

Planck HFI : le compte à rebours va bientôt commencer

O. Perdereau



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

Produced with PDF_LTEX (style beamer) within GNU-Linux

LPC - 09/01/2009

1 Introduction

- Cosmologie
- Relativité Générale (qq bases)
- Le CMB
- Anisotropies du CMB
- Pourquoi des anisotropies?
 - Polarisation

2 Planck-HFI

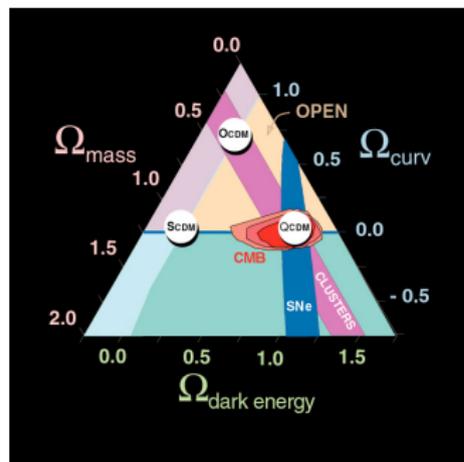
- La mission Planck
- Physique de Planck
- L'instrument haute fréquence (HFI)
- Etalonnage de HFI

3 Conclusions

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 ?
- ...

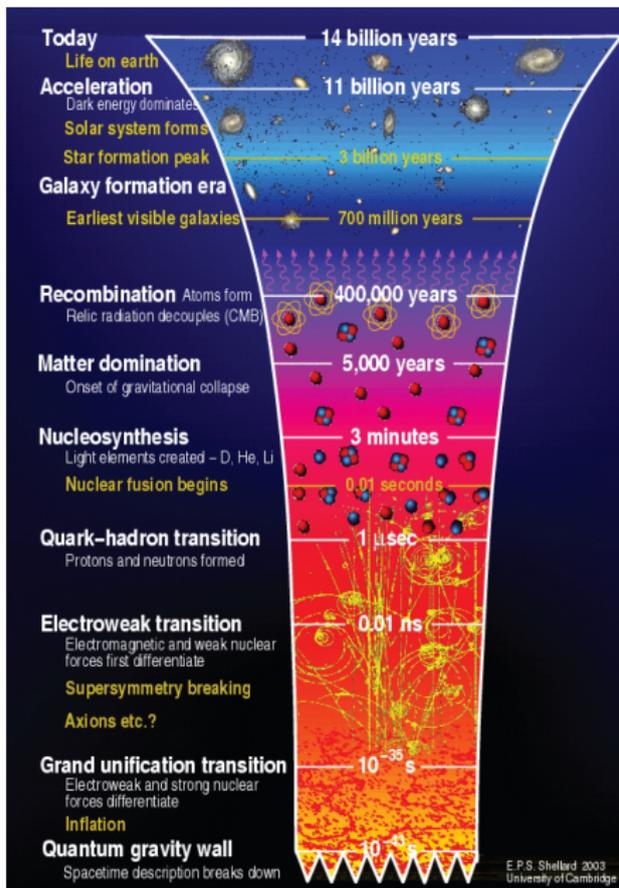


⇒ *modèle de concordance* dit du "Big-Bang model"

base : *Relativité Générale*

~ 10 "paramètres cosmologiques" étudiés par des

techniques/observables complémentaires



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

(4) "Libération" des photons = **découplage** (à $\sim 3-400000$ ans) \rightarrow **émission du CMB**

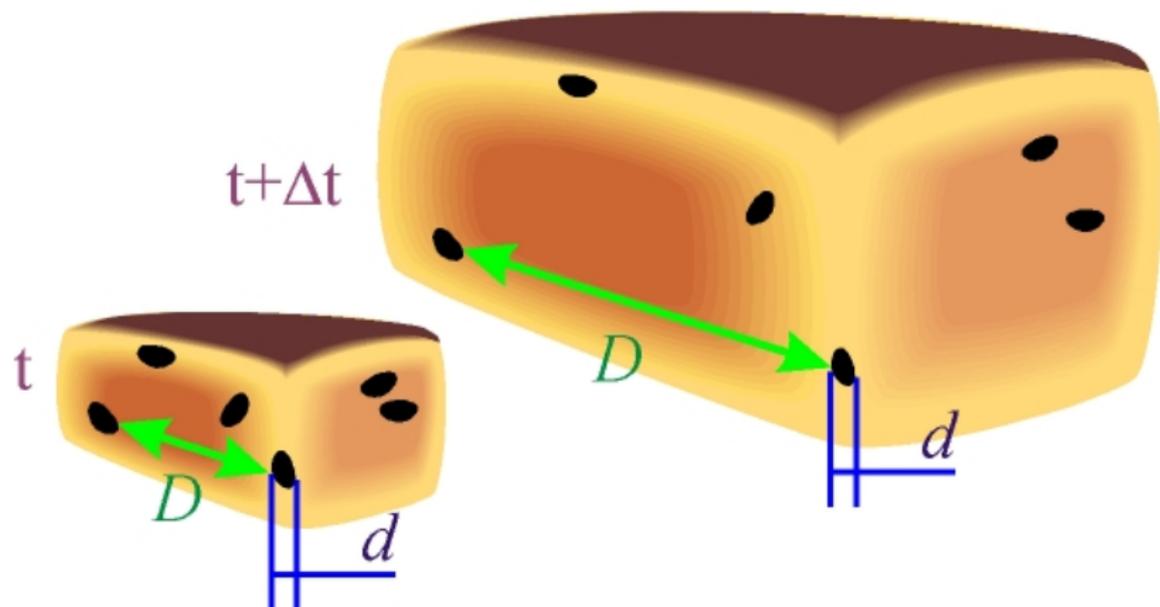
(3) Nucléosynthèse (de 3 à 30 mn) (\rightarrow éléments légers)

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

(1) inflation

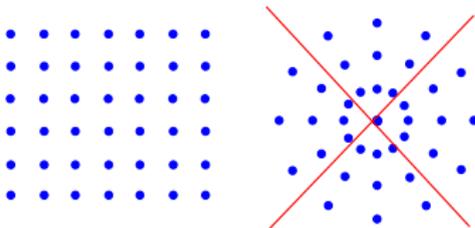
(0) état initial (??)

Une dilatation d'échelle



Principes de base

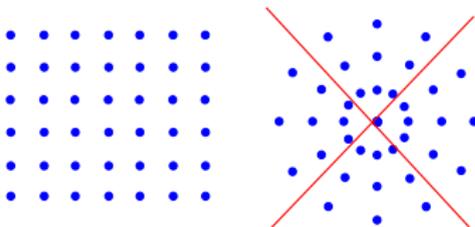
① L'univers est homogène



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

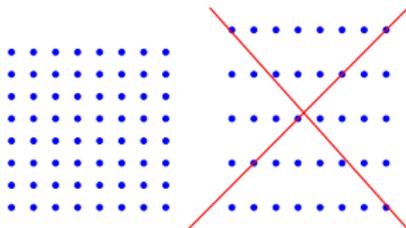
Principes de base

1 L'univers est homogène



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

2 L'univers est isotrope



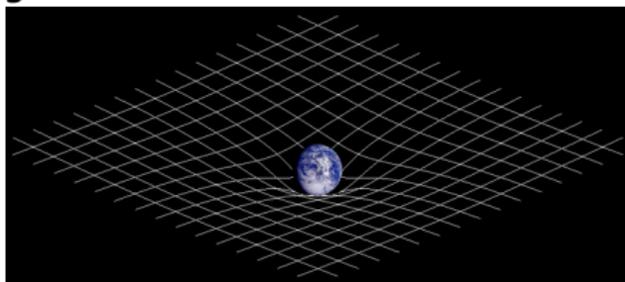
Même "aspect" dans toutes les directions
Ex. : sources distantes, température du CMB

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

Éléments du modèle :

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

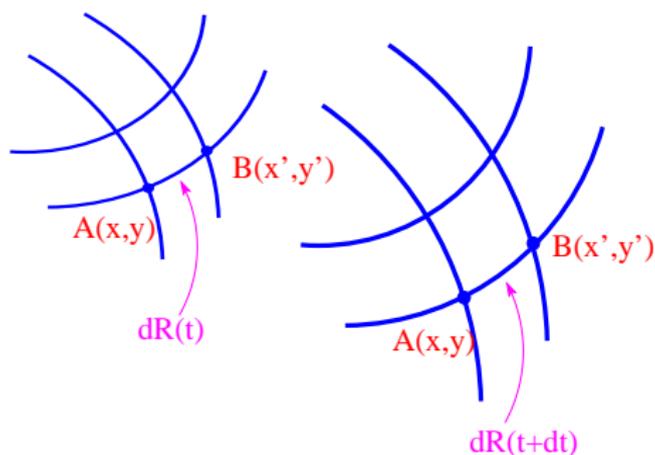
- ▶ description **géométrique** de l'univers ("métrique")
- ▶ équations (dites "d'Einstein") → structure+évolution; incluent la gravitation



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

Géométrie & facteur d'échelle

métrique = système de coordonnées lié à l'expansion
(\Rightarrow "recette" pour calculer les distances == **longueurs de vol des photons**)



$R(t)$:= Facteur d'échelle

d := distance comobile (conservée ds l'expansion)

$dR(t)$:= distance propre ("usuelle" i.e. vue par la lumière)

Variations de $R(t)$ \leftrightarrow expansion

Conséquence (1) : loi de Hubble

Localement : géométrie euclidienne (habituelle)

distance propre entre deux "observateurs" $D = dR(t)$

Expansion : $t \rightarrow t + \Delta t \Rightarrow R(t) \rightarrow R(t + \Delta t)$

$\Rightarrow \Delta D = d(R(t + \Delta t) - R(t))$

$$\frac{\Delta D}{\Delta t} = \frac{R(t + \Delta t) - R(t)}{\Delta t} d$$

Si Δt est (infiniment) petit ($\Delta t = dt \rightarrow 0$)

$$v = \frac{dD}{dt} = d\dot{R} = \frac{\dot{R}}{R} D = HD$$

"constante" de Hubble locale : $H(t) = \frac{\dot{R}}{R}(t) = \dot{a}(t)$

Où a = facteur d'échelle relatif / maintenant : $a = R(t)/R_0$

NB : $H(t)$ = "constante" de Hubble mais fonction du temps (on mesure H_0 i.e. valeur actuelle)!

Conséquence(2) : "redshift" cosmologique

La distance comobile (d) reste constante \Rightarrow

$$d = \frac{D(t_1)}{R(t_1)} = \frac{D(t_2)}{R(t_2)} = \text{cste}$$

Conséquence :

une source à $t = t_1$ émet des photons à une longueur d'onde $\lambda(t_1)$
 \rightarrow ils sont observés à $t = t_2$ avec

$$\lambda(t_2) = \lambda(t_1) \frac{R(t_2)}{R(t_1)}$$

On appelle **redshift** (décalage vers le rouge) cosmologique :

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{R(t_2)}{R(t_1)} - 1$$

z mesure la taille relative de l'univers à l'émission
 $z = 1$: univers deux fois plus petit !

Géométries possibles de l'univers

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

Densité critique

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

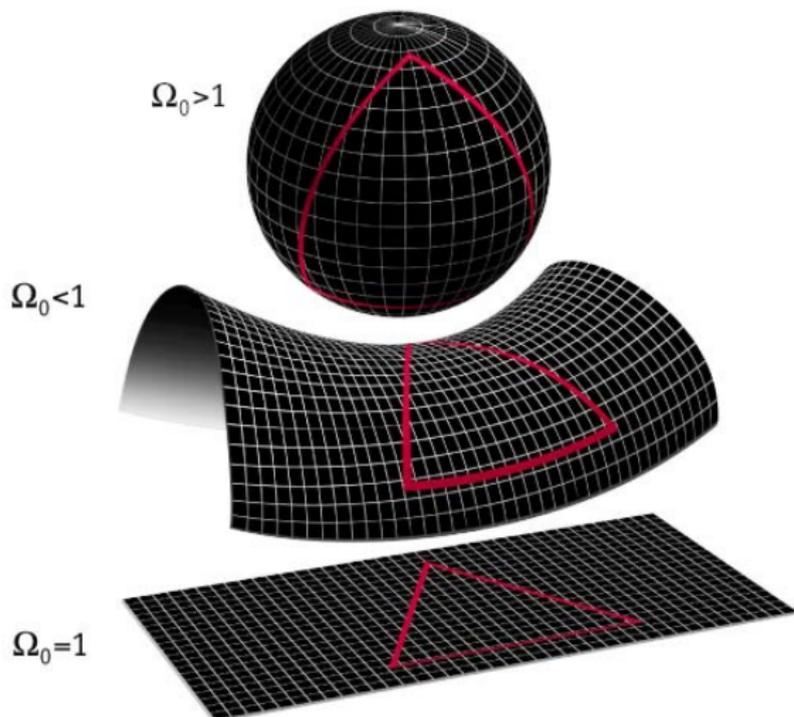
- **géométrie (et son évolution)** (macroscopique)
- **densité(s) d'énergie(s)** (microscopique)

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

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

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

Géométrie(s) de l'univers (bis)



MAP990006

L'équation fondamentale de la RG

ou équation d'Einstein :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \mathcal{R} g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$

L'équation fondamentale de la RG

ou équation d'Einstein :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \mathcal{R} g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$



tenseur d'Einstein
fonction de la métrique

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

L'équation fondamentale de la RG

ou équation d'Einstein :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \mathcal{R} g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$

tenseur d'Einstein
fonction de la métrique

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

Impulsion-
énergie

L'équation fondamentale de la RG

ou équation d'Einstein :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \mathcal{R} g_{\mu\nu}$$

tenseur d'Einstein
fonction de la métrique

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

$$= 8\pi G T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$

Impulsion-
énergie

Constante
cosmologique

L'équation de Friedman

Dans le cas d'un univers homogène et isotrope (et avec la métrique FLRW) \Rightarrow équation d'évolution de $R(t)$

$$H^2(t) + \frac{kc^2}{R_0^2} \frac{1}{a^2(t)} = 8\pi G \frac{\rho(t)}{3} + \frac{\Lambda}{3}$$

$$a(t) = \frac{R(t)}{R(t_0)}$$

$$H(t) = \frac{da/dt(t)}{a(t)}$$

En posant :

$$\Omega_m(t) = \frac{8\pi G \rho(t)}{3H^2(t)} ; \quad \Omega_\Lambda(t) = \frac{\Lambda}{3H^2(t)} ; \quad \Omega_k(t) = \frac{-kc^2}{R_0^2 H^2(t) a^2(t)}$$

$$\Omega_m(t) + \Omega_\Lambda(t) + \Omega_k(t) = 1$$

Equation d'état

- Matière "normale" (non relativiste - basses énergies & température) : "dilution" par l'expansion

$$\rho_m \propto R^{-3}$$

- "Rayonnement" (photons, particules de haute énergie / température) : "dilution" par l'expansion + **redshift**

$$\rho_r \propto R^{-4}$$

- Densité d'énergie du "vide" (!) i.e. Λ ou "énergie noire" : pas affecté par l'expansion (si Λ seul expansion exponentielle)

$$\rho_{vac} = cste$$

Cosmologie "classique"

Si on mesure H_0 , Ω_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

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

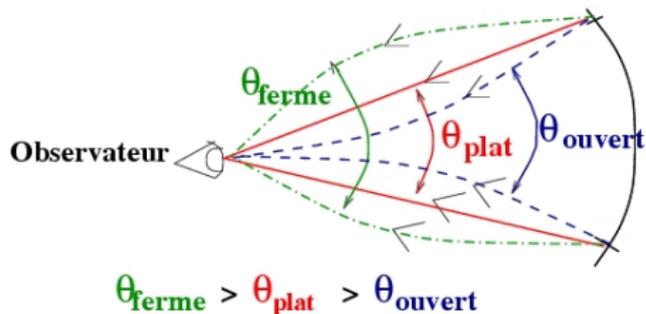
$$\text{Distance de luminosité } d_L^2 = \frac{\mathcal{L}}{4\pi\Phi}$$

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

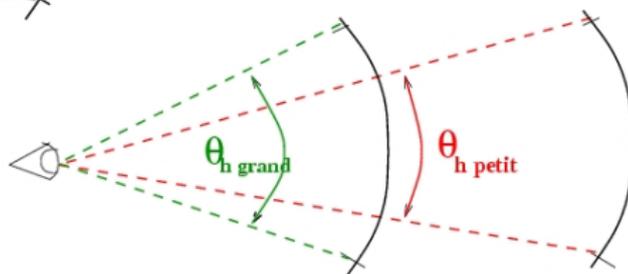
Age, taille de l'univers \Rightarrow cohérence du modèle

Géométrie et tailles angulaire

Geometrie de l'Univers et taille angulaire



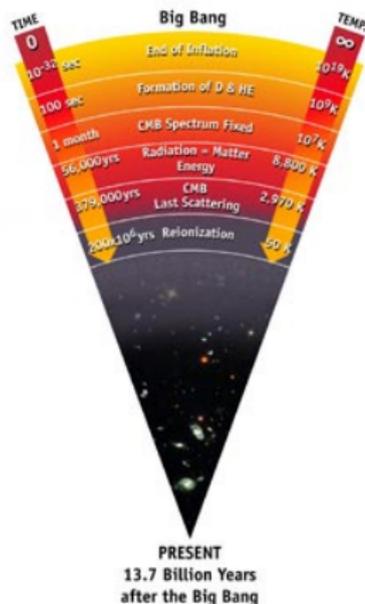
Effet de l'expansion



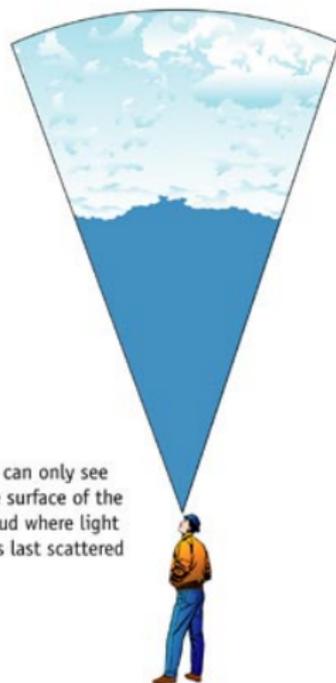
D'après C. Lineweaver

Emission du CMB

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



We can only see the surface of the cloud where light was last scattered

- 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

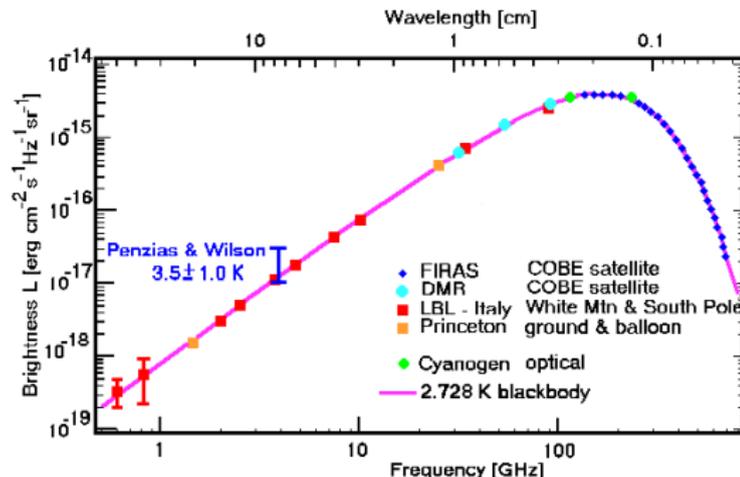
Robert Wilson



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/ cm^3
- ... qq % du bruit d'une TV

Des anisotropies dans le CMB!

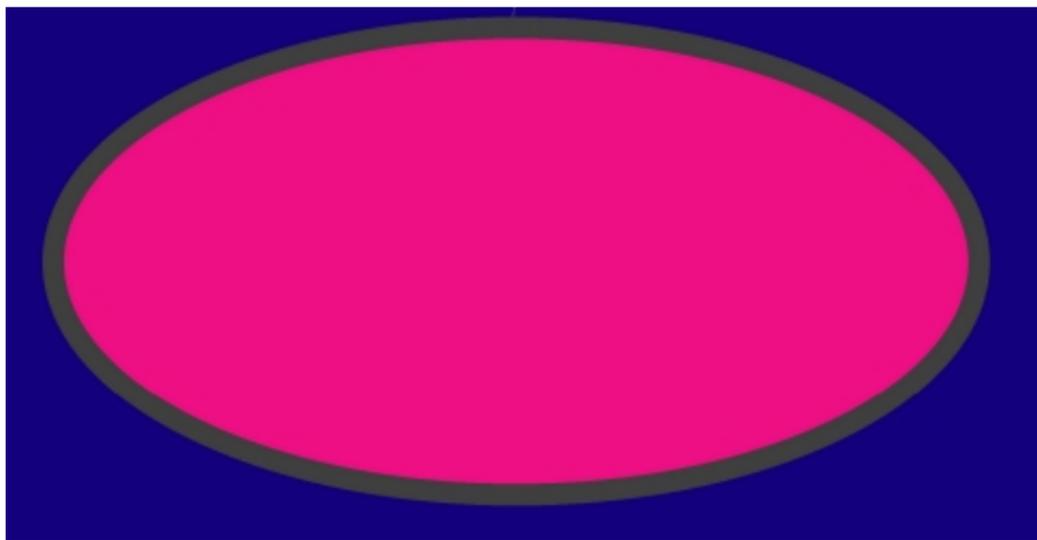
T_{CMB} dans chaque direction \rightarrow carte du "ciel" (couleur \leftrightarrow T)



Le ciel nocturne (visible)

Des anisotropies dans le CMB!

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

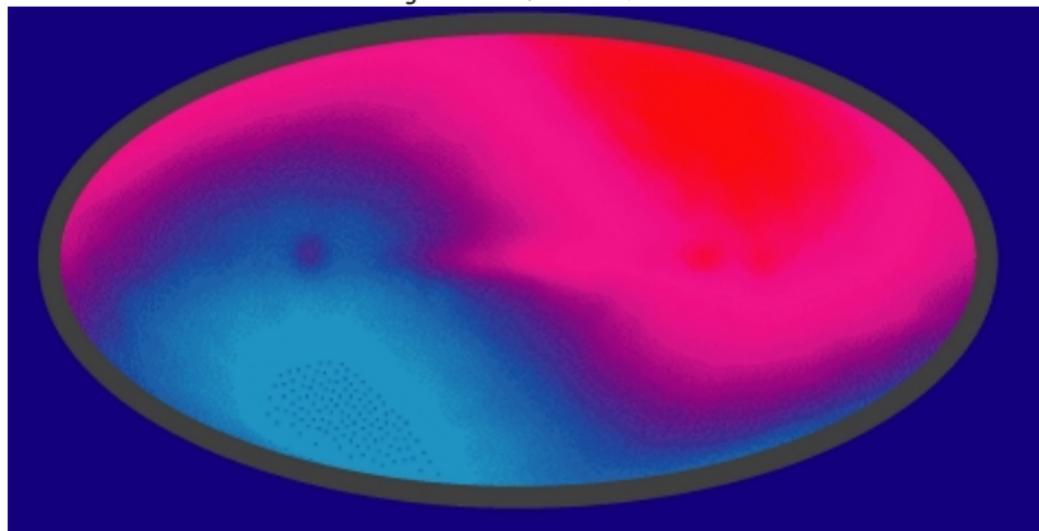


CMB très uniforme (à 1/1000 près)

Des anisotropies dans le CMB!

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

rouge \leftrightarrow chaud ; bleu \leftrightarrow froid



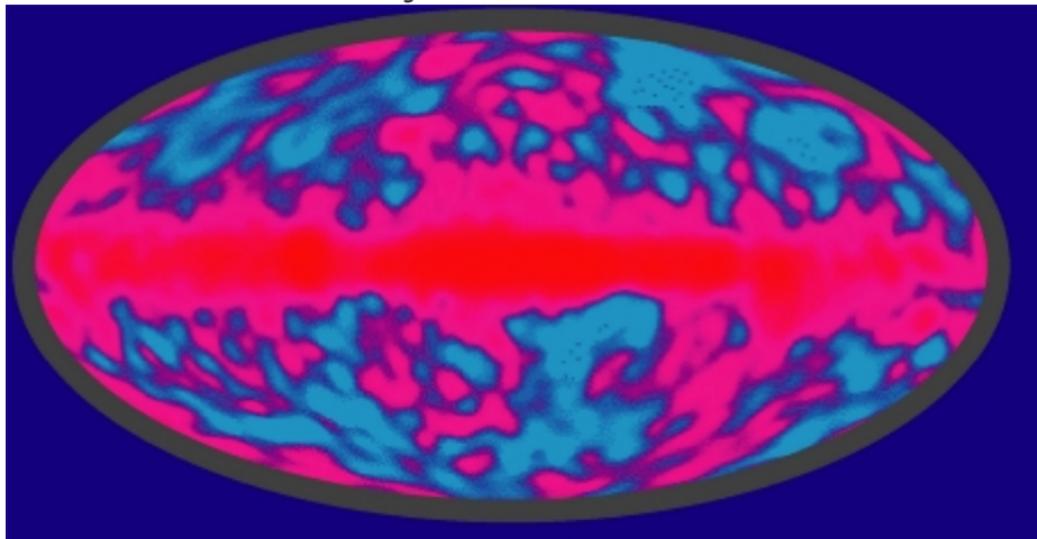
$$(\delta T/T \sim 10^{-3})$$

mvt de la Terre \Rightarrow effet Doppler
 ~ 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

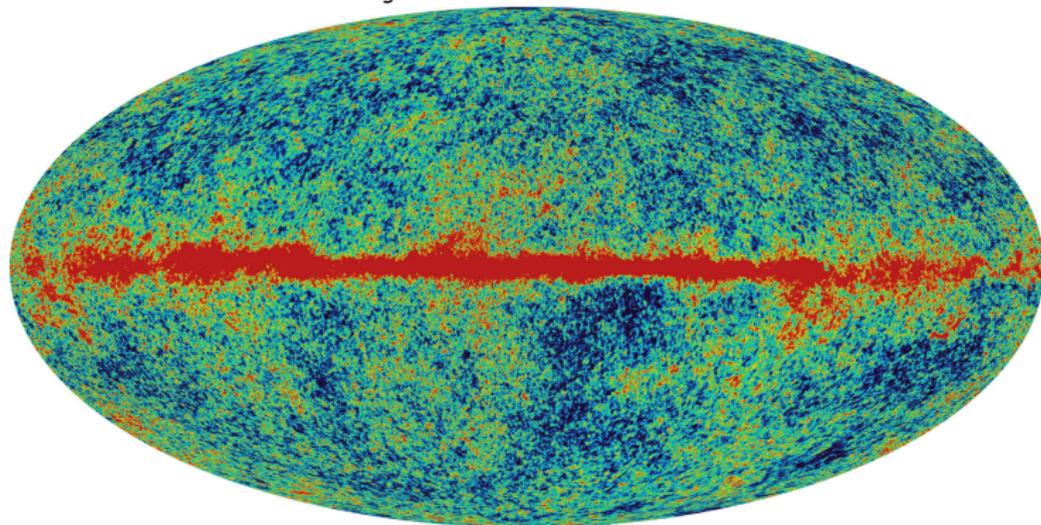


Fluctuations primordiales ($\delta T/T \sim 10^{-5}$) + Galaxie
COBE (1992)

Des anisotropies dans le CMB!

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

rouge \leftrightarrow chaud; bleu \leftrightarrow froid

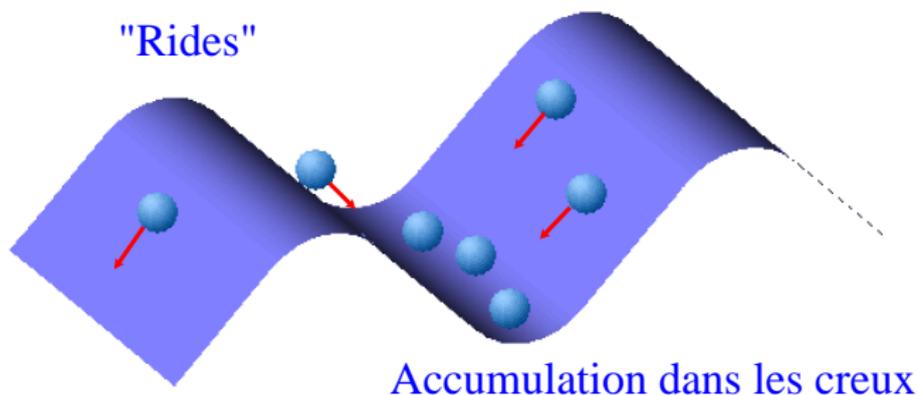


Fluctuations primordiales ($\delta T/T \sim 10^{-5}$) + Galaxie
WMAP (2003)

Des fluctuations aux anisotropies

Ou comment naissent les structures

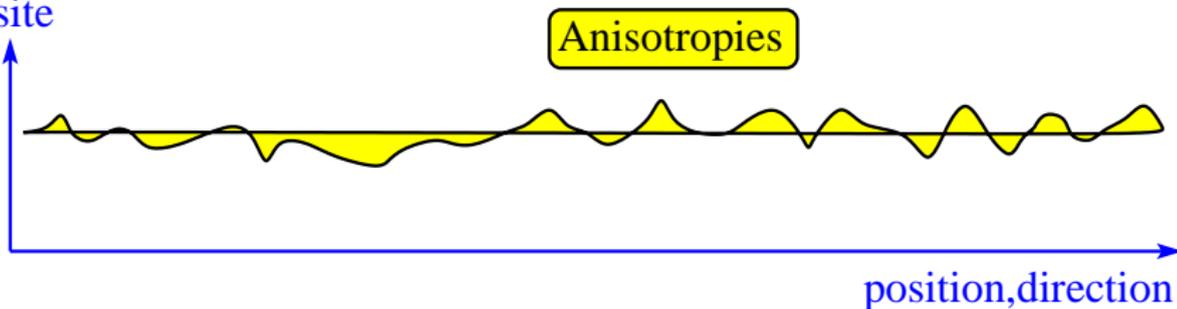
- Dans l'univers "quantique" \Rightarrow fluctuations de densité ($d = f(x, t)$)
 - Inflation \Rightarrow dilatation très rapide
- \Rightarrow "gel" des fluctuations \rightarrow anisotropies de densité
graines des grandes structures (amas, galaxies,...)



Le plasma primordial

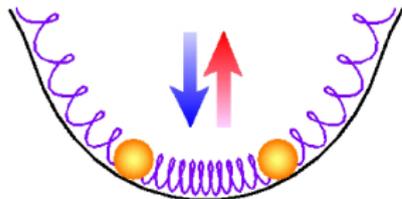
- milieu composé de protons (+ qq noyaux He,...), d'électrons ("libres") et de photons (rayonnement) : **plasma**
 - ▶ composante dominante = le rayonnement (photons)
 - ▶ interaction (électromagnétique) entre photons et électrons/protons
 - ▶ \Rightarrow pression "de radiation"
- milieu "**presque**"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

température,
densité

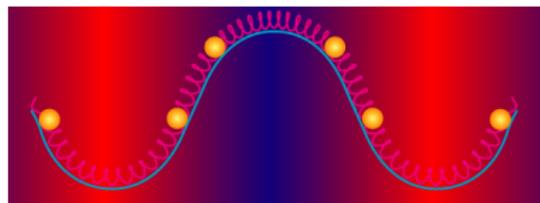


Des ondes acoustiques

- 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, ...)

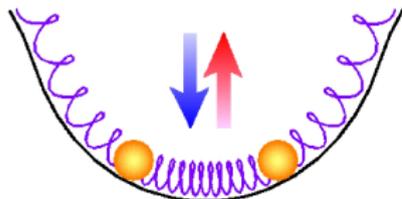


▶ Replay

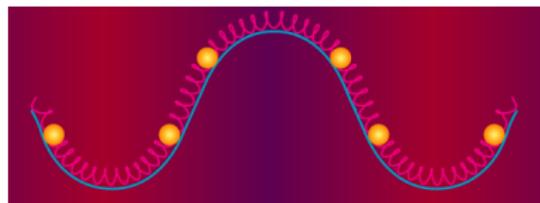
- ⇒ anisotropies de température

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, ...)

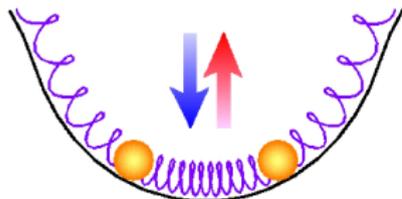


▶ Replay

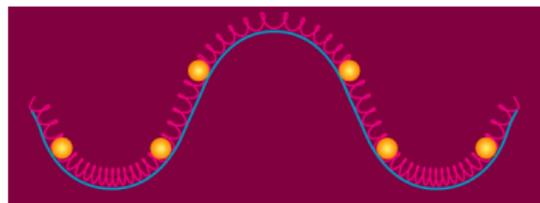
- ⇒ anisotropies de température

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, ...)

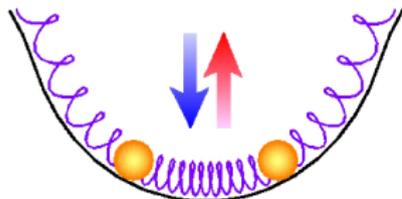


▶ Replay

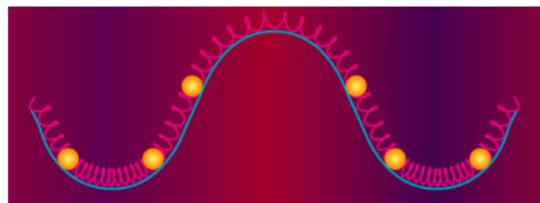
- ⇒ anisotropies de température

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, ...)

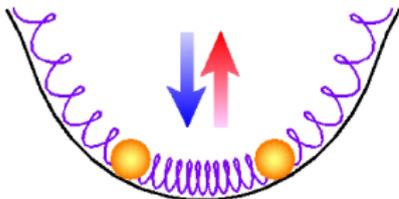


▶ Replay

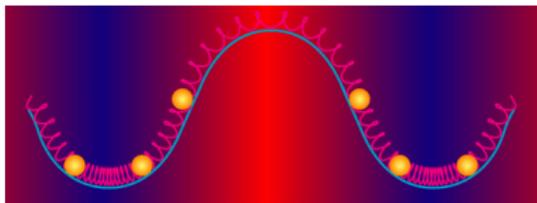
- ⇒ anisotropies de température

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, ...)

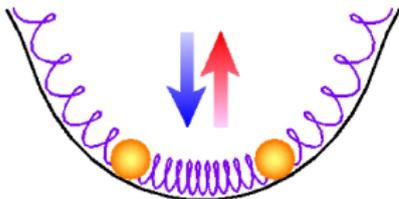


▶ Replay

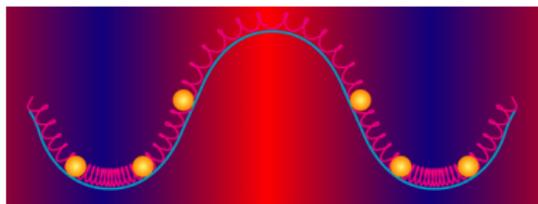
- ⇒ anisotropies de température

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, ...)

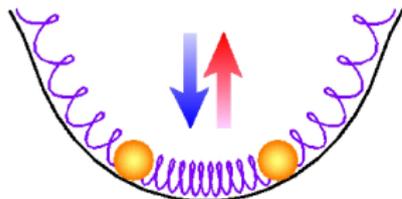


▶ Replay

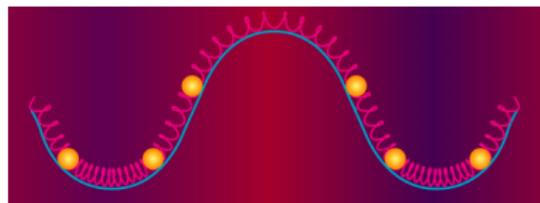
- ⇒ anisotropies de température

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, ...)

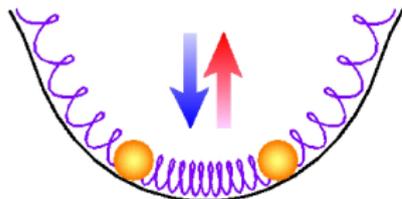


▶ Replay

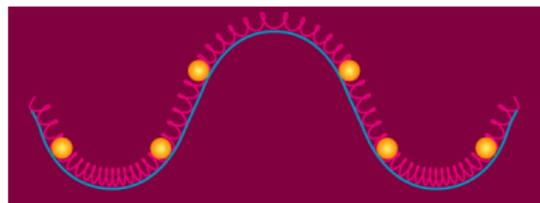
- ⇒ anisotropies de température

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, ...)

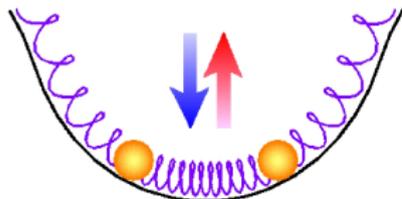


▶ Replay

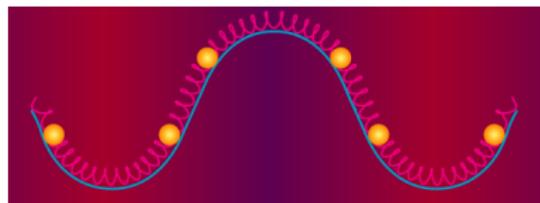
- ⇒ anisotropies de température

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, ...)

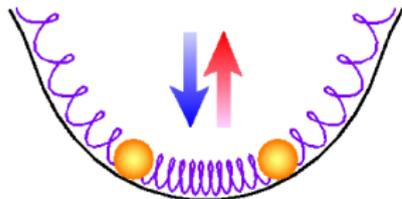


▶ Replay

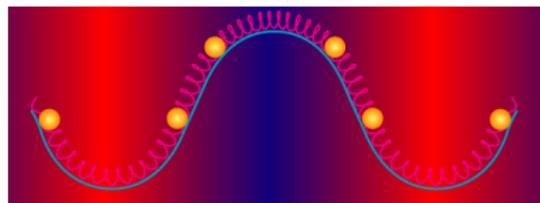
- ⇒ anisotropies de température

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, ...)

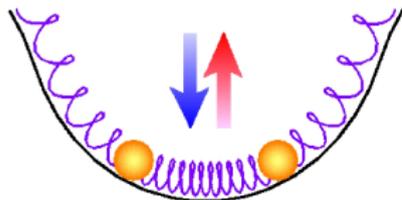


▶ Replay

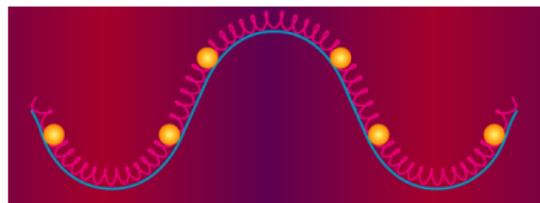
- ⇒ anisotropies de température

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, ...)

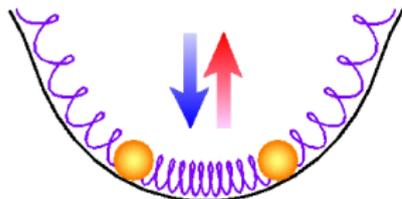


▶ Replay

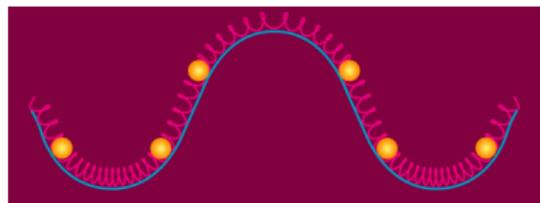
- ⇒ anisotropies de température

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, ...)

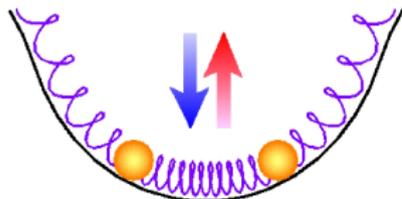


▶ Replay

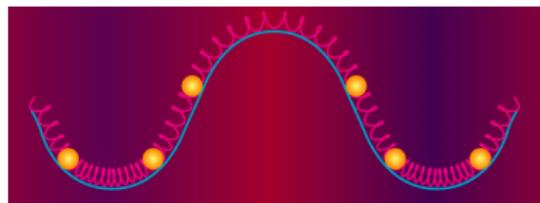
- ⇒ anisotropies de température

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, ...)

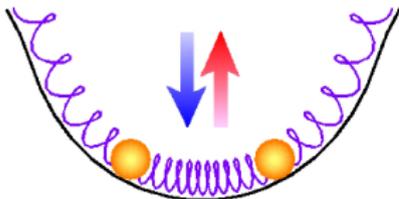


▶ Replay

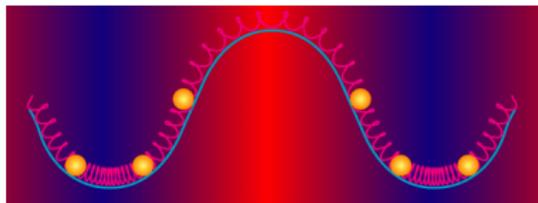
- ⇒ anisotropies de température

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, ...)

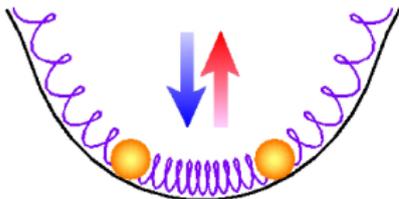


▶ Replay

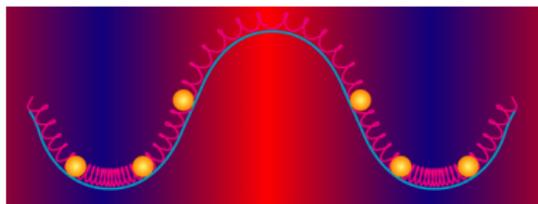
- ⇒ anisotropies de température

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, ...)

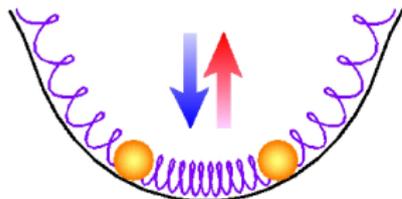


▶ Replay

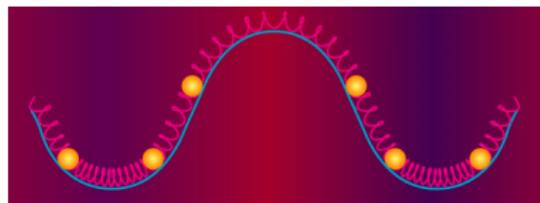
- ⇒ anisotropies de température

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, ...)

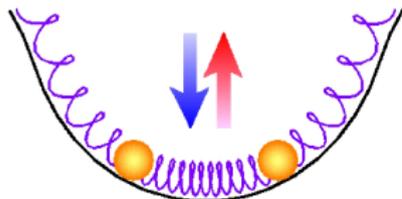


▶ Replay

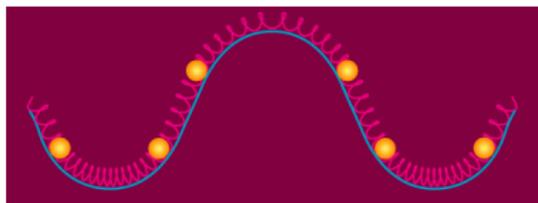
- ⇒ anisotropies de température

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, ...)

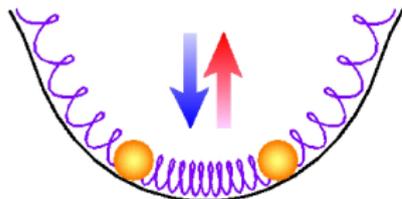


▶ Replay

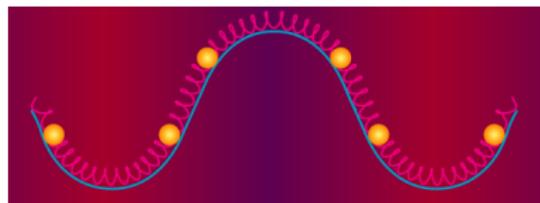
- ⇒ anisotropies de température

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, ...)

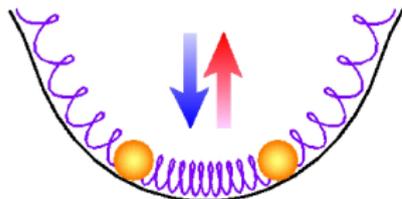


▶ Replay

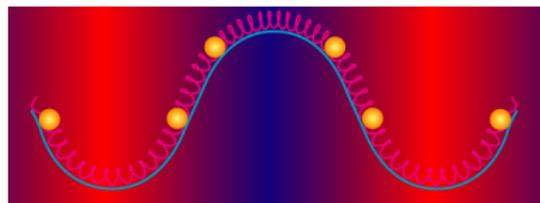
- ⇒ anisotropies de température

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, ...)

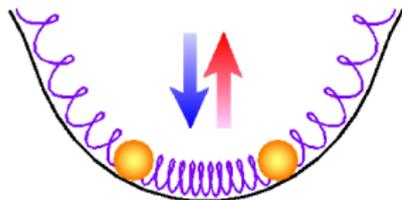


▶ Replay

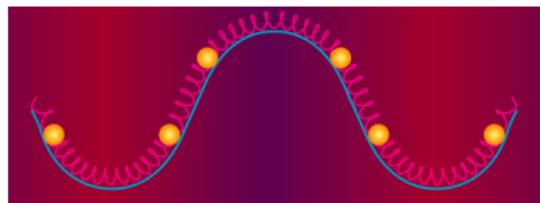
- ⇒ anisotropies de température

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, ...)

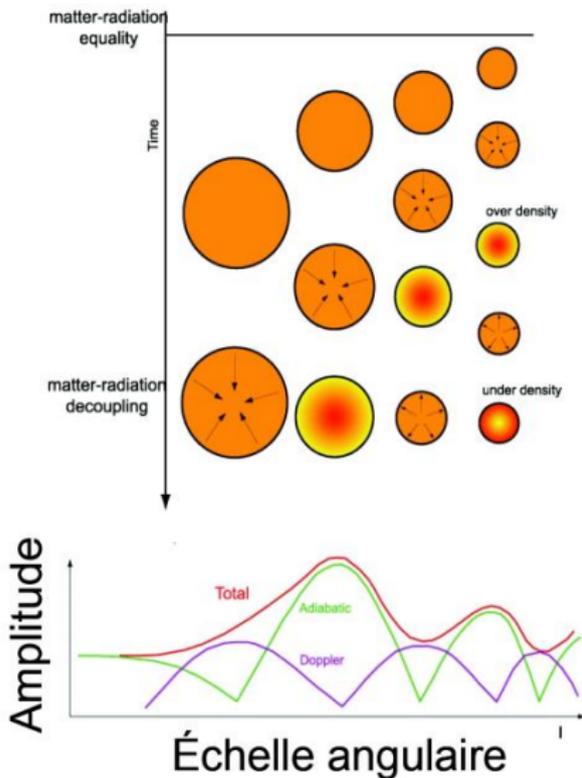


▶ Replay

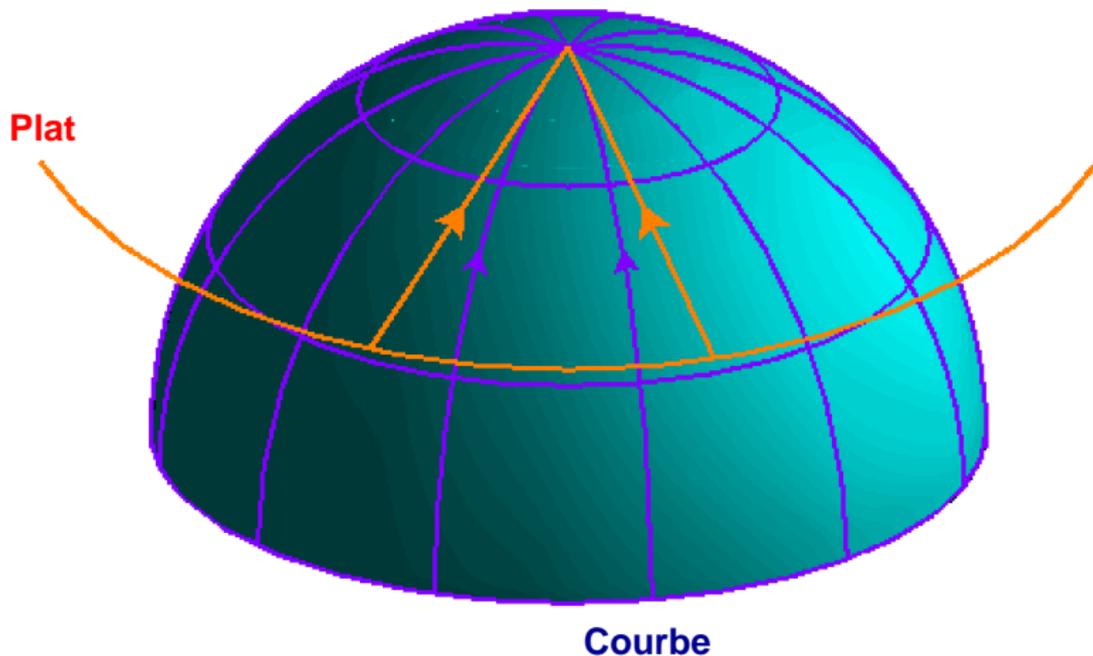
- ⇒ anisotropies de température

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)

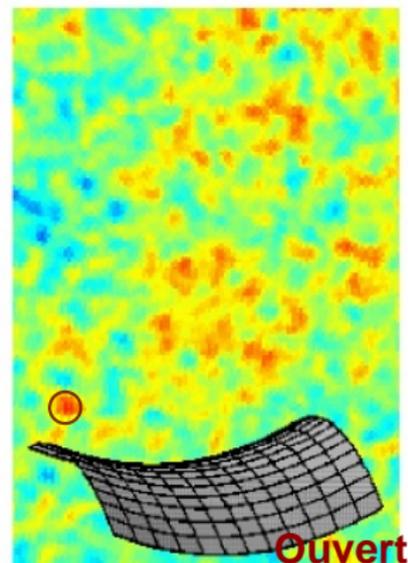
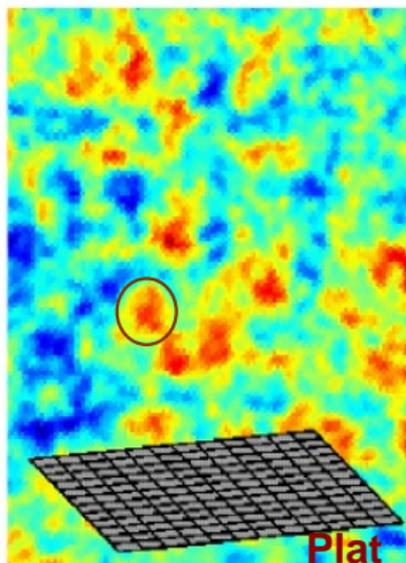
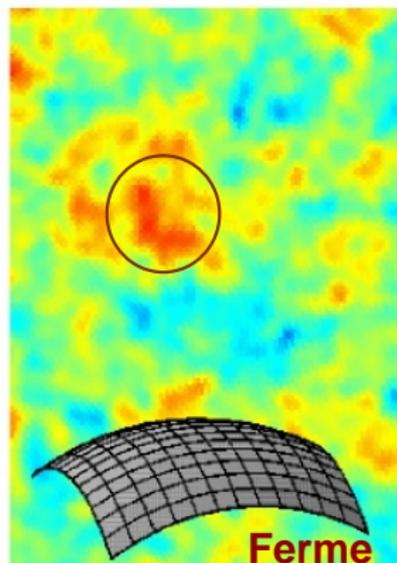


Propagation du CMB



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

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

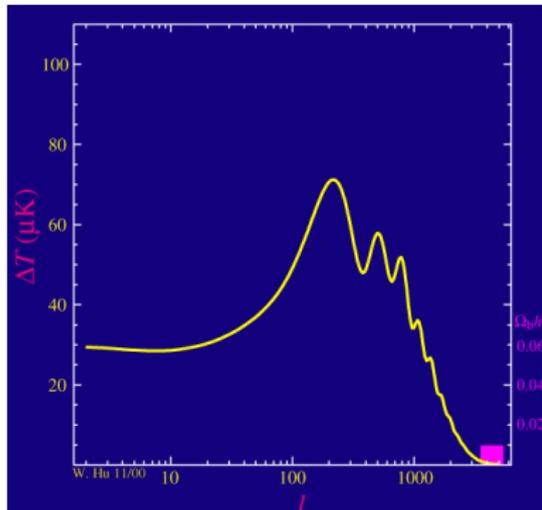
⇒ Spectre de puissance

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

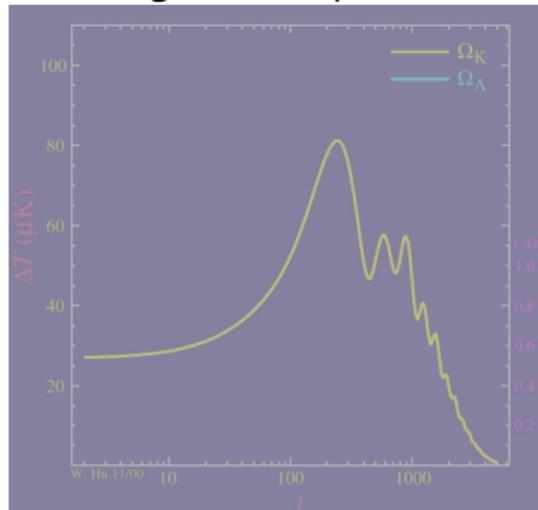
contient toute l'information *si* statistique des $a_{\ell m}$ gaussienne

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



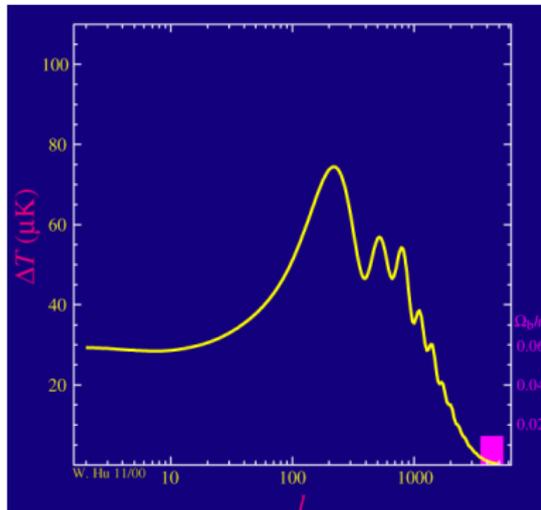
► Replay



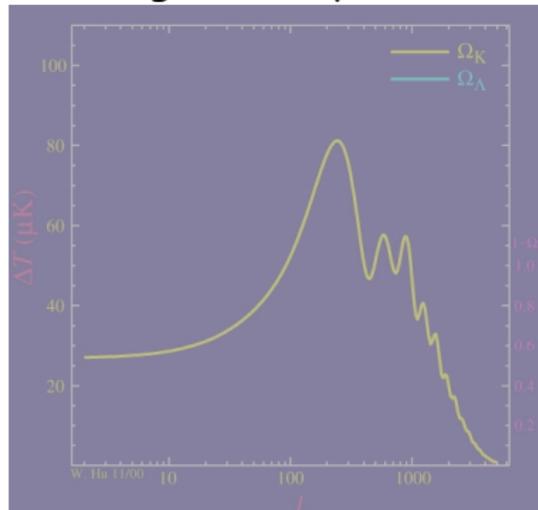
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



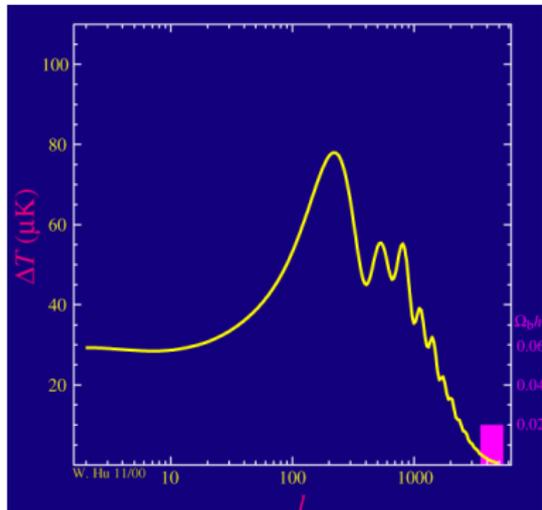
► Replay



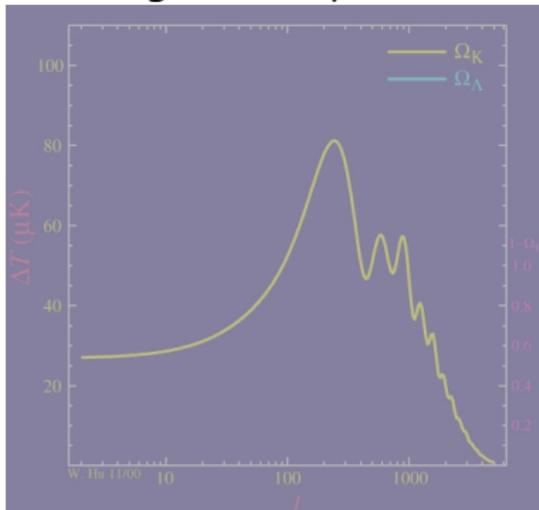
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



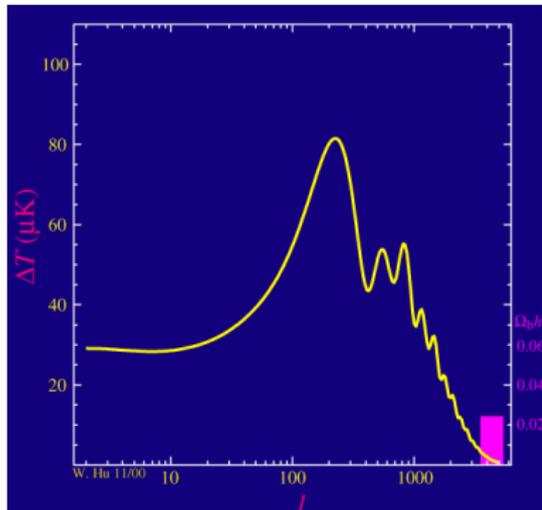
► Replay



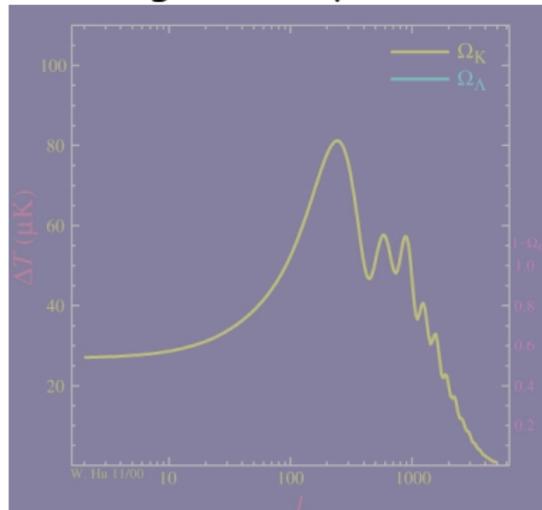
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



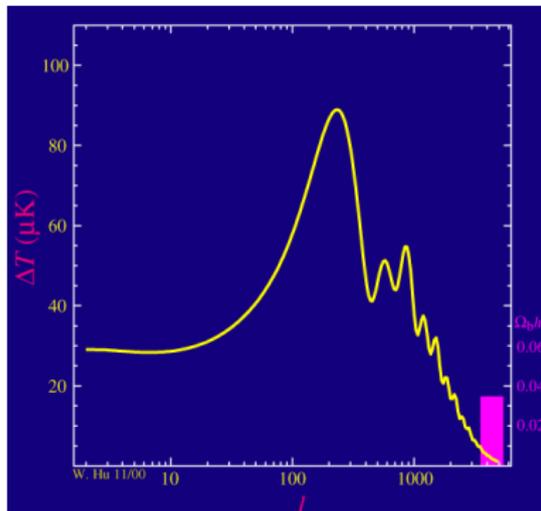
► Replay



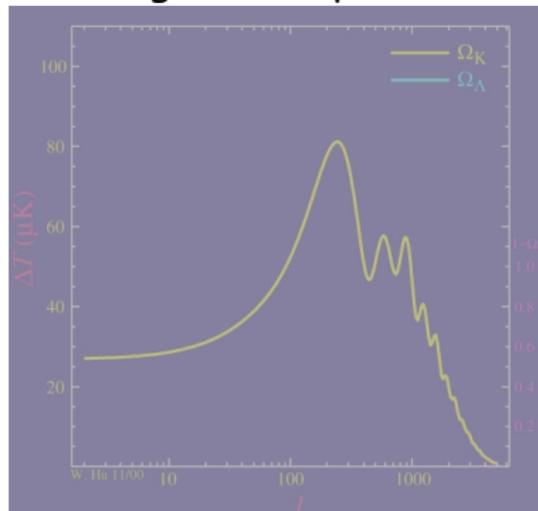
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



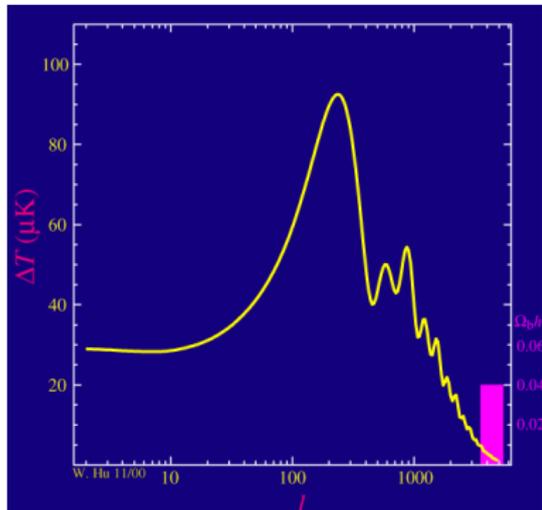
► Replay



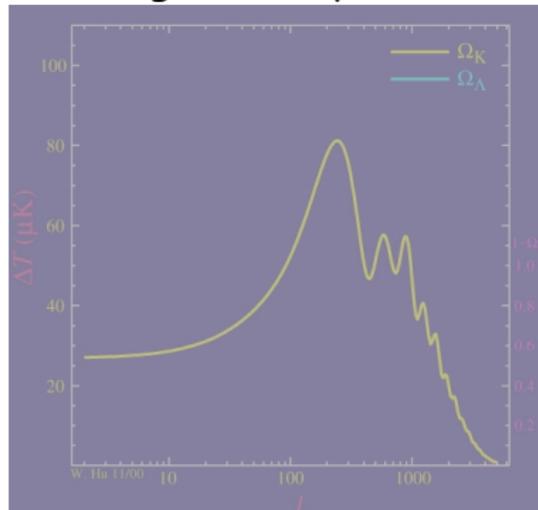
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



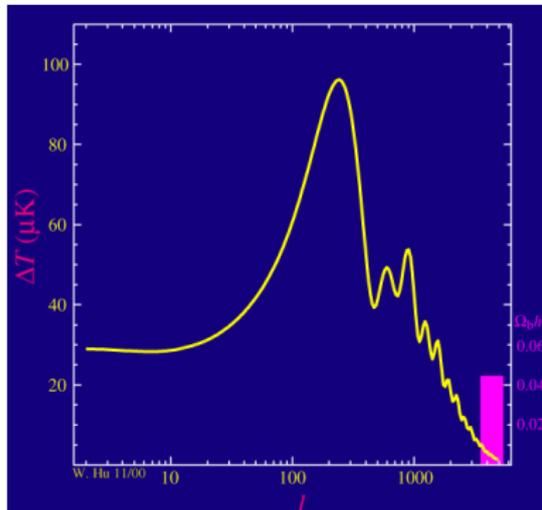
► Replay



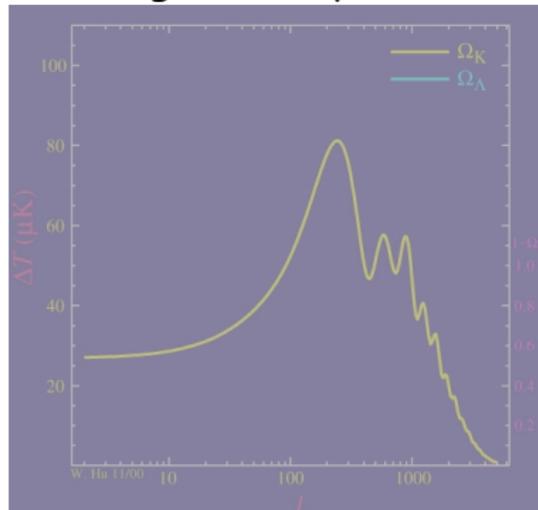
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



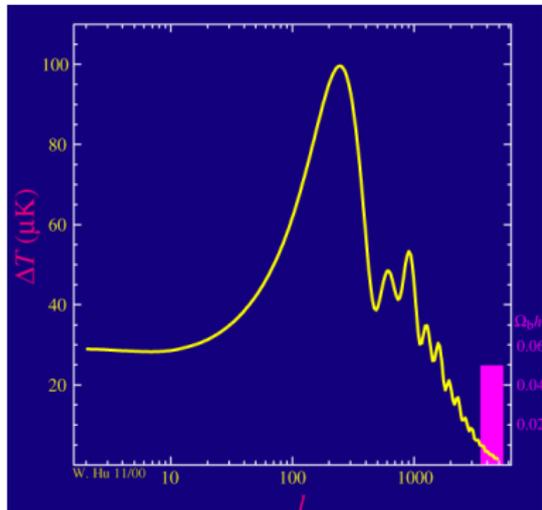
► Replay



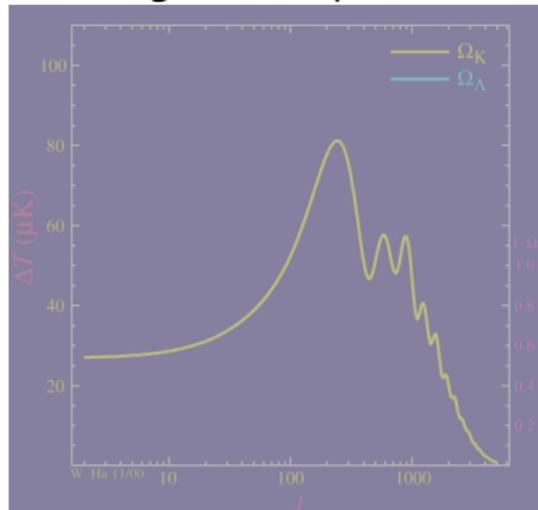
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



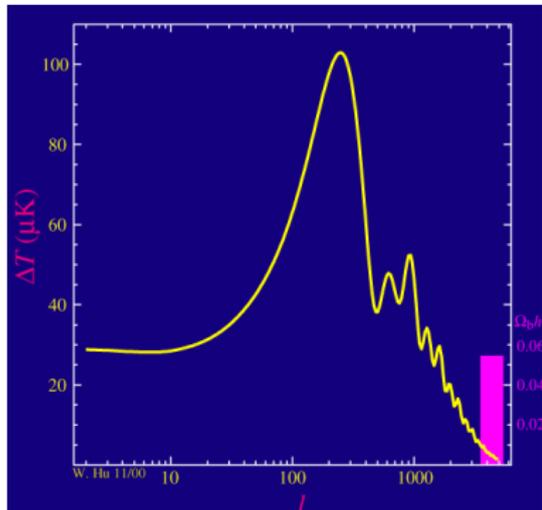
► Replay



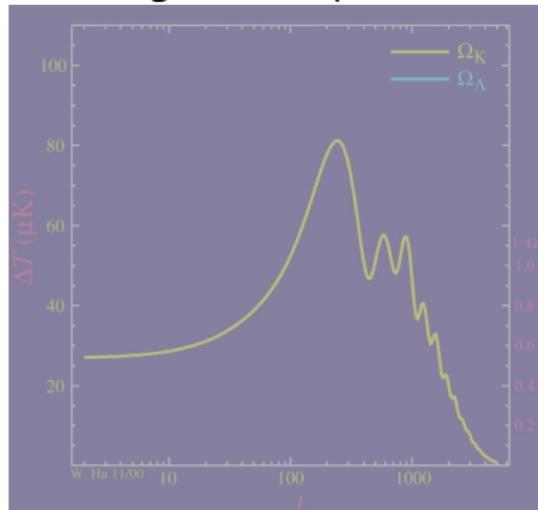
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



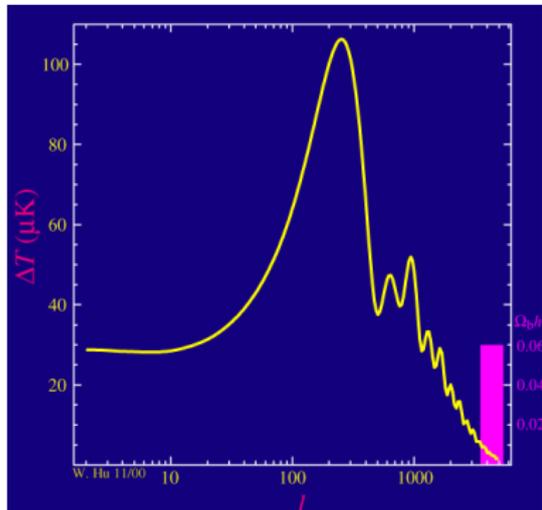
► Replay



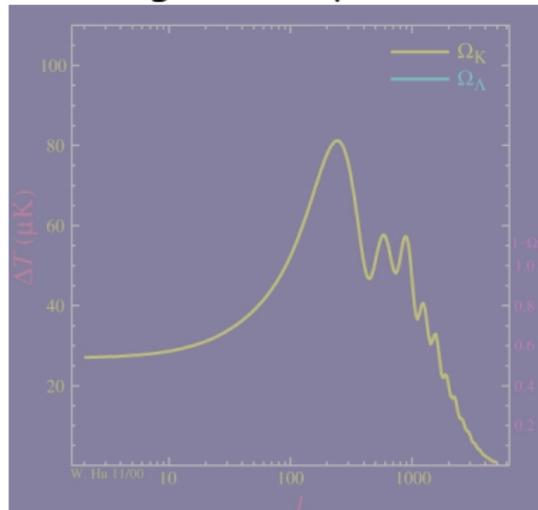
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



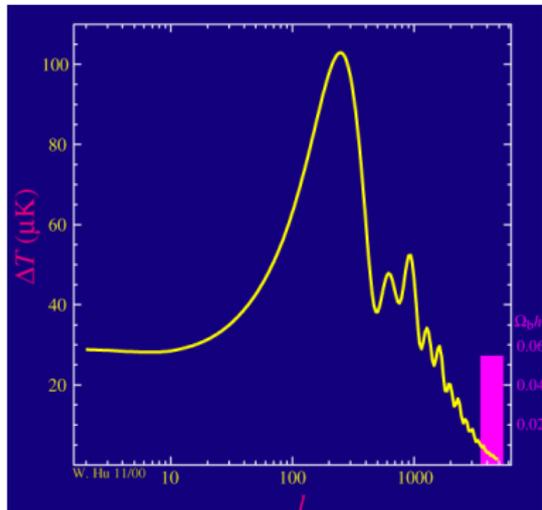
► Replay



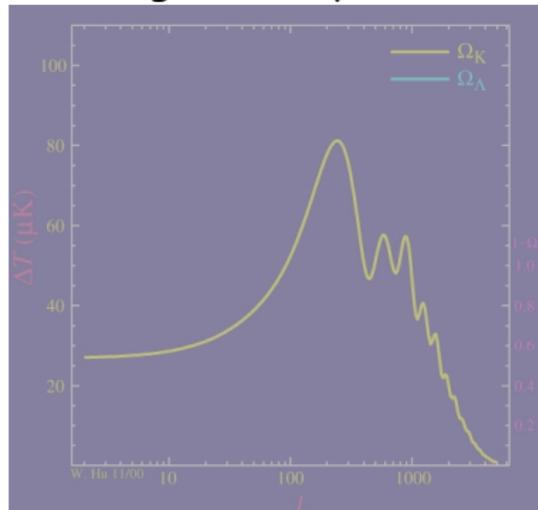
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



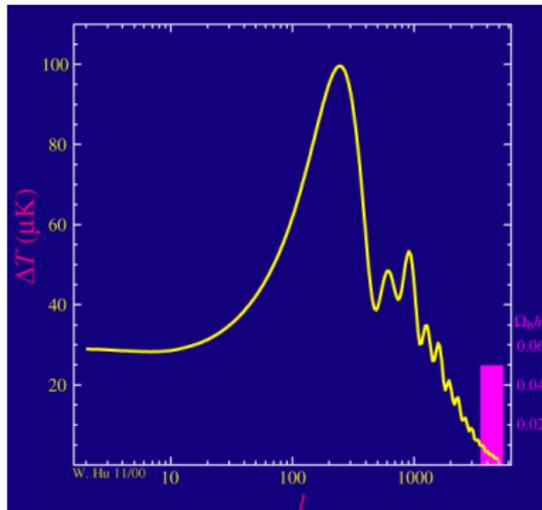
► Replay



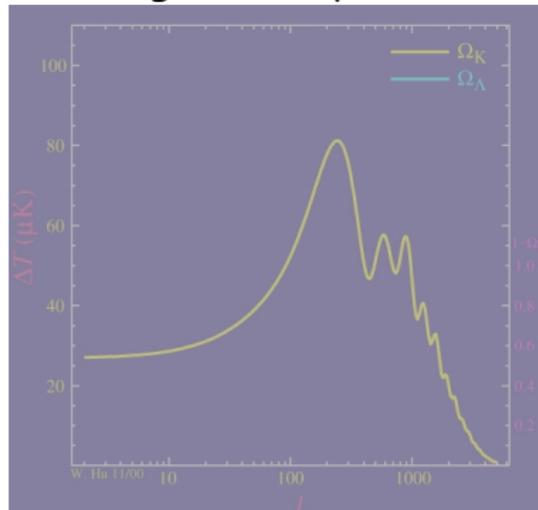
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



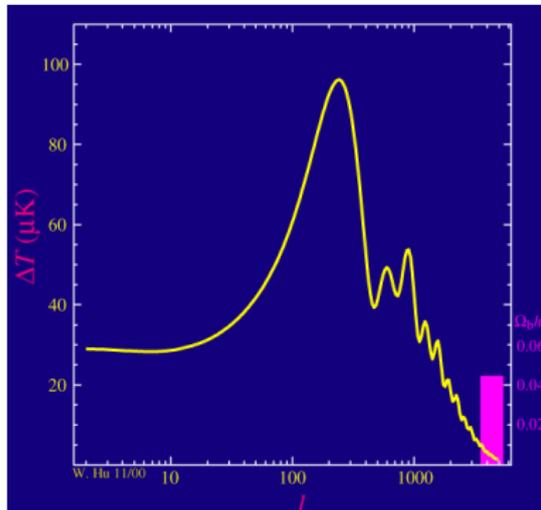
► Replay



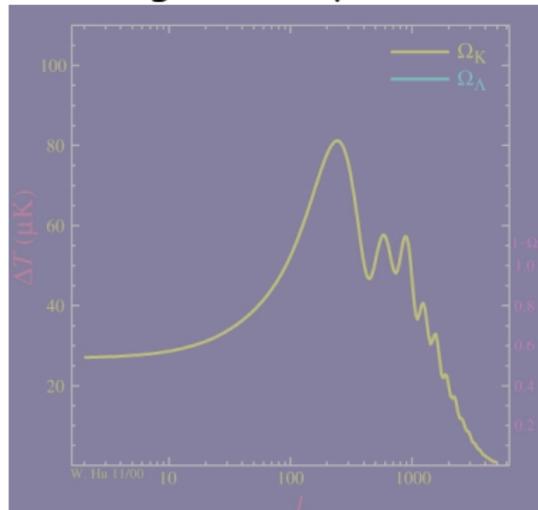
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



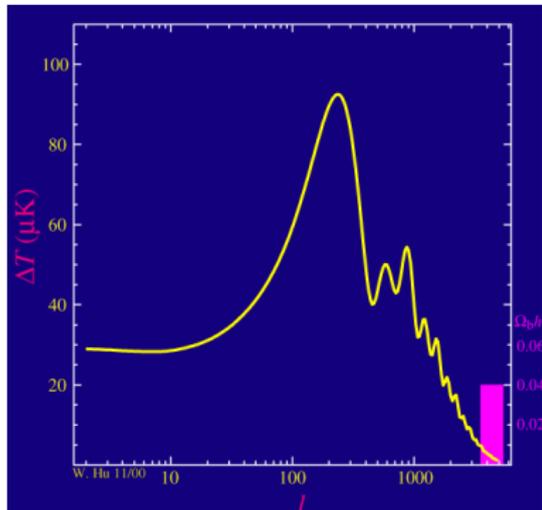
► Replay



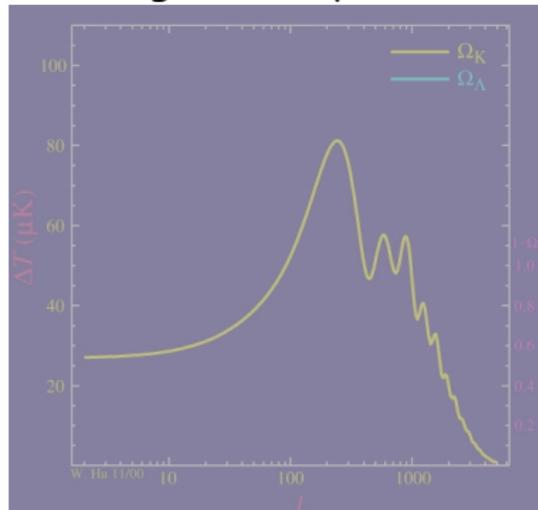
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



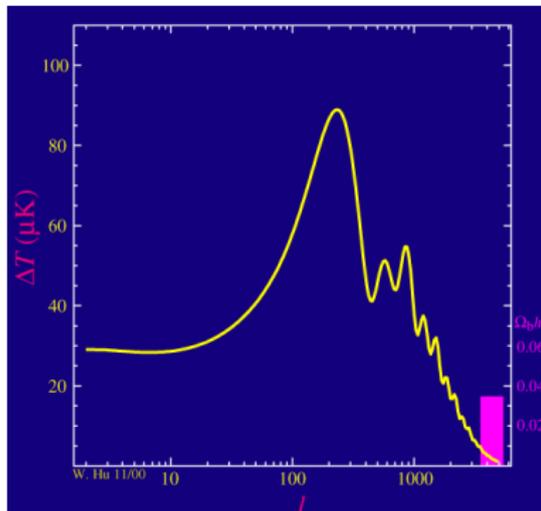
► Replay



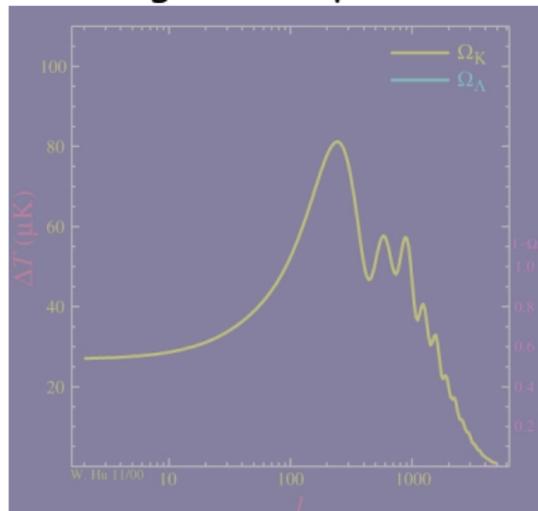
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



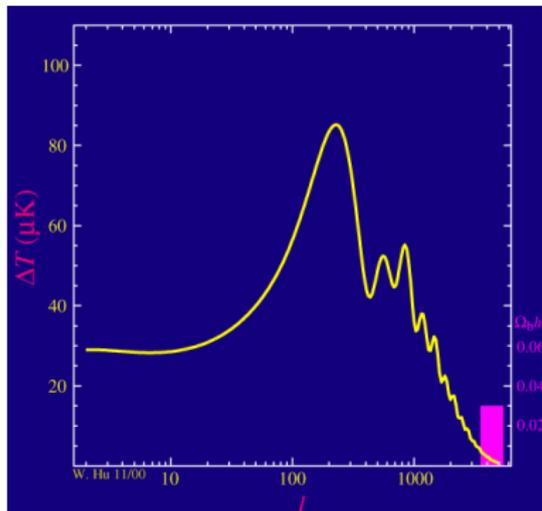
► Replay



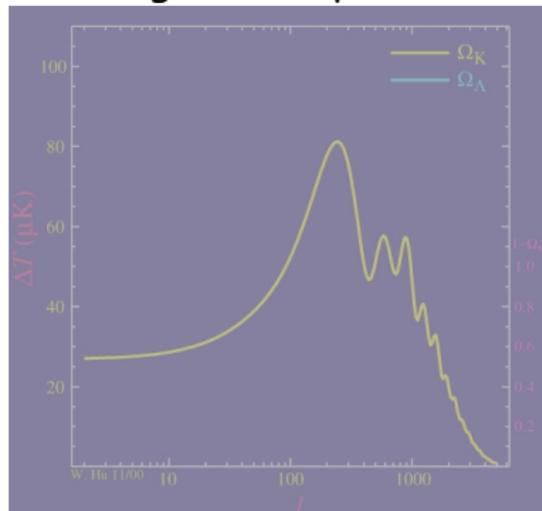
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



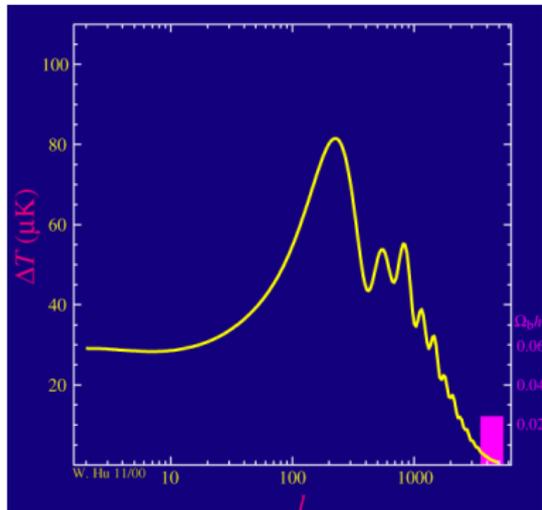
► Replay



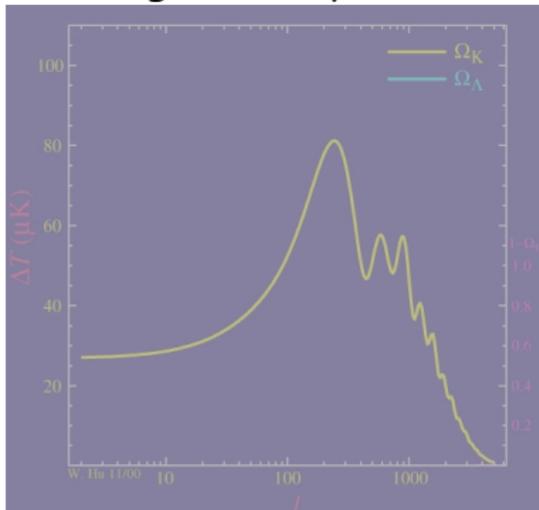
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



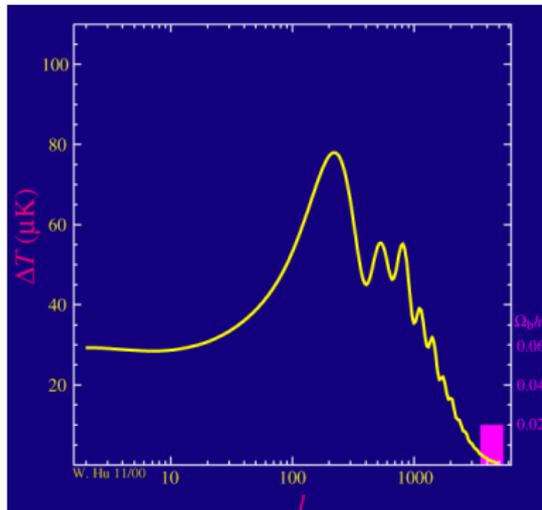
► Replay



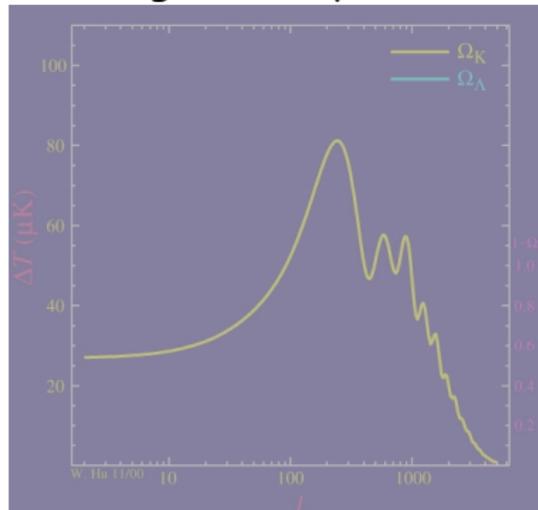
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



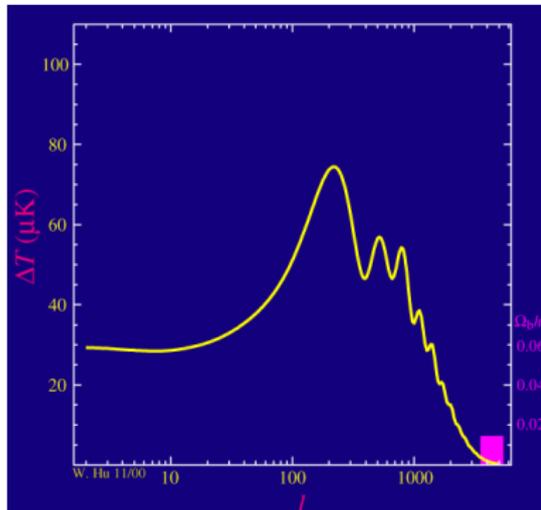
► Replay



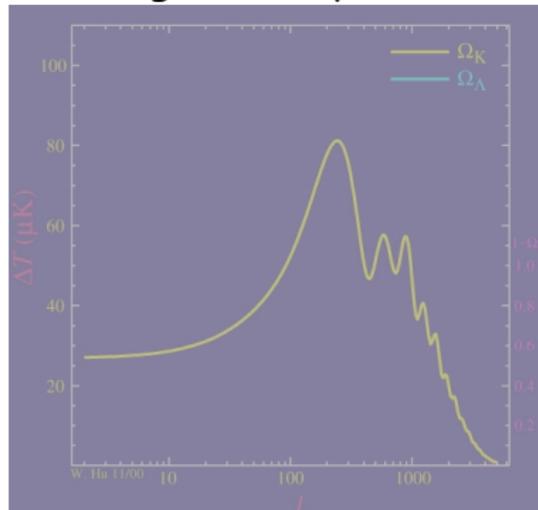
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



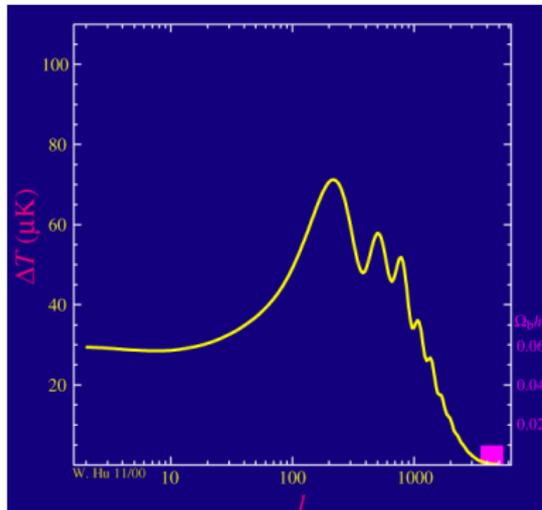
► Replay



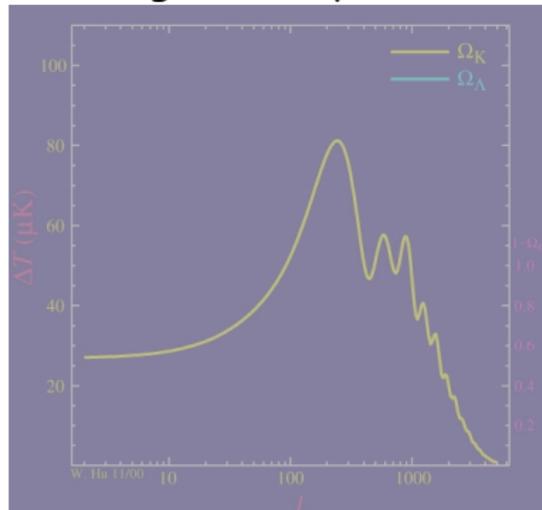
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



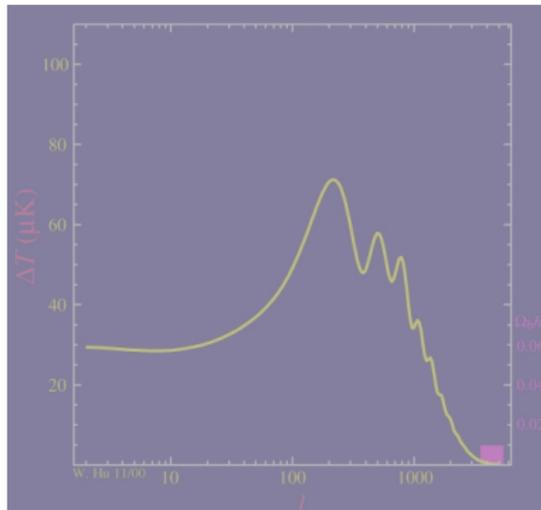
► Replay



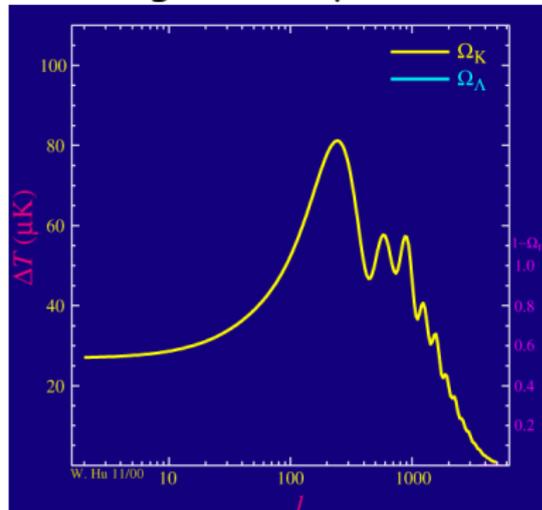
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



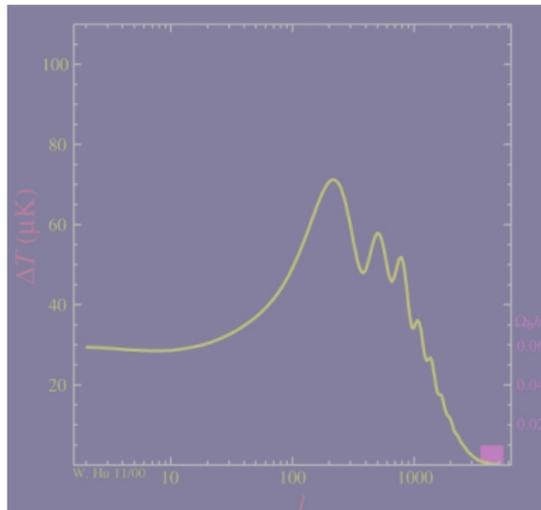
► Replay



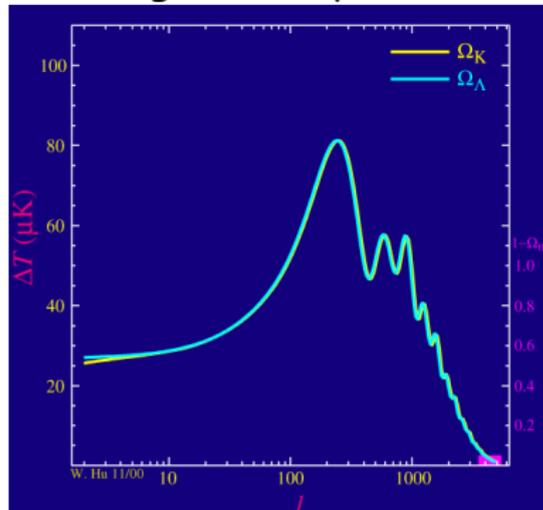
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



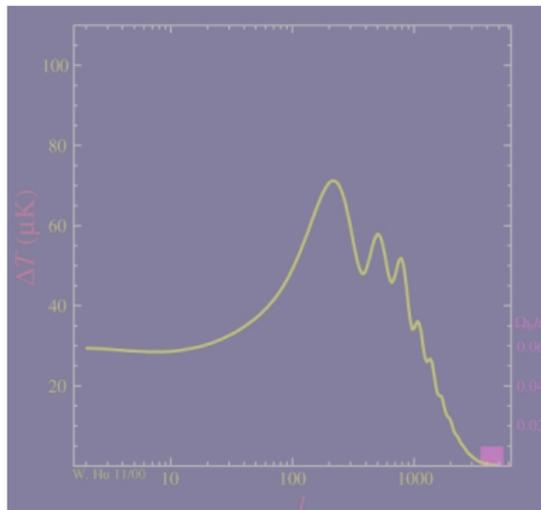
► Replay



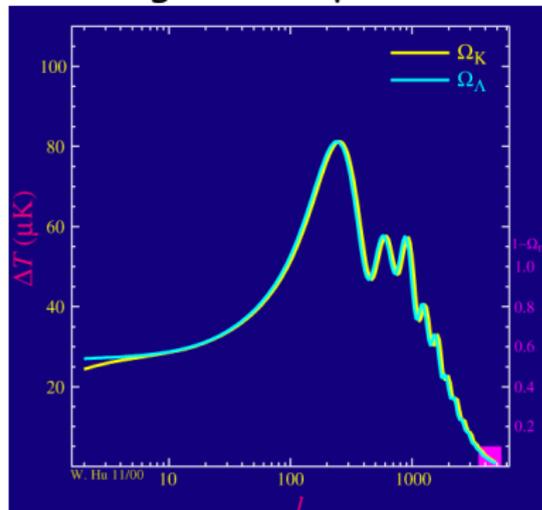
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



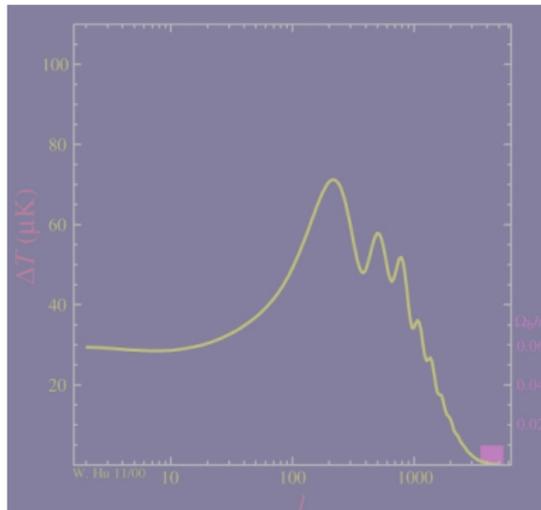
► Replay



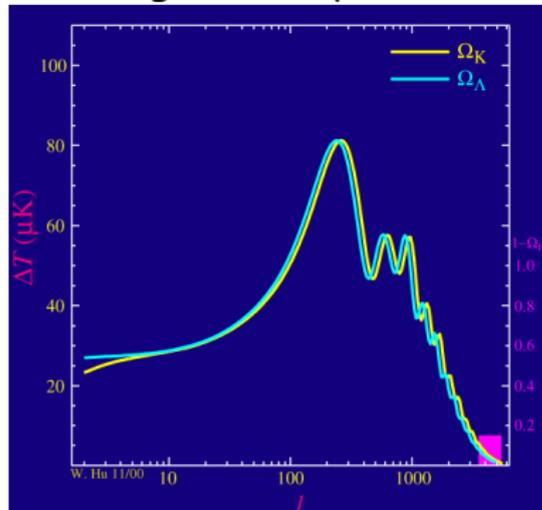
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



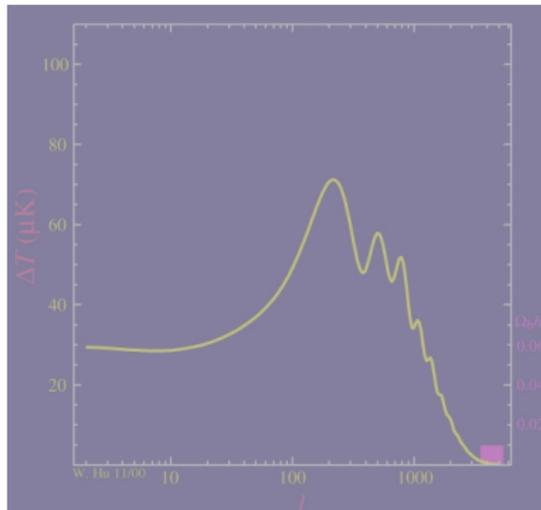
► Replay



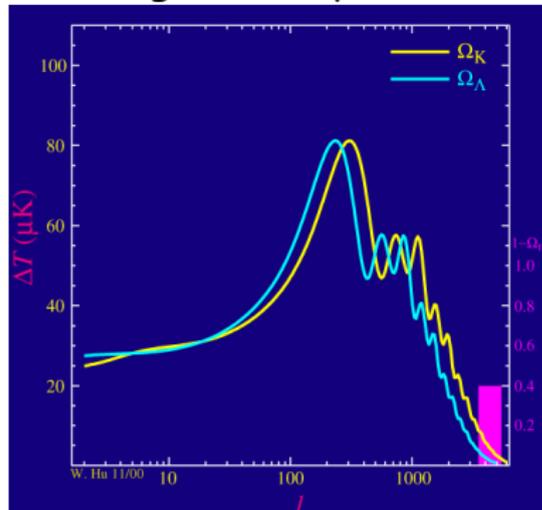
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



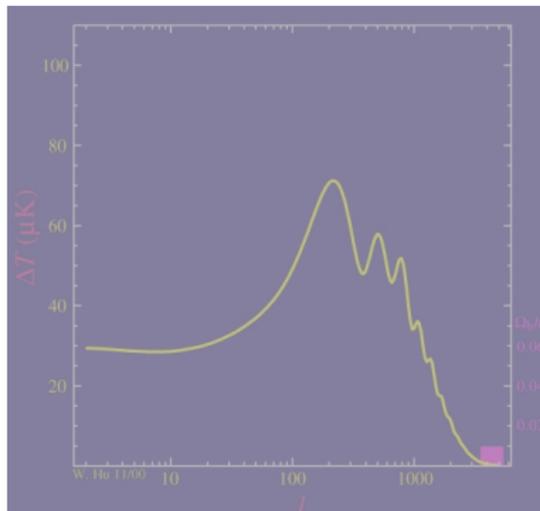
► Replay



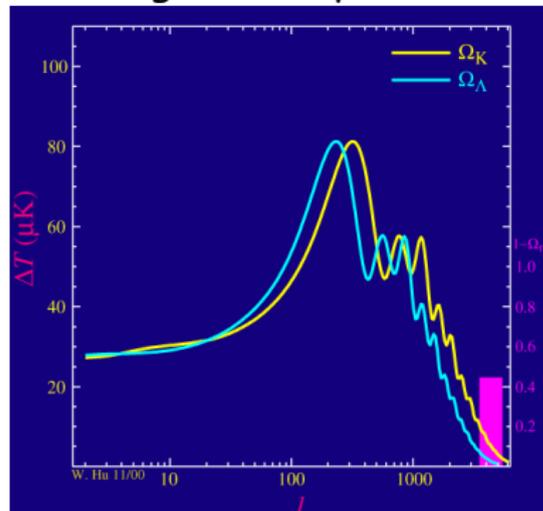
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



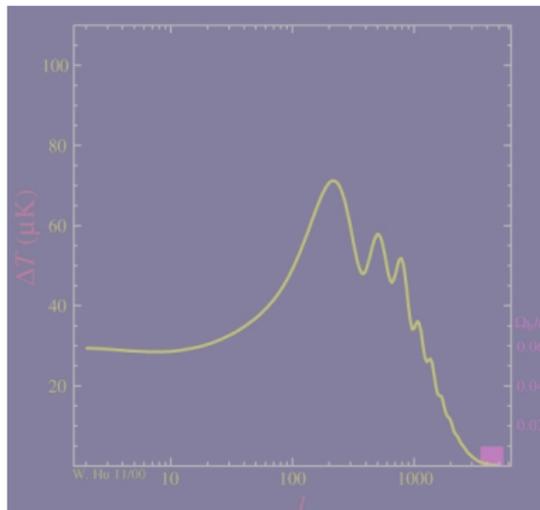
► Replay



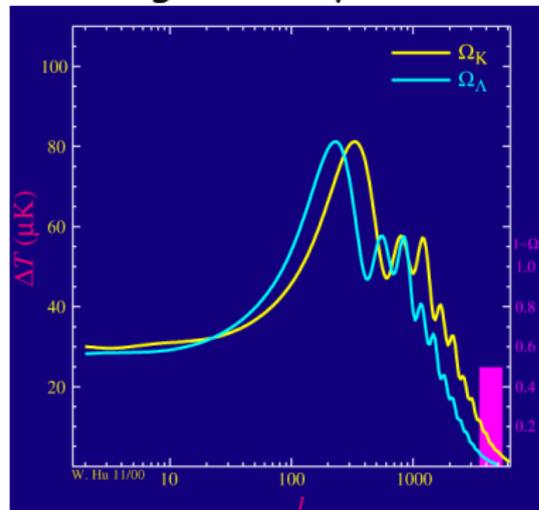
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



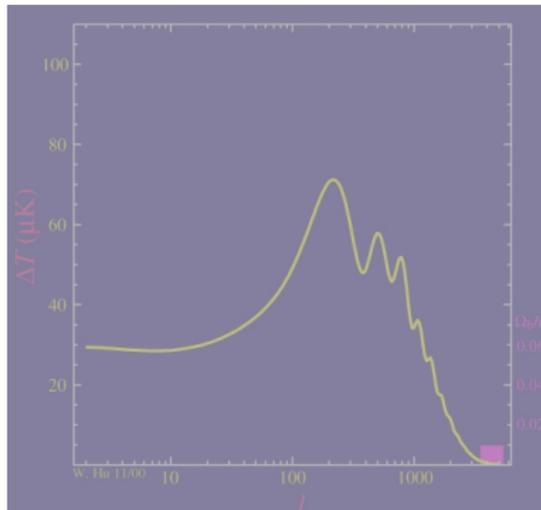
► Replay



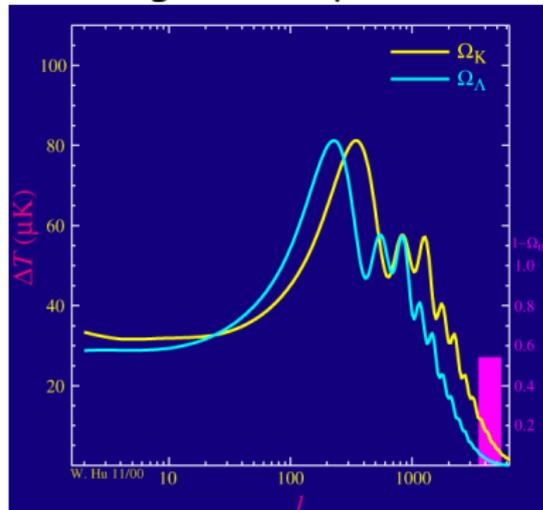
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



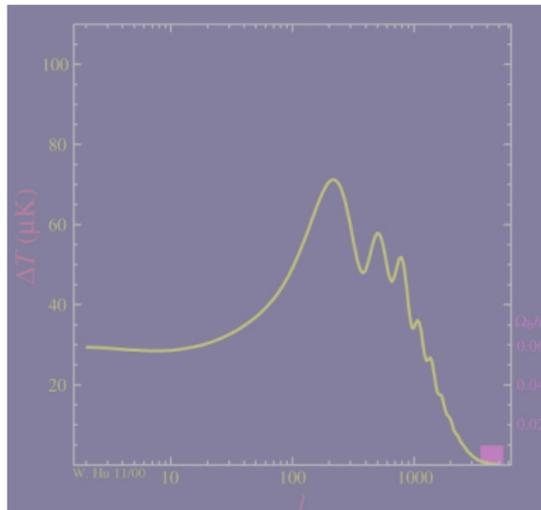
► Replay



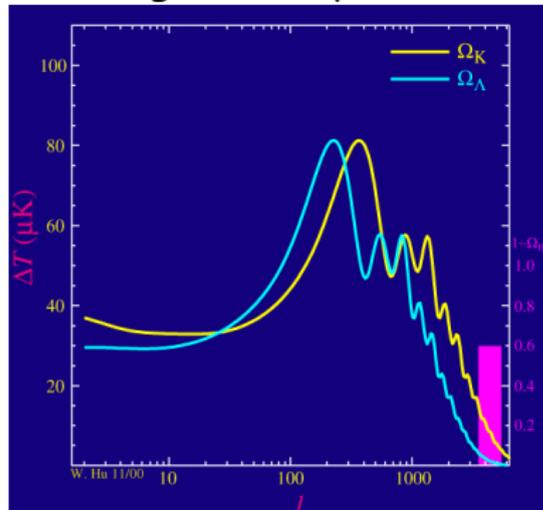
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



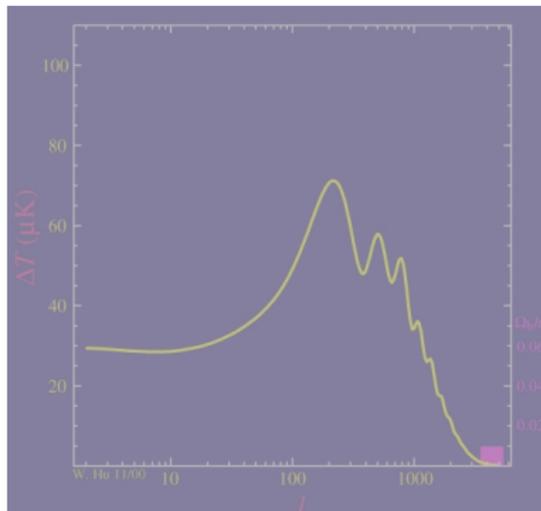
► Replay



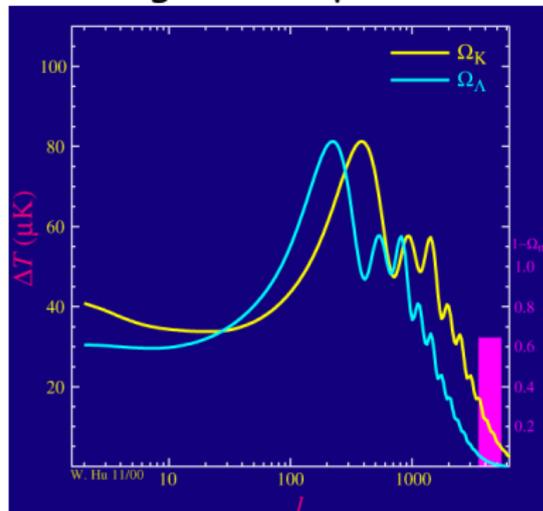
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



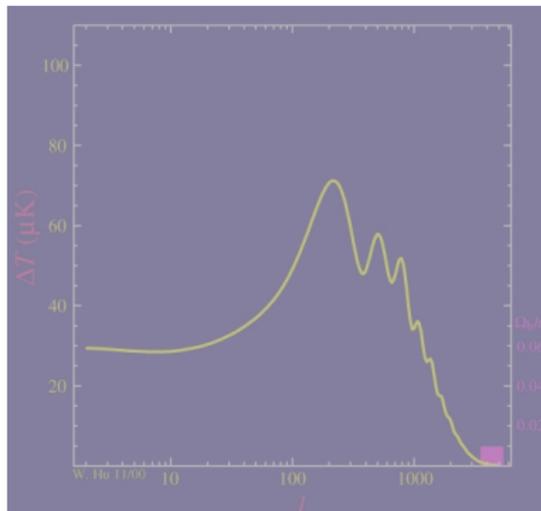
► Replay



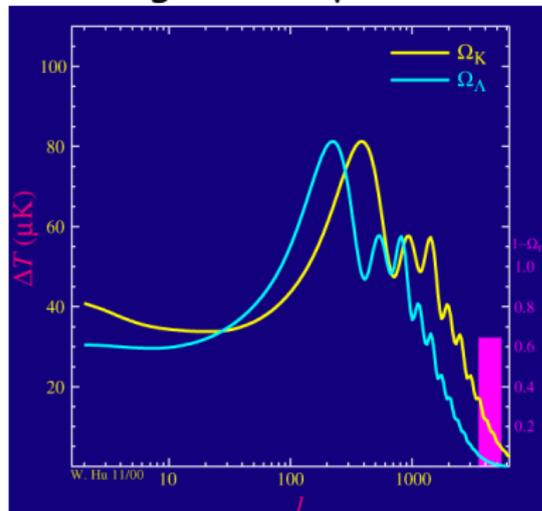
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



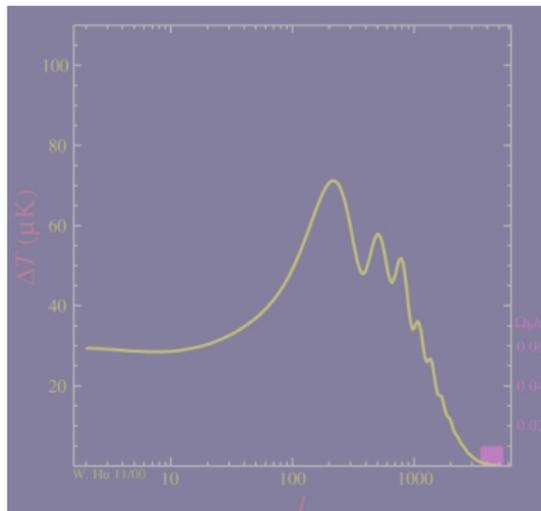
► Replay



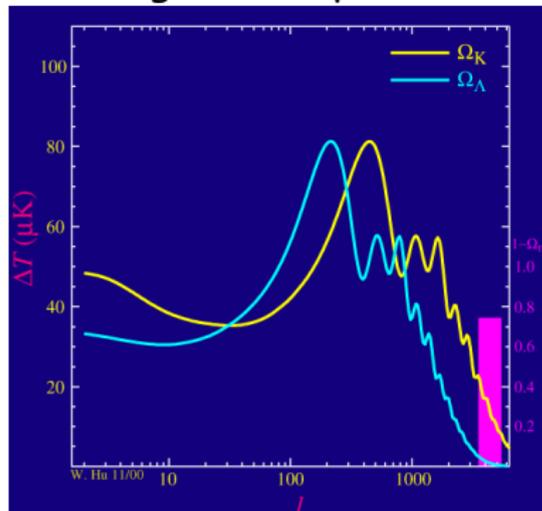
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



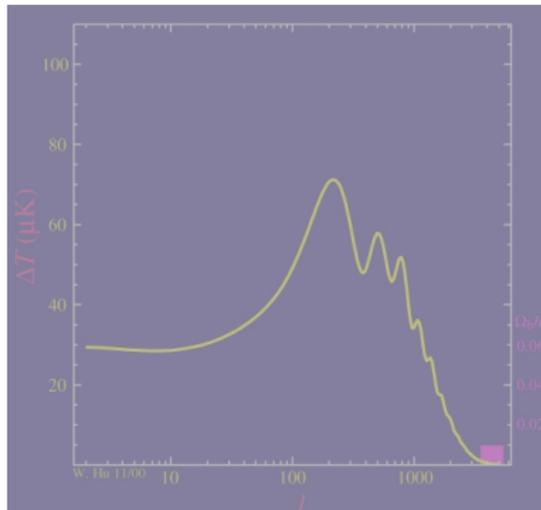
► Replay



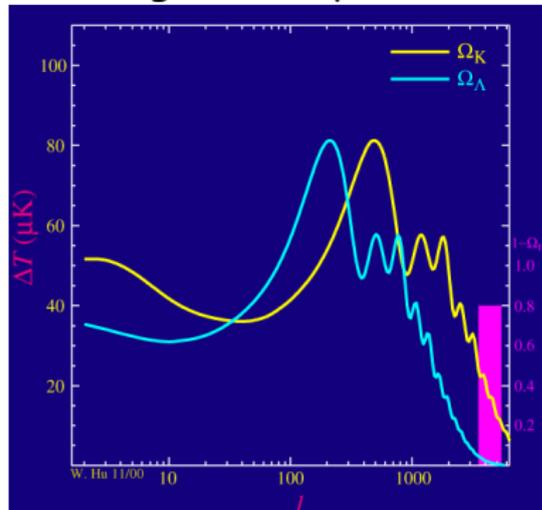
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



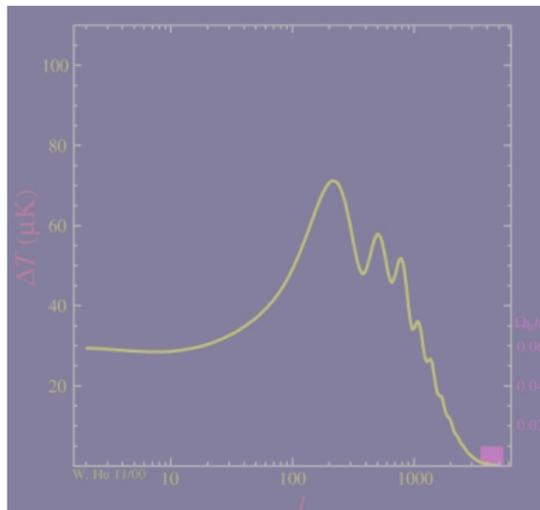
► Replay



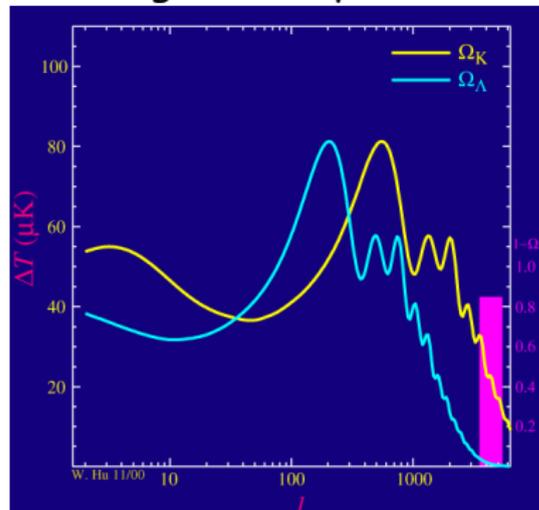
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



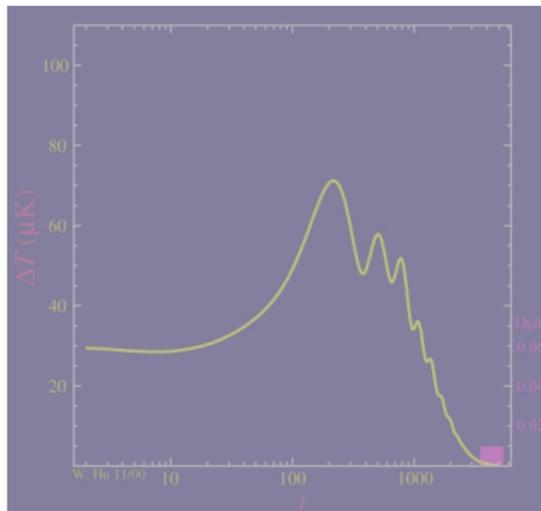
► Replay



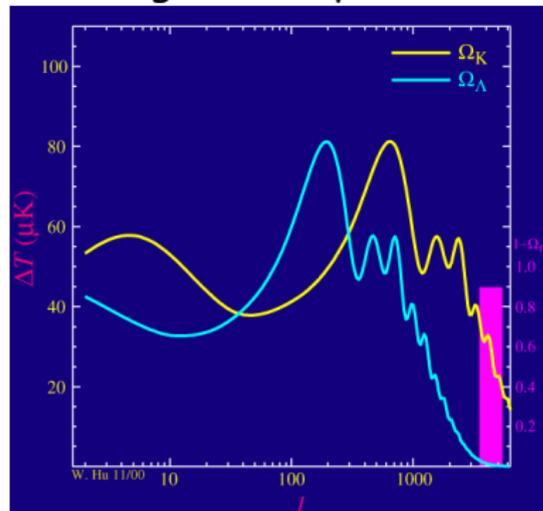
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



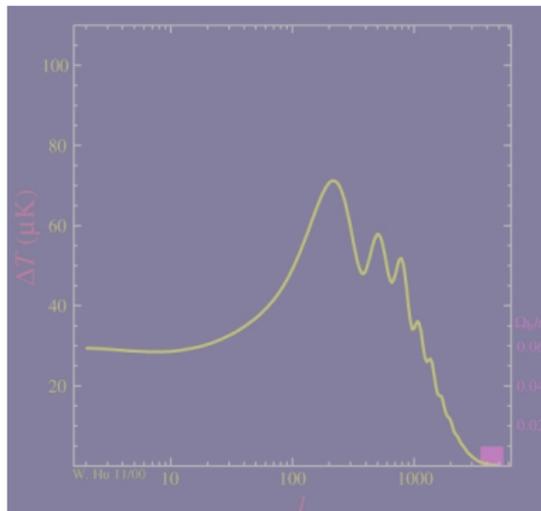
► Replay



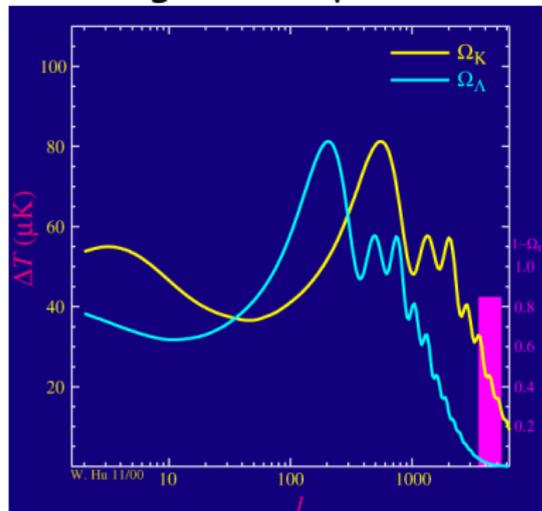
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



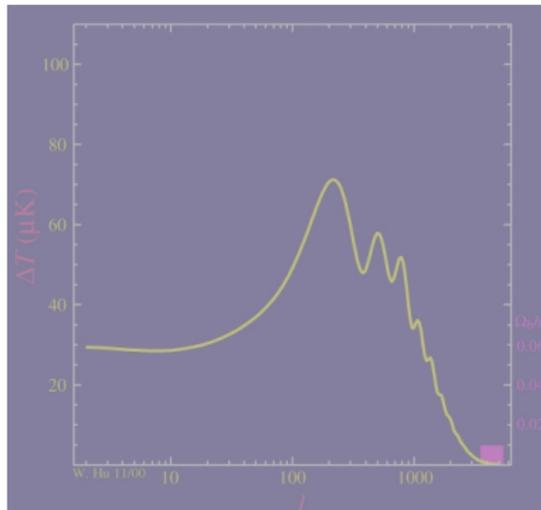
► Replay



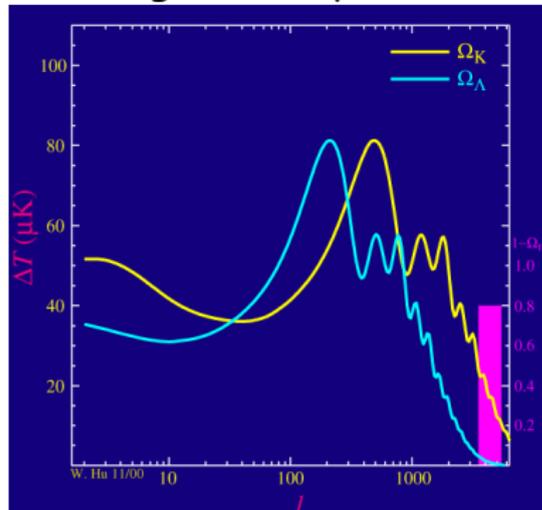
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



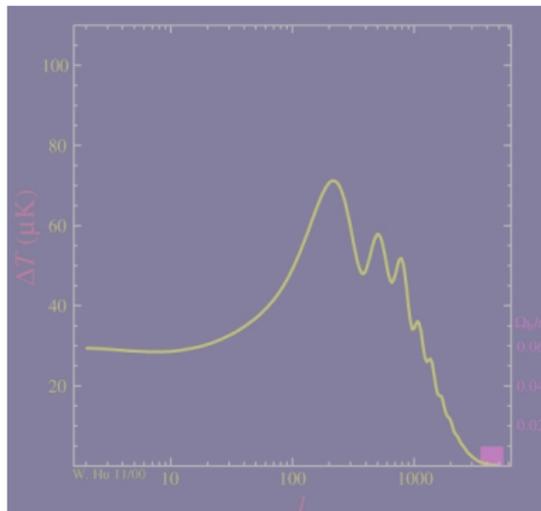
► Replay



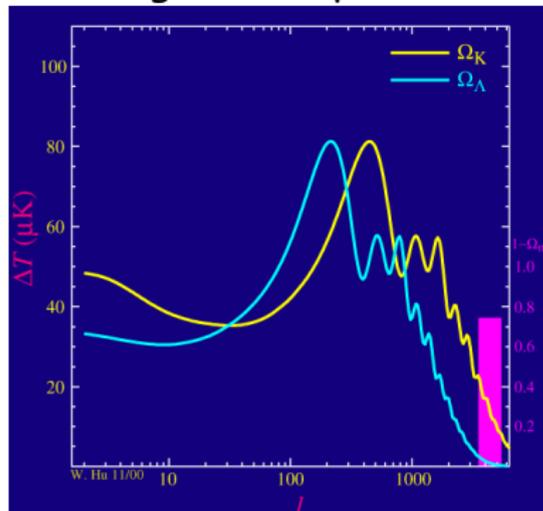
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



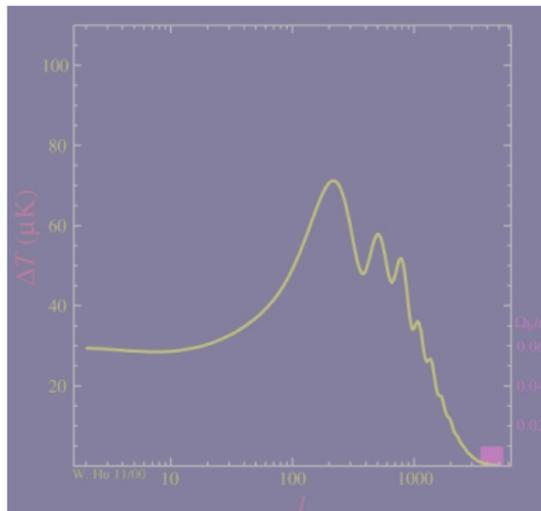
► Replay



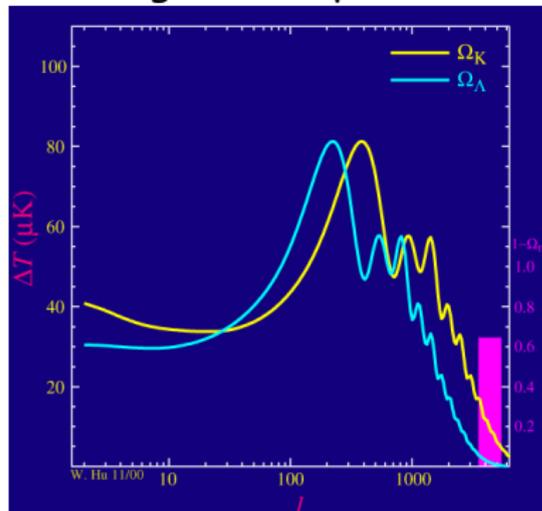
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



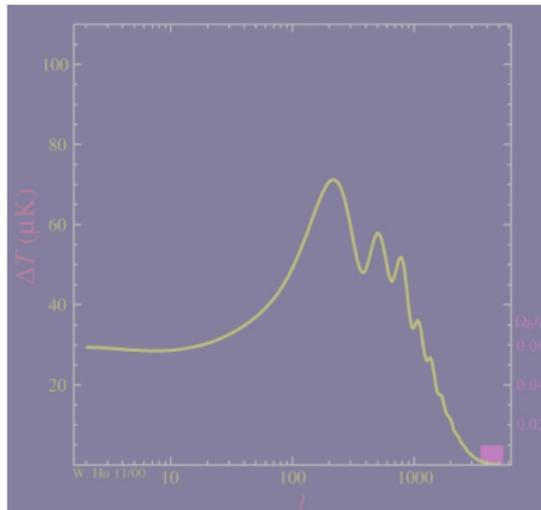
► Replay



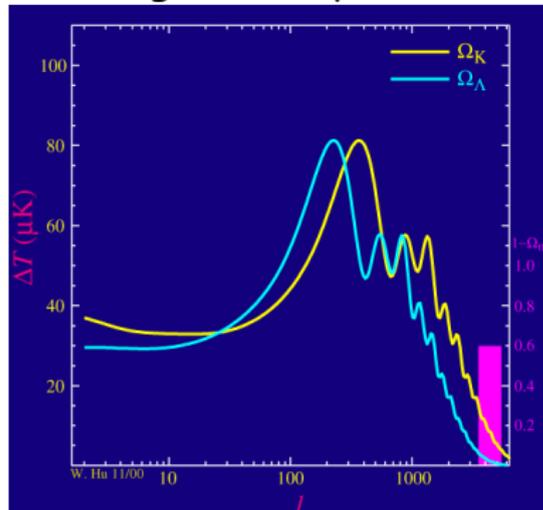
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



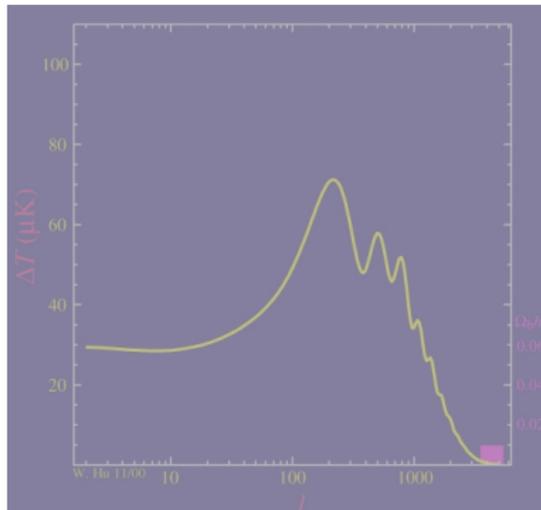
► Replay



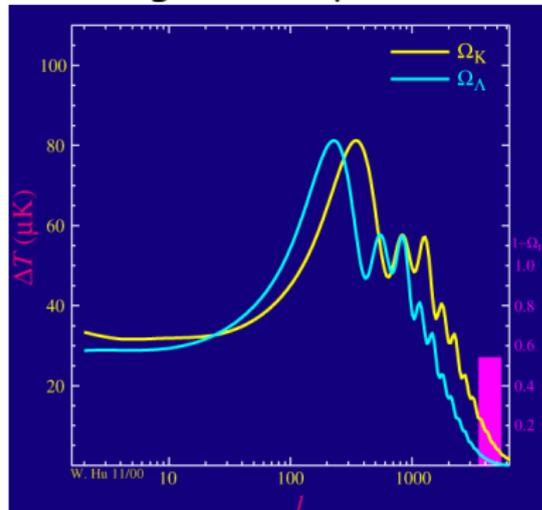
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



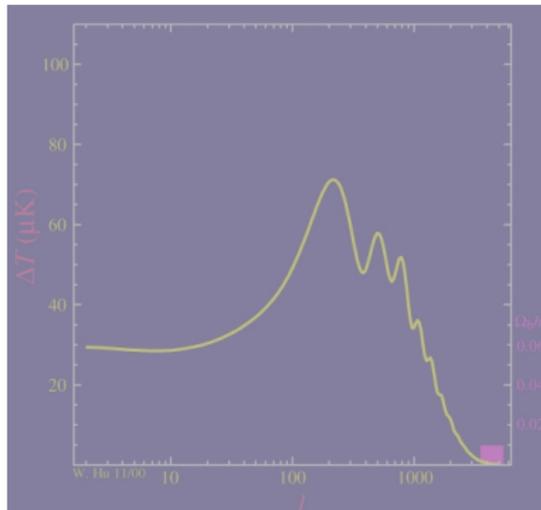
► Replay



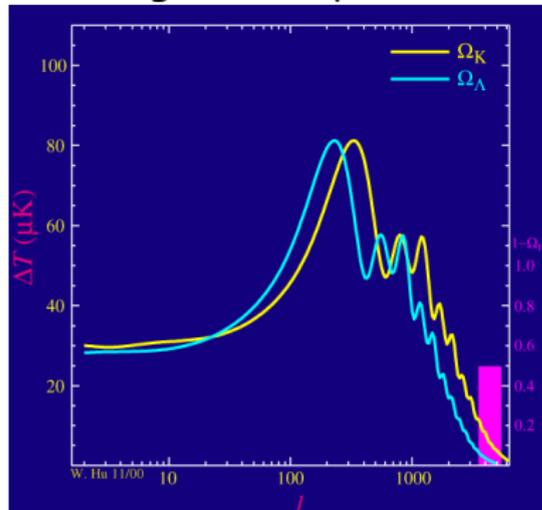
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



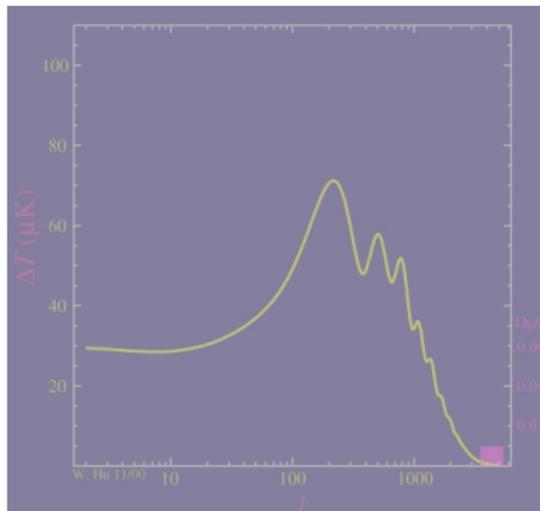
► Replay



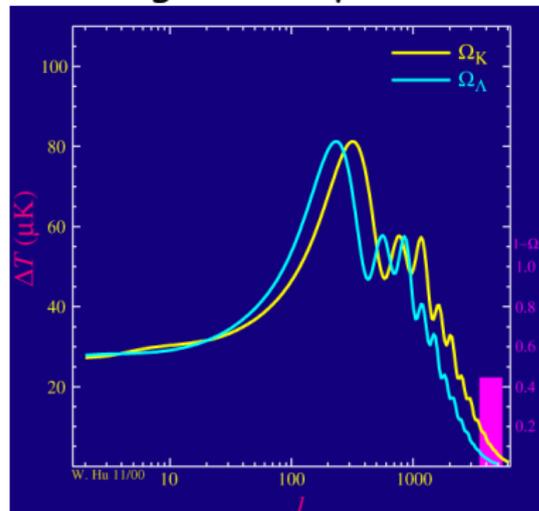
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



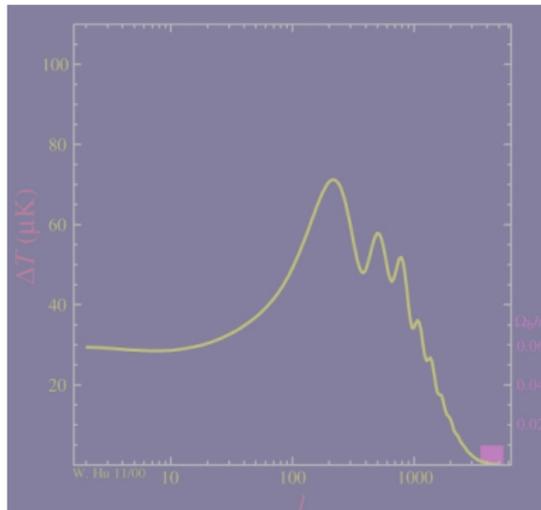
► Replay



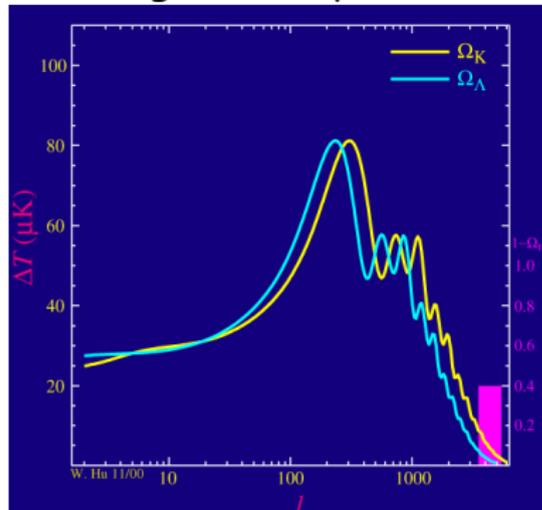
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



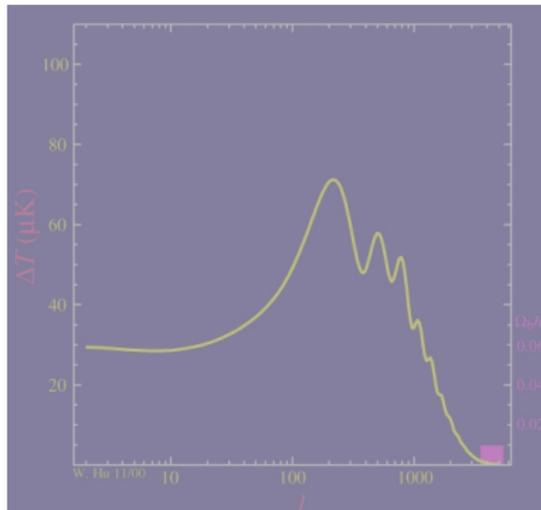
► Replay



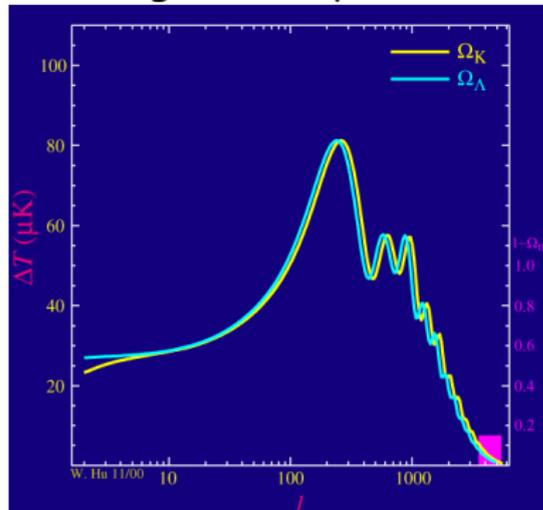
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



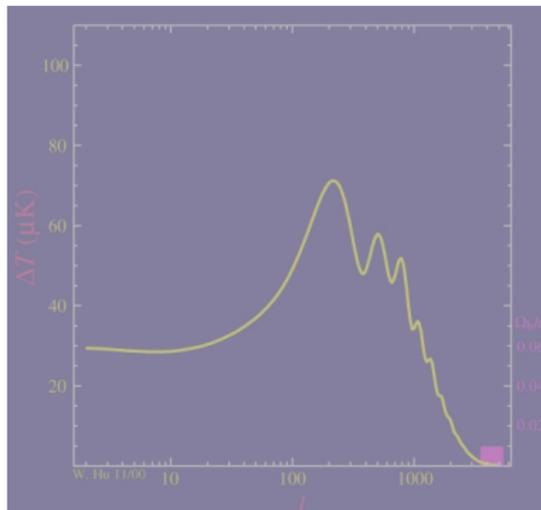
► Replay



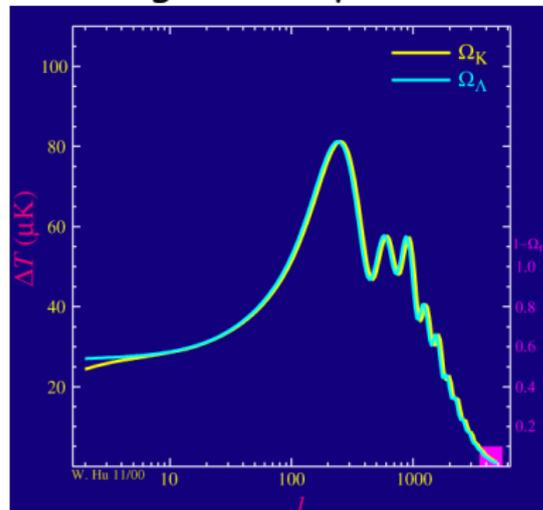
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



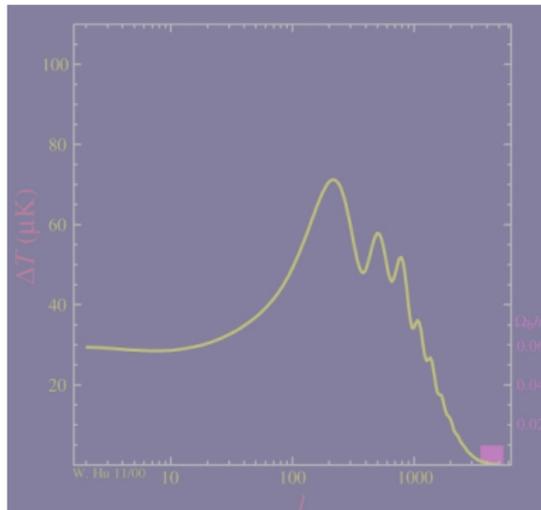
► Replay



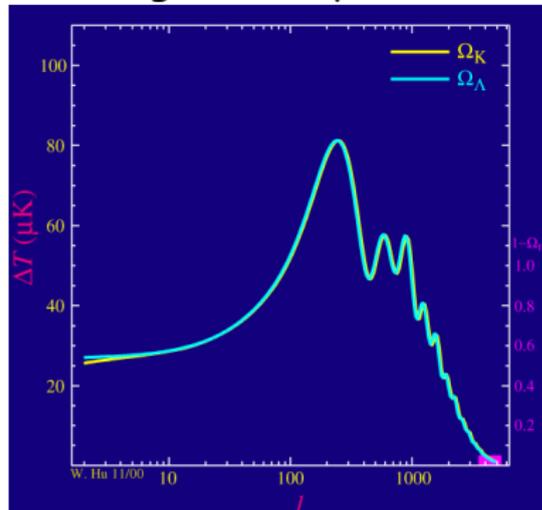
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



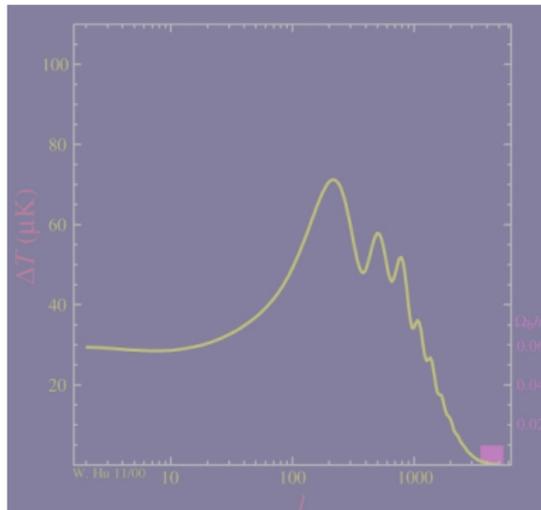
► Replay



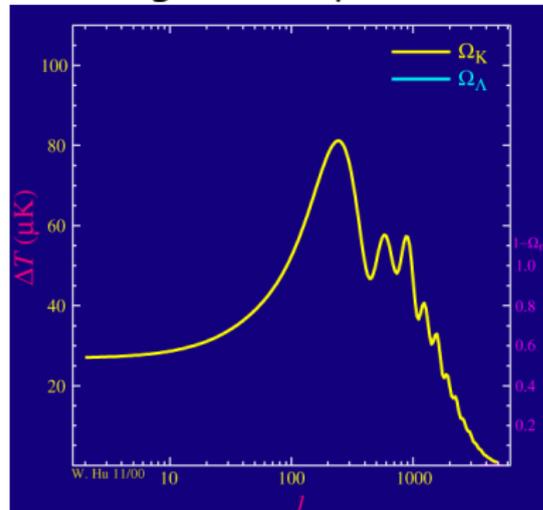
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



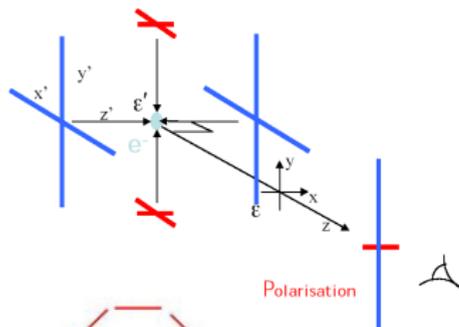
► Replay



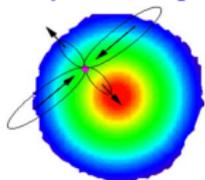
► Replay

Polarisation du CMB

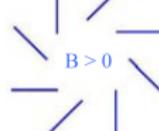
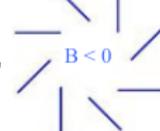
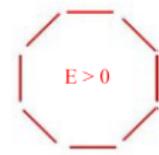
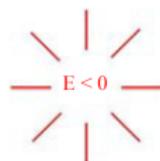
Quadrupolar
Temperature Anisotropies
+ Thomson scattering



Density Anisotropies



Primordial
Gravitational Waves



Polarisation : cartes et spectres

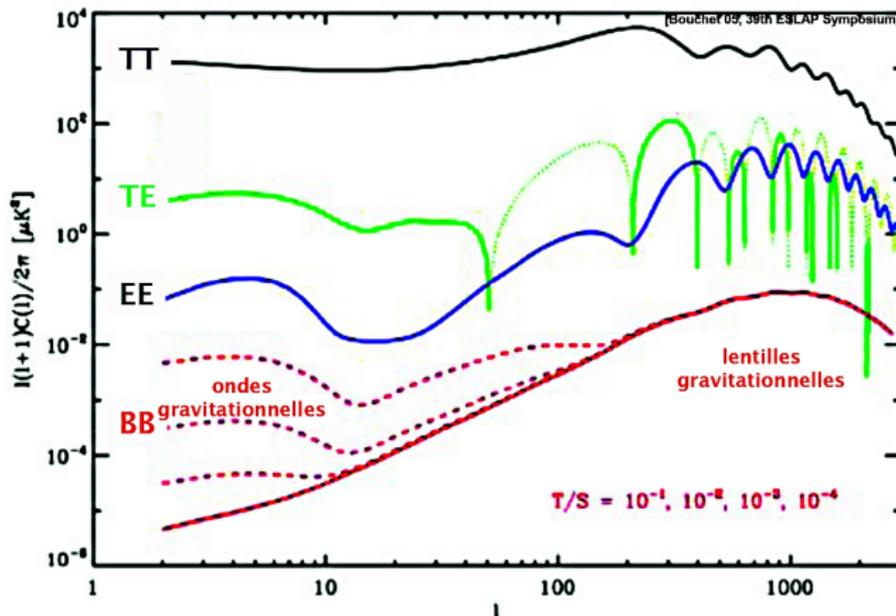
- 2 observables supplémentaires : Q et U (Stokes)
($m = I + Q \cos 2\psi + U \sin 2\psi$)
- cartes de I, Q et U
- spectres : $(Q + iU)(\theta, \varphi) = \sum_{\ell, m} \pm 2a_{\ell m} \pm 2Y_{\ell m}(\theta, \varphi)$

$$\rightarrow a_{\ell m}^E = -\frac{+2a_{\ell m} + -2a_{\ell m}}{2}, \quad a_{\ell m}^B = i\frac{+2a_{\ell m} - -2a_{\ell m}}{2}$$

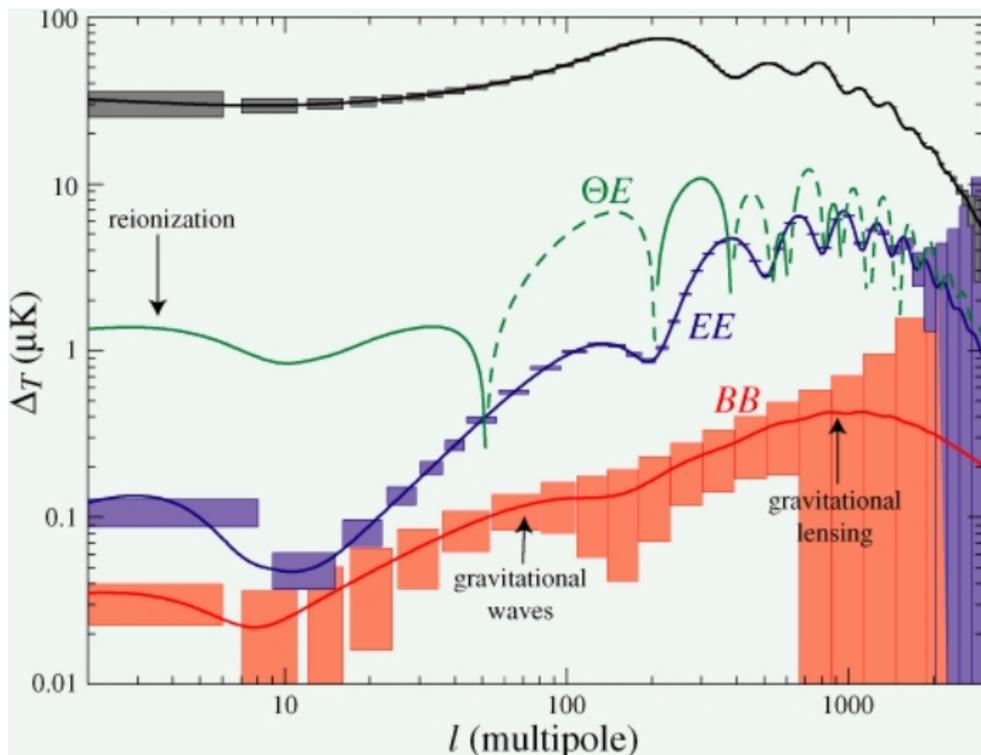
$$\rightarrow C_{\ell}^{XY} = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_m |a_{\ell m}^X a_{\ell m}^{Y*}| \quad (X, Y = T, E, B)$$

6 spectres mais $C_{\ell}^{EB} = C_{\ell}^{TB} = 0$ si pas de systés

Spectres de température & polarisation



Spectres de température & polarisation



sensibilité de Planck

Une mesure de ... tout!?

Les anisotropies du CMB combinent :

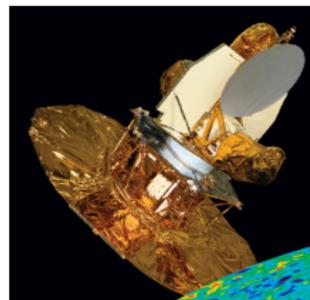
- 1 des informations "pre" ou sur l'**inflation**
- 2 des manifestation de la physique ("simple") du plasma primordial (**ondes acoustiques**) et de ses paramètres
- 3 les effets de la **géométrie** de l'univers
- 4 ... des indications sur l'inflations?

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

Aperçu expérimental

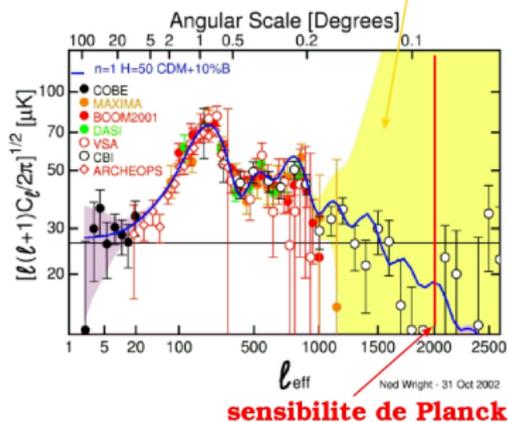
- COBE-DMR (1992) anisotropies (radio, espace)
- Boomerang, Maxima (1998, ballon + bolomètres) : 1eres mesures de Ω_0 avec le CMB
- Archéops (2002) (ballon + bolomètres)
- CBI, VSA, DASI (interférométrie radio, sol, 2000-2) : petites échelles
- WMAP 2003(-7-?) (radio, espace)
Mesures de $\delta T/T$ 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"

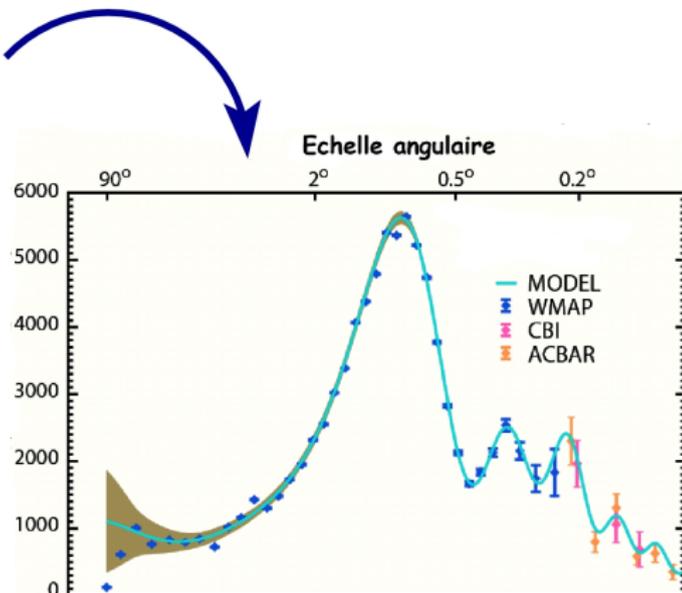


Les C_ℓ hier et aujourd'hui

sensibilite (prevue) de WMAP



Resultats de WMAP



Planck

missions de l'ESA

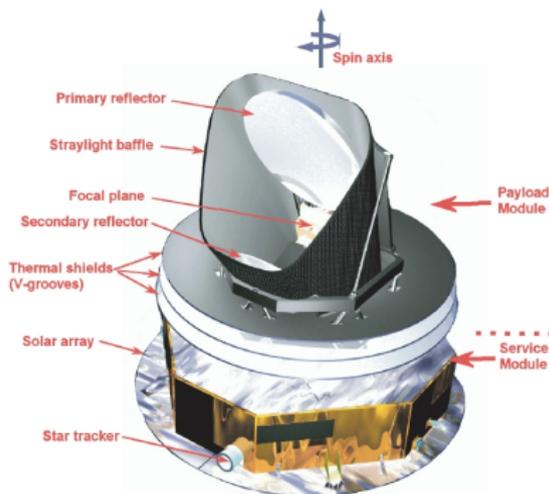
Lancement : 15/04/2009

(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

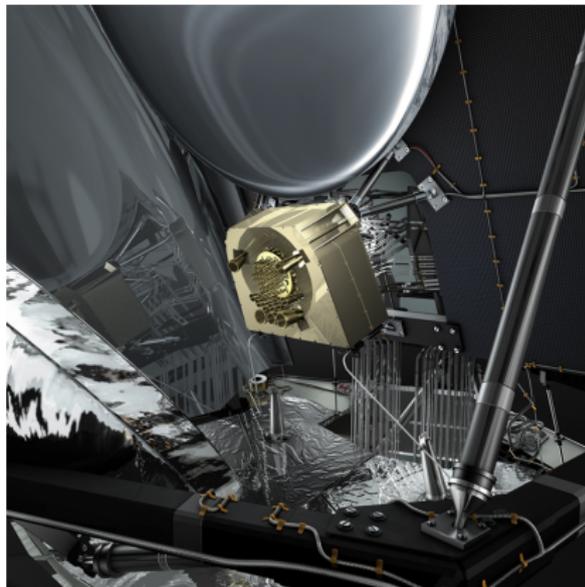
Lancement : 15/04/2009

(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 : 15/04/2009

(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

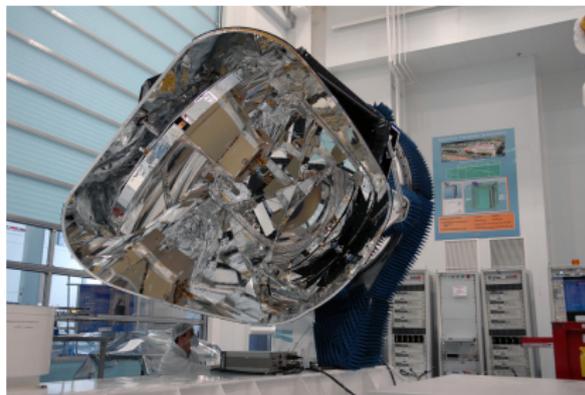
Lancement : 15/04/2009

(avec Hershell)

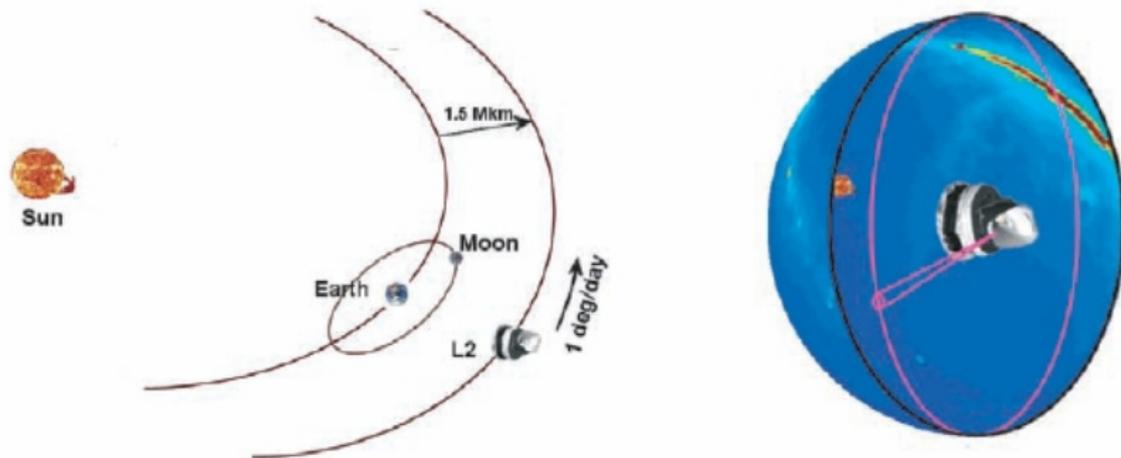
Durée garantie : 14 mois (2 sur-veys) @ L2 (1.5Mkm)

- 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

- δT : cartes ds 9 bandes entre 30 and 857 GHz
- polarisation : cartes (30 to 353 GHz)
- cartes des ~ 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

Séparation de composantes : basées sur leur spectre e.m.

Bandes des détecteurs de Planck

"avant-plan" syst.

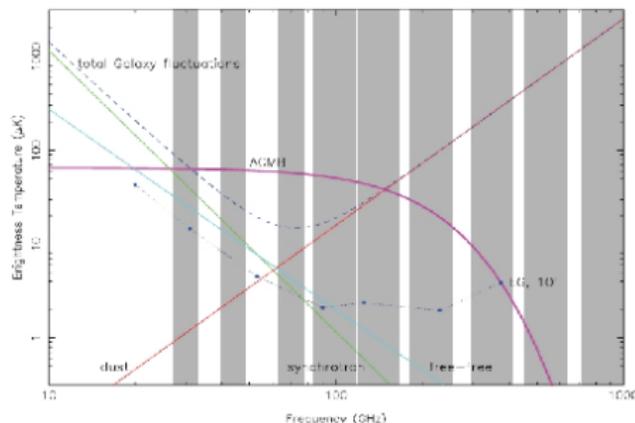
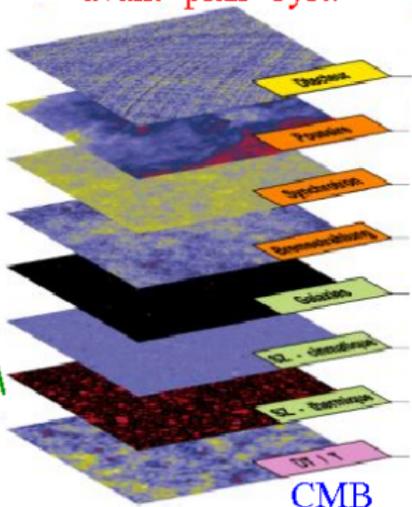
Canaux de Planck (approx)

LFI

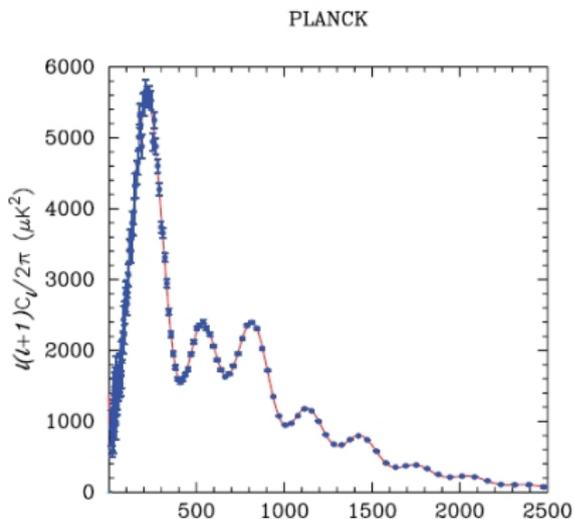
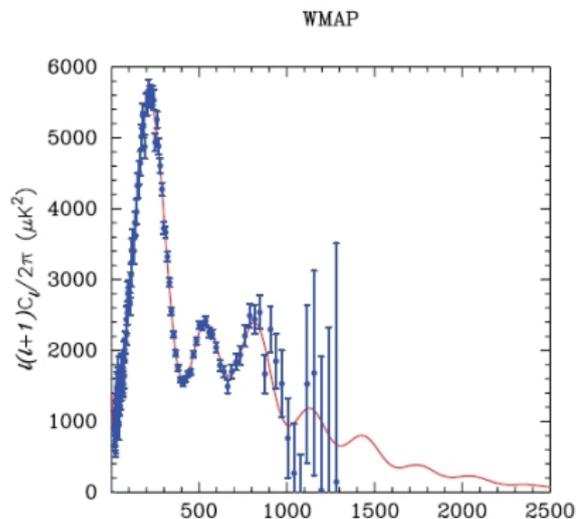
HFI

avant-plans astro

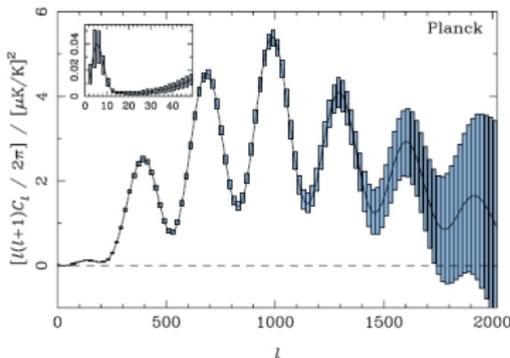
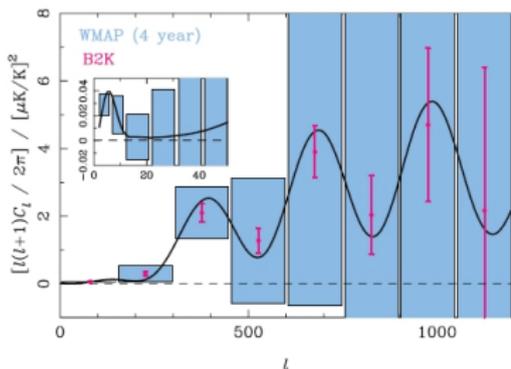
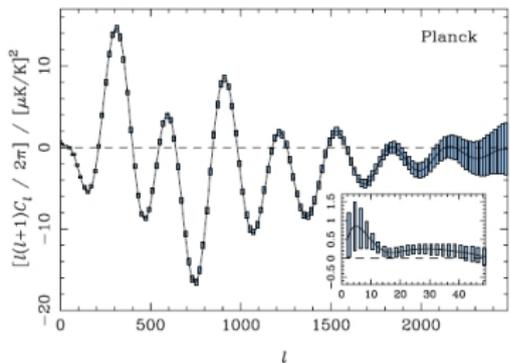
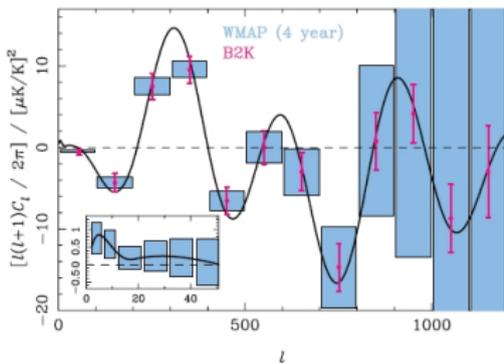
Figure 10.10.1



Planck vs WMAP (Temperature)

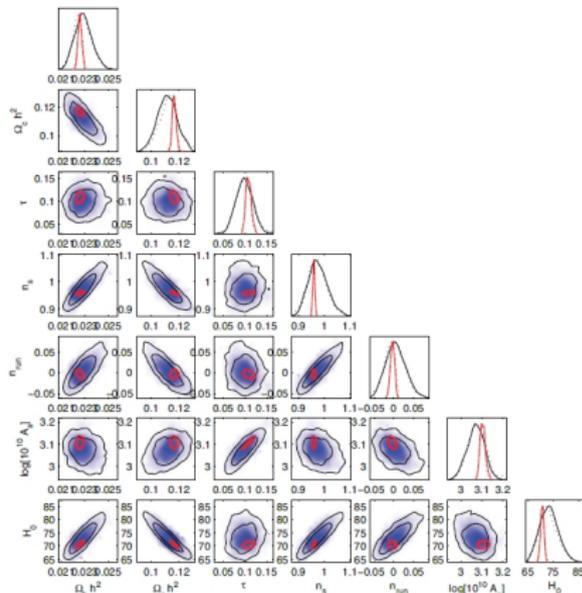


Planck vs WMAP (spectres TE and EE)



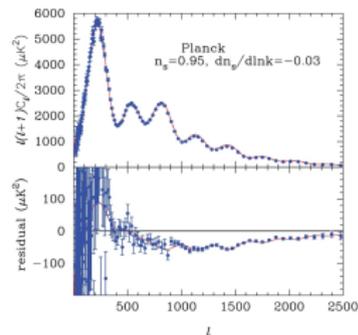
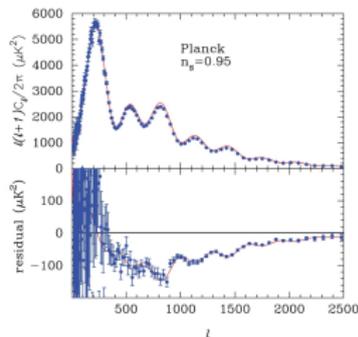
Contraintes cosmologiques

- large intervalle de $\ell \Rightarrow$
 - ▶ moins de dégénérescences
 - ▶ meilleure sensibilité p.ex. au spectre primordial
- grande précision \Rightarrow lensing du CMB accessible (C_ℓ , 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, ...)



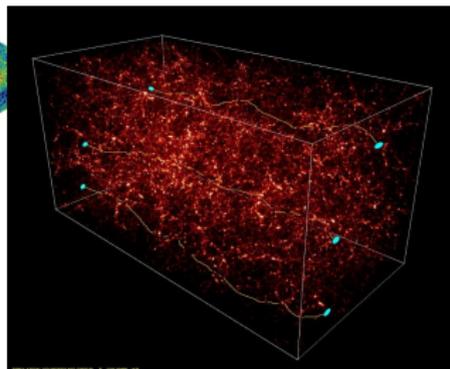
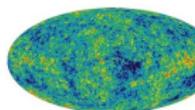
Contraintes cosmologiques

- large intervalle de $\ell \Rightarrow$
 - ▶ moins de dégénérescences
 - ▶ meilleure sensibilité p.ex. au spectre primordial
- grande précision \Rightarrow lensing du CMB accessible (C_ℓ , 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, ...)

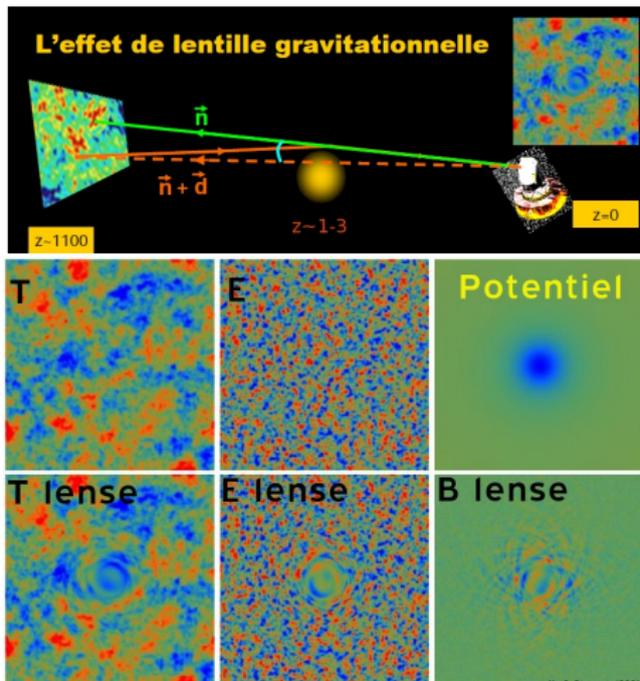
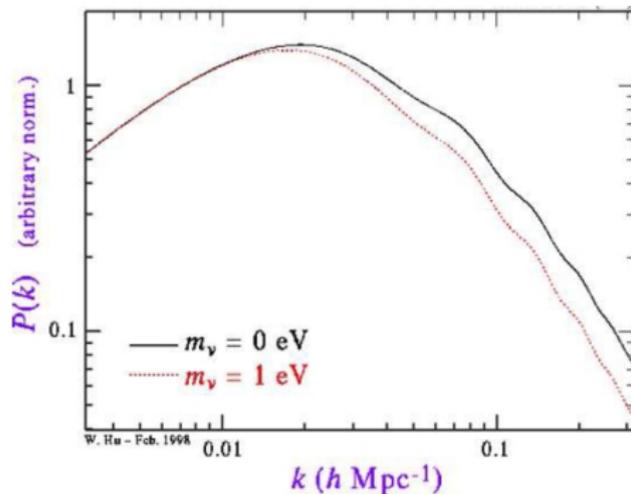


Contraintes cosmologiques

- large intervalle de $\ell \Rightarrow$
 - ▶ moins de dégénérescences
 - ▶ meilleure sensibilité p.ex. au spectre primordial
- grande précision \Rightarrow **lensing du CMB** accessible (C_ℓ , 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, ...)



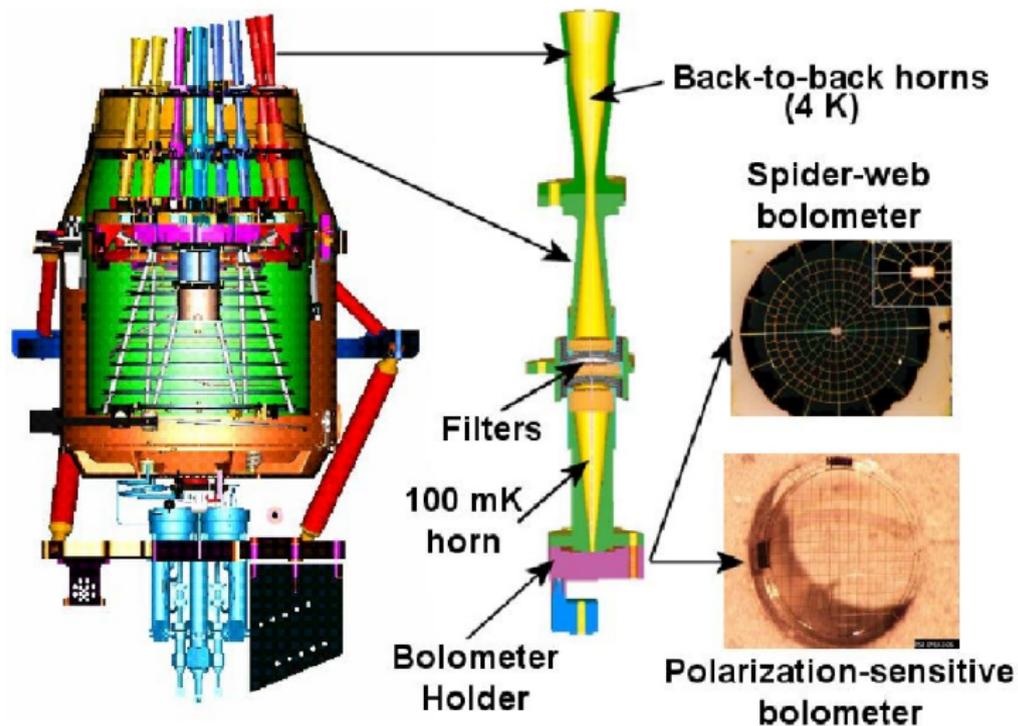
Effet des neutrinos sur les grandes structures



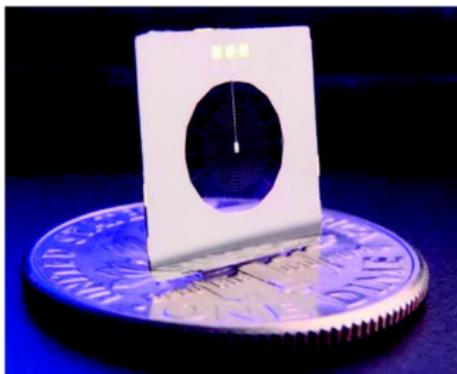
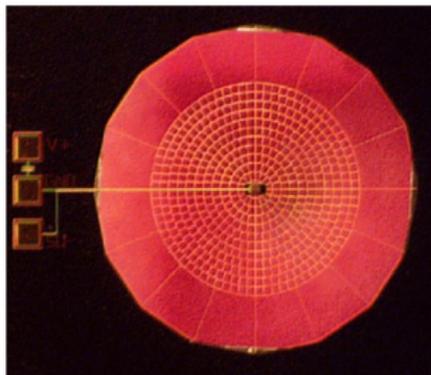
Calendrier de HFI

- 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 (15 avril \pm qq j) Lancement par une Ariane 5 (avec Hershell)
- 2012(?) fin de la période propriétaire (data release) → résultats ...

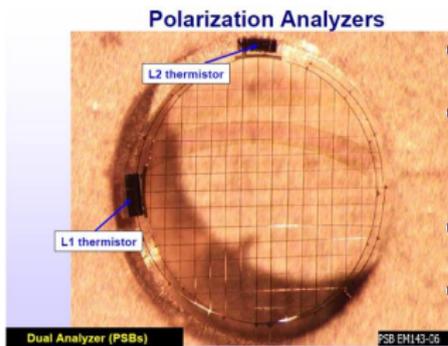
L'instrument haute fréquence (HFI)



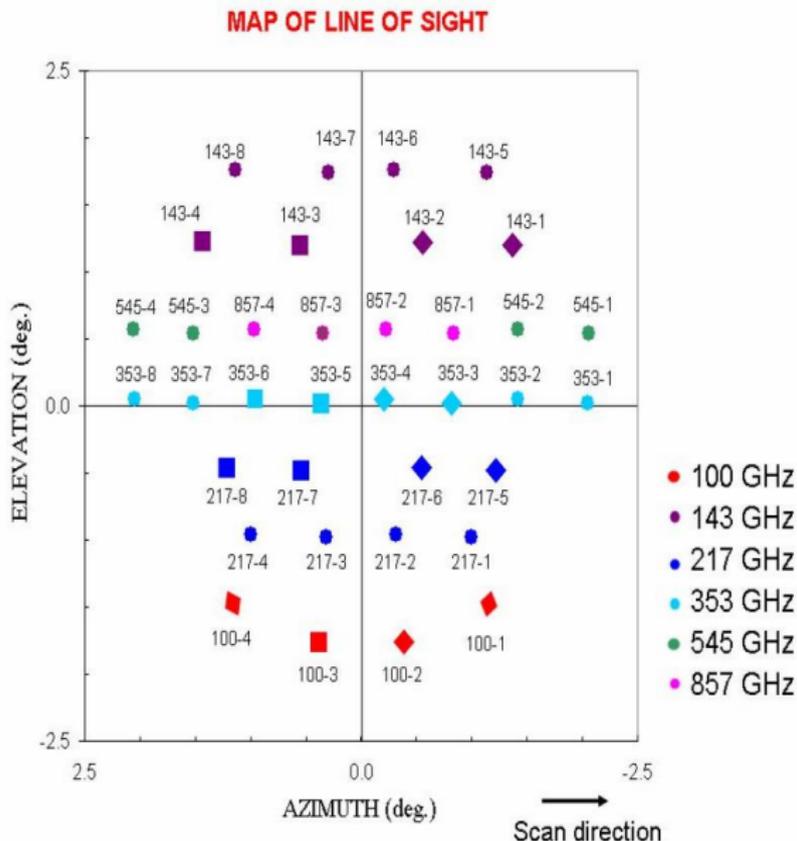
Bolomètres



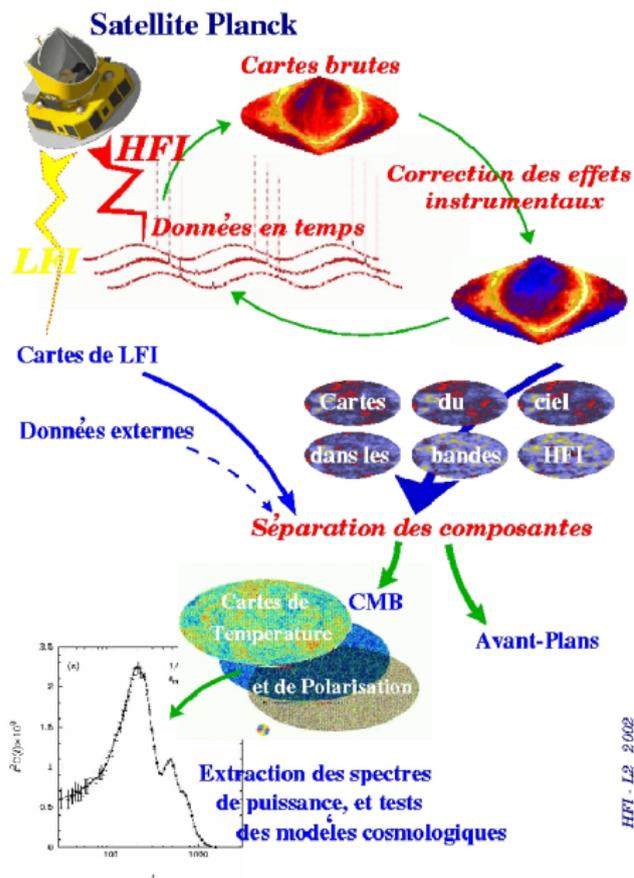
- diamètre $\sim 2.6\text{mm}$
- "fils" $4 \times 1\mu\text{m}$ (Au)
- $T \sim 100\text{mK}$ (bon S/N) par un système à dilution $^3\text{He}/^4\text{He}$
- fabrication : JPL/Caltech (USA)
- existe aussi sous forme sensible à la polarisation (PSB)



Plan focal de HFI

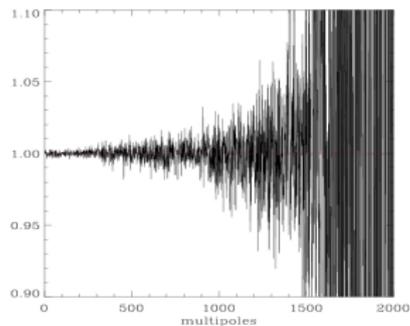
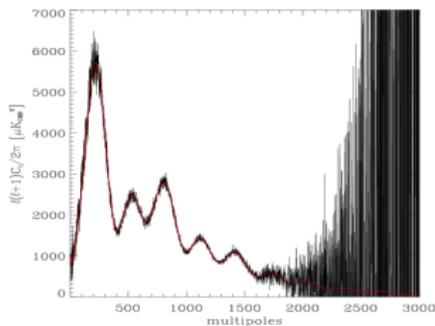
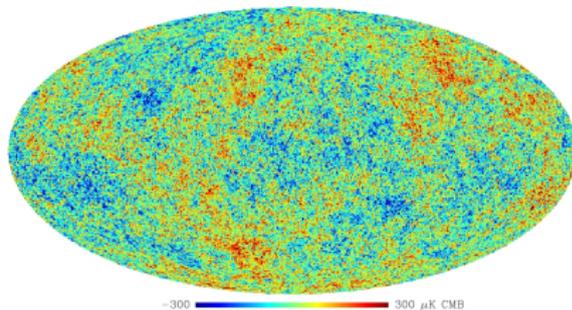
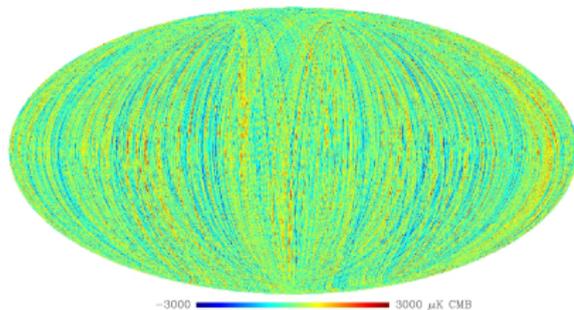


Analyse des données



- Echantillonnage à ~ 200 Hz ; données de 14 mois : $\sim 1 - 260$ 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 ~ 2 ans après la fin du survey : tout doit être prêt !

Test du Mapmaking (un détecteur à 143 GHz)

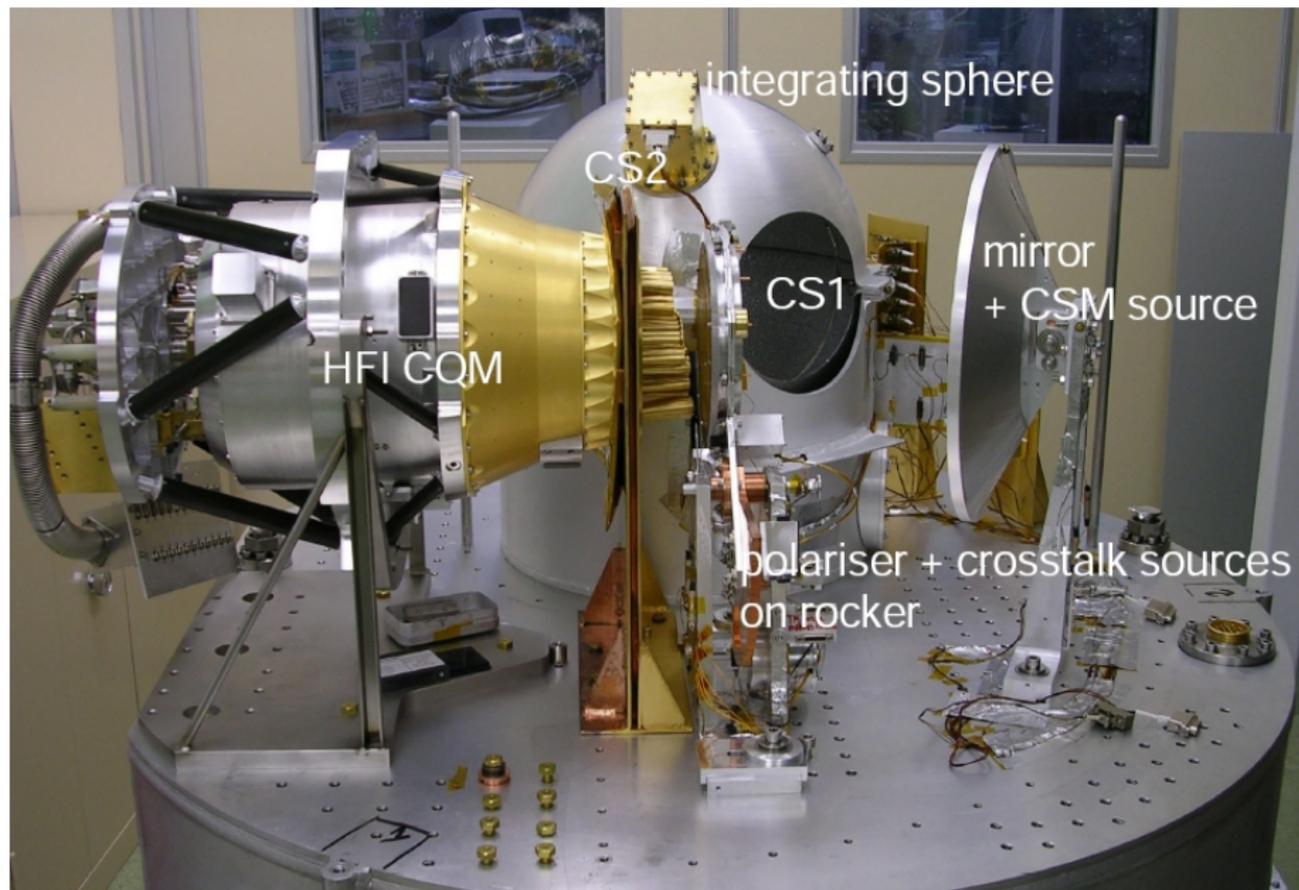


NB : canaux CMB auto-calibrés par dipole orbital

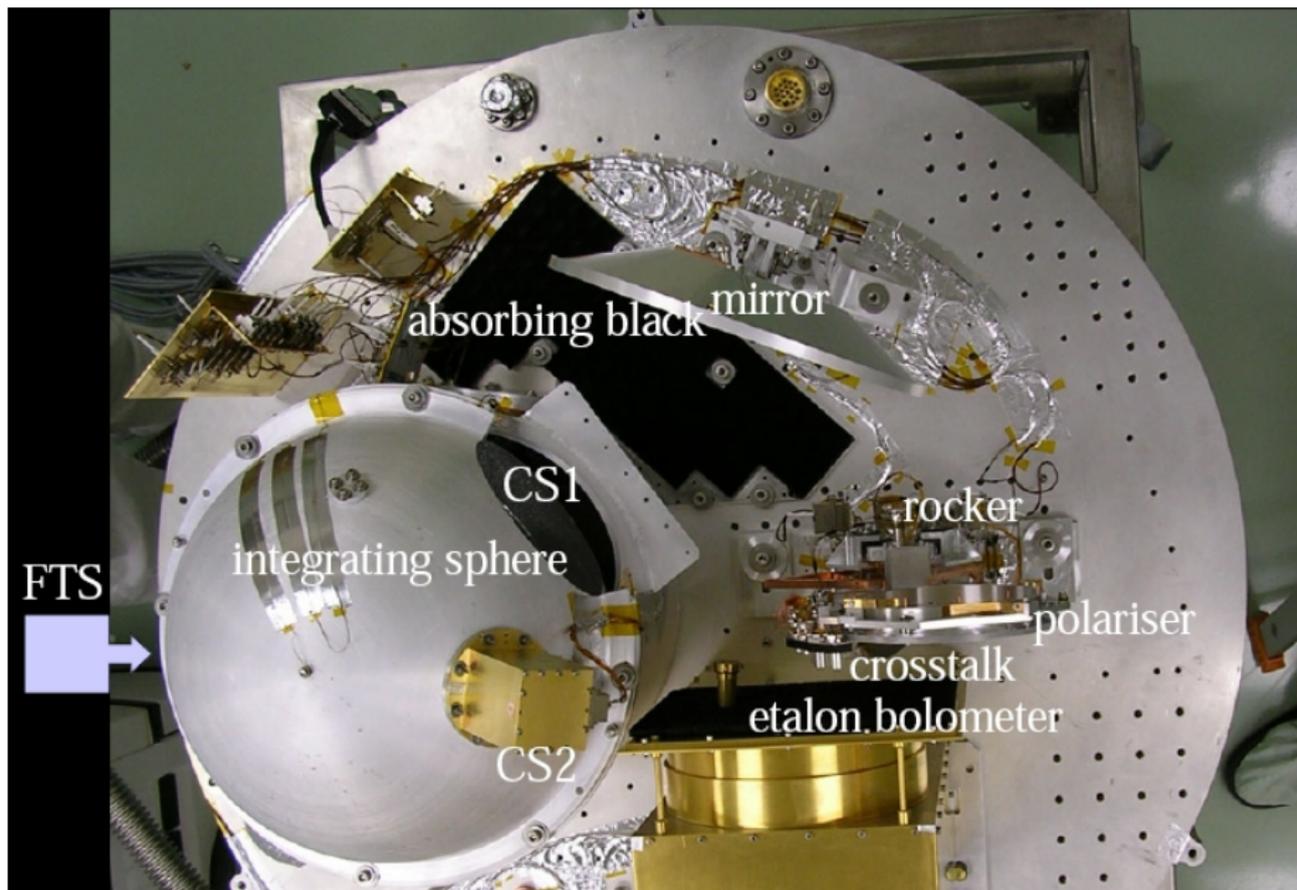
Stratégie d'étalonnage de HFI

	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	●	●	●

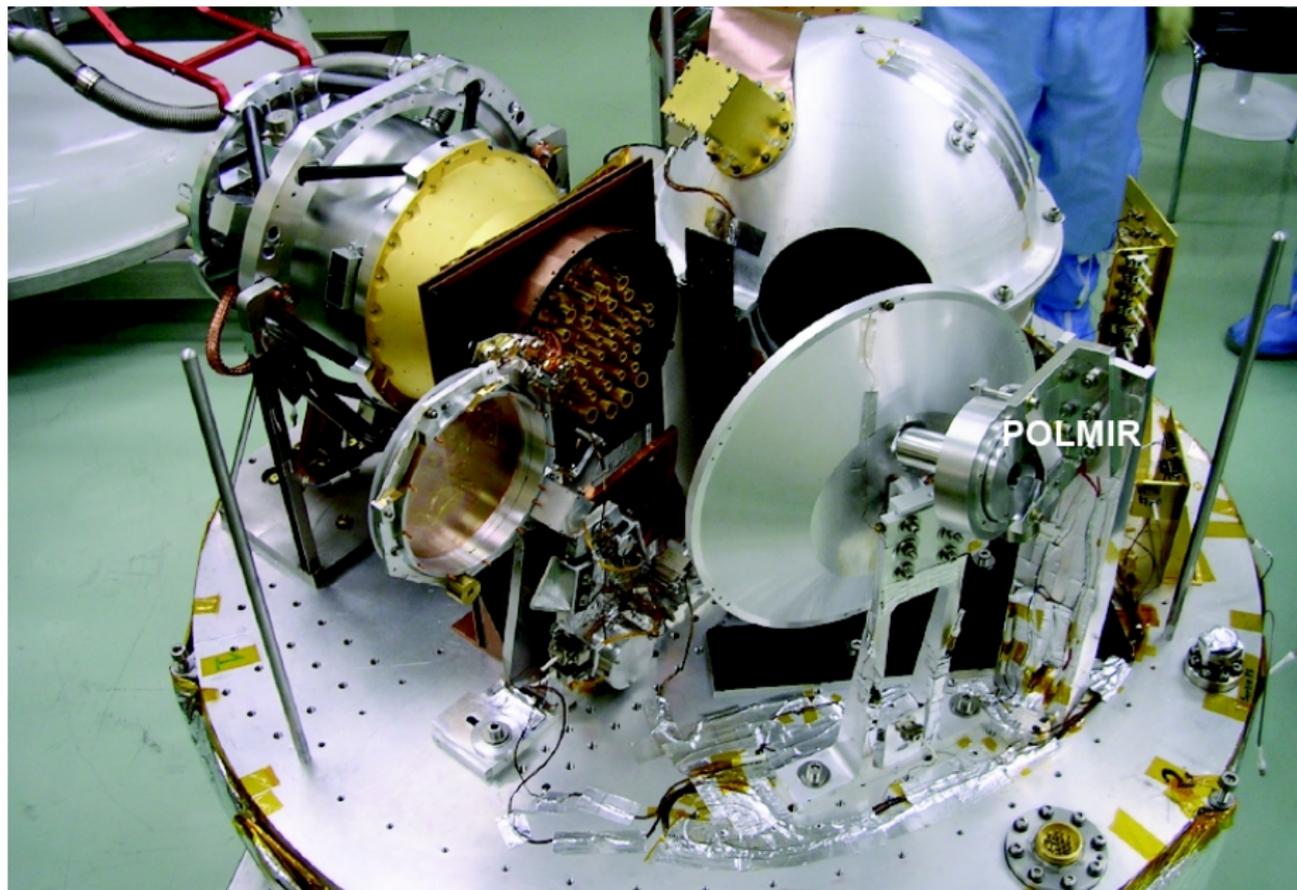
Les setups (version CQM)



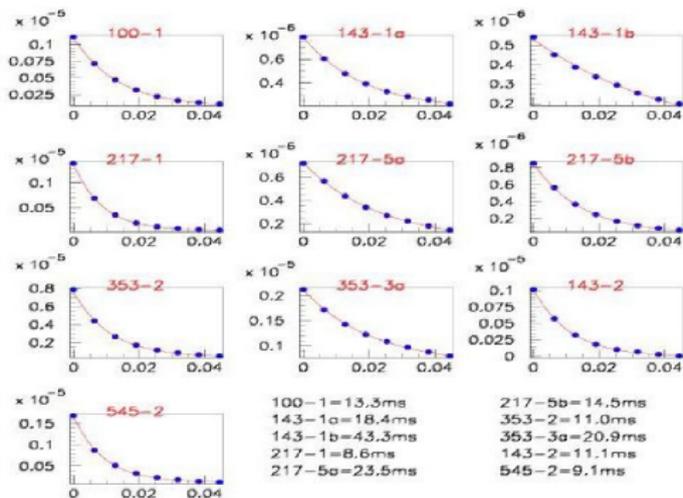
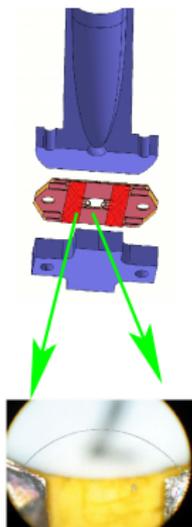
Les setups (version CQM)



Le setup (version PFM)

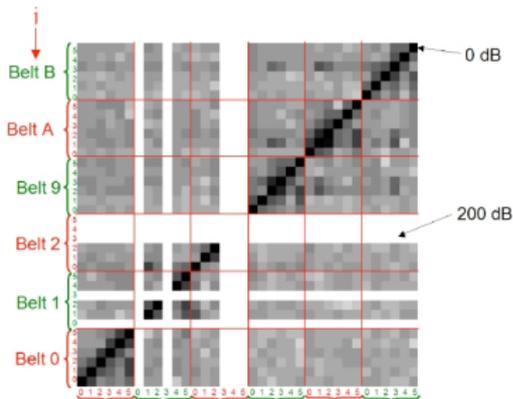
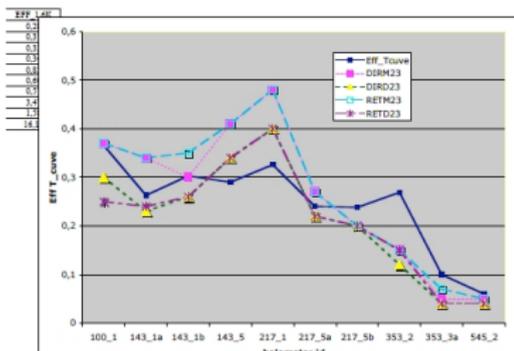
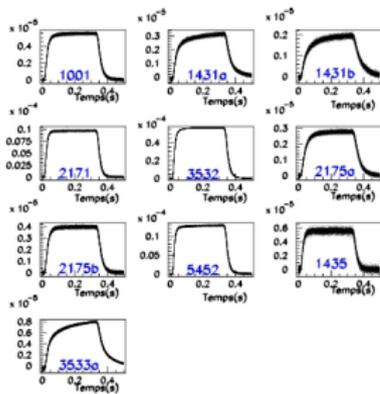
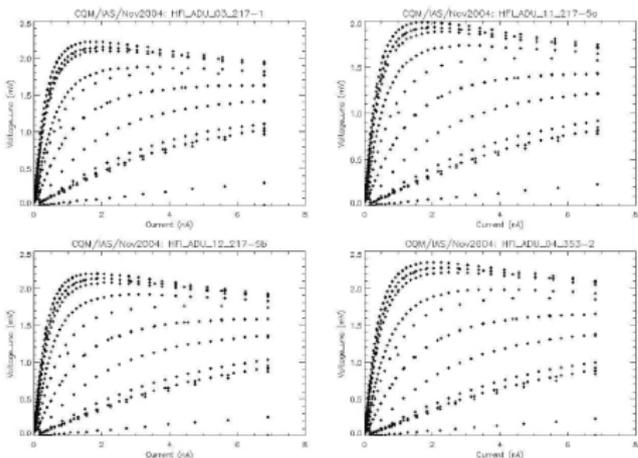


Fibres de carbone (LAL)



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

quelques résultats de l'étalonnage (CQM)



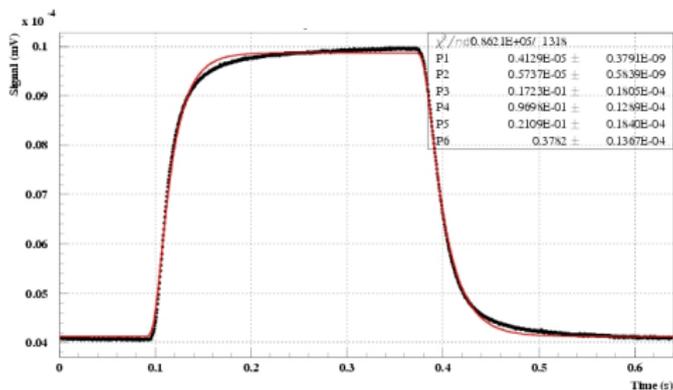
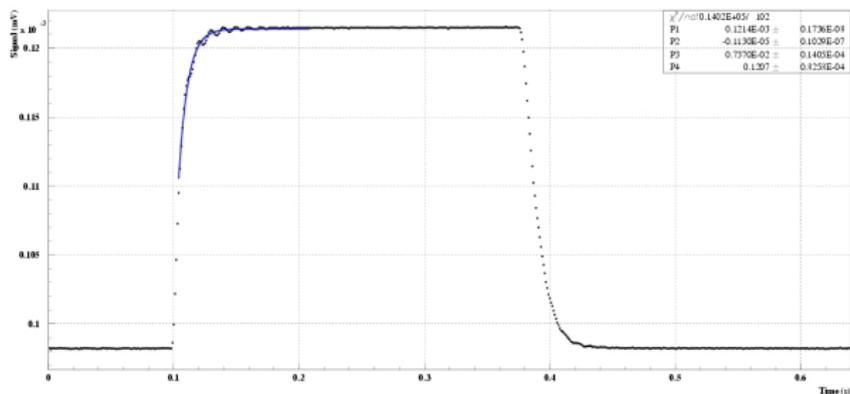
Etalonnage du PFM

- tests intensifs (juin-juillet 2006) - excellent S/N
- Bcp de caractéristiques mesurées "comme prévu" (acceptance spectrale, efficacité, 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**
 - ▶ 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

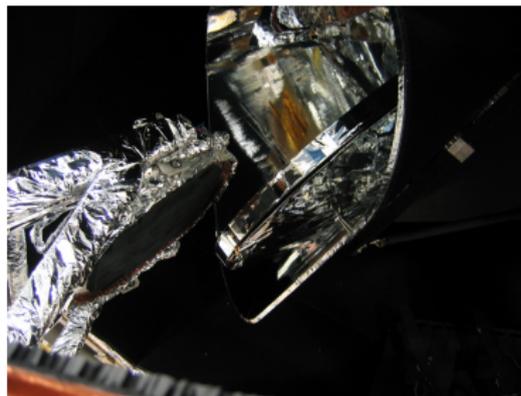
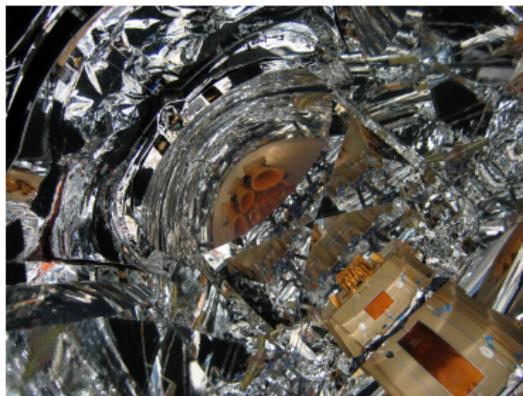
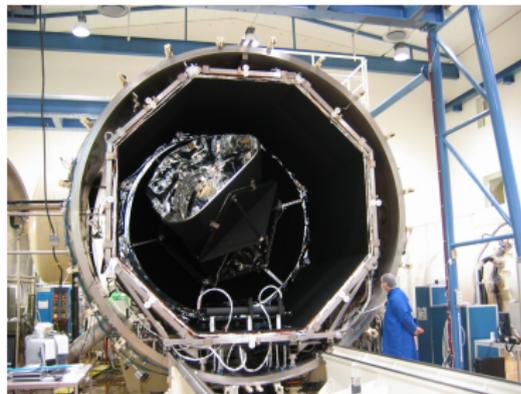
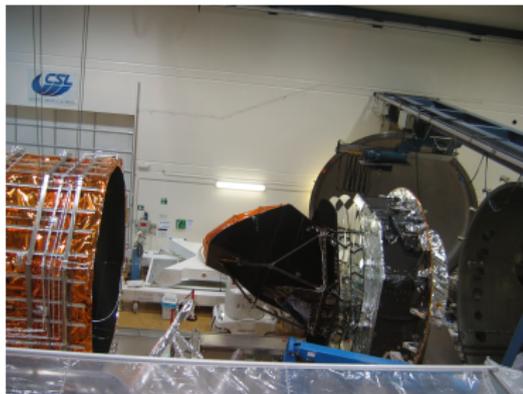
Etalonnage du PFM

- tests intensifs (juin-juillet 2006) - excellent S/N
- Bcp de caractéristiques mesurées "comme prévu" (acceptance spectrale, efficacité, 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**
 - ▶ 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

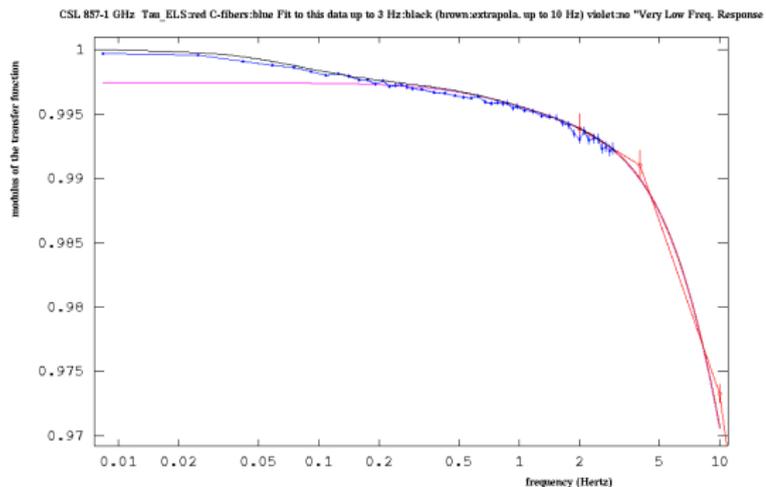
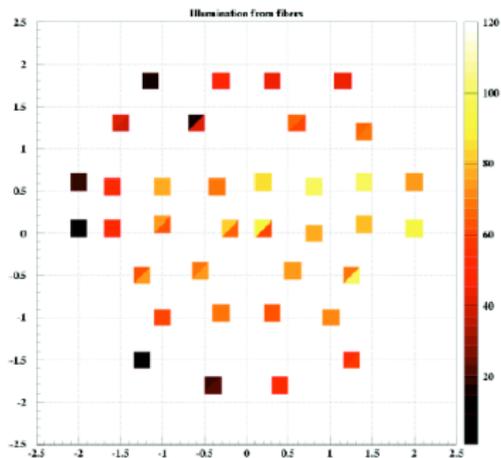
Réponse temporelle



CSL (1)



CSL (2)



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)
- **travaux en cours** : exploitation des mesures d'étalonnage, préparation des outils de reconstruction et d'extraction des paramètres "physiques" (m_ν),... avant les opérations!
- RDV en avril (lancement) & 2010-11 (premiers résultats)