaxies, and will reach a total of about 250,000. The aim is to map the large-scale structure in the galaxy distribution, which is widely seen as one of the most important relics from an early stage of evolution of the universe.

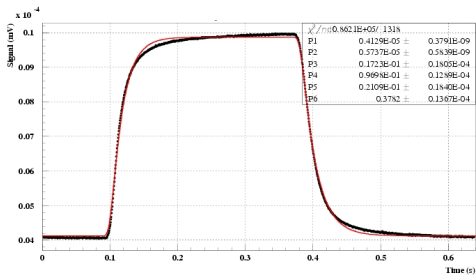
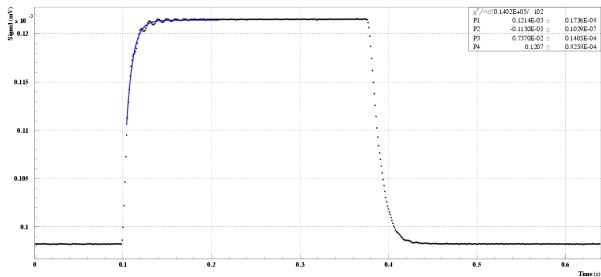


© Mark Sawden, UATC, Royal Observatory Edinburgh

# Facteur d'échelle



# Réponse temporelle



## Cooling system

