

# A l'écoute du premier cri de l'univers

O. Perdereau



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

Fête de la science 12/10/2007



- 1 La cosmologie
  - Introduction
  - Les "trois piliers" du Big-Bang
  - Univers et Relativité
  - Histoire(s) de l'univers
- 2 Le rayonnement de fond cosmologique (ou CMB)
  - Introduction observationnelle
  - Anisotropies du CMB
- 3 La mission Planck
  - Présentation
  - L'Instrument Haute Fréquence HFI
  - Préparation(s) de la mission
- 4 Conclusions
- 5 Sources
- 6 Compléments

## LE DIFFICILE COMBAT DE JOHANNES KEPLER



# Qu'est-ce que la cosmologie ?

## La cosmologie

d'après [www.francophonie.hachette-livre.fr](http://www.francophonie.hachette-livre.fr)

" n. f. Partie de l'astronomie qui étudie **la structure** et **l'évolution** de l'**Univers** considéré comme un tout."

"Les concepts *relativistes* et les progrès de la *physique des particules* font évoluer la cosmologie."

infiniment  
grand



Modèle du  
"Big-Bang"

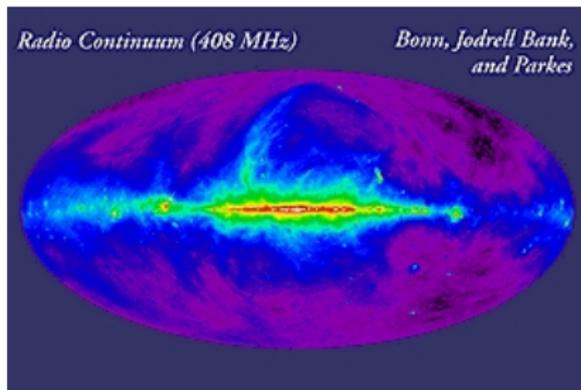
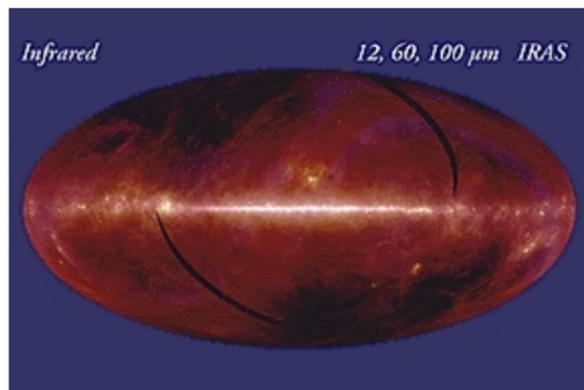
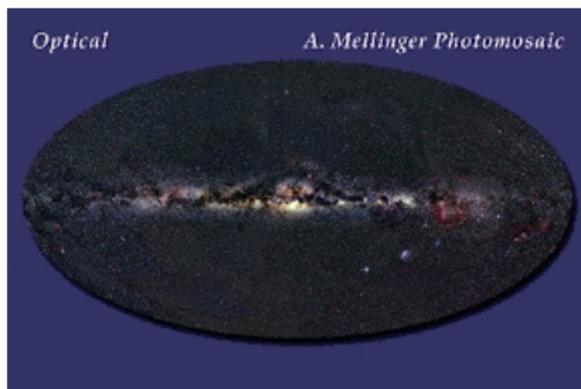
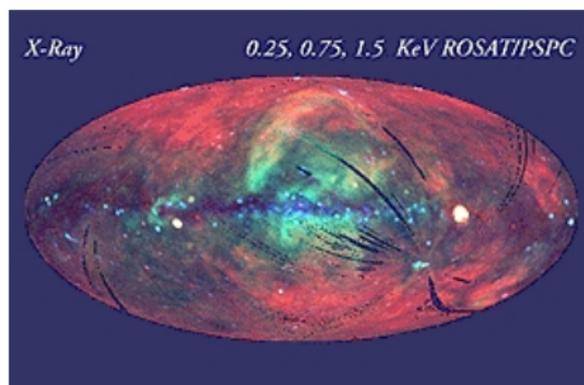


infiniment  
petit

# Remarques Générales

- Discipline observationnelle
- Messenger = lumière (photons)
- $c$  (vitesse de la lumière) est finie  
⇒ en général "loin"  $\Leftrightarrow$  "vieux"  
Distance  $\rightarrow$  année-lumière (1 a.l.  $\sim$  9500 Milliards de km)  
Distances "cosmologiques" en Giga-a.l. i.e. en  $10^9$  a.l.
- Luminosité apparente [flux lumineux par unité de surface]  
 $\propto 1/(\text{distance})^2 \Rightarrow$  faible luminosité  $\simeq$  loin  
si luminosité intrinsèque (*absolue*) connue, luminosité *apparente*  $\Rightarrow$  distance
- Différentes longueurs d'onde  $\Rightarrow$  différentes sources (à différentes distances)

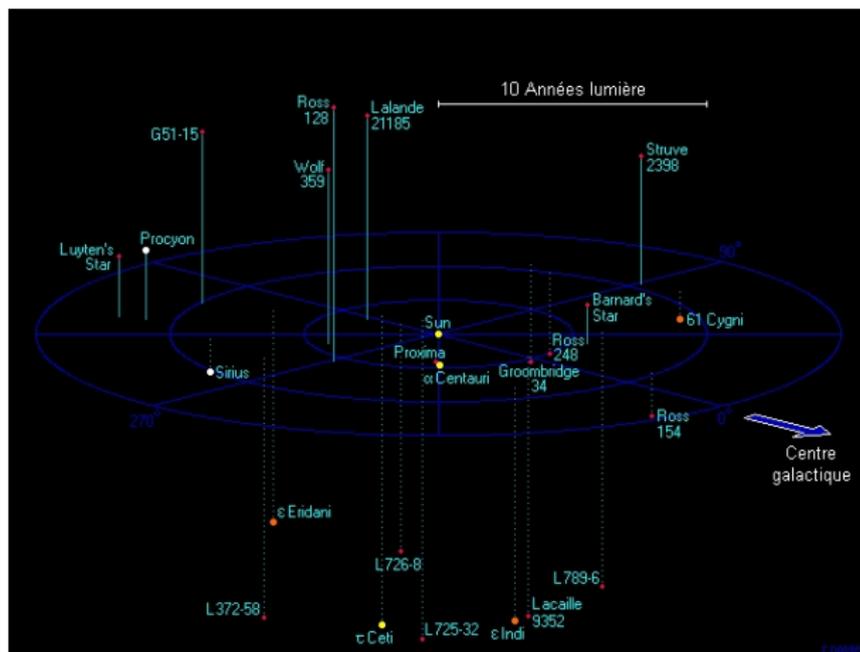
# Quatre visages de l'Univers



# Cartes de l'univers

Echelle

- ~ 10 a.l.
- ~ 30000 a.l.
- ~ 5 M a.l.
- ~ 80 M a.l.
- ~ 1000 M a.l.
- ~ 20000 M a.l.



cf <http://atunivers.free.fr/>

# Cartes de l'univers

Echelle

~ 10 a.l.

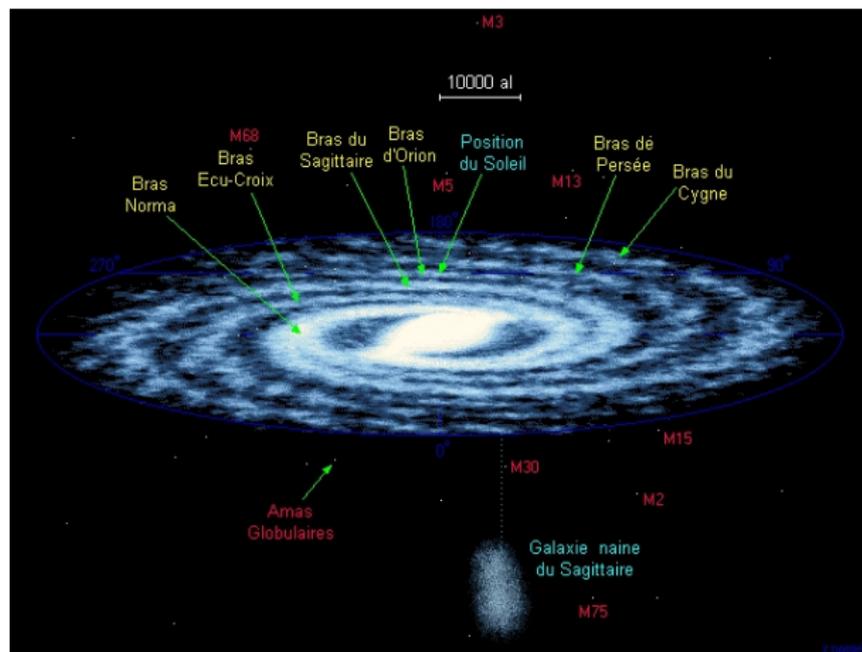
~ 30000 a.l.

~ 5 M a.l.

~ 80 M a.l.

~ 1000 M a.l.

~ 20000 M a.l.



cf <http://atunivers.free.fr/>

# Cartes de l'univers

Echelle

~ 10 a.l.

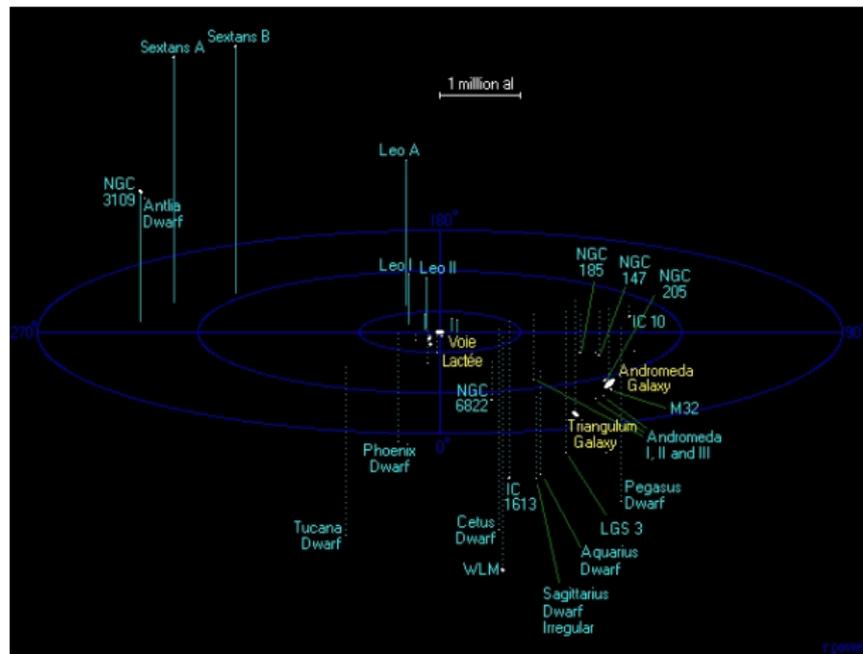
~ 30000 a.l.

~ **5 M** a.l.

~ 80 M a.l.

~ 1000 M a.l.

~ 20000 M a.l.



cf <http://atunivers.free.fr/>

# Cartes de l'univers

Echelle

~ 10 a.l.

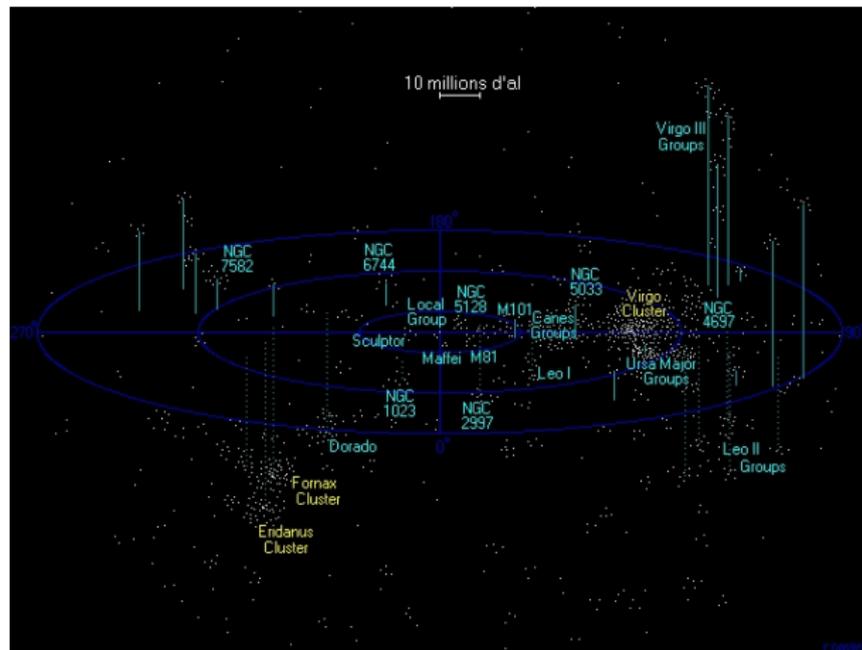
~ 30000 a.l.

~ 5 M a.l.

~ **80 M a.l.**

~ 1000 M a.l.

~ 20000 M a.l.



cf <http://atunivers.free.fr/>

# Cartes de l'univers

Echelle

~ 10 a.l.

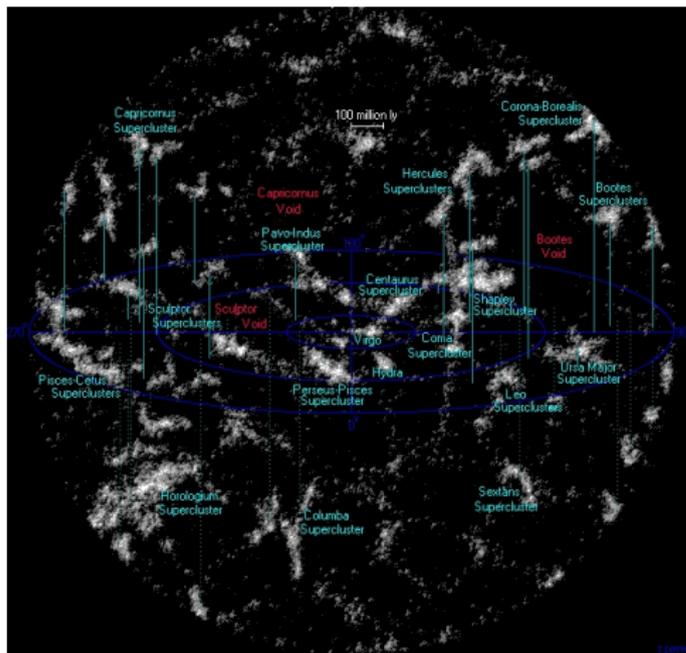
~ 30000 a.l.

~ 5 M a.l.

~ 80 M a.l.

~ 1000 M a.l.

~ 20000 M a.l.



cf <http://atunivers.free.fr/>

# Cartes de l'univers

Echelle

~ 10 a.l.

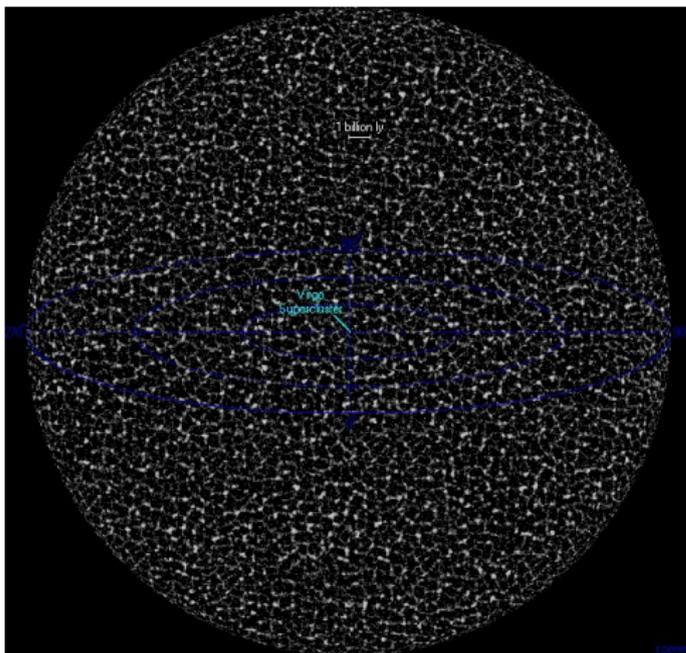
~ 30000 a.l.

~ 5 M a.l.

~ 80 M a.l.

~ 1000 M a.l.

~ **20000 M a.l.**

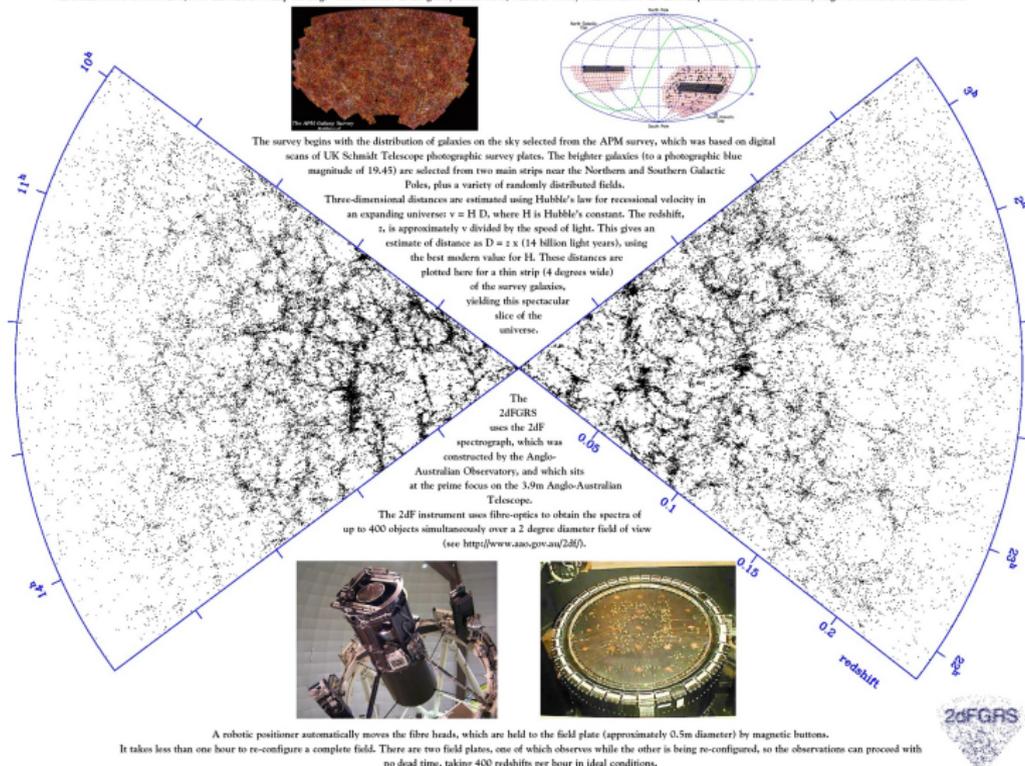


cf <http://atunivers.free.fr/>

# Carte de l'univers (observée)

## 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

# Les "trois piliers" du Big-Bang

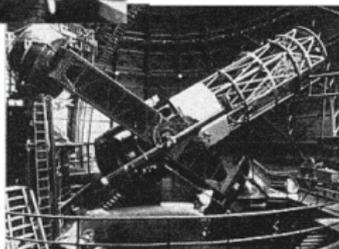
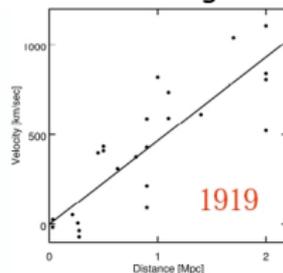
Trois observations :

## 1 "Récession" des galaxies lointaines (Univers en expansion)

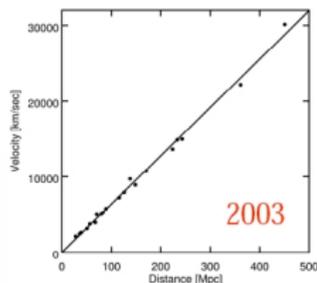
- ▶ Les galaxies lointaines s'"éloignent" de nous
- ▶ Plus elles sont loin, plus elles s'"éloignent" vite



Edwin Hubble



Mt. Wilson  
100 Inch  
Telescope



- ▶ ⇒ dilatation globale de l'Univers

# Les "trois piliers" du Big-Bang

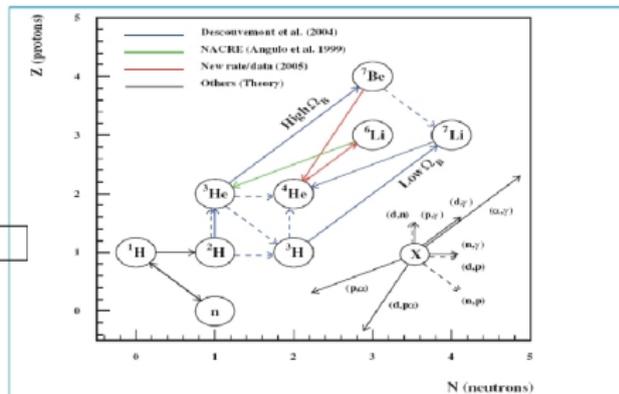
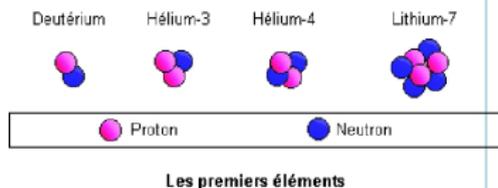
Trois observations :

## 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?



- ▶ ⇒ *fusions thermonucléaires 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?

▶ ⇒ **fusions thermonucléaires dans une phase primordiale dense et chaude**

## 3 Rayonnement de fond (Fond Diffus Cosmologique, CMB...)

- ▶ Rayonnement isotrope (micro-onde / 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?

▶ ⇒ fusions thermonucléaires dans une phase primordiale dense et chaude

## 3 Rayonnement de fond (Fond Diffus Cosmologique, CMB...)

- ▶ Rayonnement isotrope (micro-onde / IR lointain) de "corps noir"
- ▶ image de l'univers "jeune" (300000 ans)
- ▶ signature d'un état dense, chaud et homogène

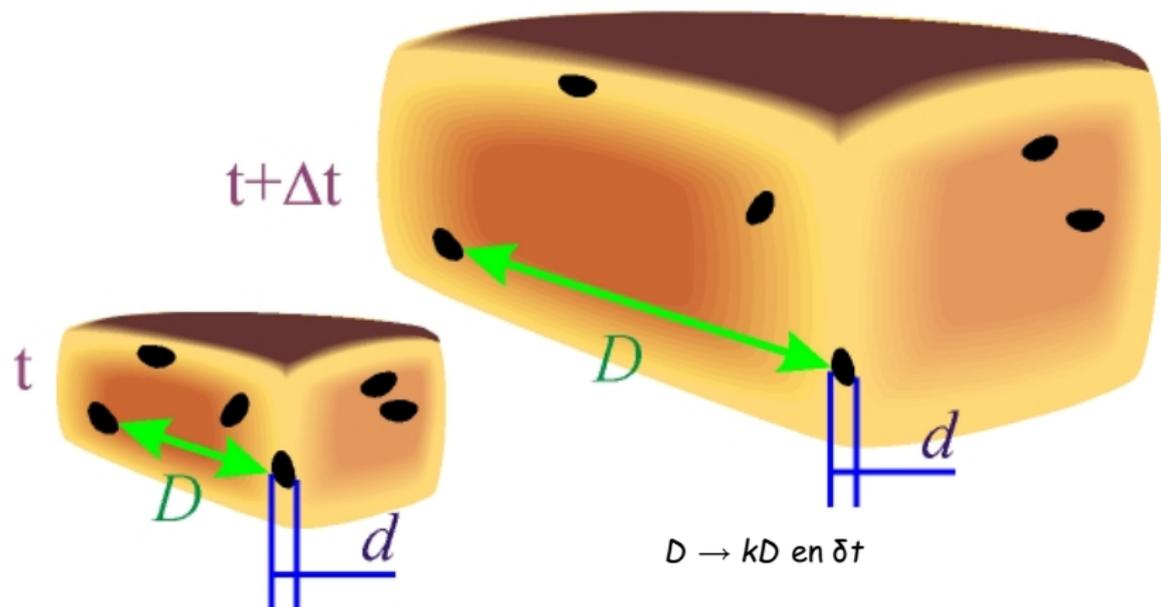
⇒ Il y a eu une "explosion"? ...

# Le Big Bang



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

# Une dilatation d'échelle



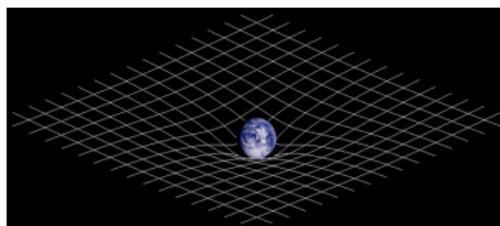
$$D \rightarrow kD \text{ en } \delta t$$

$$v_{app} = \frac{\delta D}{\delta t} = (k-1) \frac{D}{\delta t} \propto D$$



# L'univers relativiste

- Relativité Générale  $\Leftrightarrow$  Description géométrique de la Gravitation (Einstein  $\sim$  1917)

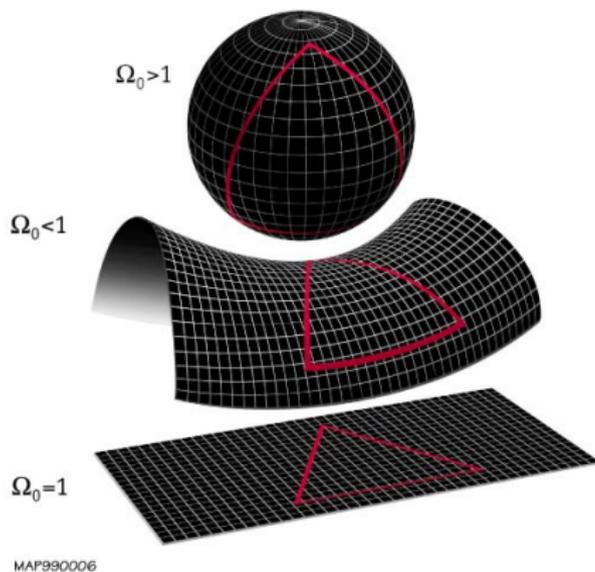


- application à l'univers (homogène isotrope)  $\rightarrow$  modèle du Big-Bang
- Lien entre géométrie (et son évolution) (macroscopique) et densité(s) d'énergie(s) (microscopique)
- Un paramètre important (parmi  $\sim 10$ ) : densité totale d'énergie  $\Omega_0$

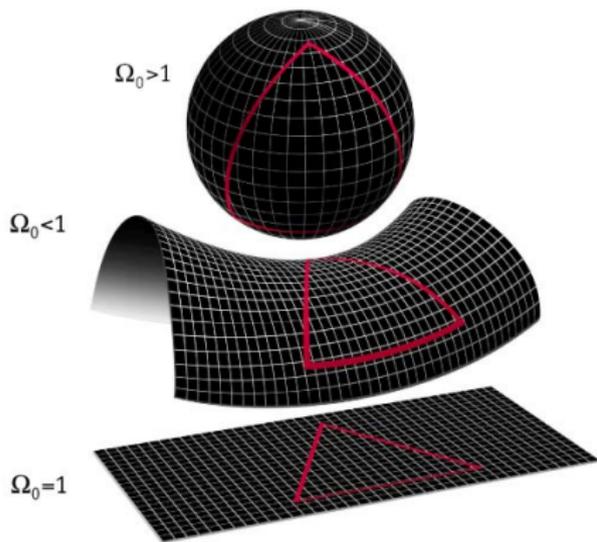
$\Omega_0 = 1 \Leftrightarrow$  Univers "plat" (euclidien)

$$\Leftrightarrow \rho = \rho_{critique} \sim 4.5 \cdot 10^{-30} \text{ g/cm}^3 \sim 6 m_{proton} m^{-3}$$

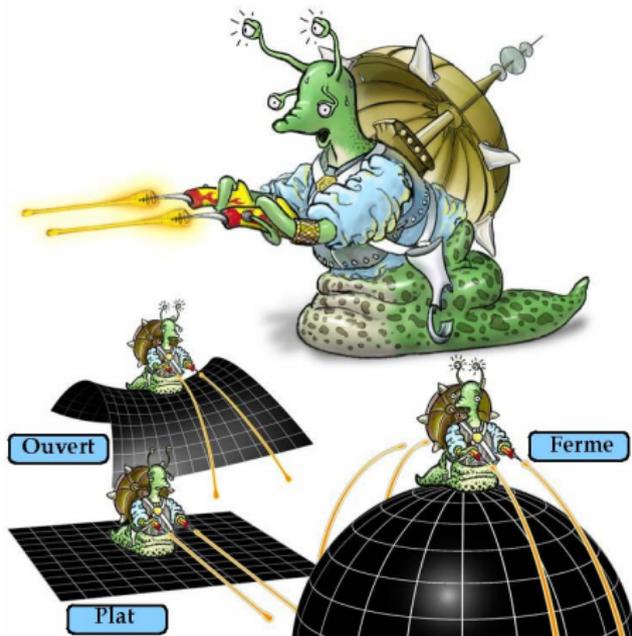
# Géométrie(s) de l'univers

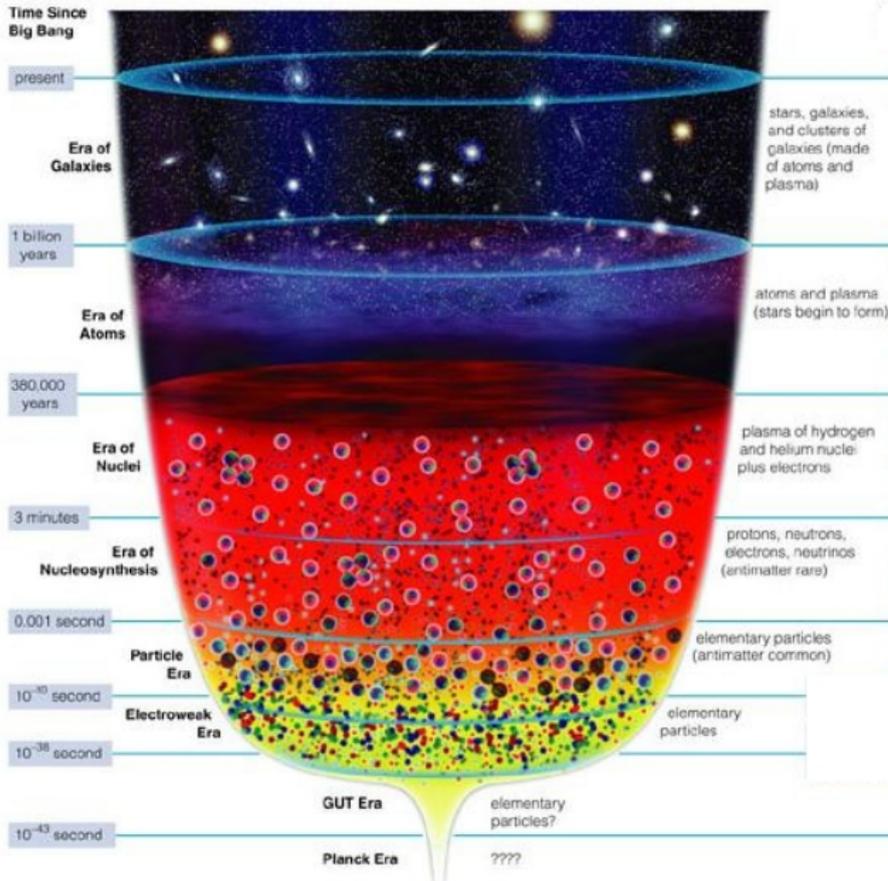


# Géométrie(s) de l'univers



MAP990006





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

(4) "Libération" des photons = découplage (à 300000 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

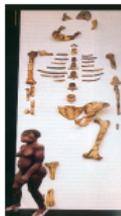
28 décembre



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

- Prédiction : *G. Gamow* (1948)



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

## DISCOVERY OF COSMIC BACKGROUND



Microwave Receiver



MWP90045

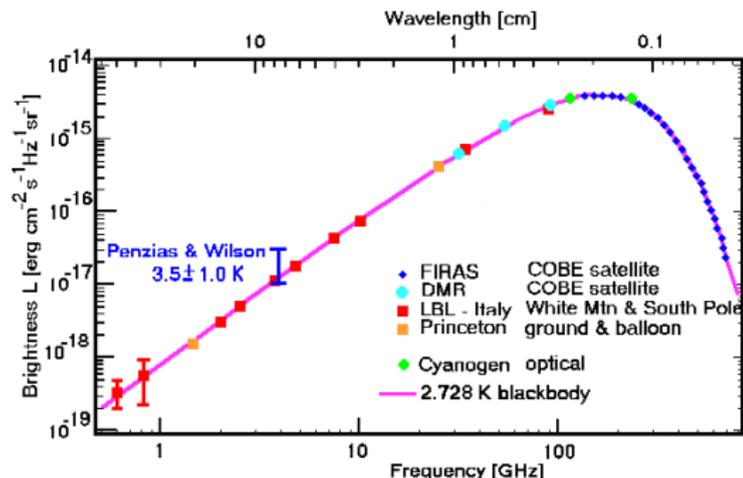
Robert Wilson



Arno Penzias

# Le CMB

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



- Spectre = "**corps noir**"  
*origine thermique*
- pic à 100GHz  
*TV sat ~ 10GHz*  
*portable ~ 2.5GHz*
- 400 photons/cm<sup>3</sup>
- ... qq % du bruit  
d'une TV

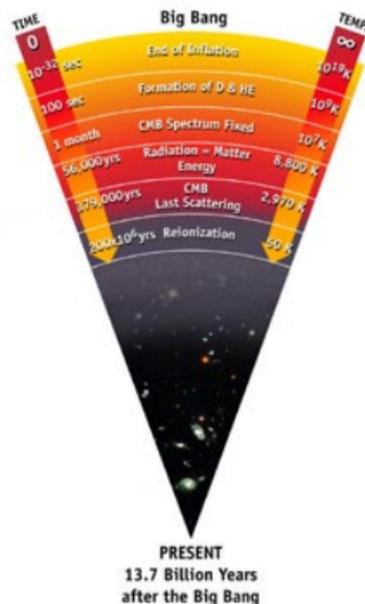
# Emission du CMB

- 1 Univers primordial ( $t < 300000$  ans,  $T > 3000^\circ K / 2700^\circ C$ ) électrons, protons (noyaux) et photons( $\gamma$ )/rayonnement (plasma)

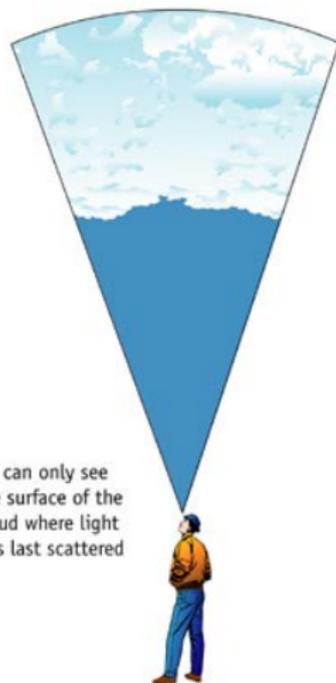
- ▶ T élevée  $\Rightarrow$  pas d'atomes
- ▶  $\gamma$  réfléchis ou absorbés : Univers opaque

- 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.



# Des anisotropies dans le CMB!

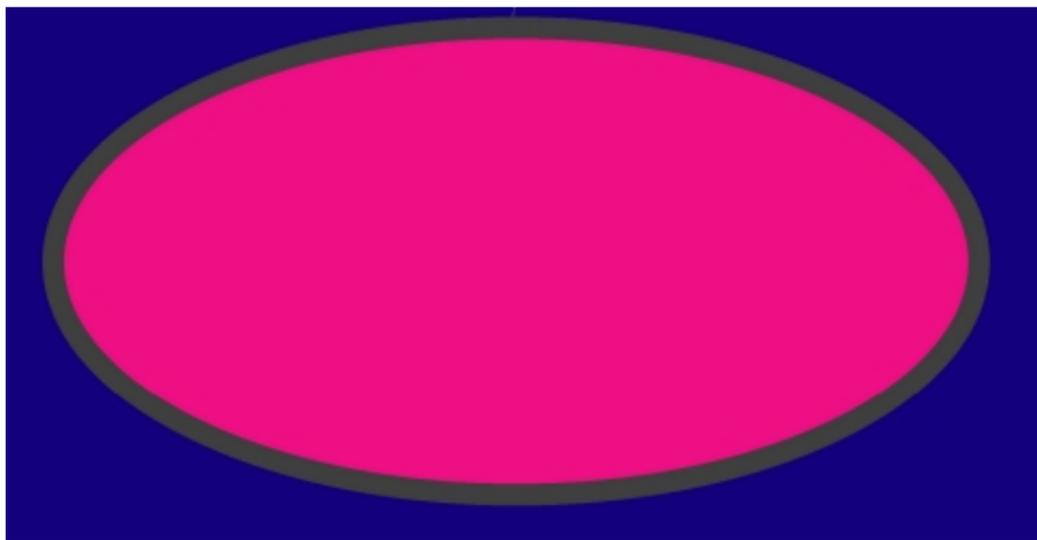
$T_{CMB}$  dans chaque direction  $\rightarrow$  carte du "ciel" (couleur  $\leftrightarrow$  T)



Le ciel nocturne (visible)

# Des anisotropies dans le CMB!

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

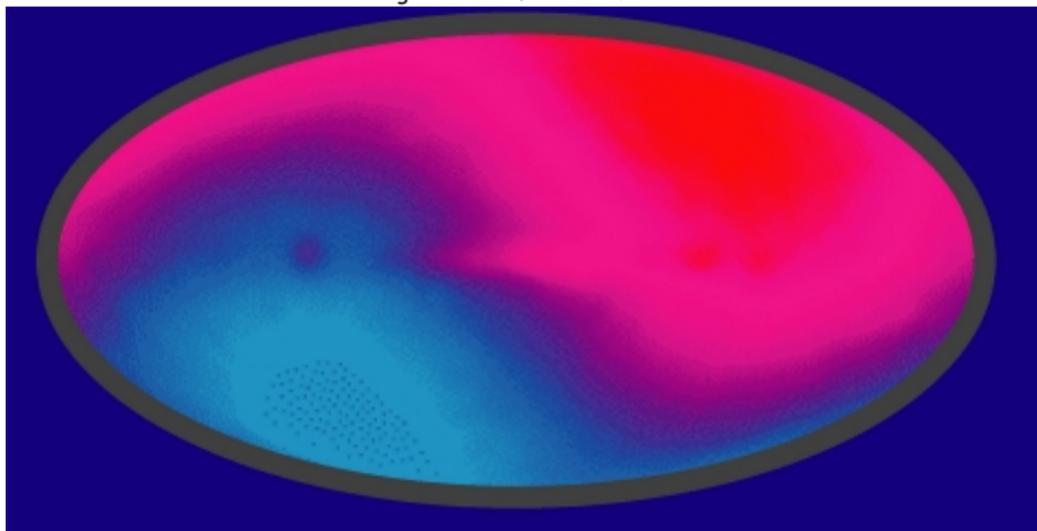


CMB (i.e. l'univers) très isotrope (à 1/1000 près)

# Des anisotropies dans le CMB!

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

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



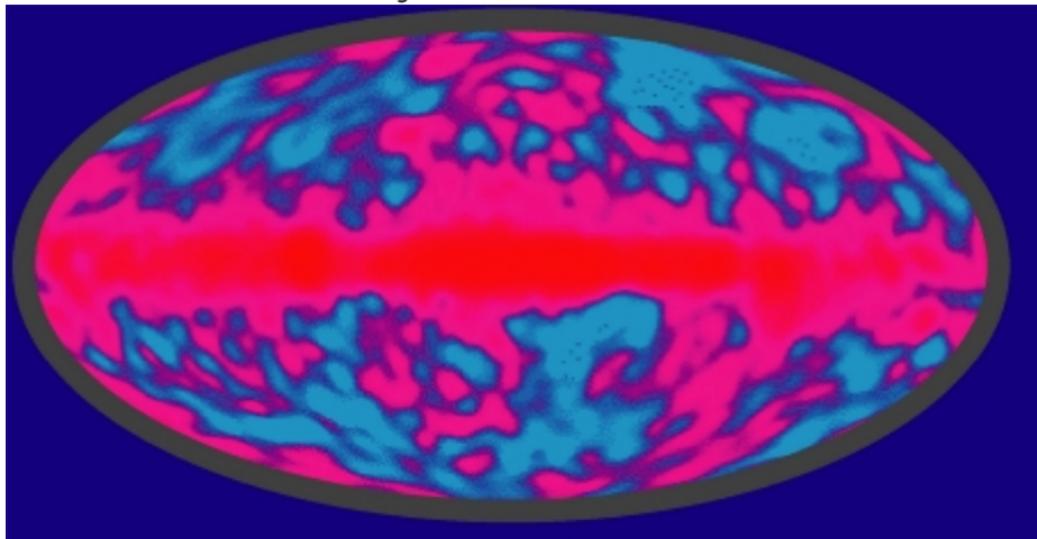
$$(\delta T/T \sim 10^{-3})$$

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

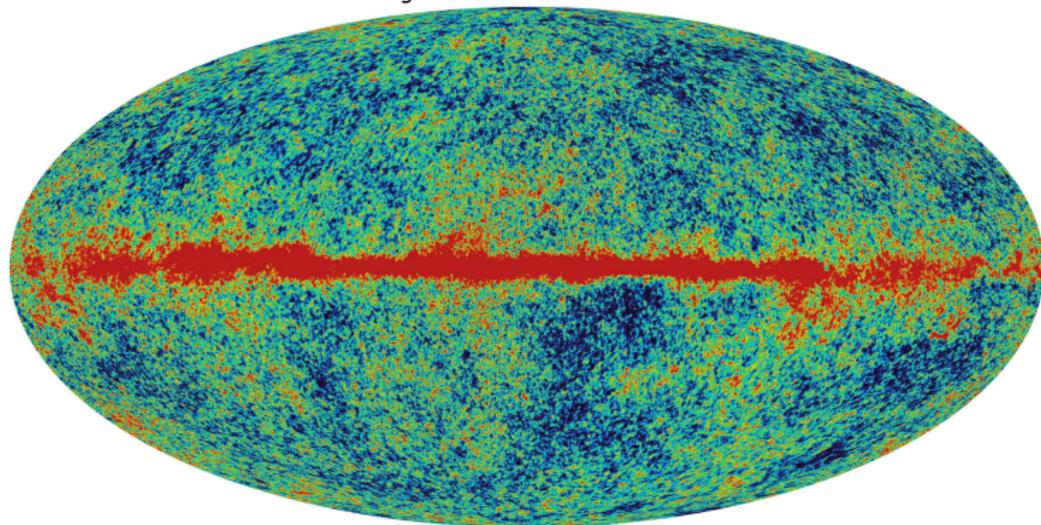


Anisotropies primordiales ( $\delta T/T \sim 10^{-5}$ ) + Galaxie (1/100000 près)  
COBE (1992)

# Des anisotropies dans le CMB!

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

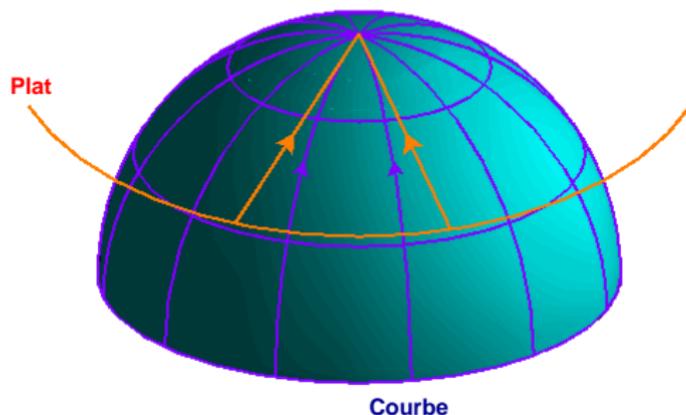
rouge  $\leftrightarrow$  chaud; bleu  $\leftrightarrow$  froid



Fluctuations primordiales ( $\delta T/T \sim 10^{-5}$ ) + Galaxie (1/100000 près)  
WMAP (2003)

# De l'informations dans les anisotropies!

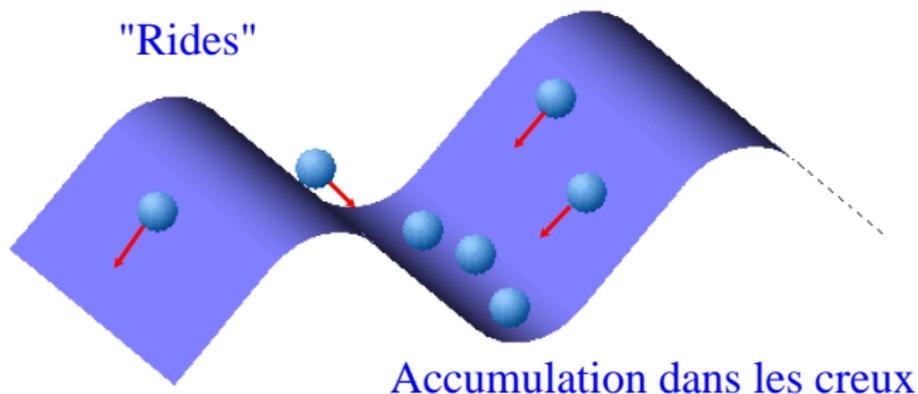
- (presque) origine des **structures**
- Etablissement : résultat de la propagation d'ondes (acoustiques) dans un plasma (**composition, densité**)
- Propagation : La taille (apparente) angulaire des anisotropies est modulée par la **géométrie** de l'Univers



# 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,...)

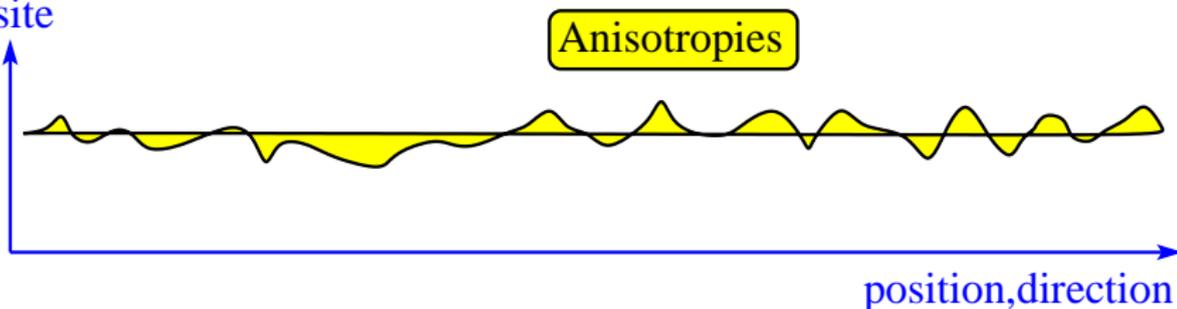


# Le plasma primordial (le tambour)

- 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"

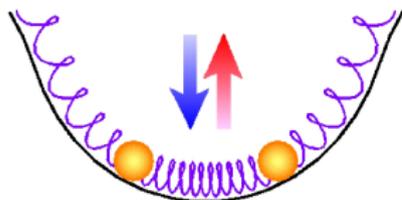
- milieu "presque" isotrope

température,  
densité



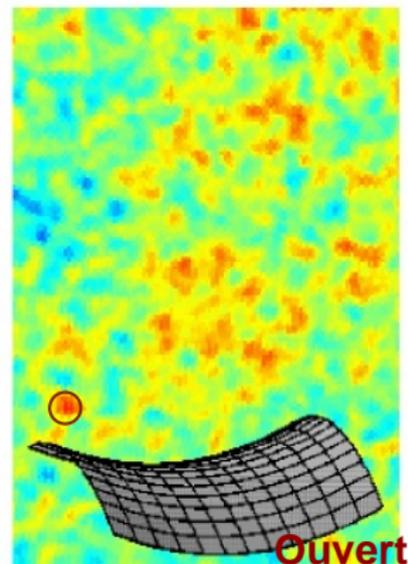
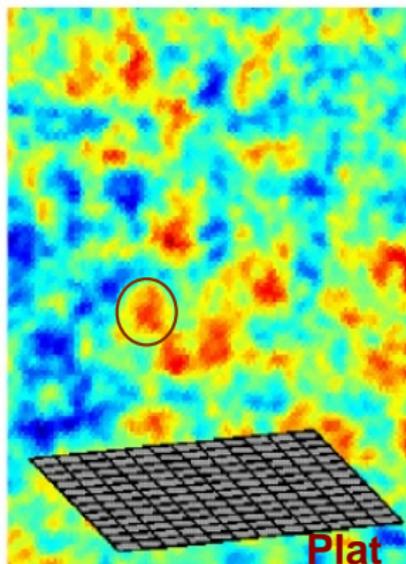
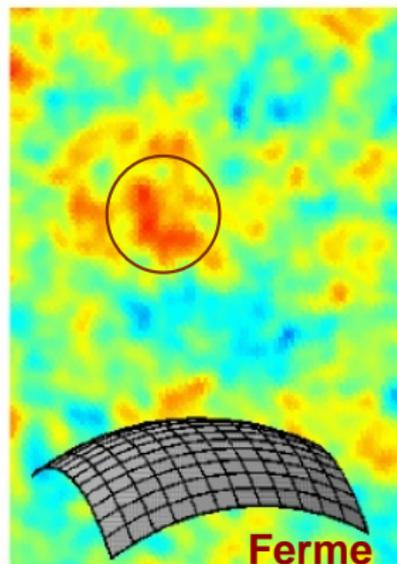
# Des ondes acoustiques (le premier cri!)

- Il existe des zones plus denses et moins denses
- la matière "tombe" vers les sur-densités (gravitation)
- ... mais la pression réagit



- ⇒ apparition d'oscillations (**ondes acoustiques**) ds le plasma primordial (**arrêt au découplage**)
- Vitesse des ondes  $\leftrightarrow$  composition, densité du milieu, ...
  - densité  $\leftrightarrow$  température : **état final "vu" dans le CMB**

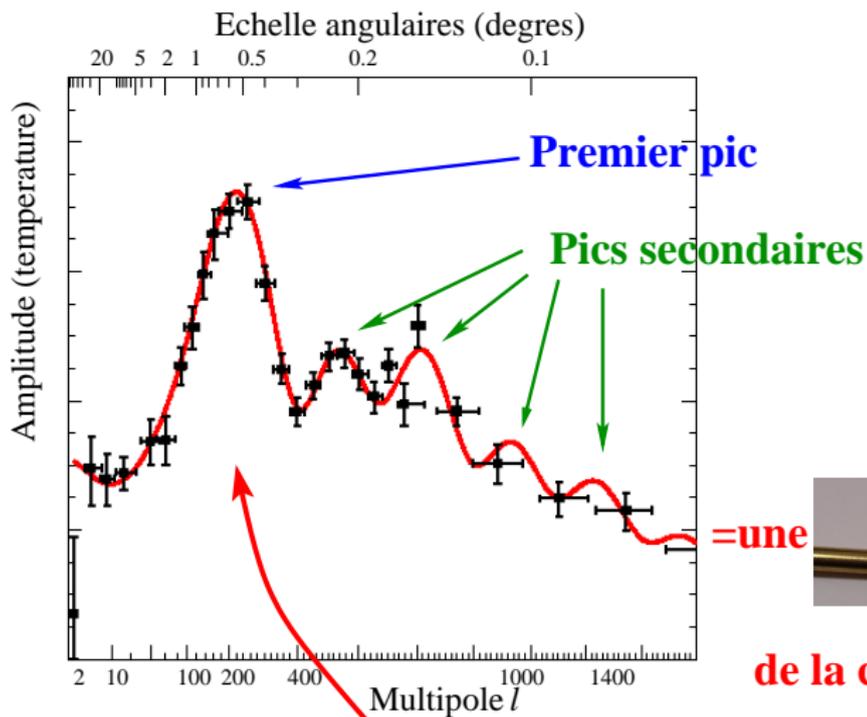
# Géométries et anisotropies



Pb : extraire des infos quantitatives des cartes

Principe : estimer parmi les anisotropies la fréquence de chaque taille angulaire

# La courbe des $C_l$

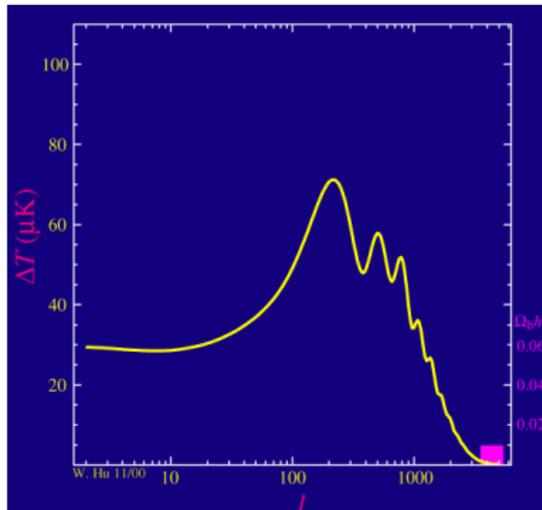


Beaucoup de structures de cette taille

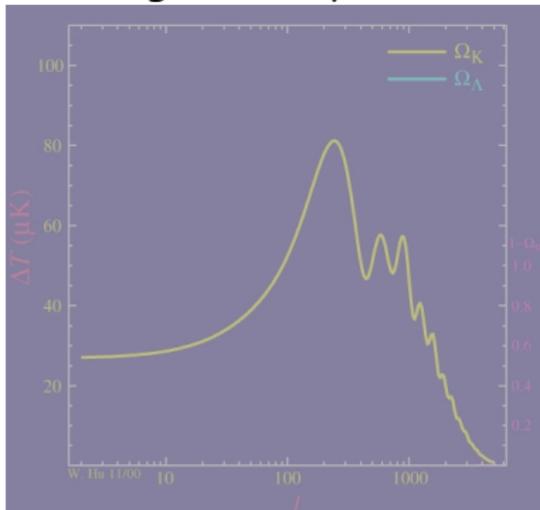
=une  
de la cosmologie !

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



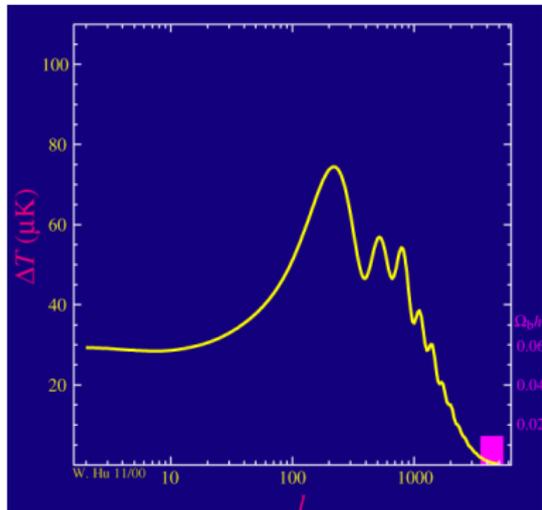
► Replay



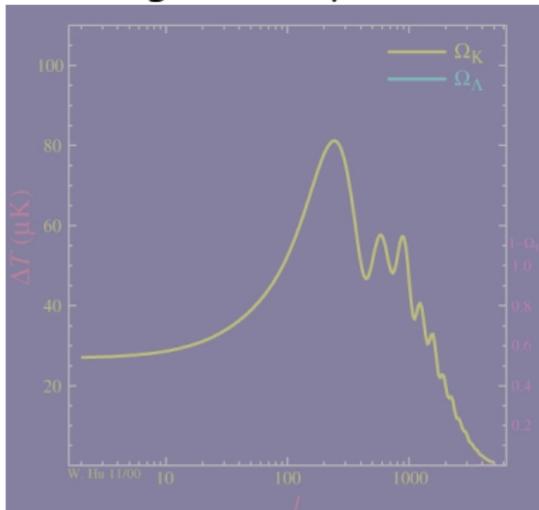
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



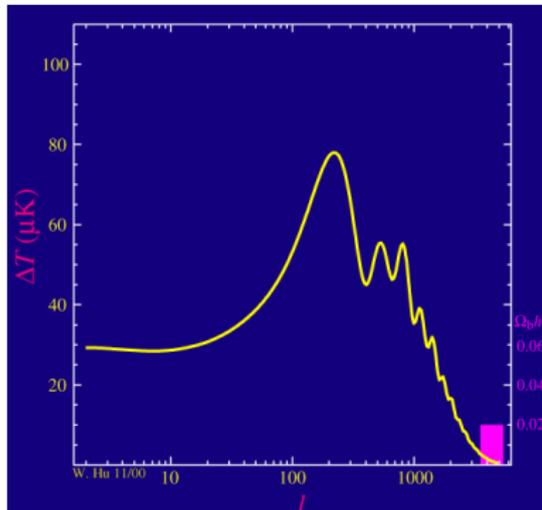
► Replay



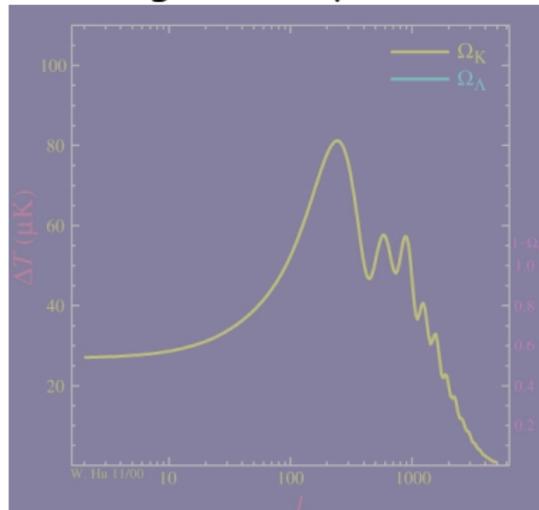
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



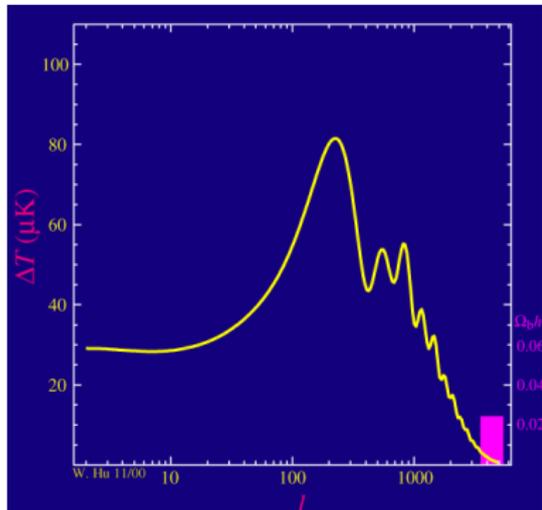
► Replay



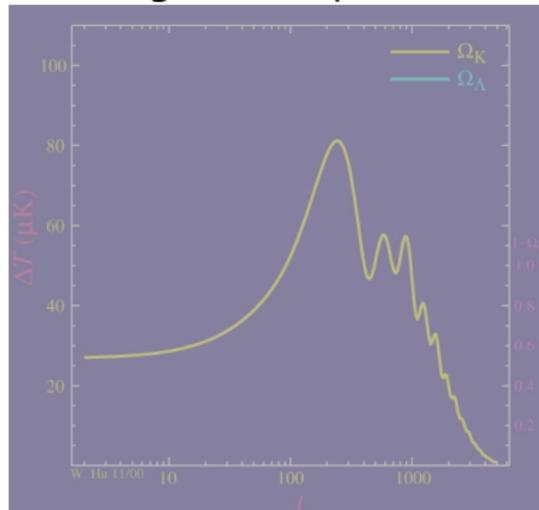
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



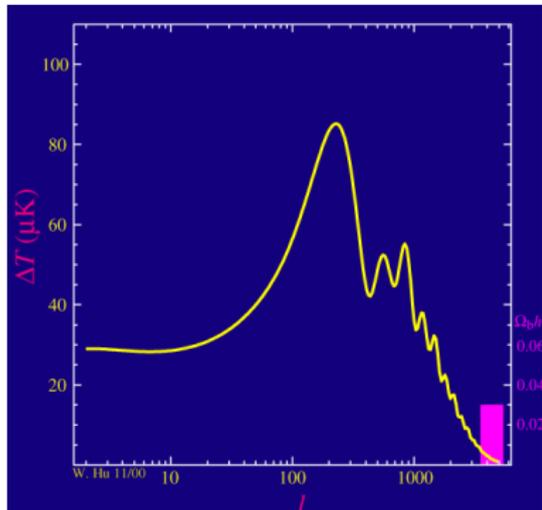
► Replay



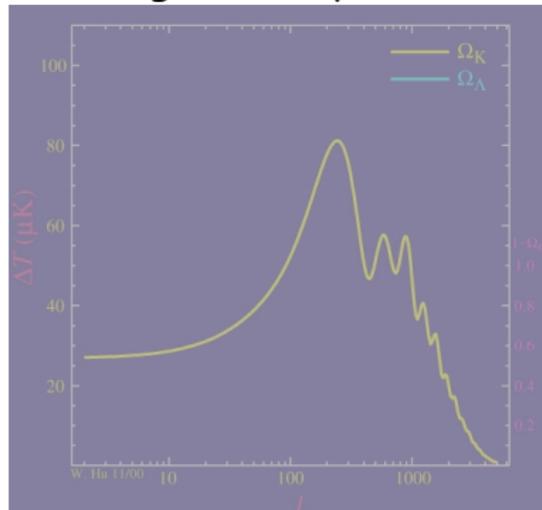
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



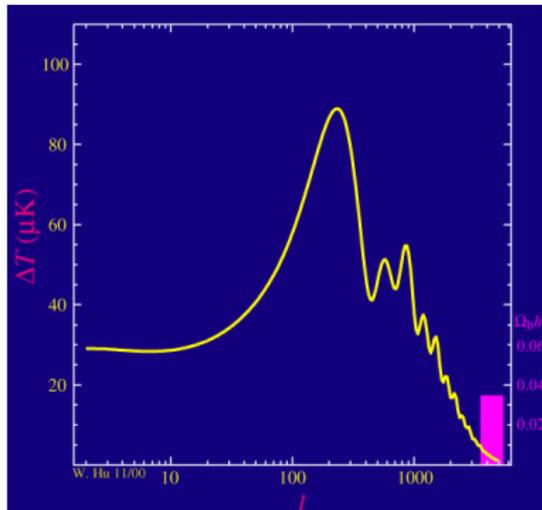
► Replay



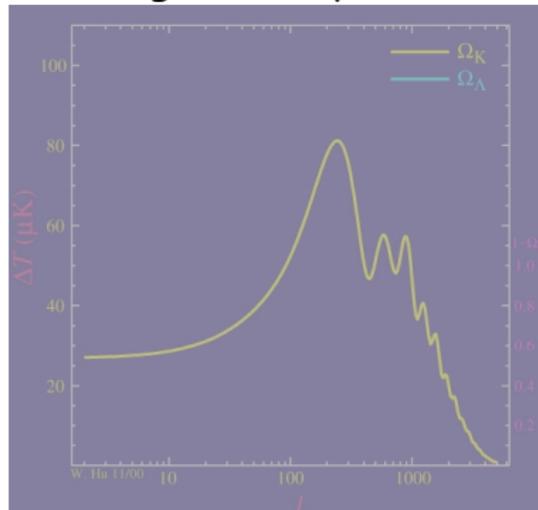
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



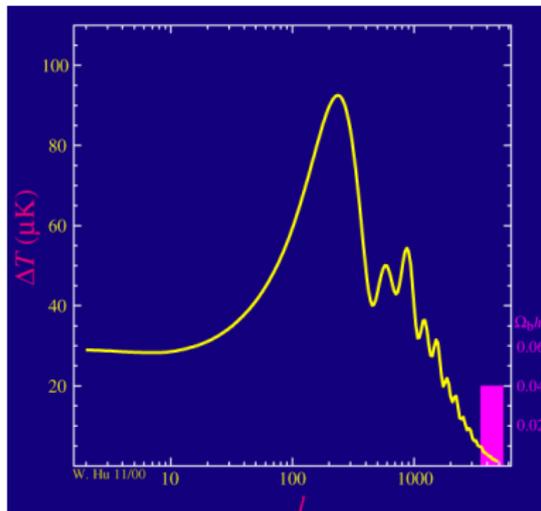
► Replay



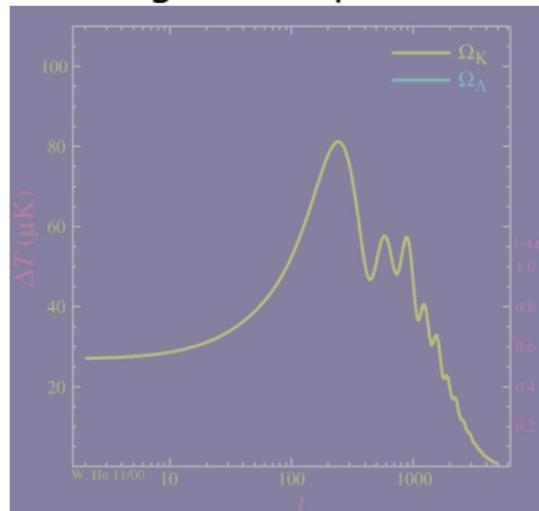
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



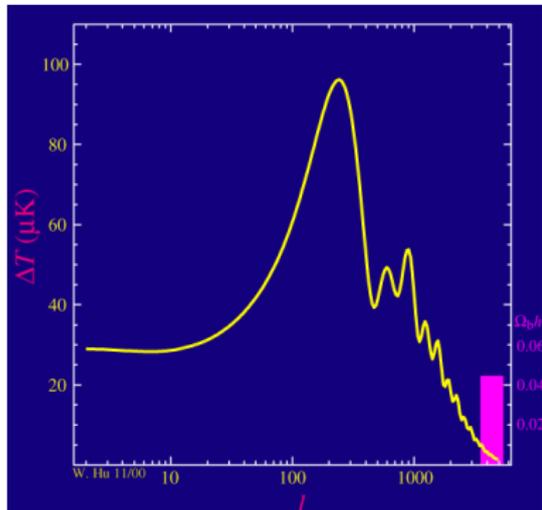
► Replay



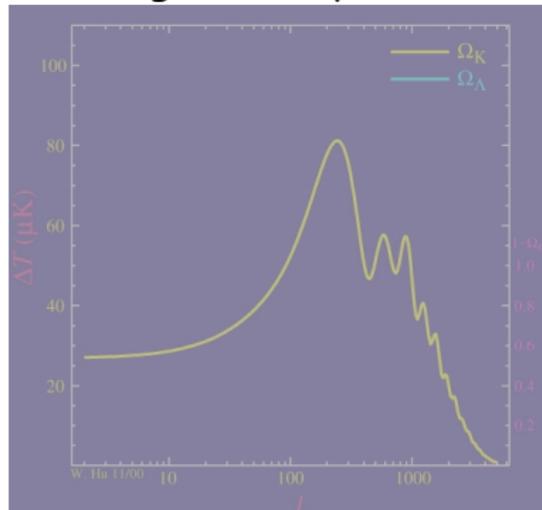
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



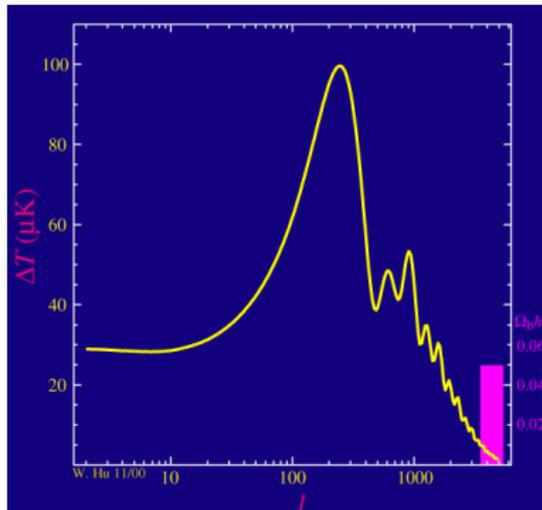
► Replay



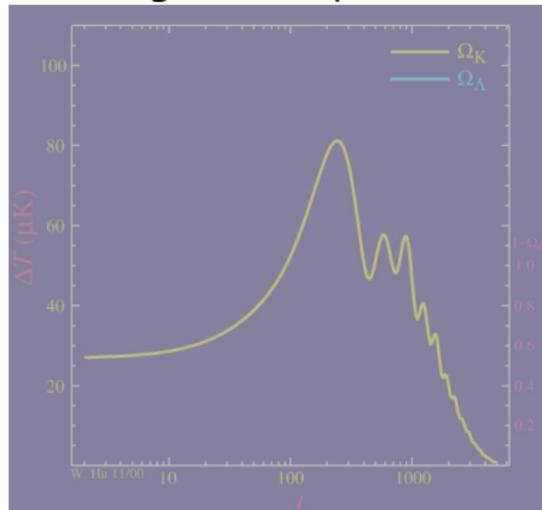
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



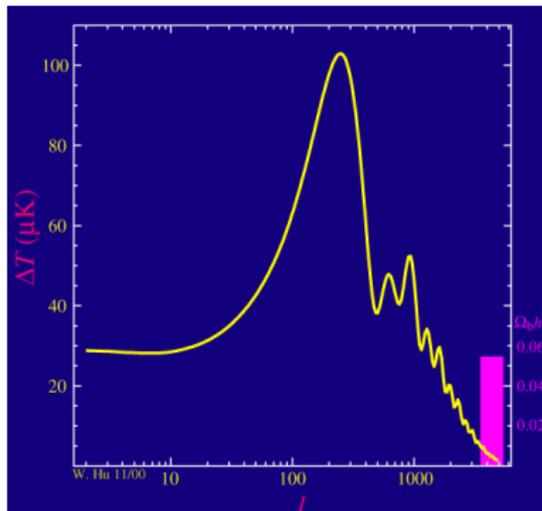
► Replay



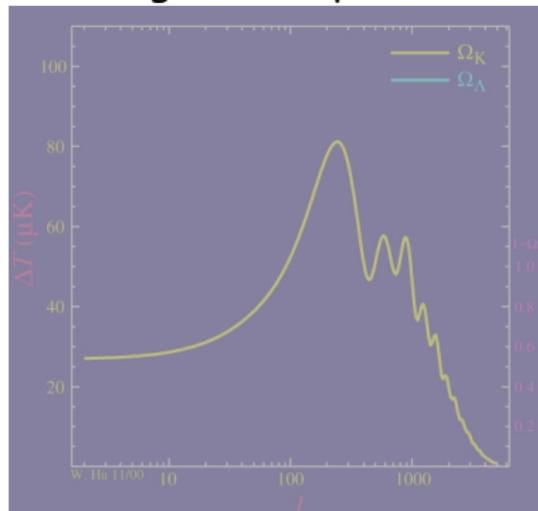
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



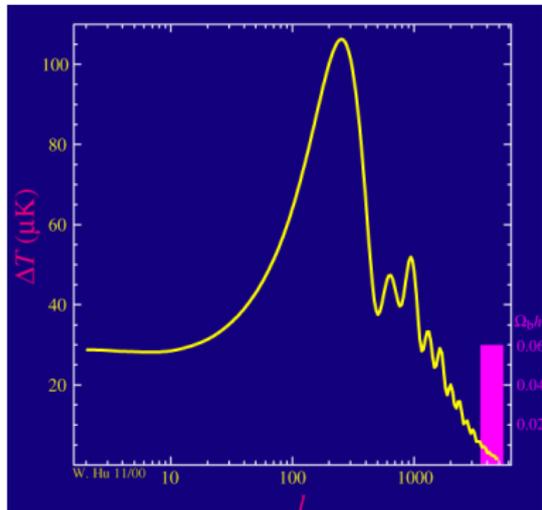
► Replay



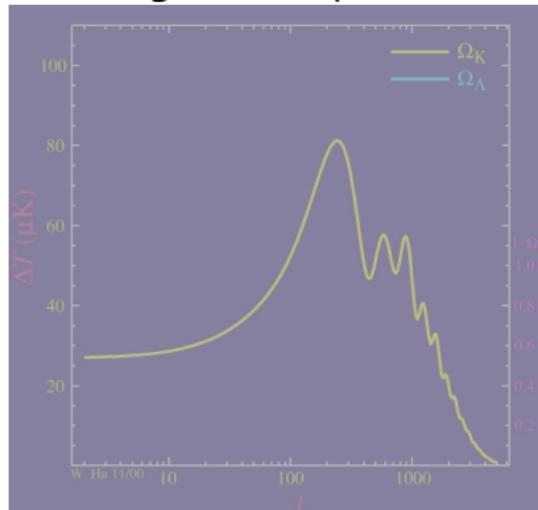
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



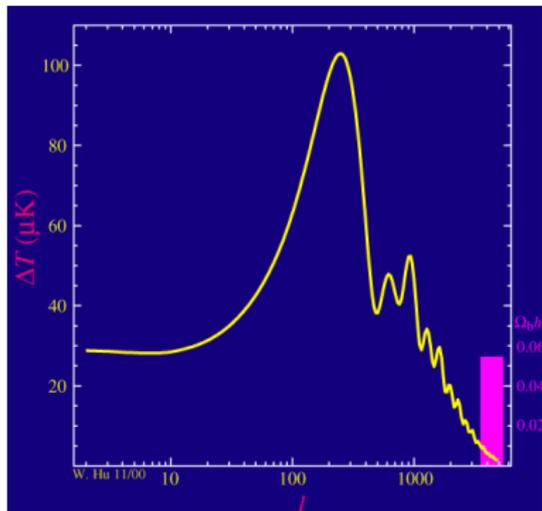
► Replay



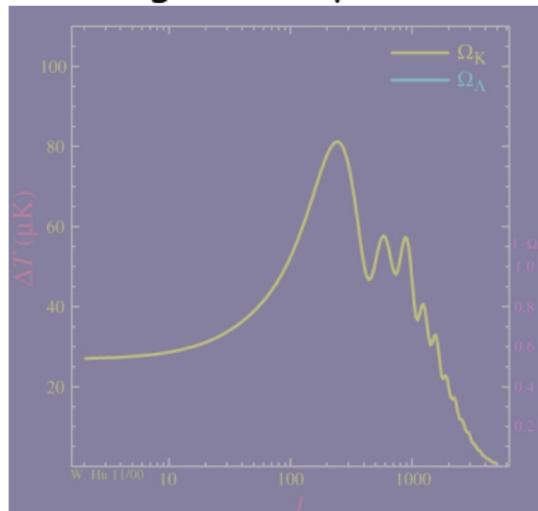
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



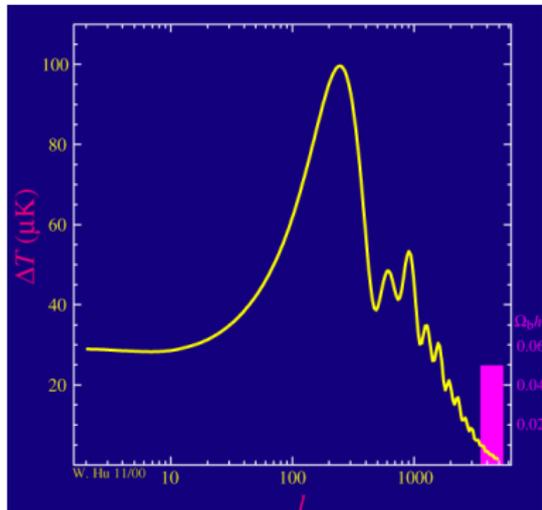
► Replay



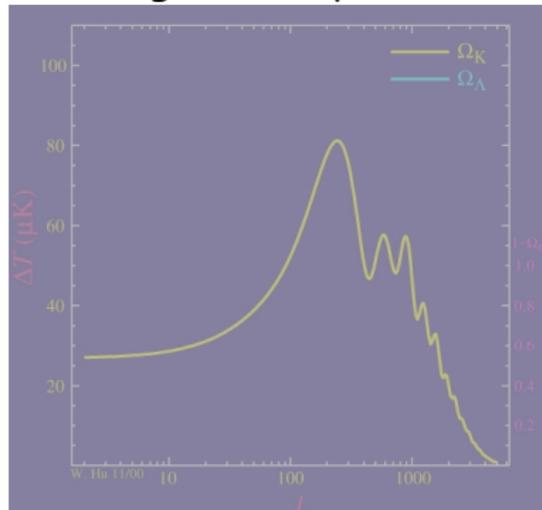
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



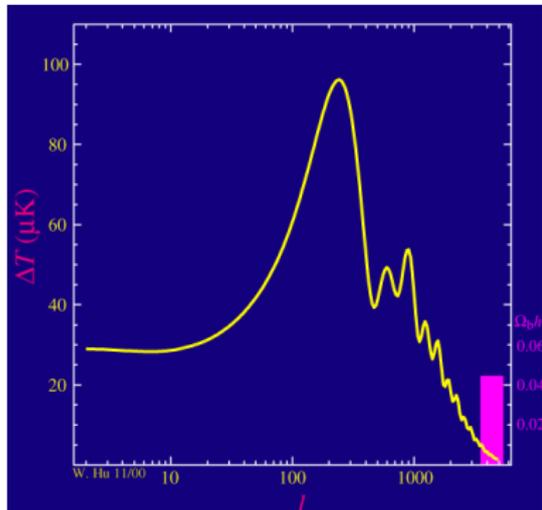
► Replay



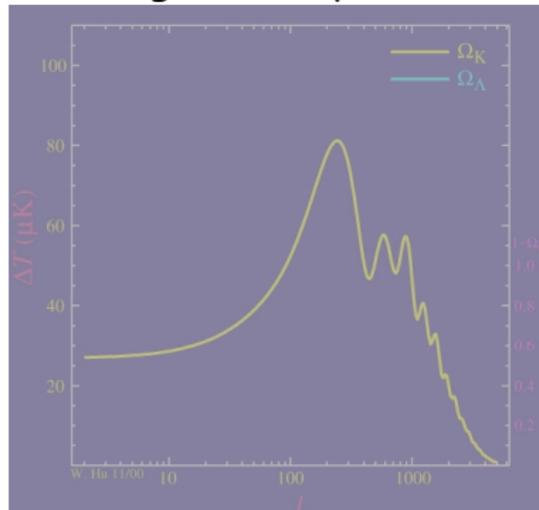
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



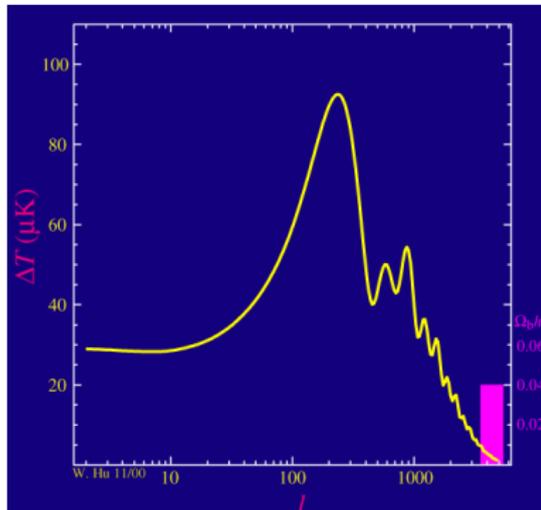
► Replay



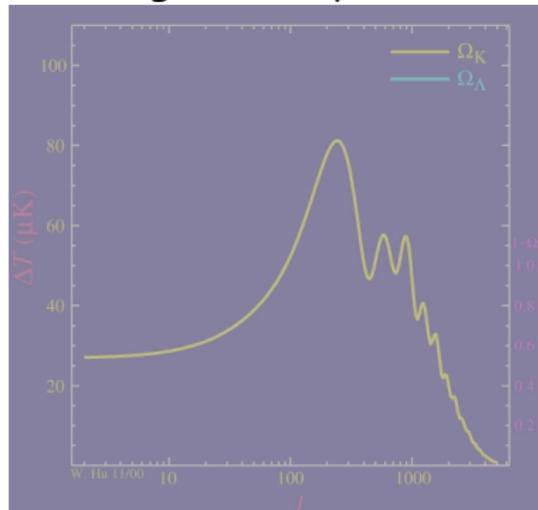
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



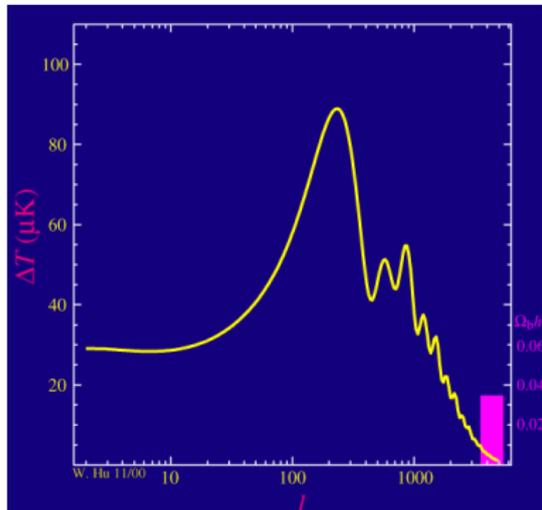
► Replay



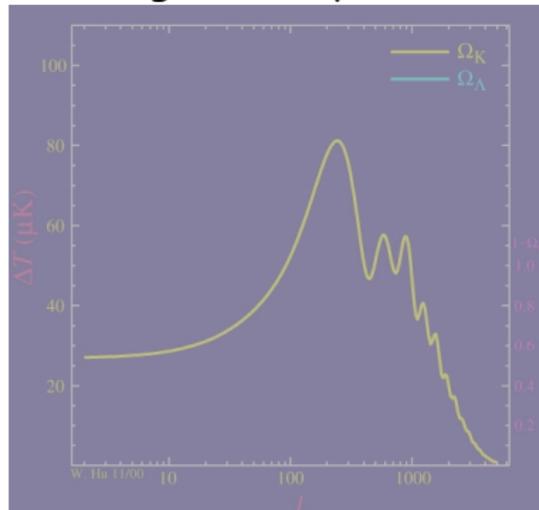
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



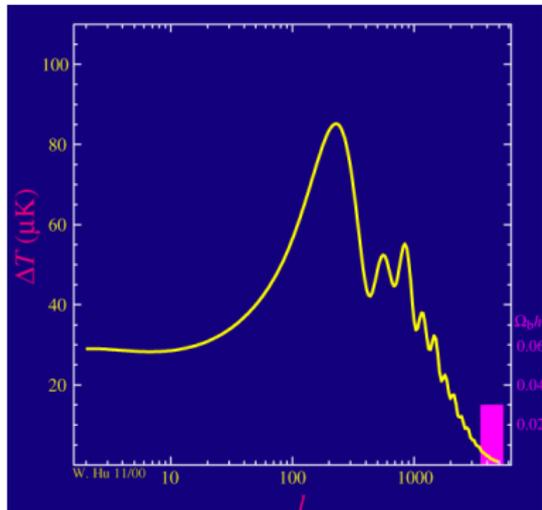
► Replay



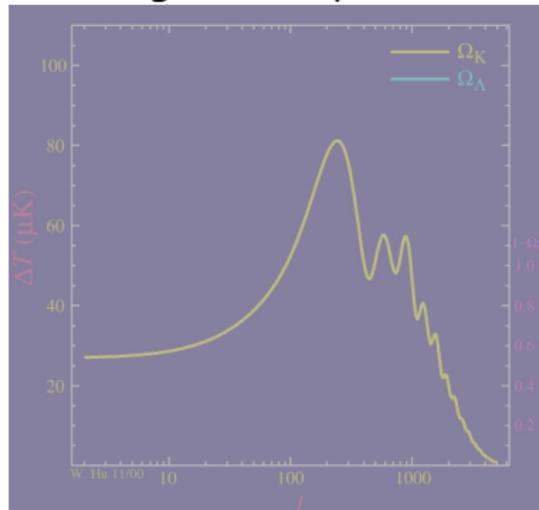
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



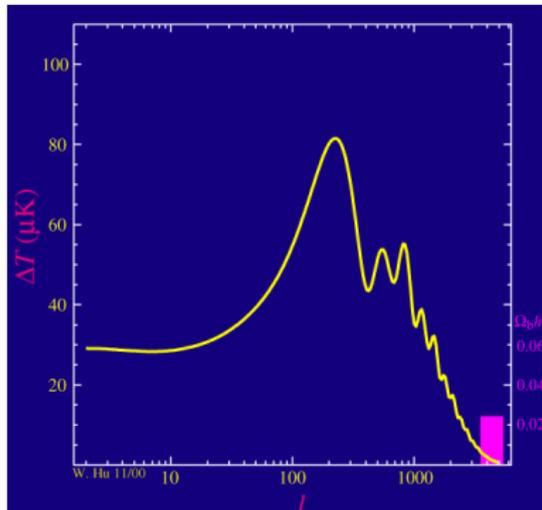
► Replay



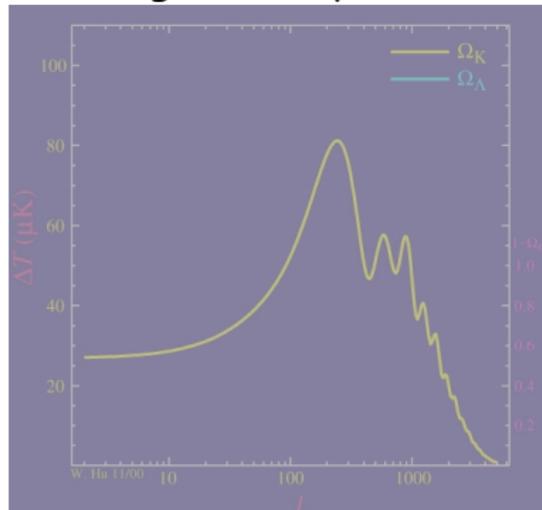
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



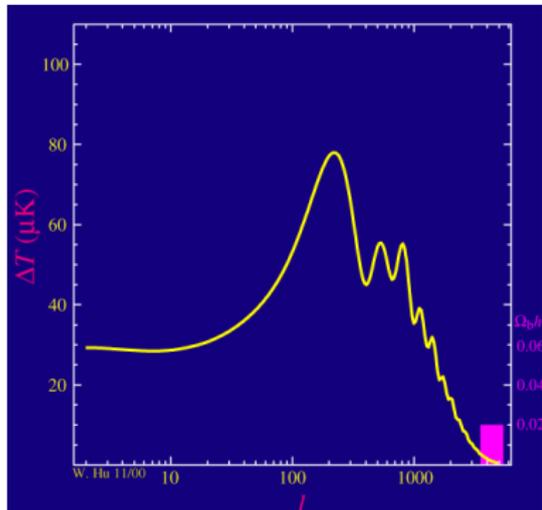
► Replay



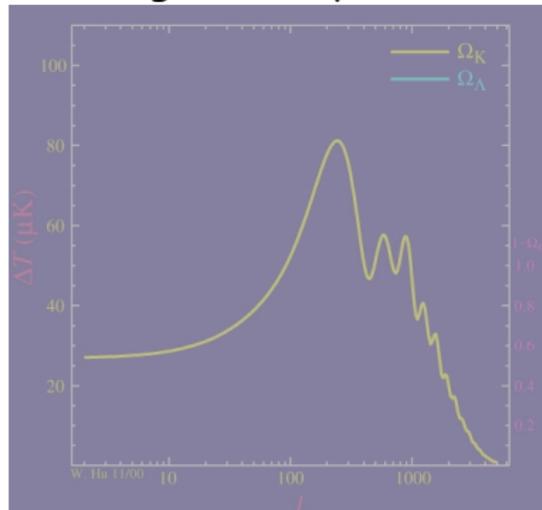
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



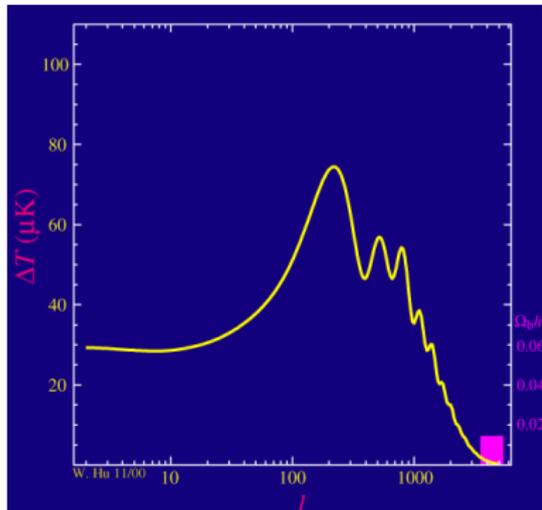
► Replay



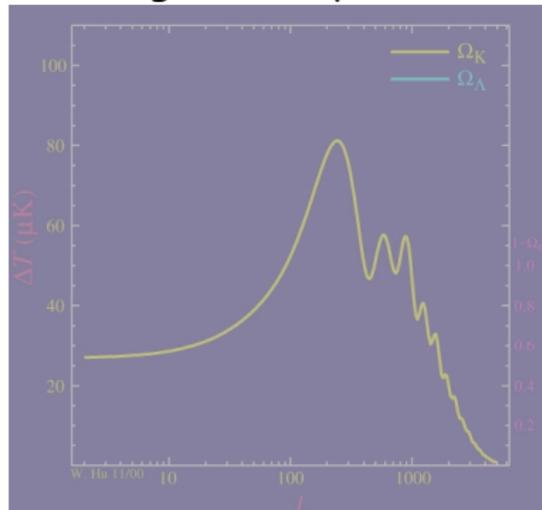
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



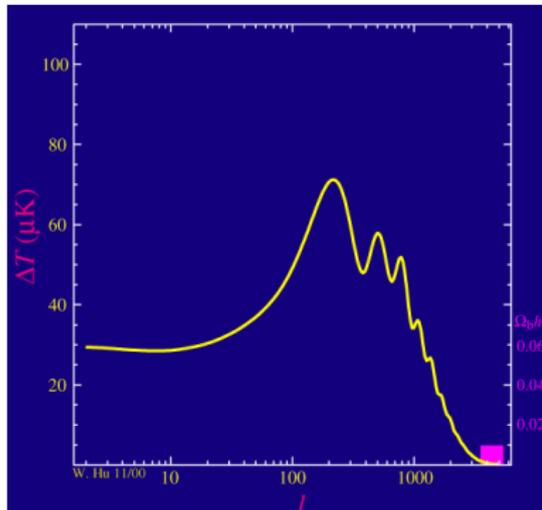
► Replay



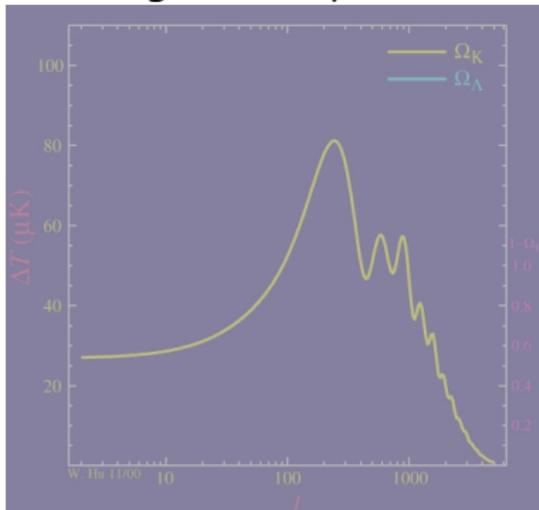
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



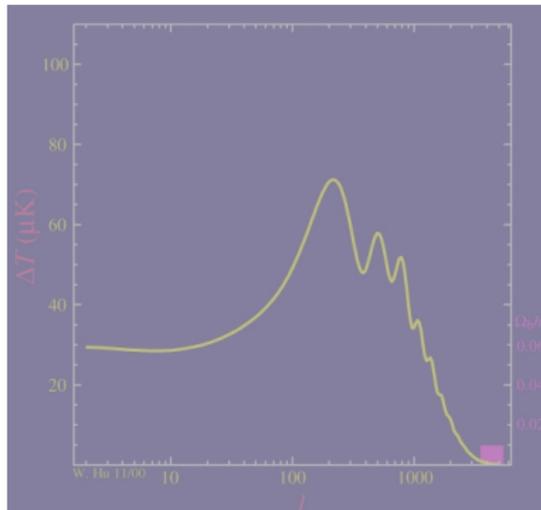
► Replay



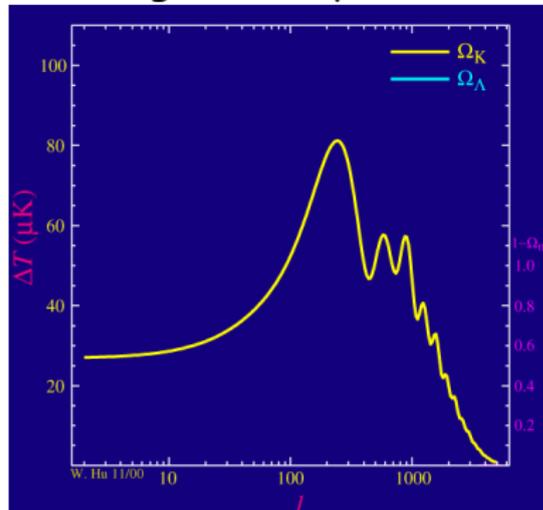
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



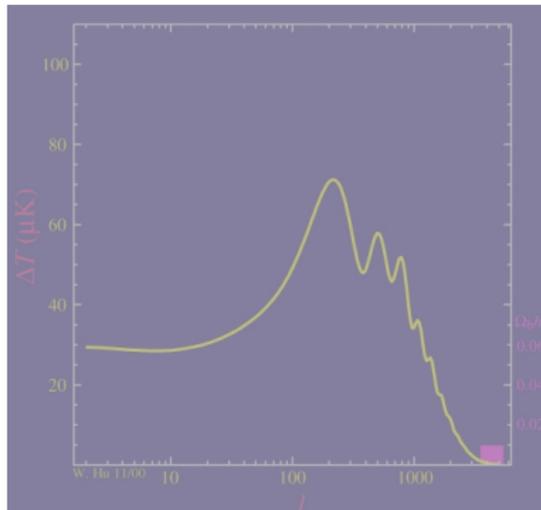
► Replay



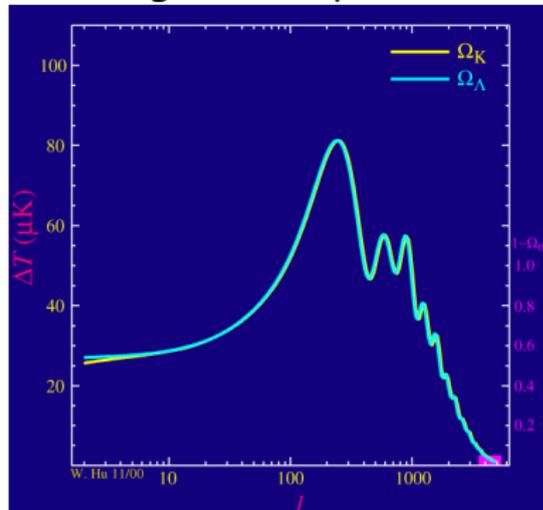
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



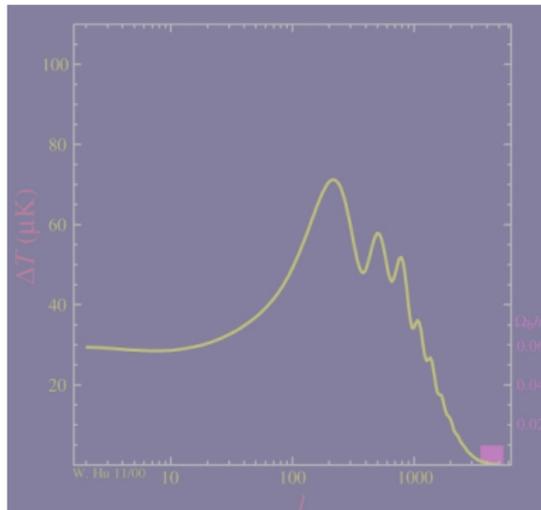
► Replay



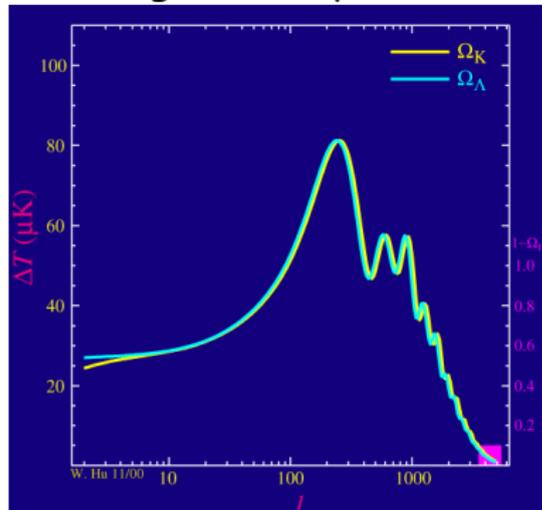
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



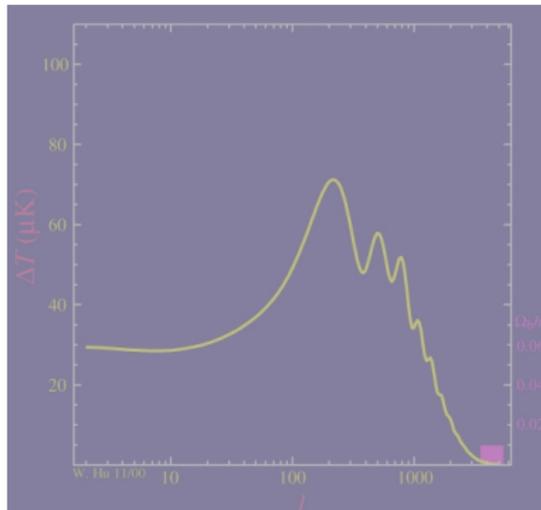
► Replay



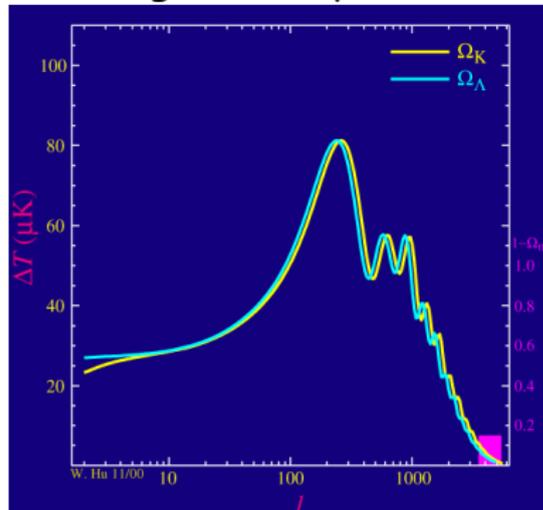
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



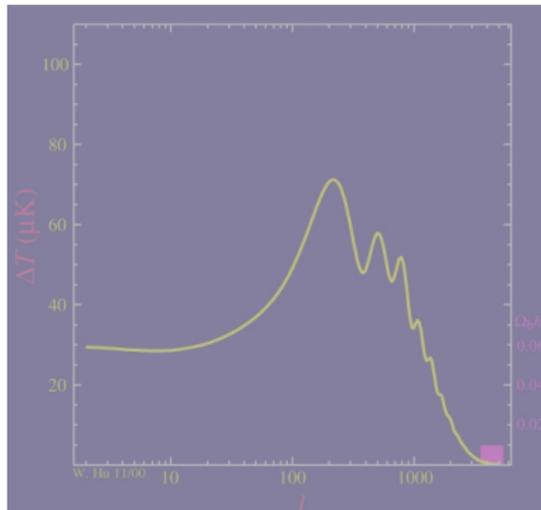
► Replay



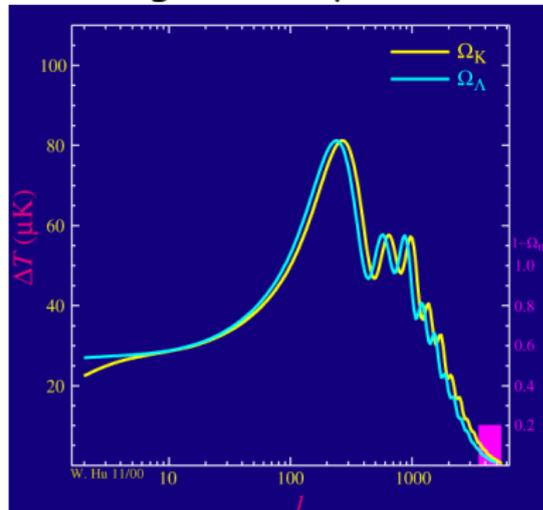
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



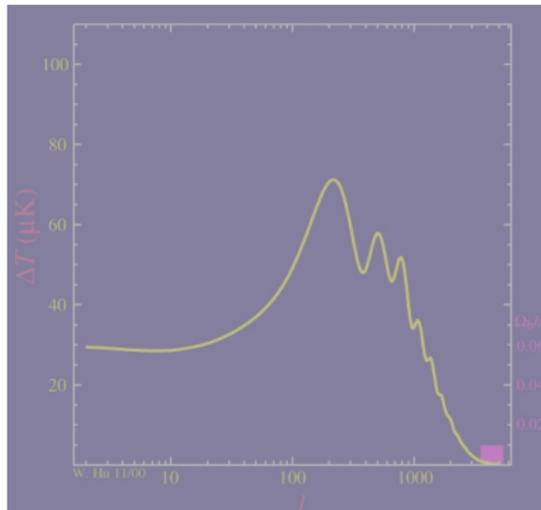
► Replay



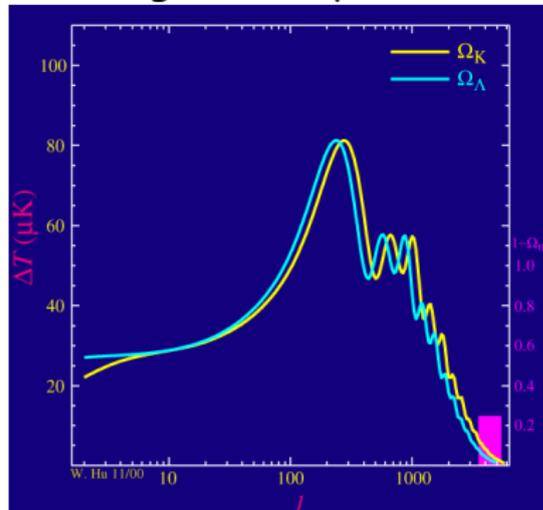
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



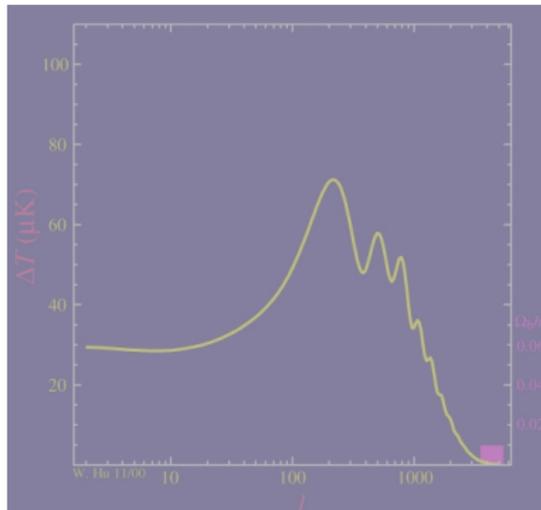
► Replay



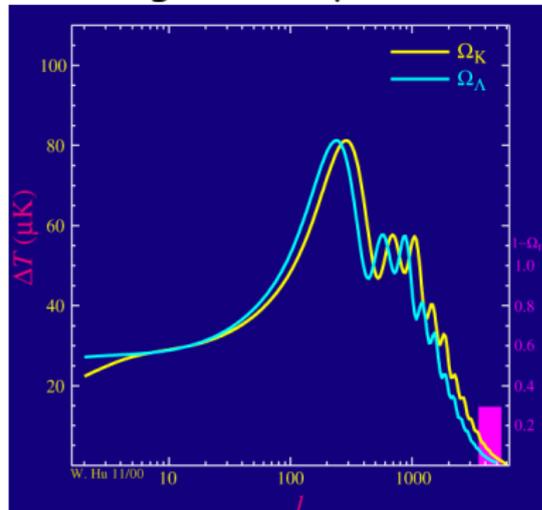
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



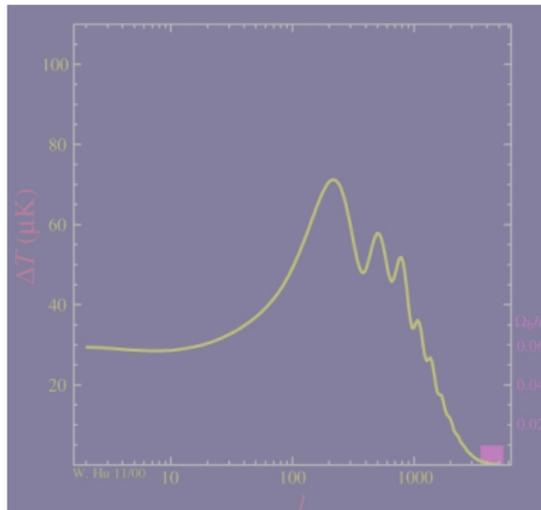
► Replay



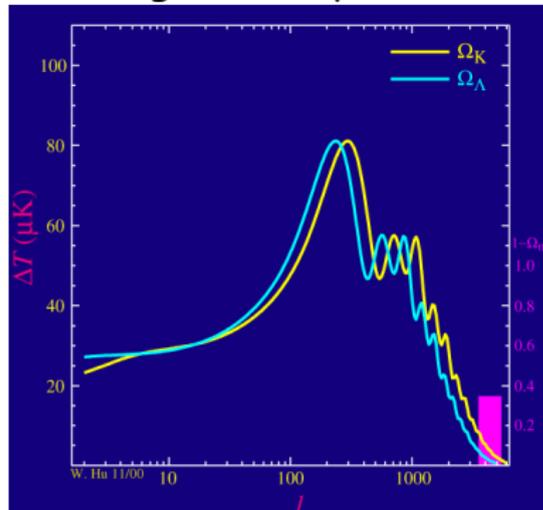
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



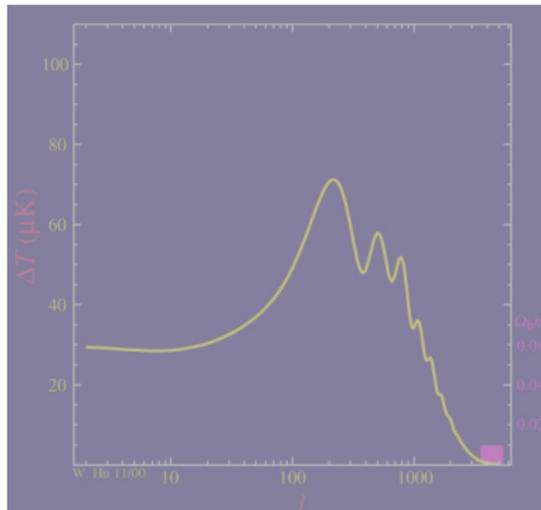
► Replay



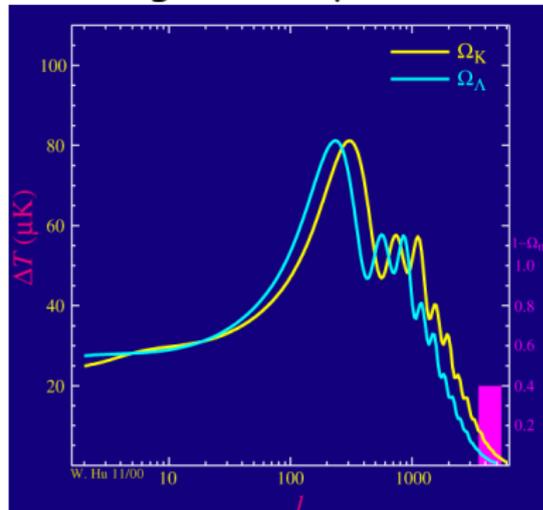
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



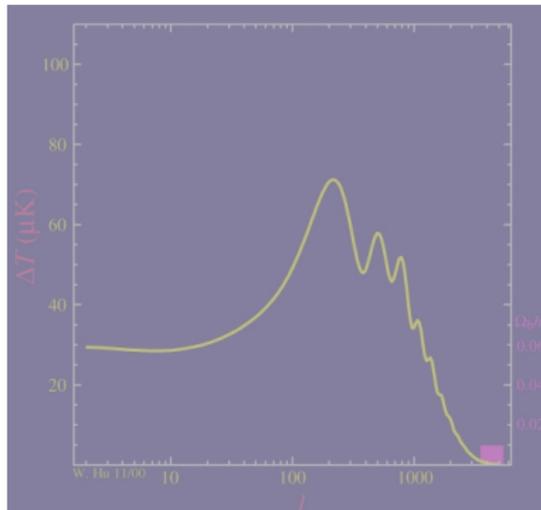
► Replay



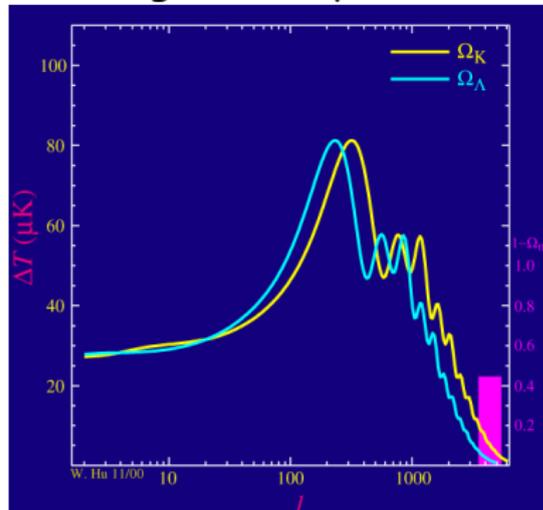
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



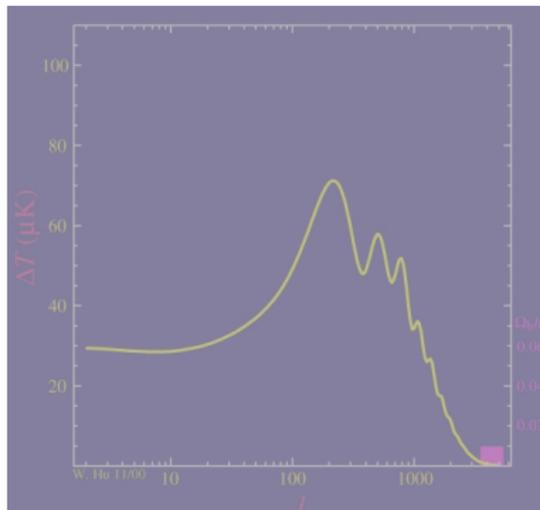
► Replay



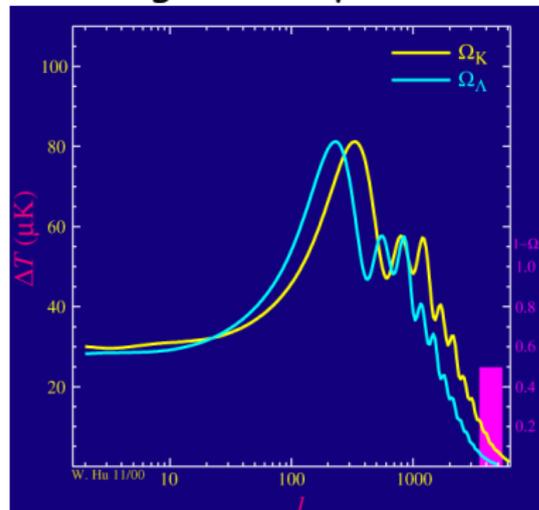
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



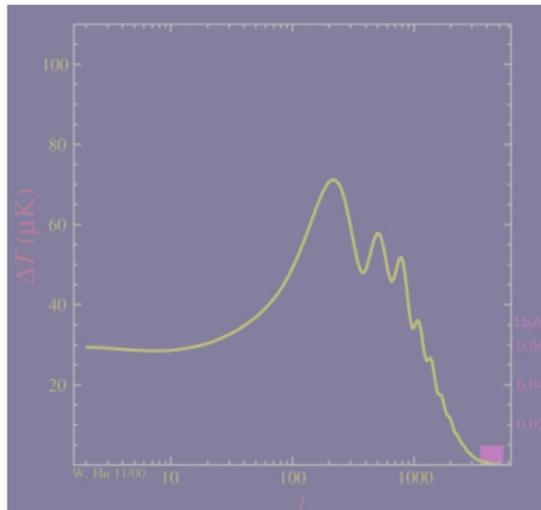
► Replay



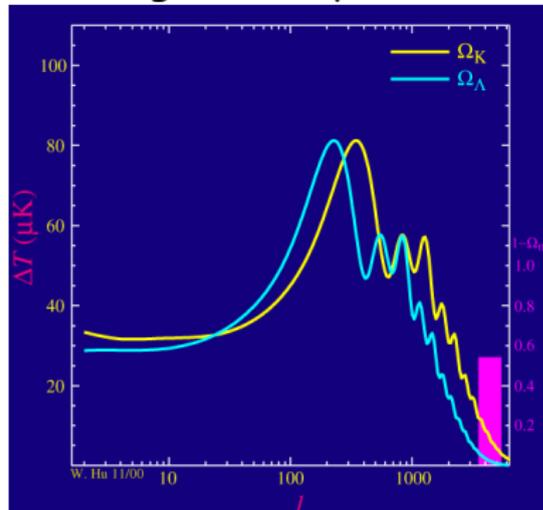
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



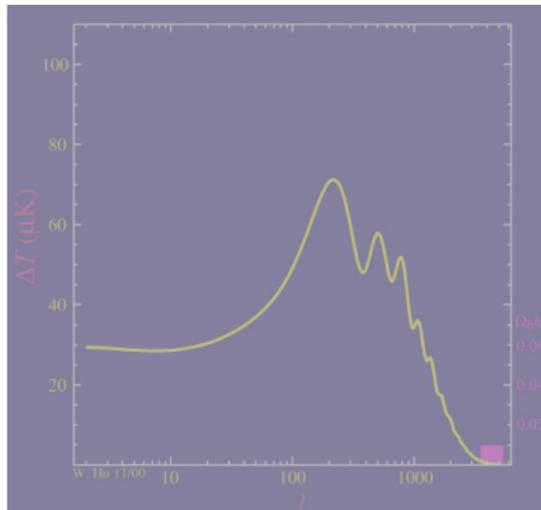
► Replay



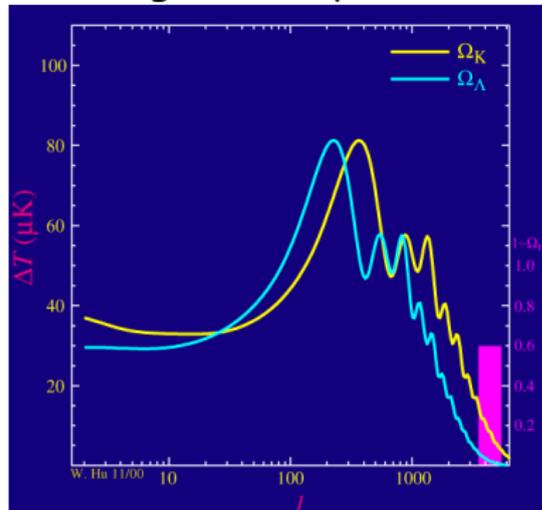
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



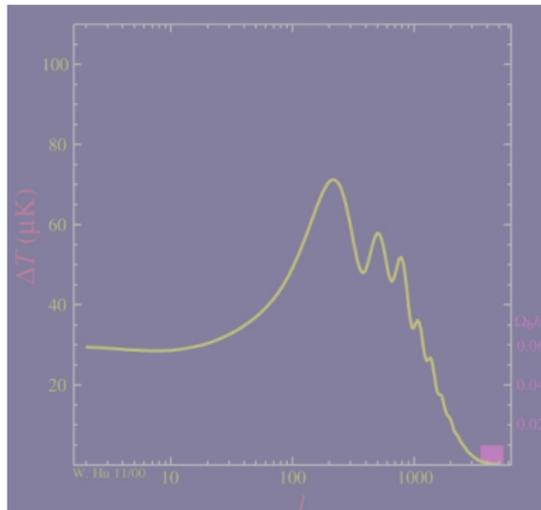
► Replay



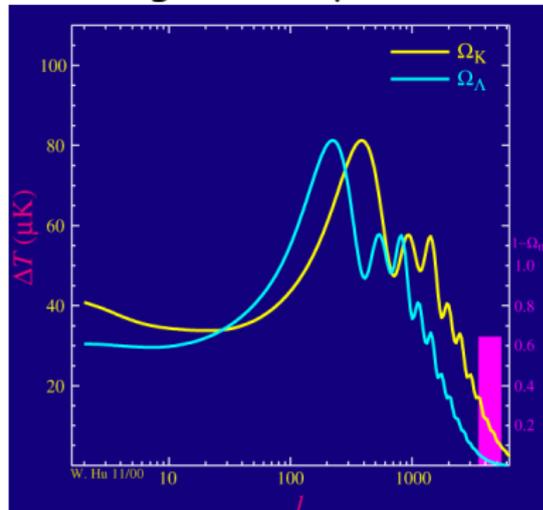
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



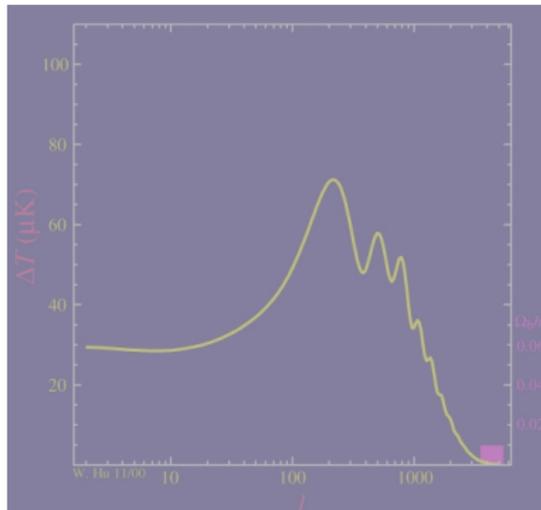
► Replay



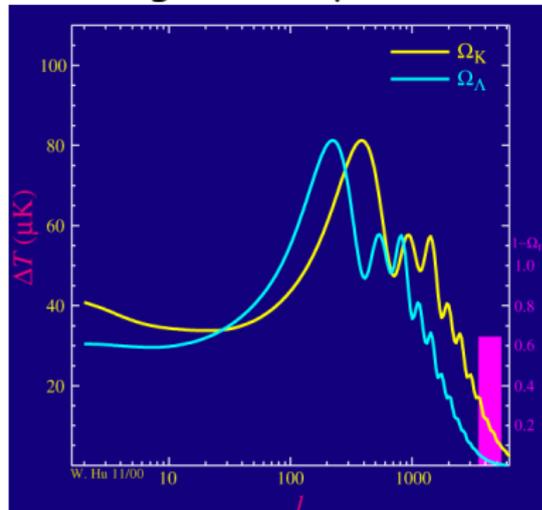
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



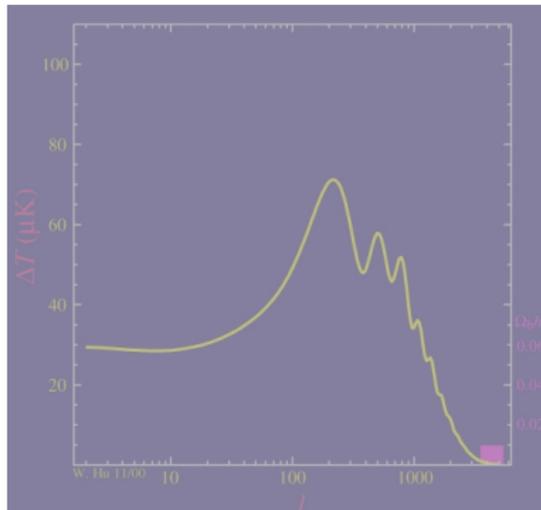
► Replay



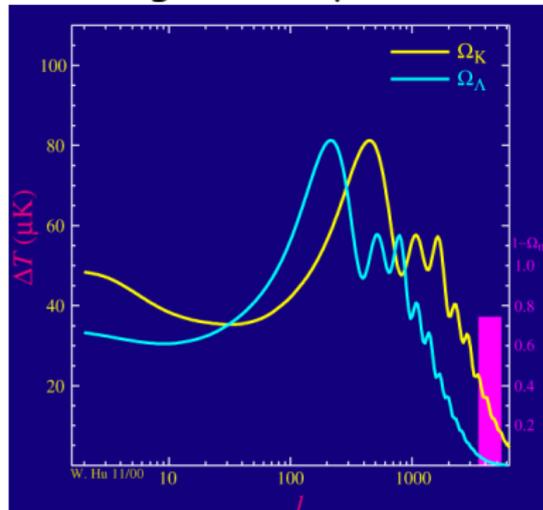
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



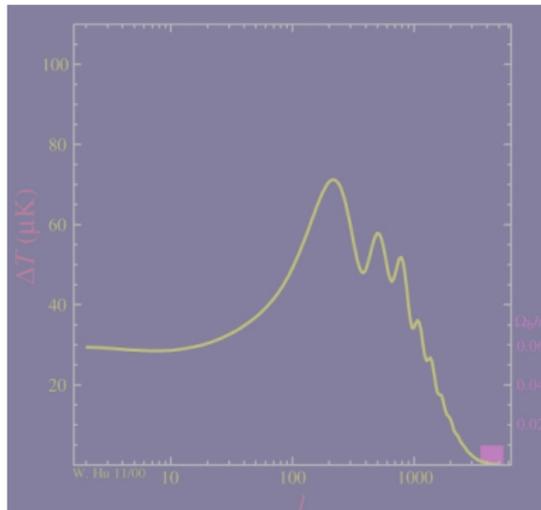
► Replay



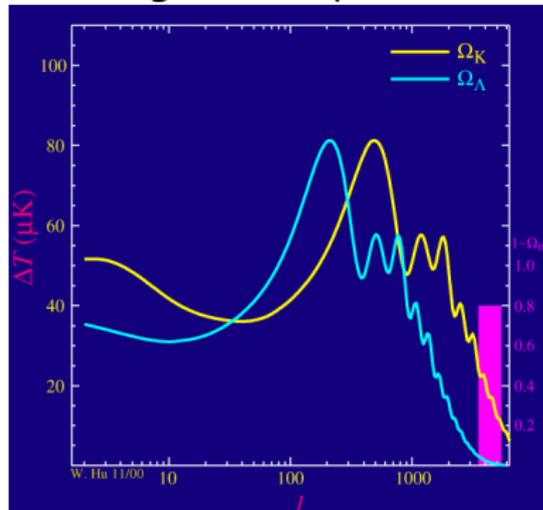
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



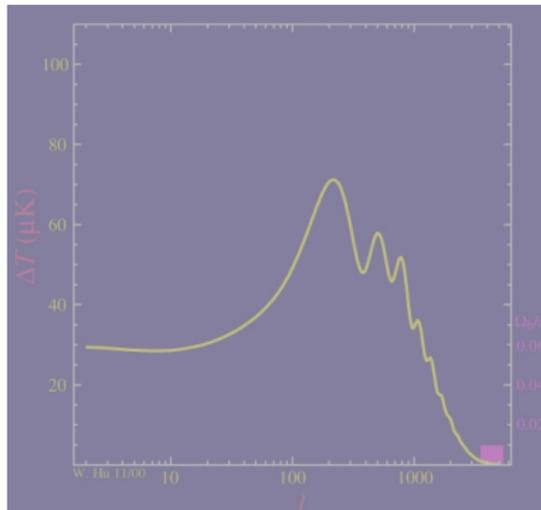
► Replay



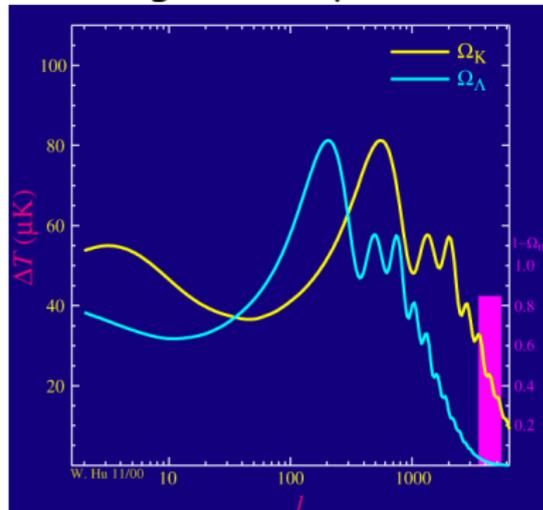
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



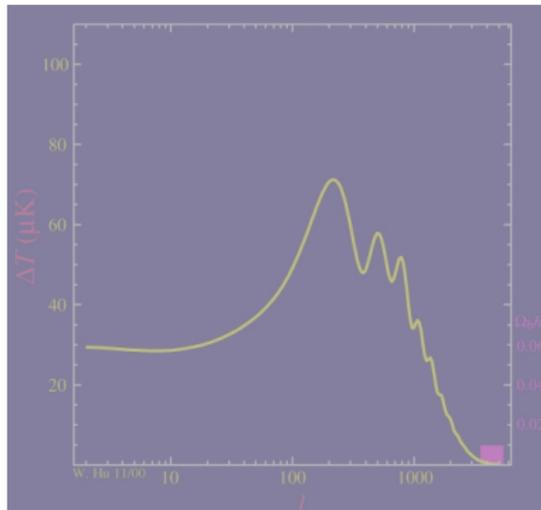
► Replay



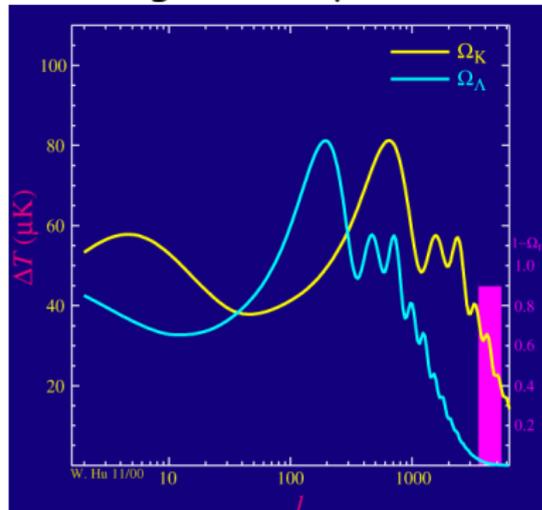
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



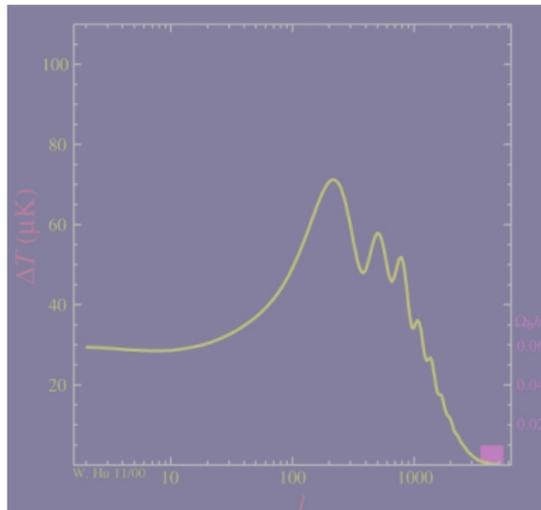
► Replay



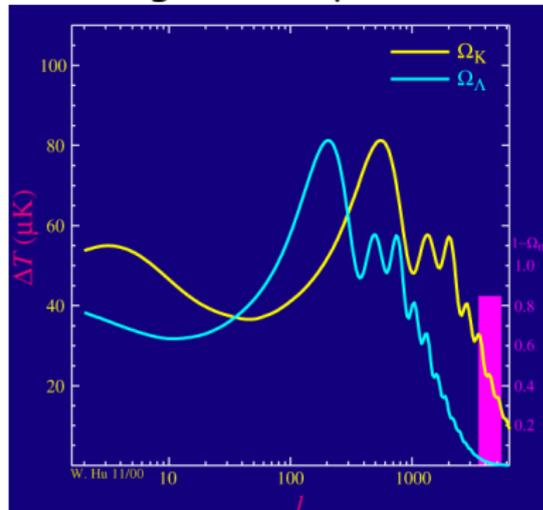
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



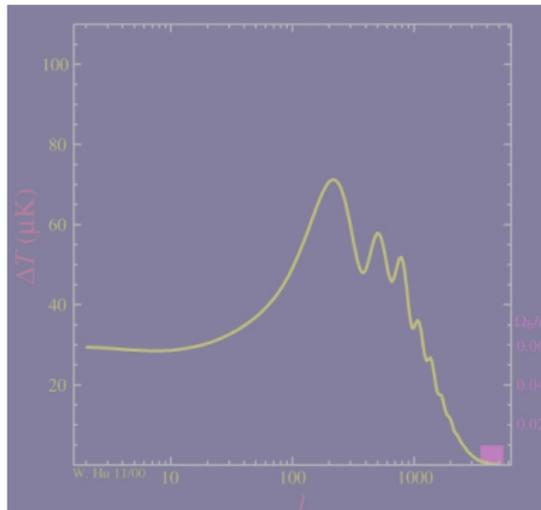
► Replay



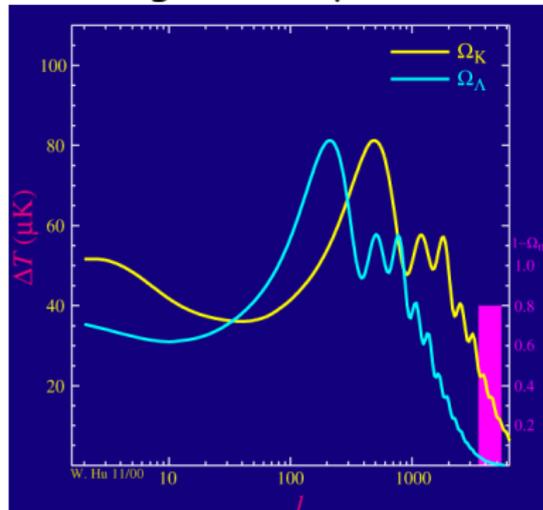
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



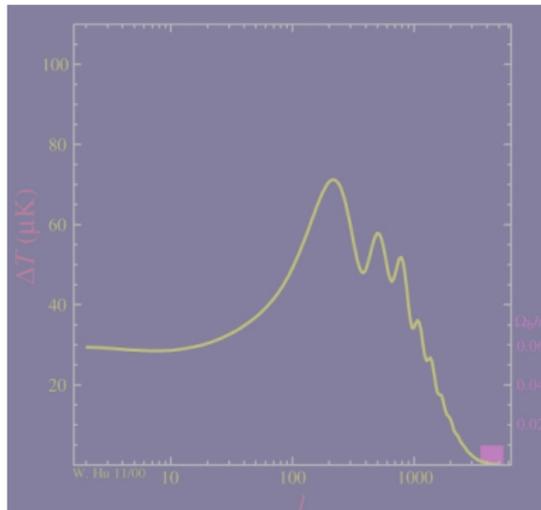
► Replay



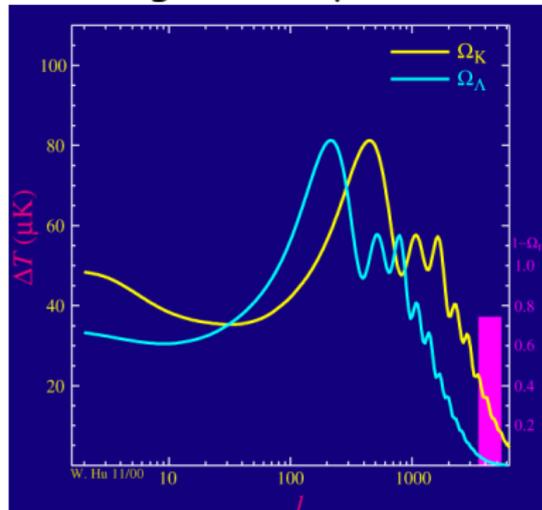
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



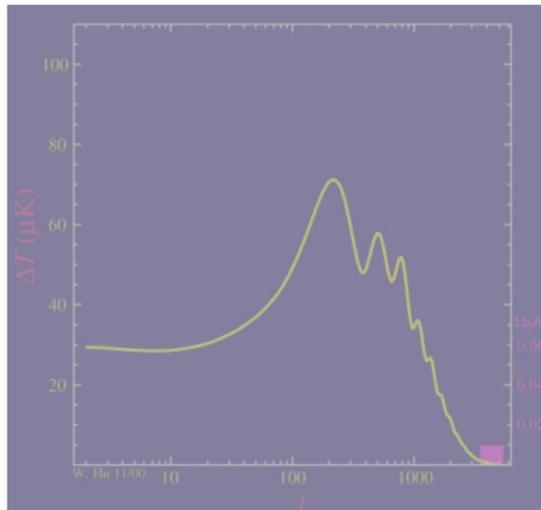
► Replay



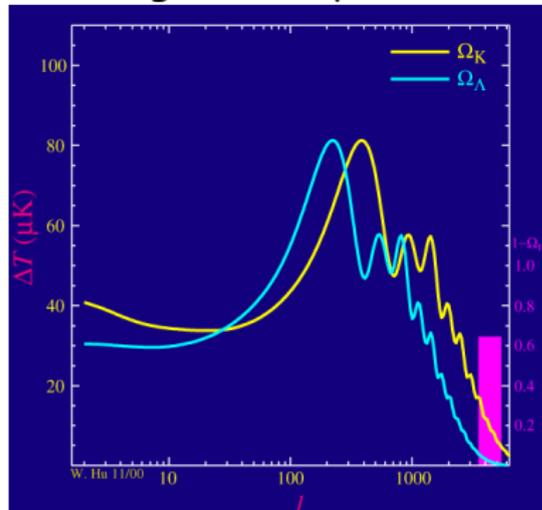
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



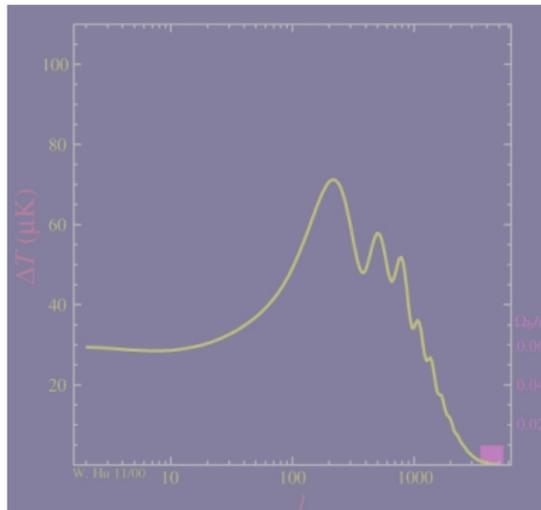
► Replay



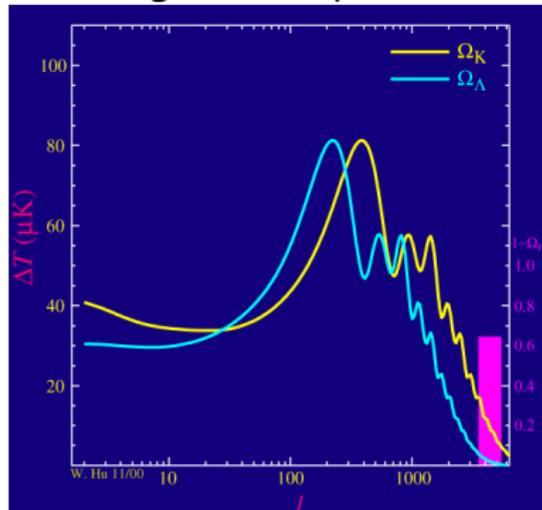
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



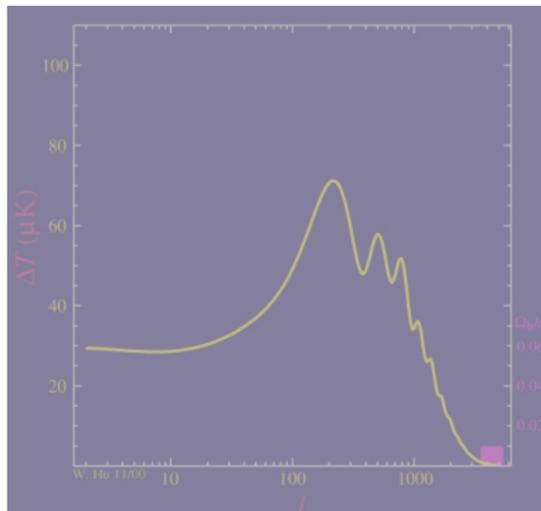
► Replay



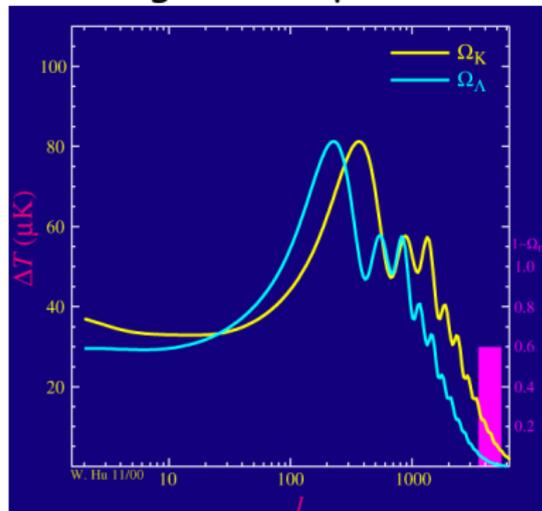
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



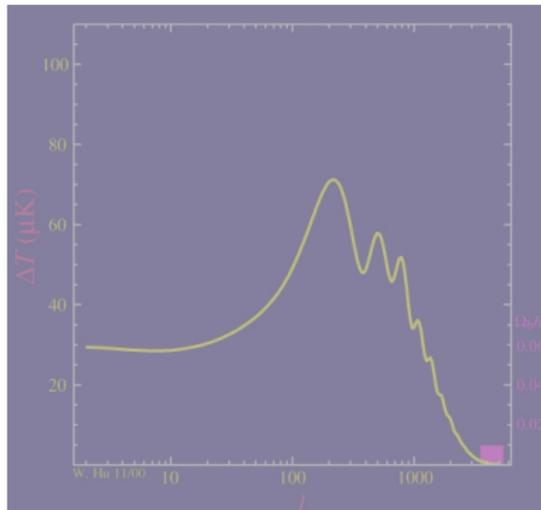
► Replay



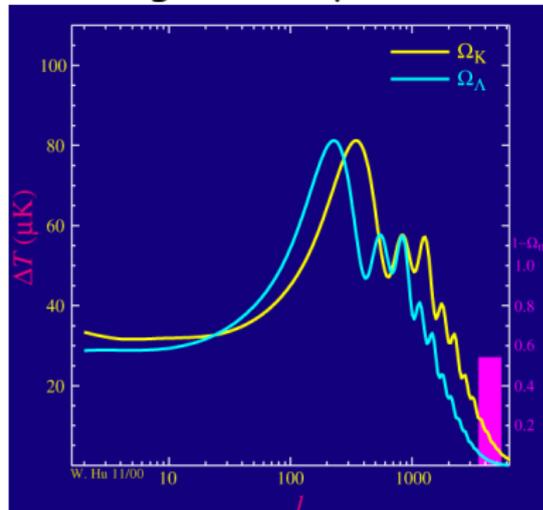
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



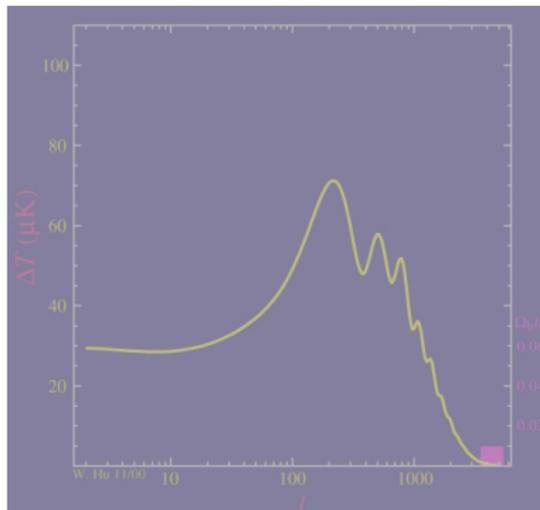
► Replay



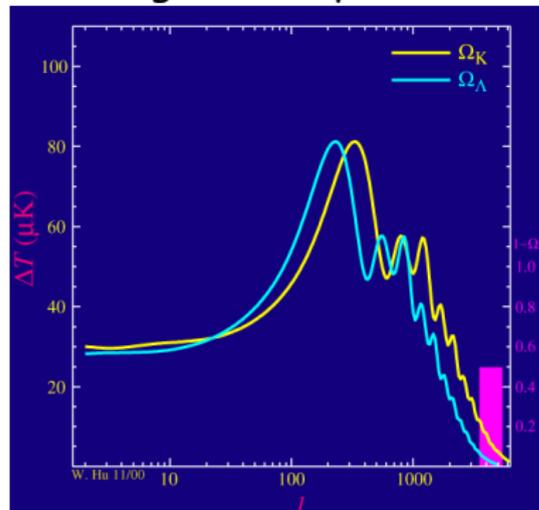
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



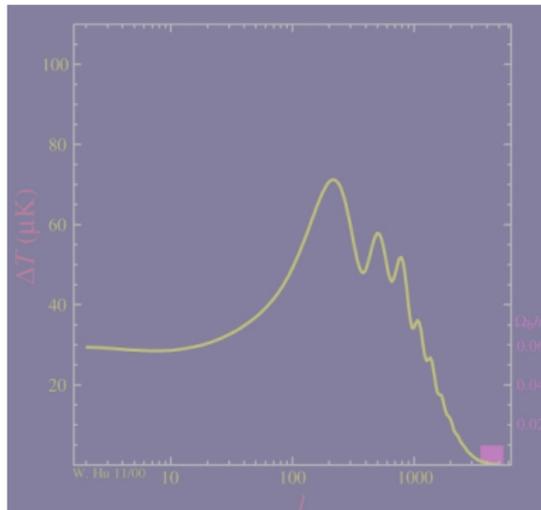
► Replay



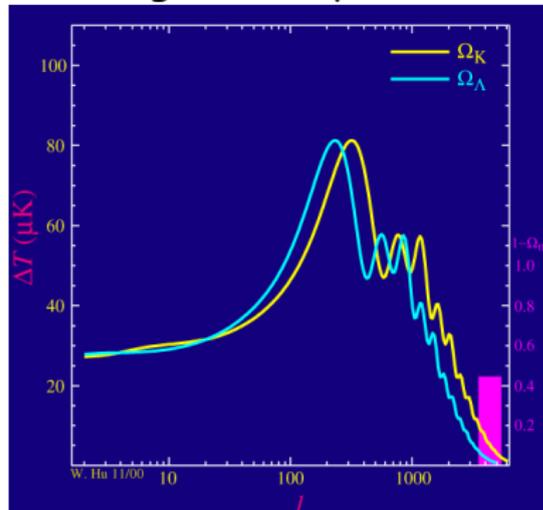
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



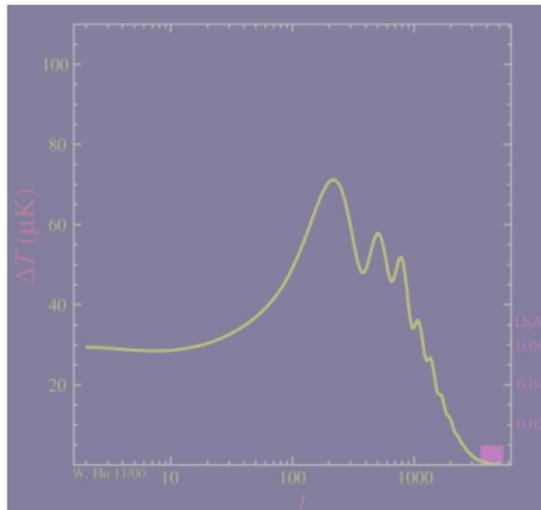
► Replay



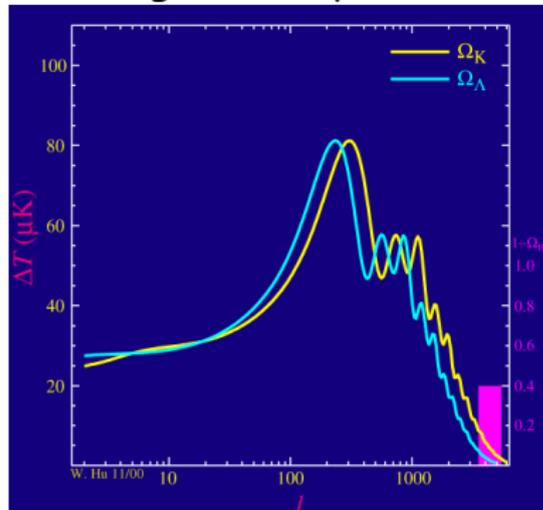
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



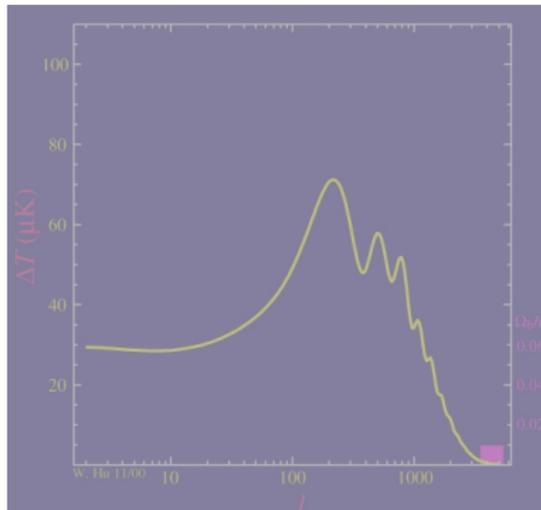
► Replay



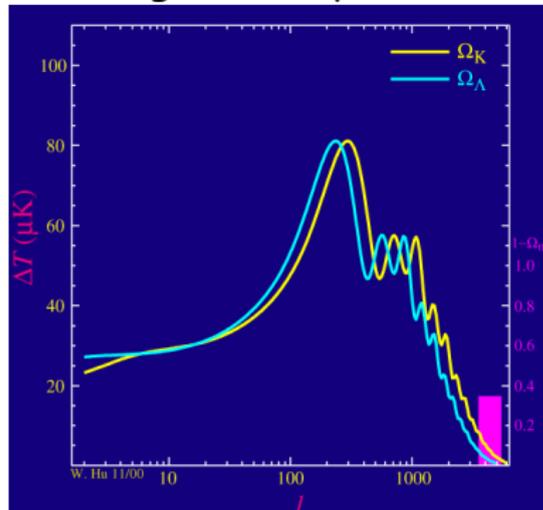
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



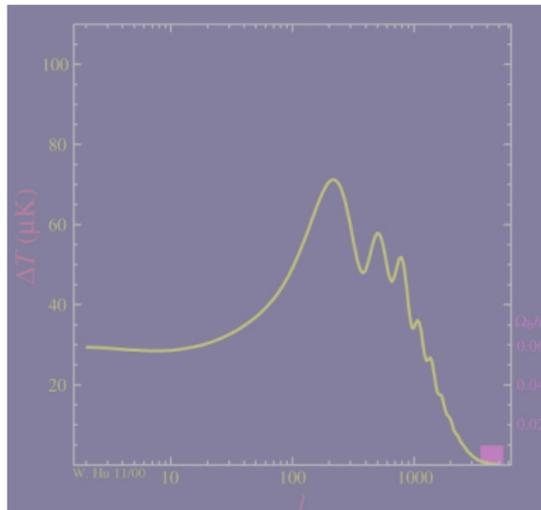
► Replay



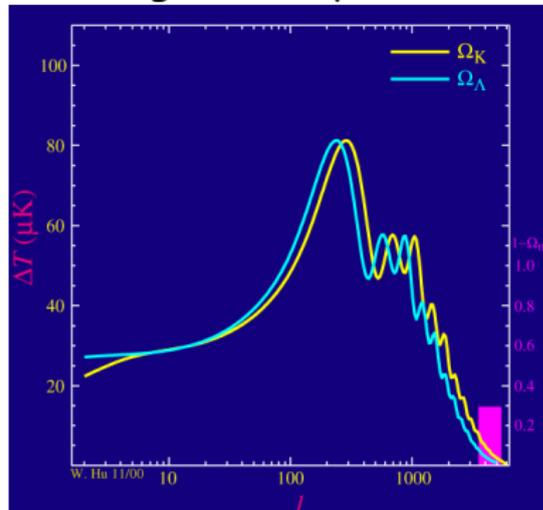
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



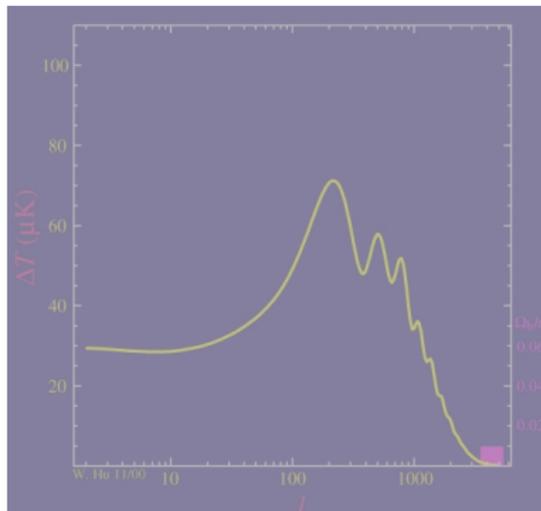
► Replay



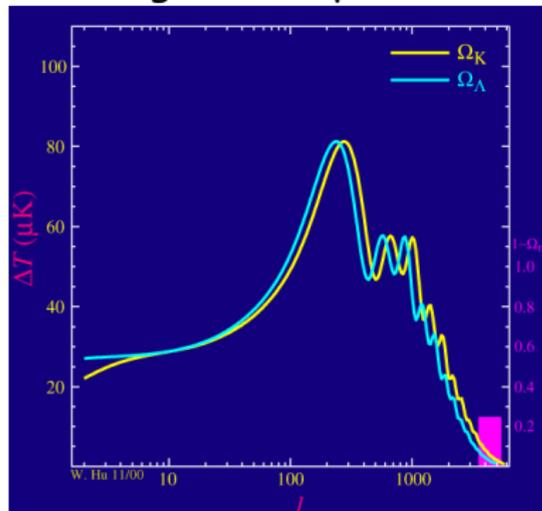
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



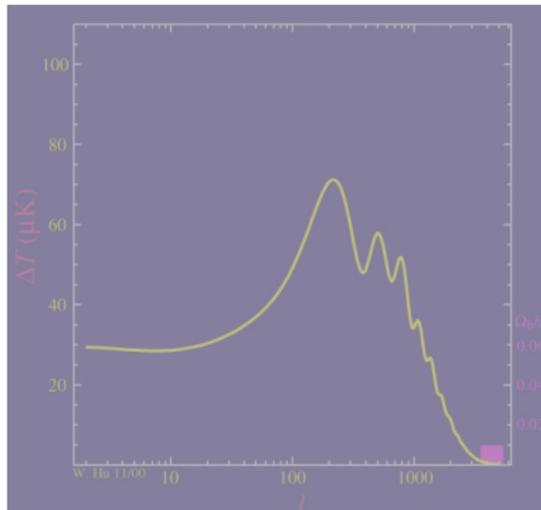
► Replay



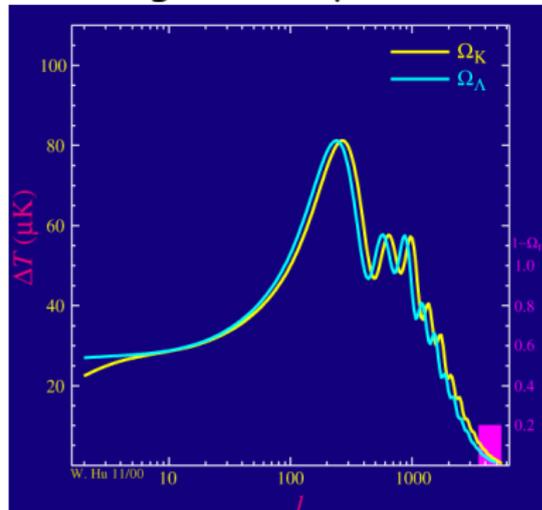
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



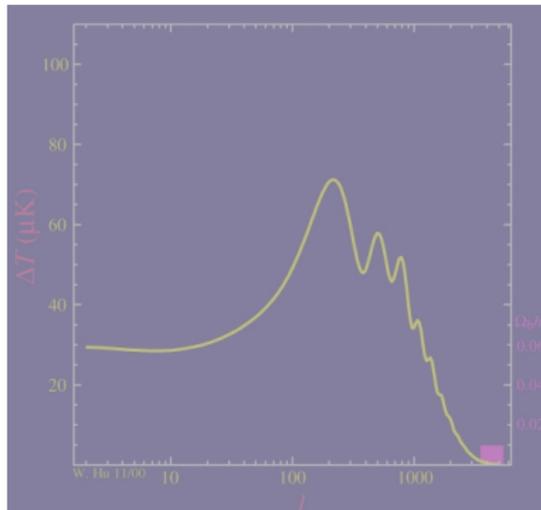
► Replay



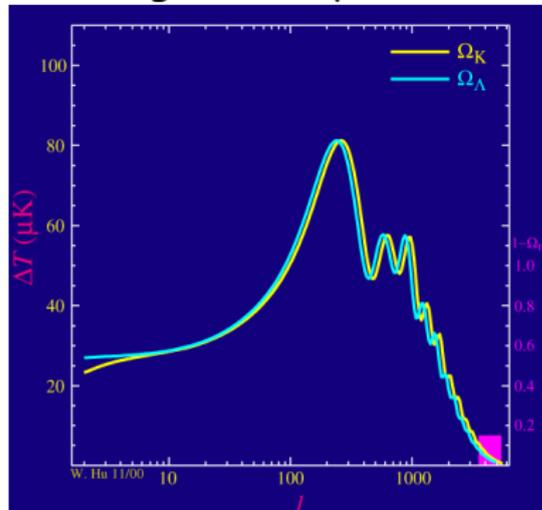
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



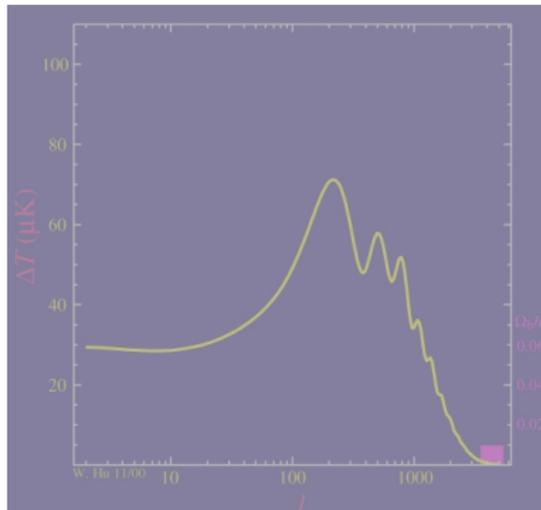
► Replay



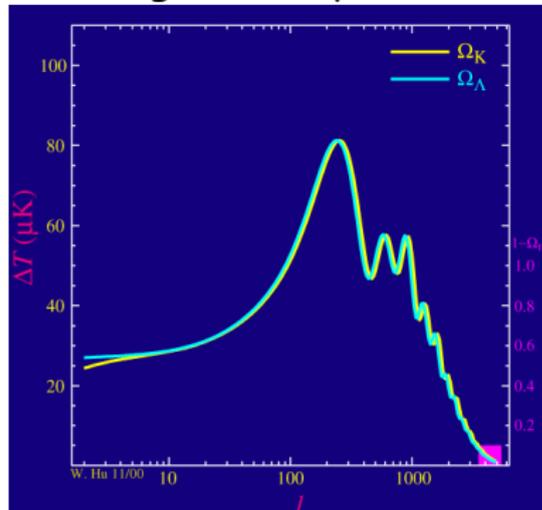
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



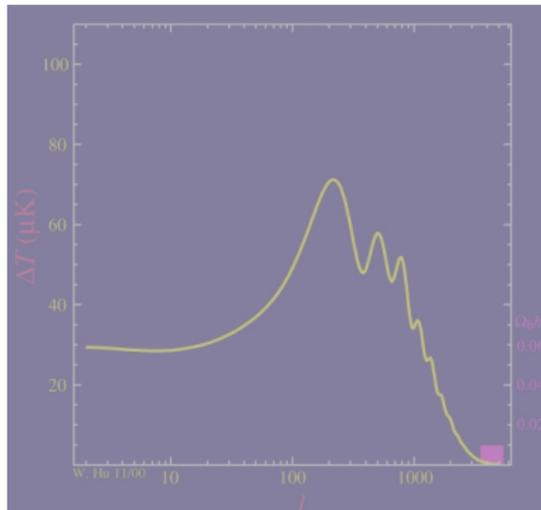
► Replay



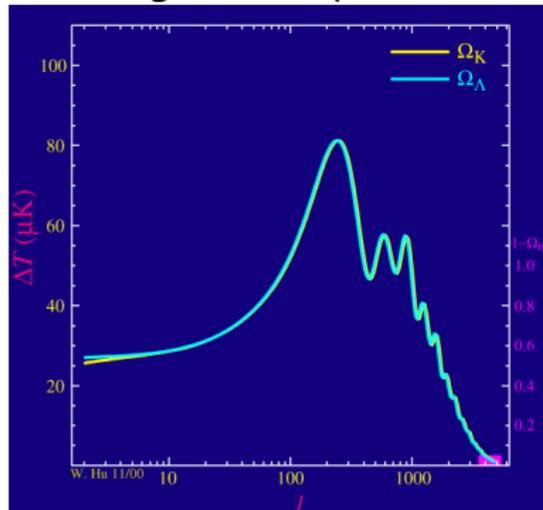
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



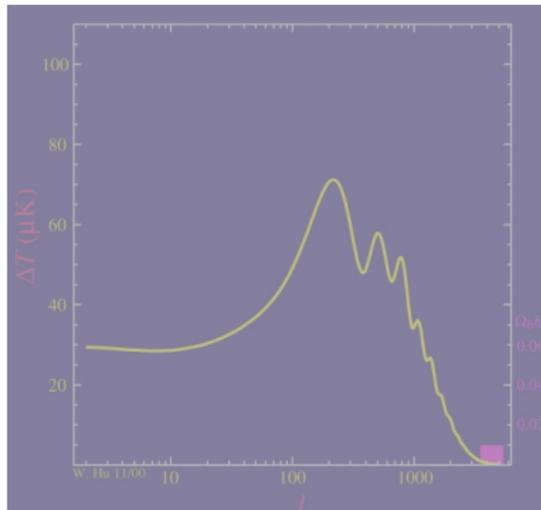
► Replay



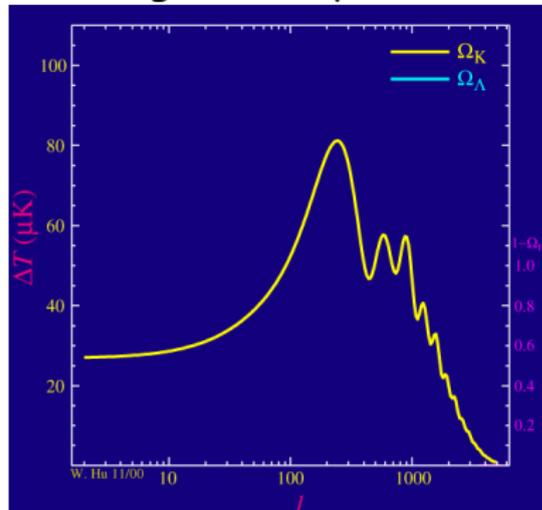
► Replay

# Un outil sensible!

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



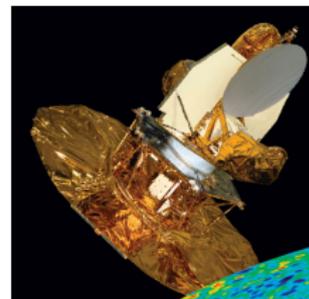
► Replay



► Replay

# Aperçu expérimental

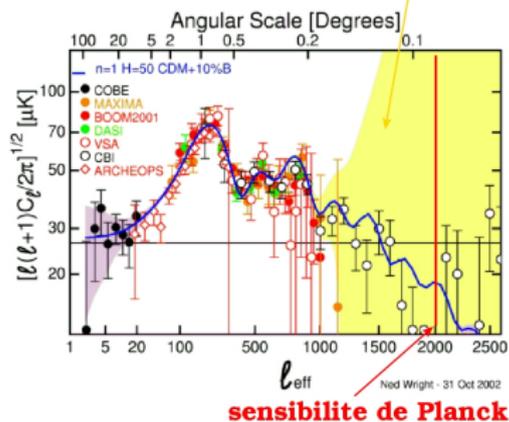
- COBE-DMR (1992) anisotropies (radio, espace)
- Boomerang, Maxima (1998, ballon + bolomètres) : 1eres mesures de  $\Omega_0$  avec le CMB
- Archéops (2002) (ballon + bolomètres)
- CBI, VSA, DASI (interférométrie radio, sol, 2000-2) : petites échelles
- WMAP 2003(-7-?) (radio, espace)  
Mesures de  $\delta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



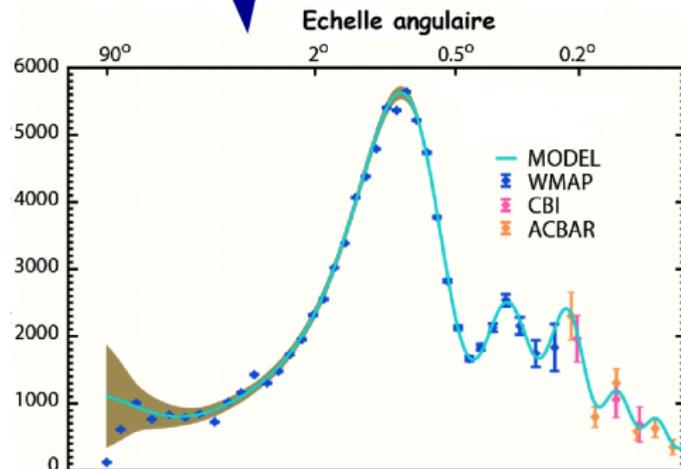
COBE×1000, WMAP×10, "cosmologie au pourcent"

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

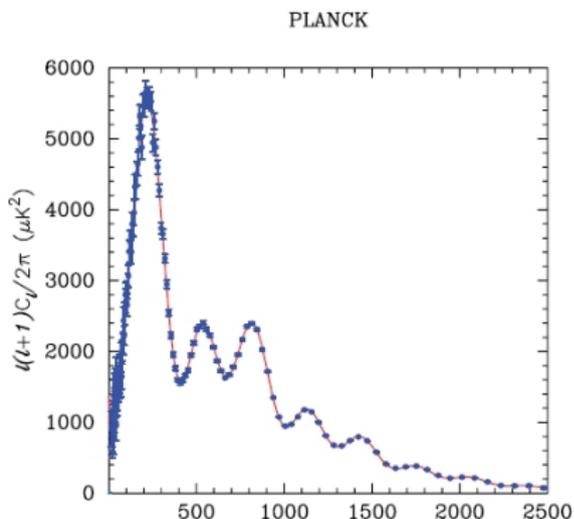
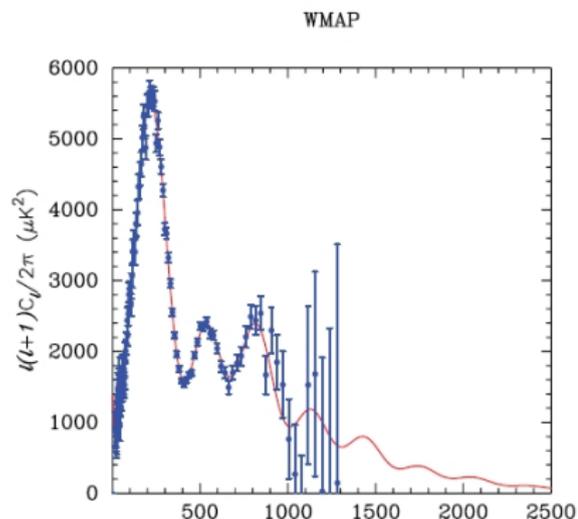
sensibilite (prevue) de WMAP



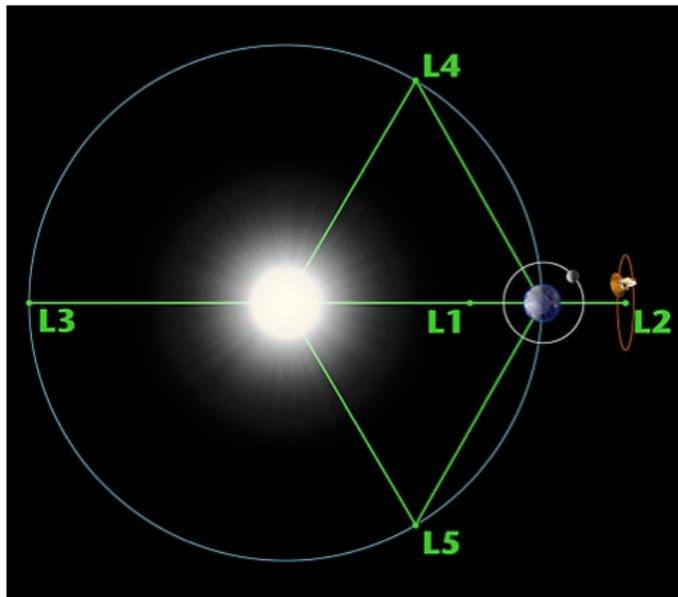
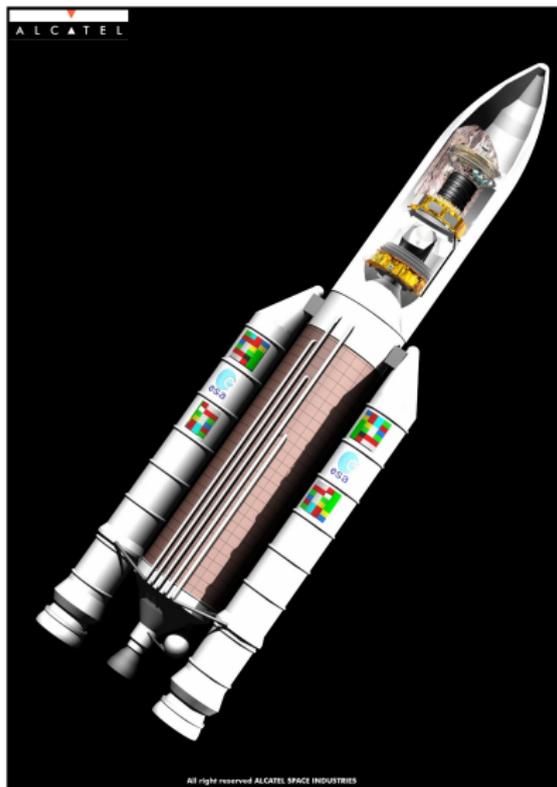
Resultats de WMAP



# Planck vs WMAP (température)



# Planck



# Planck

Mission de l'ESA

Lancement 2008 (printemps?)

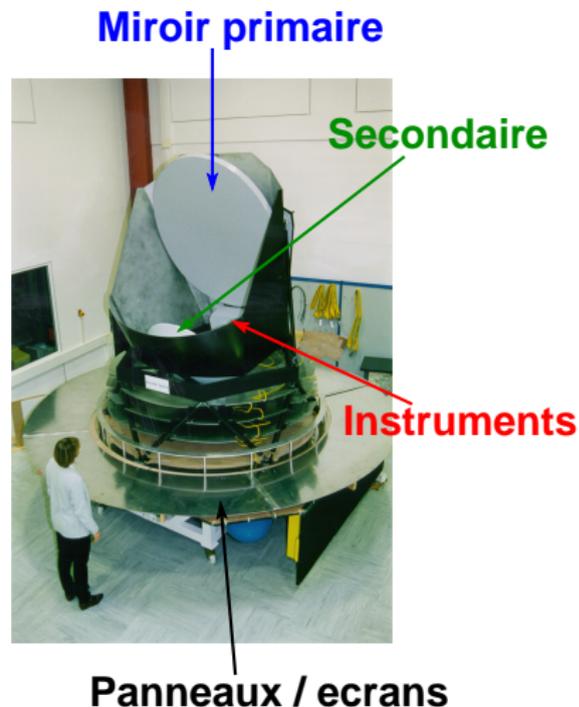
(avec Hershell)

Durée garantie : 14 mois @ L2  
(1.5Mkm)

- 1 Telescope (1.5m) - consortium danois
- 2 LFI (radiomètres 10-80GHz) - consortium piloté par U. Bologne
- 3 HFI : bolomètres (100-800 GHz) - consortium piloté par IAS (Orsay 🇫🇷)

Coût : ~ 600Meuros

(HFI ~ 150Meuros)



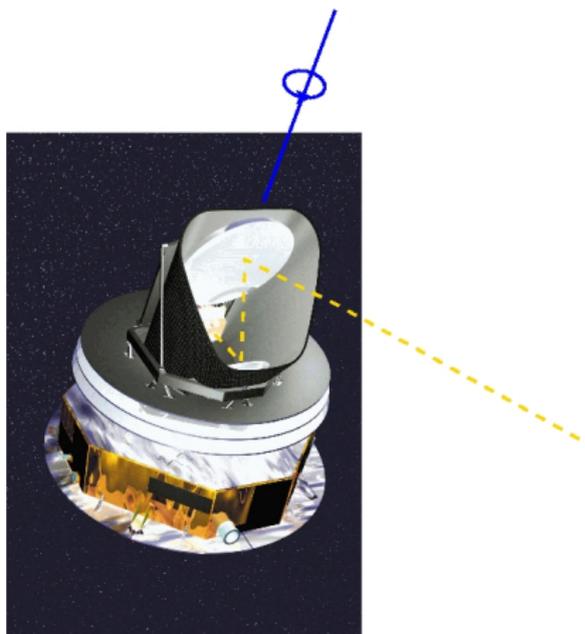
Mission de l'ESA

Lancement 2008 (printemps?)  
(avec Hershell)

Durée garantie : 14 mois @ L2  
(1.5Mkm)

- 1 Telescope (1.5m) - consortium danois
- 2 LFI (radiomètres 10-80GHz) - consortium piloté par U. Bologne
- 3 HFI : bolomètres (100-800 GHz) - consortium piloté par IAS (Orsay 🇫🇷)

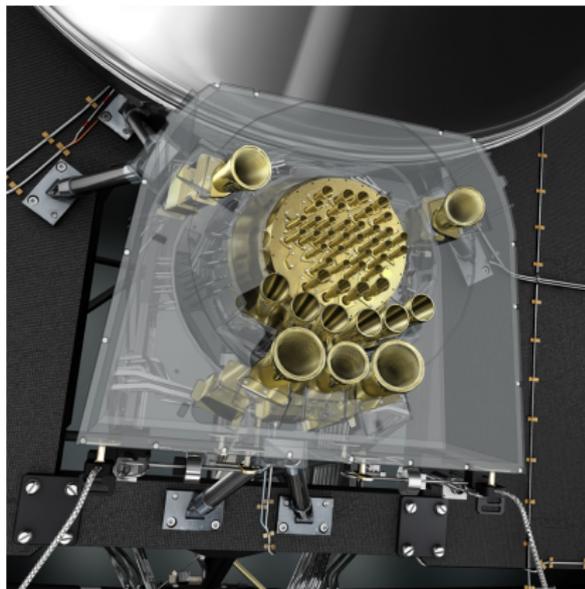
Coût : ~ 600Meuros  
(HFI ~ 150Meuros)



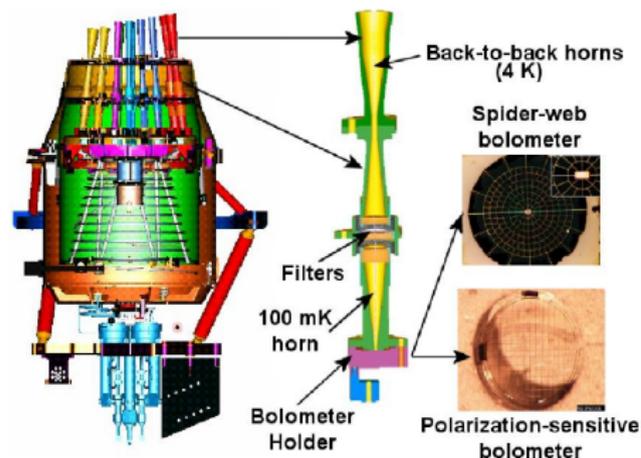
Mission de l'ESA  
Lancement 2008 (printemps?)  
(avec Herschell)  
Durée garantie : 14 mois @ L2  
(1.5Mkm)

- 1 Telescope (1.5m) - consortium danois
- 2 LFI (radiomètres 10-80GHz) - consortium piloté par U. Bologne
- 5 HFI : bolomètres (100-800 GHz) - consortium piloté par IAS (Orsay 🇫🇷)

Coût : ~ 600Meuros  
(HFI ~ 150Meuros)

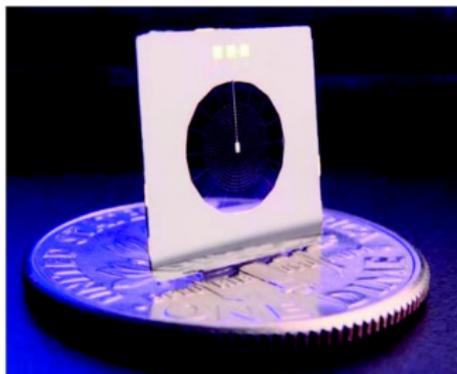
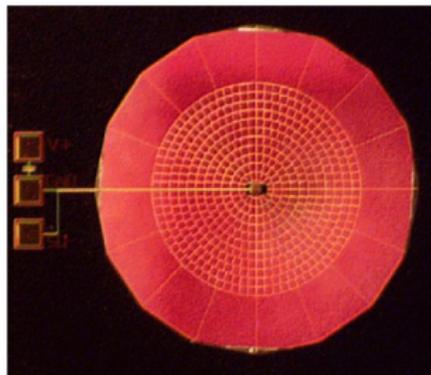


# L'Instrument Haute Fréquence (HFI)

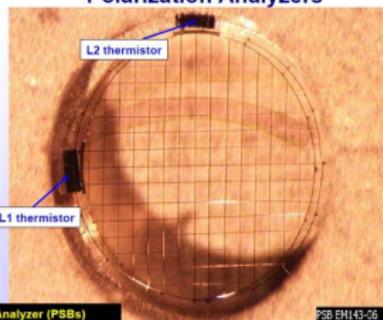


- Au foyer du télescope ("dans LFI")
- Refroidissement à plusieurs étages
- Dernier étage  $T \sim 0.1$  K (dilution  $^3\text{He}/^4\text{He}$ )
- Détecteurs : bolomètres (52 voies)
- "prototype" = Archéops

# Les bolomètres

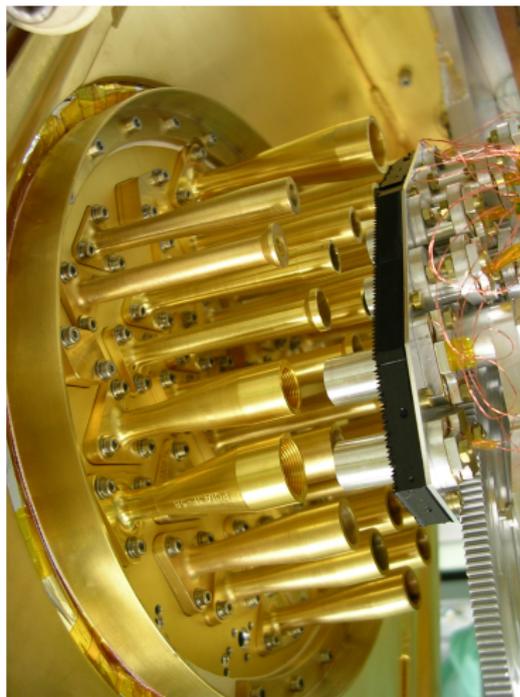
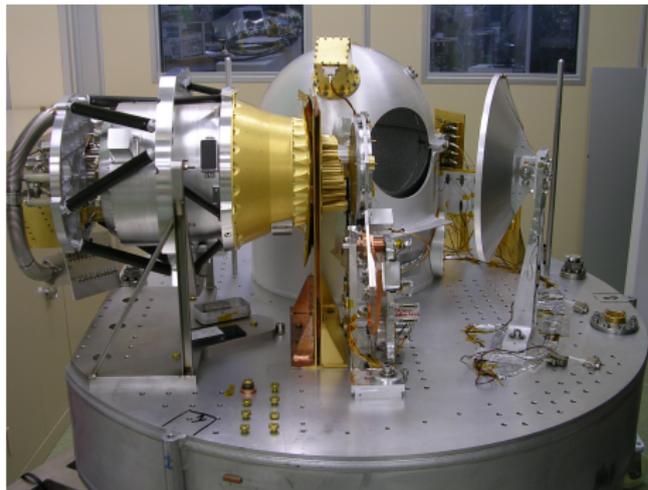


Polarization Analyzers

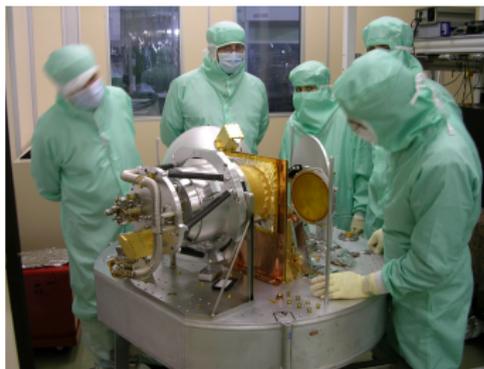
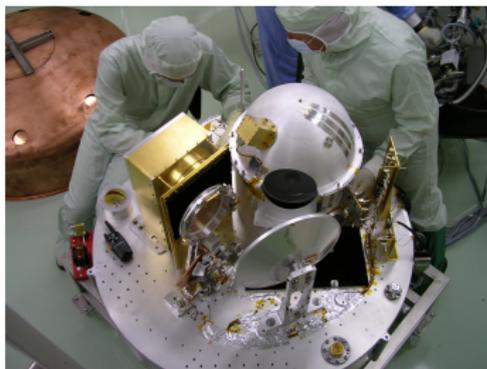


- mesurent la chaleur déposée par les  $\gamma$
- grille  $\leftrightarrow$  détecteur
- diamètre **2.6mm**
- "fils" **4x1 $\mu$ m**
- **$T \sim 100\text{mK}$**   
(sensibilité)

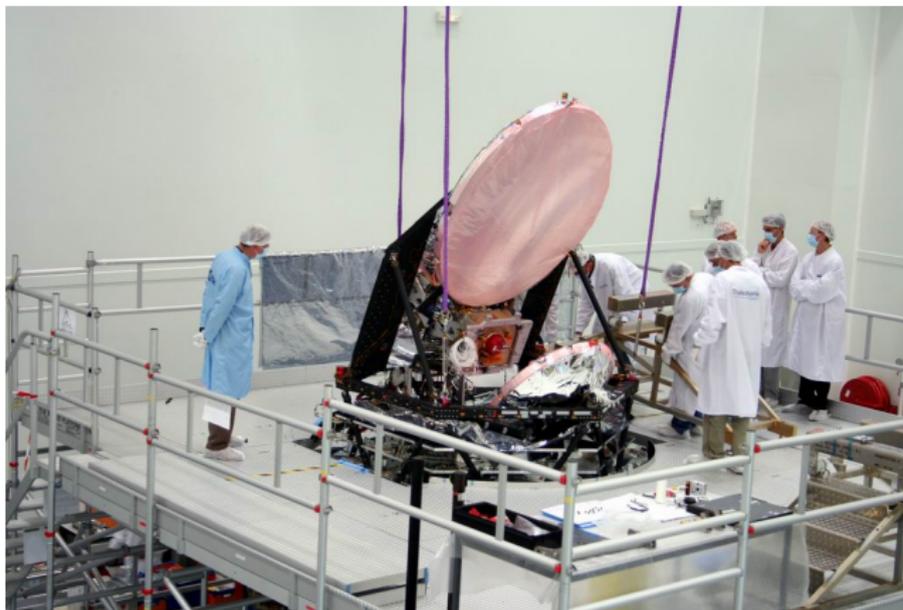
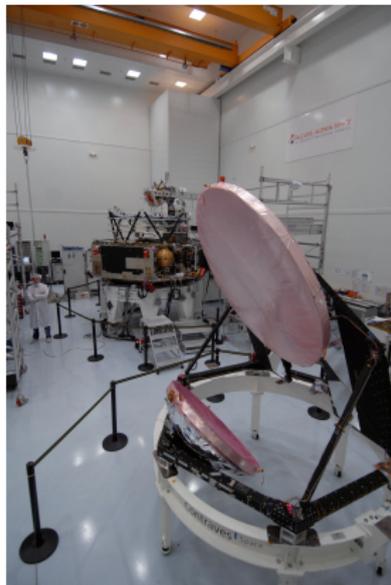
# Etalonnage de Planck (2004,2006)



# Etalonnage de Planck (2004,2006)



# Etat "actuel" (2007)

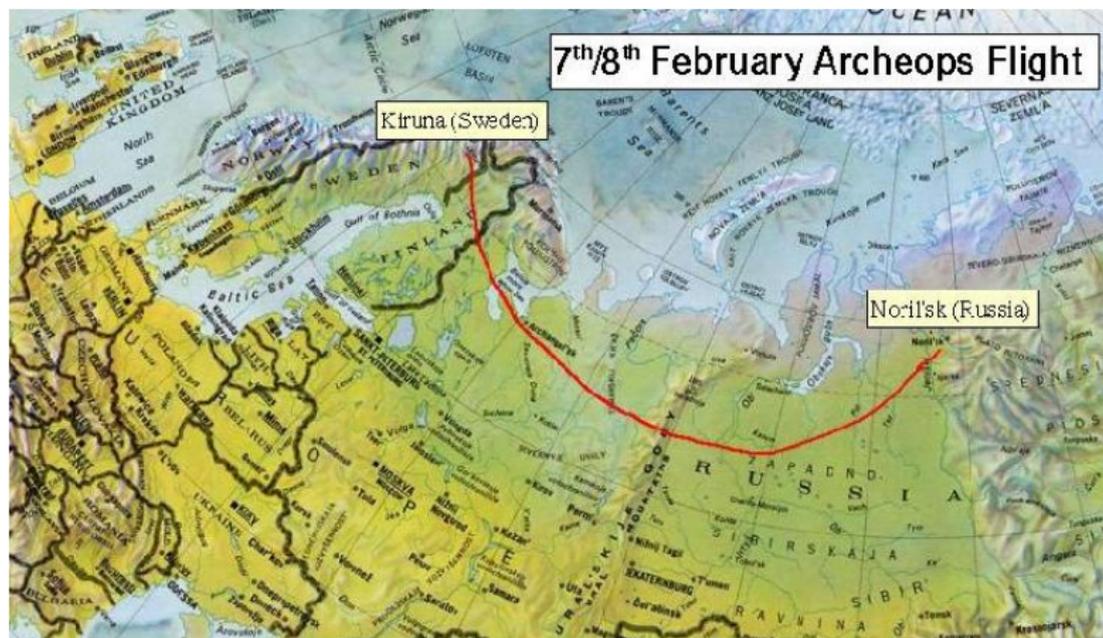




## PI : A. Benoît (CRTBT Grenoble)

-  / CRTBT : (Cryogénie, électronique, nacelle, coordination)
-  : Caltech (bolomètres), Minnesota (téléscope)
-  : QMWC Cardiff (cornets)
-  : (récupérations manip)
-  : Rome (nacelle), Bologne (senseur stellaire)
-  / IN2P3 : PCC/CdF, ISN, LAL (calibration, pointage, analyse)
-  / INSU : IAP, IAS (analyse)

# Vol du 7 février 2001



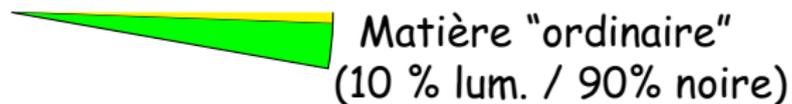
# Récupérations



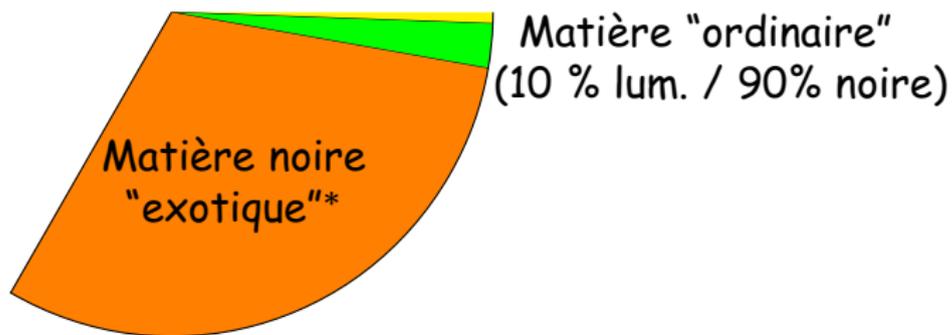
# Conclusion(s)

- "On vit une époque formidable" : **cosmologie qualitative** → **quantitative**
- anisotropies du CMB → pièce essentielle du puzzle
- d'autres observations :
  - ▶ Supernovæ lointaines,
  - ▶ Recherches directes et indirectes de matière(s) noire(s)
  - ▶ mais aussi (entre autres) :
    - ★ Lentilles gravitationnelles,
    - ★ Etudes des amas de galaxies (X, dynamique, ...)
- **mesurent un Univers ~ "plat" ( $\Omega_0 \sim 1$ ) mais au contenu mystérieux (... et noir !)**

# Composition de l'univers

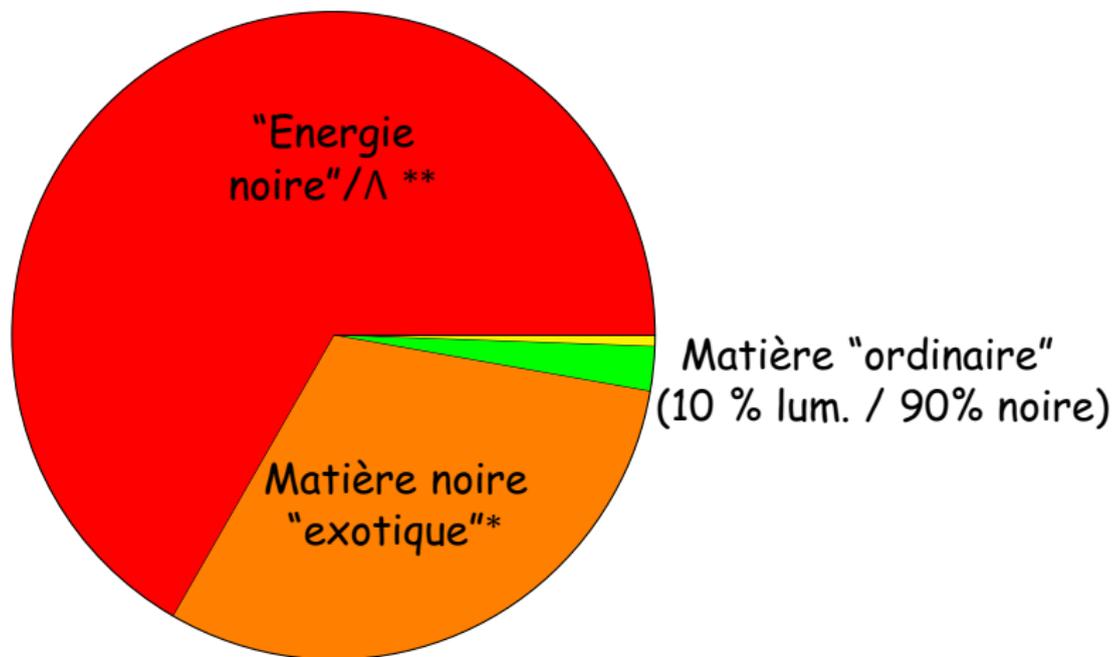


# Composition de l'univers



\*non identifiée

# Composition de l'univers



\* non identifiée

\*\* encore plus mystérieuse



# Dans la nuit des temps

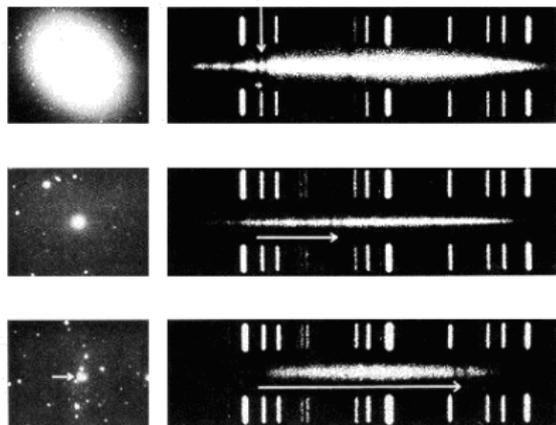
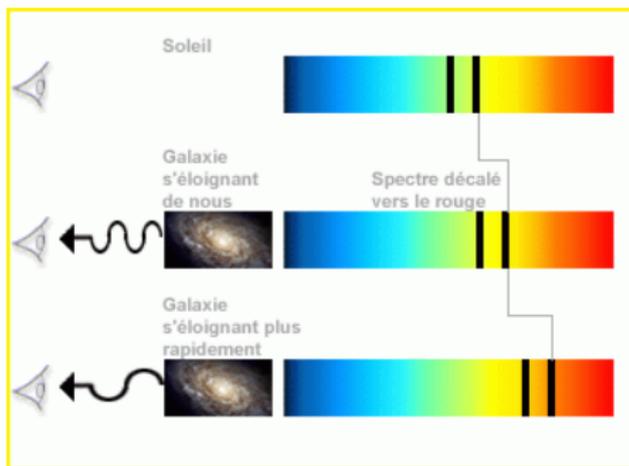


# Sources

- site de Wayne Hu ([background.chicago.edu/whu](http://background.chicago.edu/whu))
- Site de WMAP ([map.gsfc.nasa.gov](http://map.gsfc.nasa.gov))
- cours de J. Wilms (Univ. Tuebingen [astro.uni-tuebingen.de/wilms/teach/index](http://astro.uni-tuebingen.de/wilms/teach/index))
- sites de Planck : [planck.fr](http://planck.fr), ESA ([www.esa.int/index.php?project=planck](http://www.esa.int/index.php?project=planck))
- Atlas de l'univers ([atunivers.free.fr](http://atunivers.free.fr))
- Multiwavelength Milky Way ([asc.gsfc.nasa.gov/mw/milkyway.html](http://asc.gsfc.nasa.gov/mw/milkyway.html))
- S. Weinberg : les trois premières minutes de l'univers
- J. Silk : le Big-Bang, l'univers et l'infini, une brève histoire de l'univers (O Jacob)
- J Gribbin : à la poursuite du BIg-Bang (Flammarion)
- G. Smoot : les rides du temps (Flammarion)
- ...

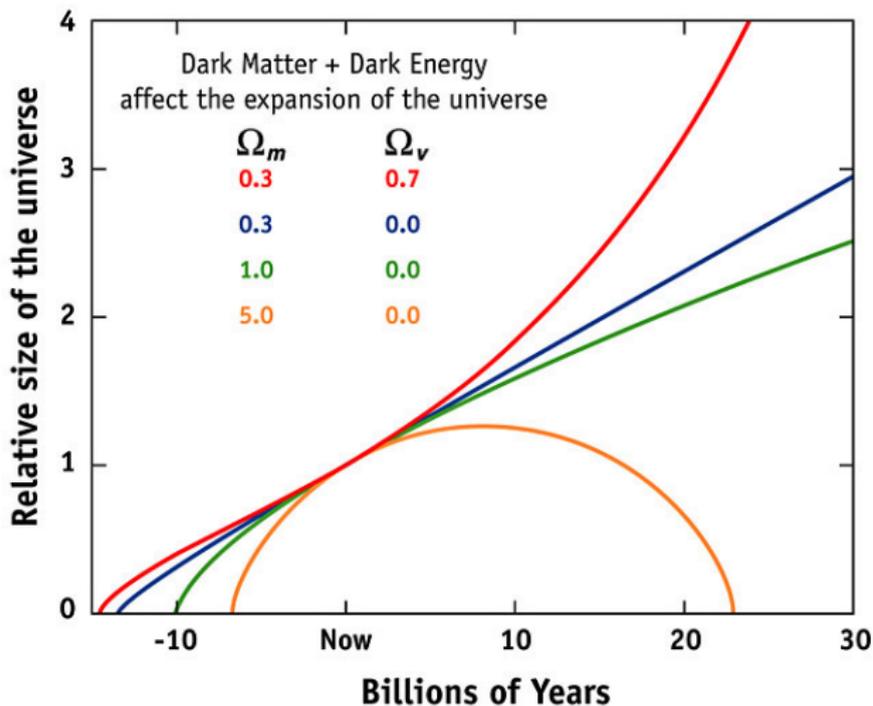
# Un univers dynamique

- Les galaxies lointaines s'«éloignent» de nous
- Plus elles sont loin, plus elles s'«éloignent» vite
- $\Rightarrow$  dilatation globale de l'Univers
- "signature" de cette expansion : décalage vers le rouge des rayonnements (*redshift*  $z$ )  $\Rightarrow$  mesure de distance

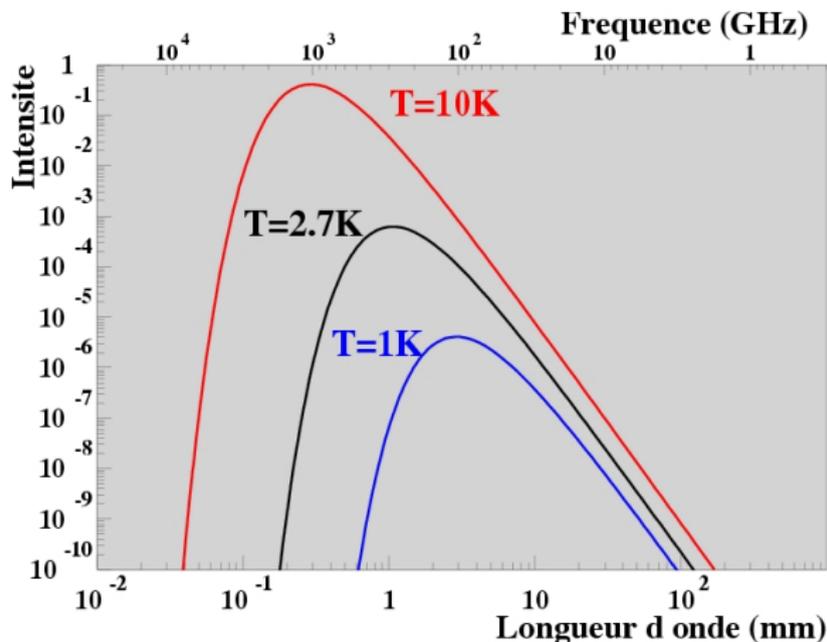


# "Histoire" de la géométrie

## EXPANSION OF THE UNIVERSE



# Spectres de corps noirs



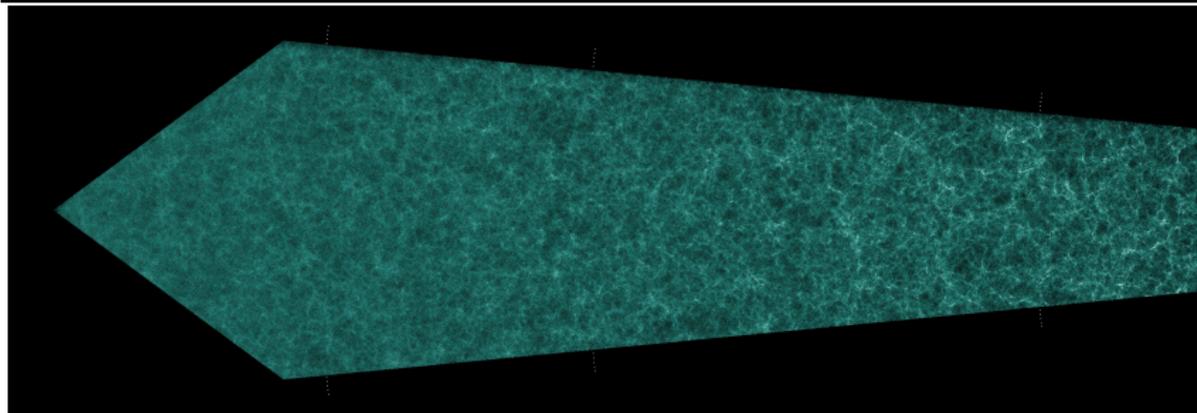
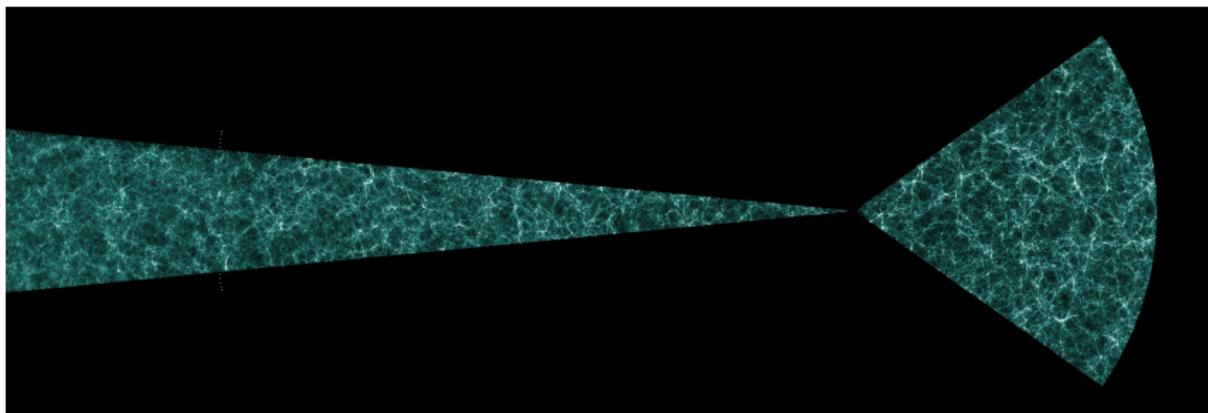
M. Planck 1900

spectre à UN param. :  $T$

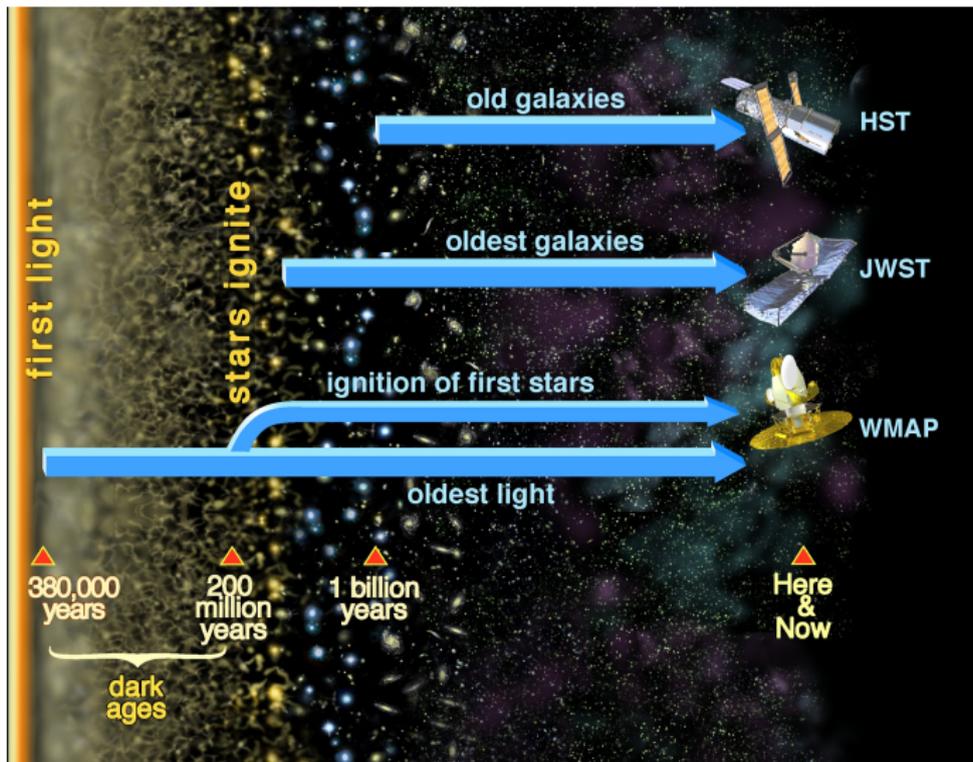
pdt l'expansion :

$$T(t) \rightarrow \frac{R(t_0)}{R(t)} T(t_0)$$

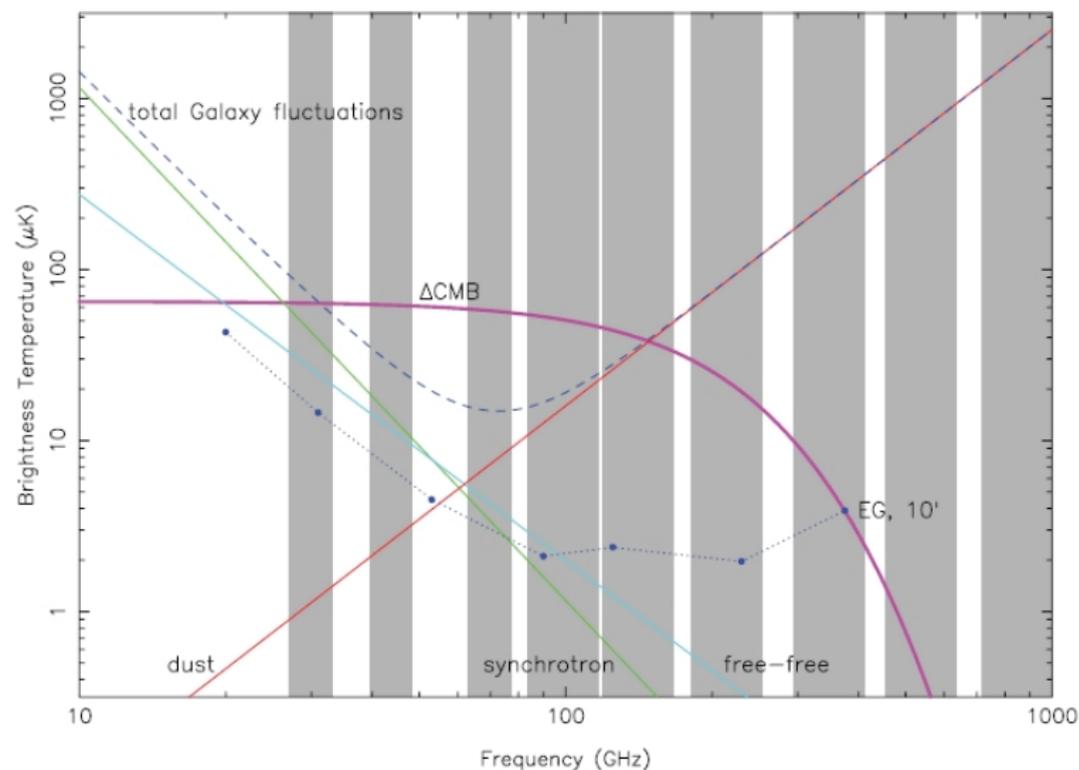
# Une carte de l'univers *calculée*



# Une machine à remonter le temps (14 Milliards d'années)



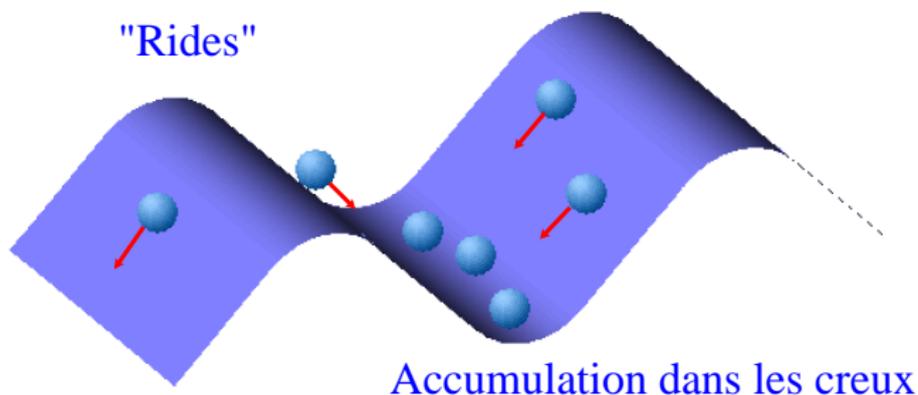
# Bandes de fréquence de Planck



# Des fluctuations aux anisotropies

*Ou comment naissent les structures*

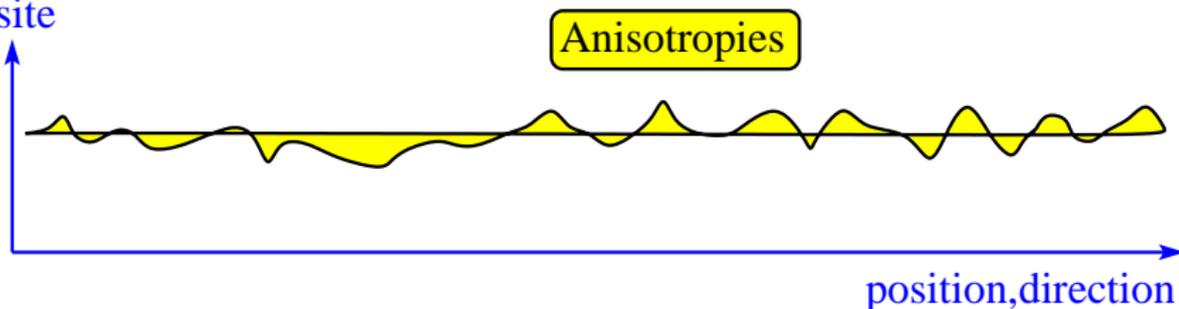
- Dans l'univers "quantique"  $\Rightarrow$  fluctuations de densité ( $d = f(x, t)$ )
  - Inflation  $\Rightarrow$  dilatation très rapide
- $\Rightarrow$  "gel" des fluctuations  $\rightarrow$  anisotropies de densité  
**graines** des grandes structures (amas, galaxies,...)



# Le plasma primordial (le tambour)

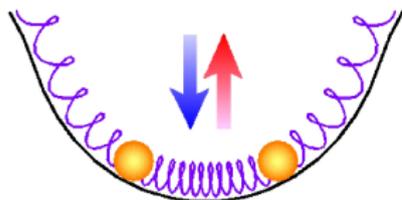
- milieu composé de protons (+ qq noyaux He,...), d'électrons ("libres") et de photons (rayonnement) : **plasma**
  - ▶ composante dominante = le rayonnement (photons)
  - ▶ interaction (électromagnétique) entre photons et électrons/protons
  - ▶ pression "de radiation"
- milieu "presque" isotrope

température,  
densité



# Des ondes acoustiques

- Il existe des zones plus denses et moins denses
- la matière "tombe" vers les sur-densités (gravitation)
- ... mais la pression réagit

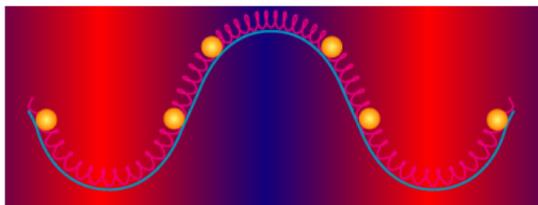


⇒ apparition d'oscillations (**ondes acoustiques**) ds le plasma primordial

Vitesse des ondes  $\leftrightarrow$  composition, densité du milieu, ...

# Anisotropies de température

- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

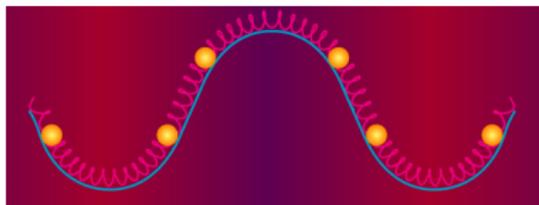


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

# Anisotropies de température

- ⇒ régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

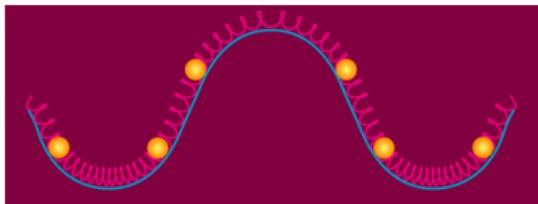


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les **anisotropies de températures** du CMB

# Anisotropies de température

- ⇒ régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

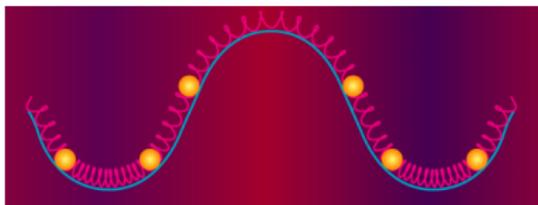


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les **anisotropies de températures** du CMB

# Anisotropies de température

- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

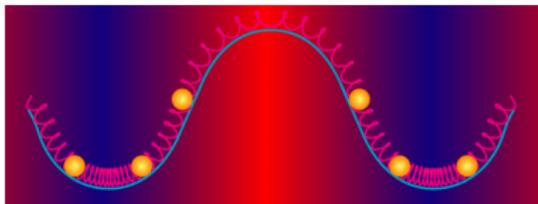


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les **anisotropies de températures** du CMB

# Anisotropies de température

- ⇒ régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

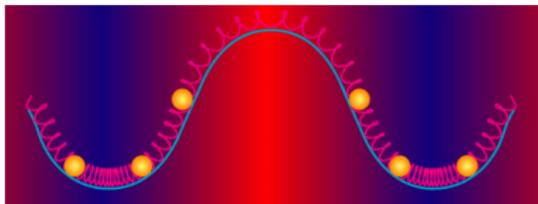


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les **anisotropies de températures** du CMB

# Anisotropies de température

- ⇒ régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

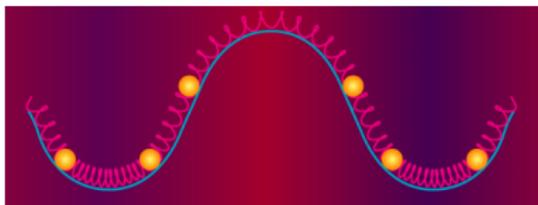


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

# Anisotropies de température

- ⇒ régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

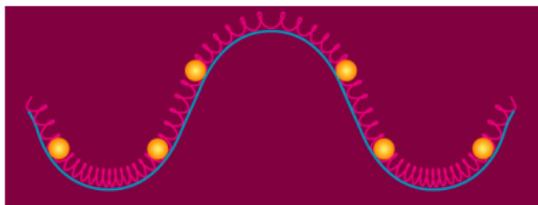


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

# Anisotropies de température

- ⇒ régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**



⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les **anisotropies de températures** du CMB

# Anisotropies de température

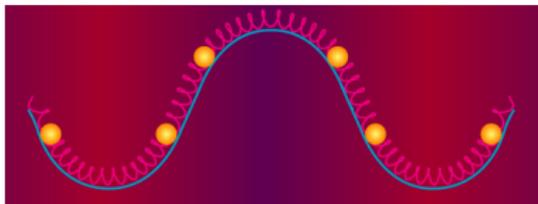
- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

# Anisotropies de température

- ⇒ régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

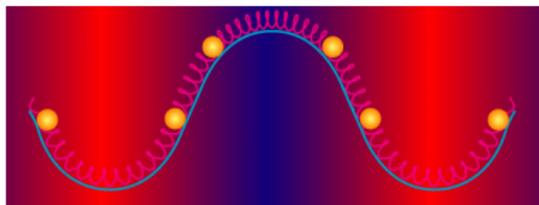


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les **anisotropies de températures** du CMB

# Anisotropies de température

- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

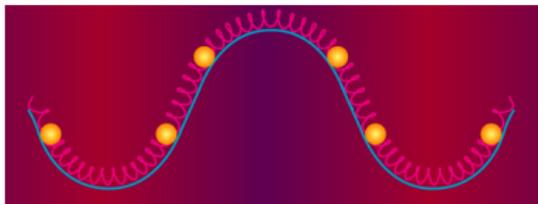


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

# Anisotropies de température

- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

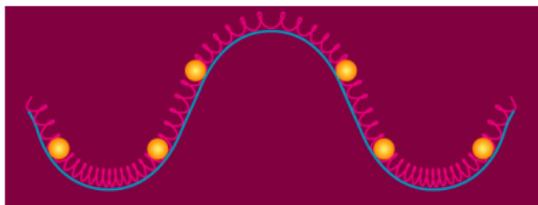


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les **anisotropies de températures** du CMB

# Anisotropies de température

- ⇒ régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

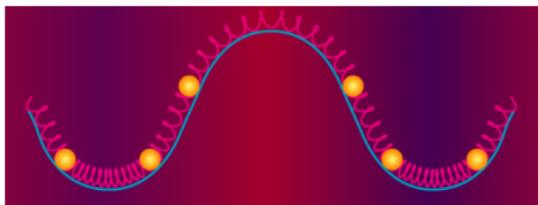


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les **anisotropies de températures** du CMB

# Anisotropies de température

- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

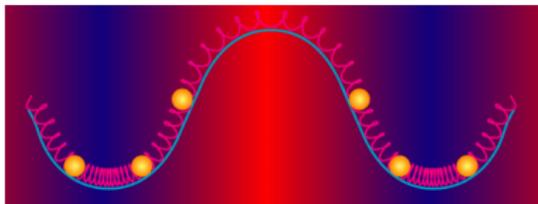


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

# Anisotropies de température

- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

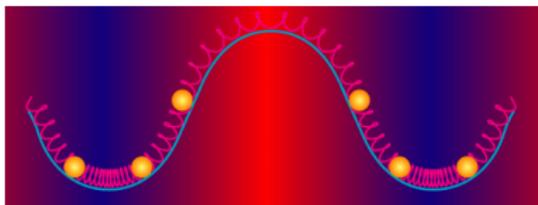


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

# Anisotropies de température

- ⇒ régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

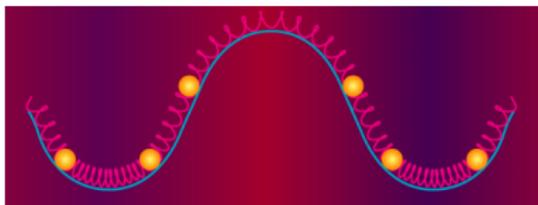


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

# Anisotropies de température

- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

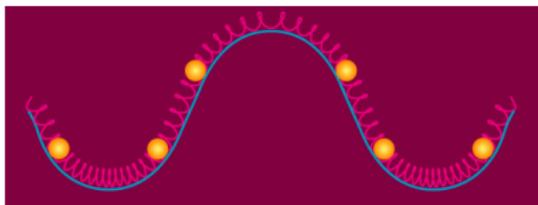


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

# Anisotropies de température

- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

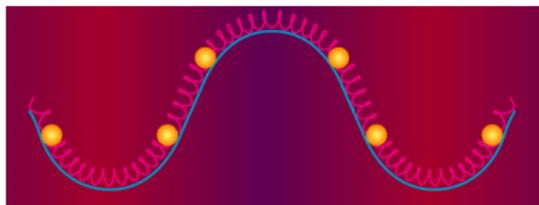


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les **anisotropies de températures** du CMB

# Anisotropies de température

- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

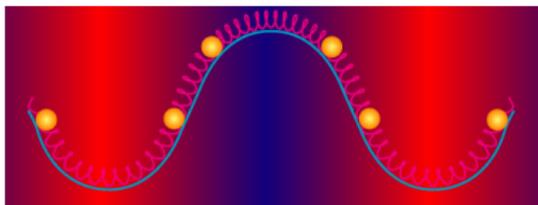


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les **anisotropies de températures** du CMB

# Anisotropies de température

- ⇒ régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

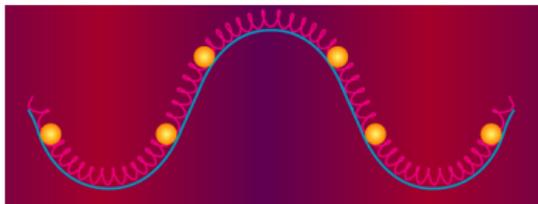


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

# Anisotropies de température

- ⇒ régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

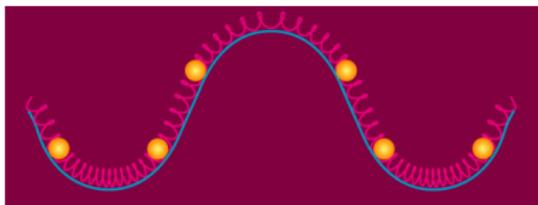


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les **anisotropies de températures** du CMB

# Anisotropies de température

- ⇒ régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

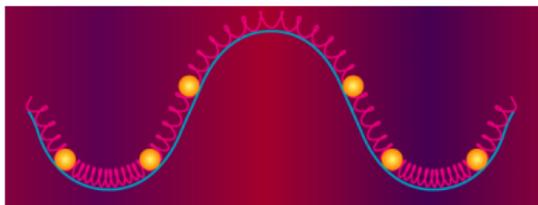


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

# Anisotropies de température

- ⇒ régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

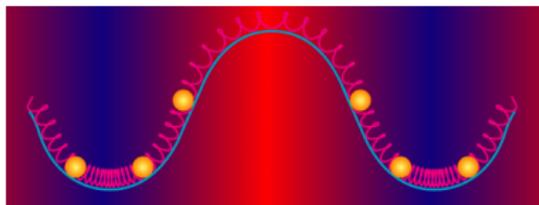


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

# Anisotropies de température

- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

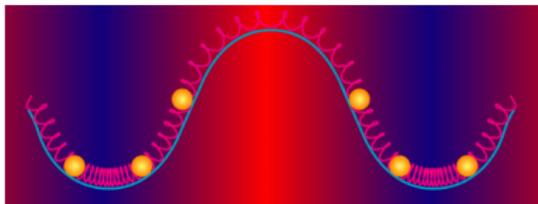


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

# Anisotropies de température

- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

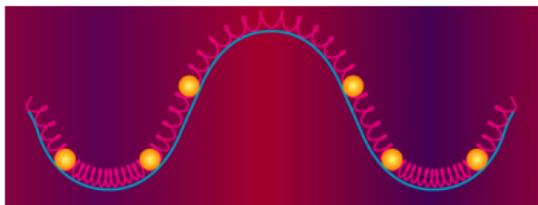


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

# Anisotropies de température

- ⇒ régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

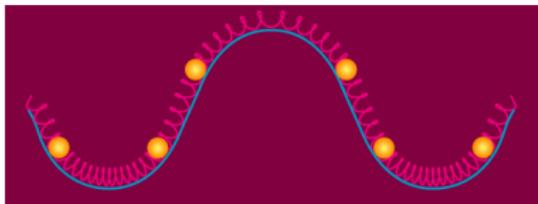


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les **anisotropies de températures** du CMB

# Anisotropies de température

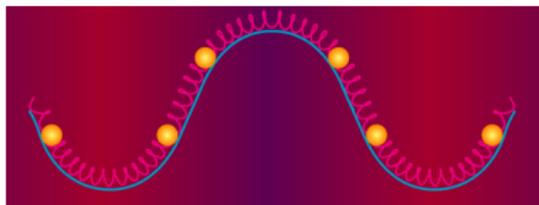
- ⇒ régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**



⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les **anisotropies de températures** du CMB

# Anisotropies de température

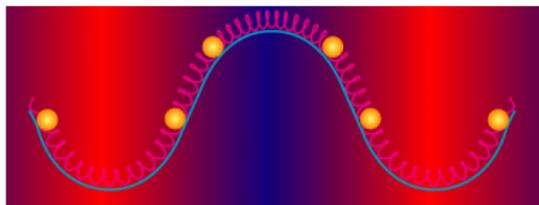
- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**



⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

# Anisotropies de température

- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

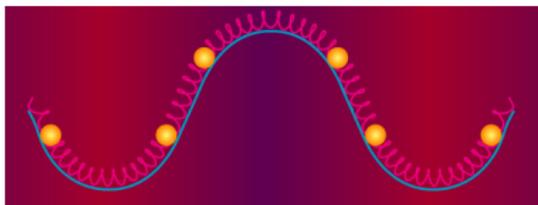


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

# Anisotropies de température

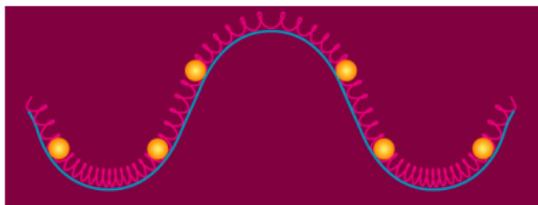
- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**



⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

# Anisotropies de température

- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

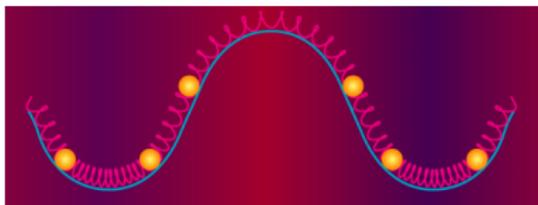


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les **anisotropies de températures** du CMB

# Anisotropies de température

- ⇒ régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

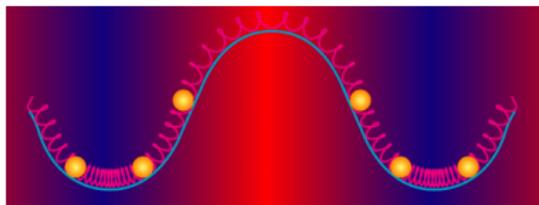


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

# Anisotropies de température

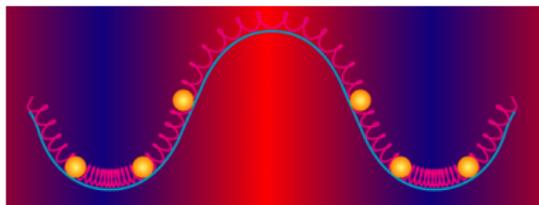
- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**



⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

# Anisotropies de température

- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

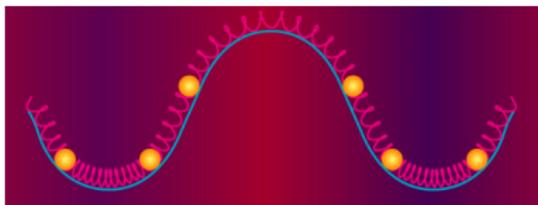


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

# Anisotropies de température

- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

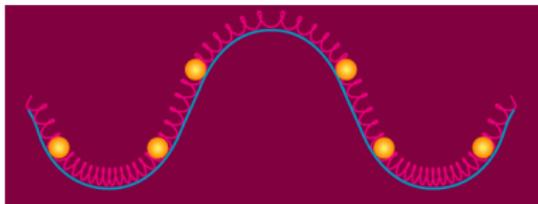


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

# Anisotropies de température

- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

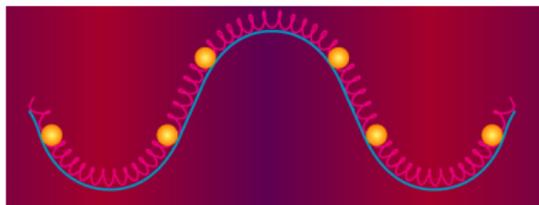


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

# Anisotropies de température

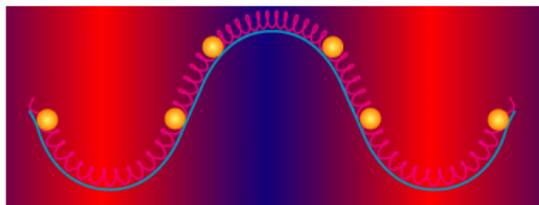
- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**



⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

# Anisotropies de température

- ⇒ régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**

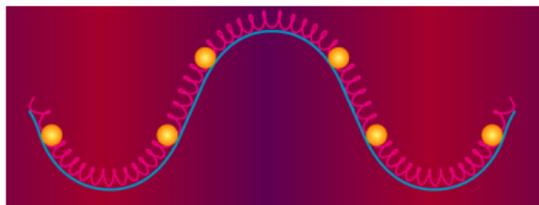


▶ Replay

⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

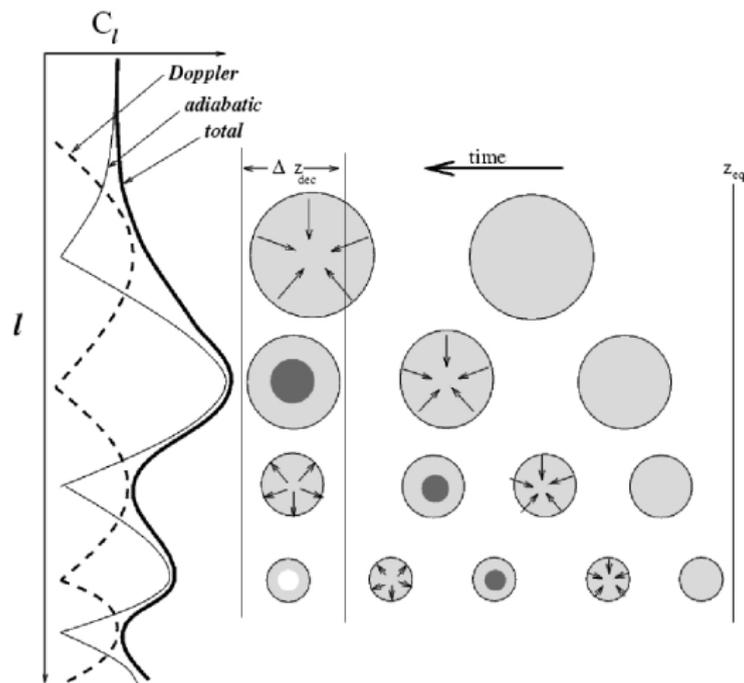
# Anisotropies de température

- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**



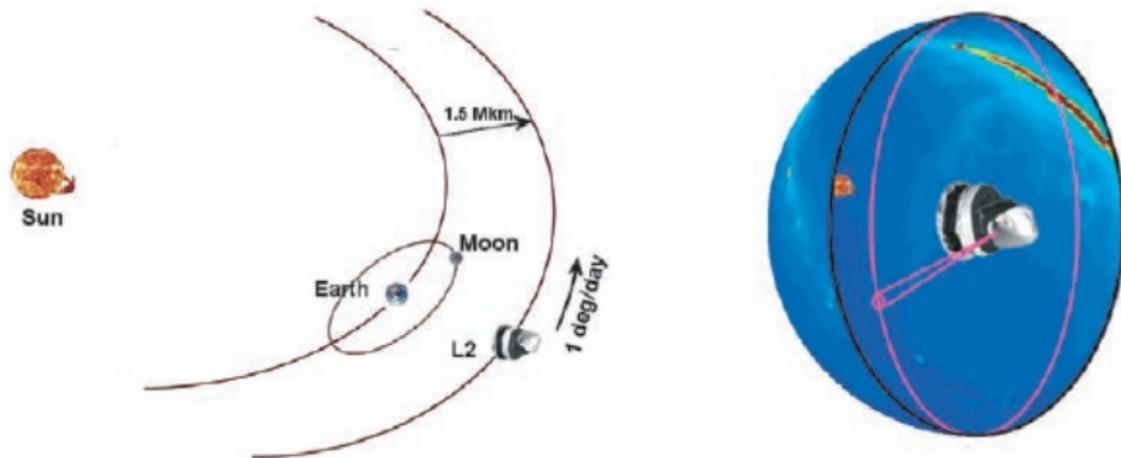
⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

# Pourquoi des pics dans les $C_\ell$ ?



A grande échelle (petit  $\ell$ ) : pas encore d'oscillations

# Planck au point L2



Observations en continu (tout le ciel en 7 mois)

Redondances à plusieurs mois d'écart (systématiques p.ex. dérives)