

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

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

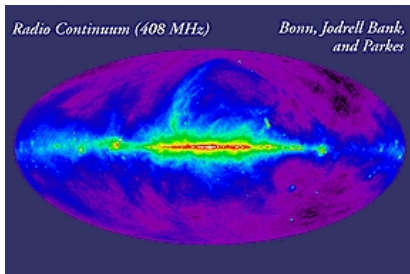
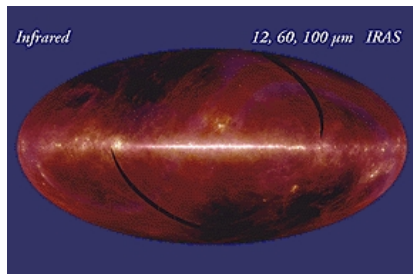
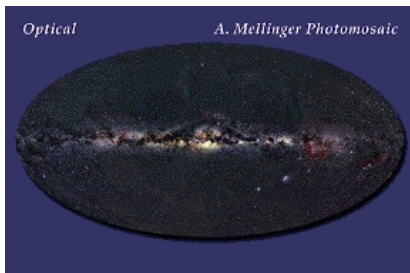
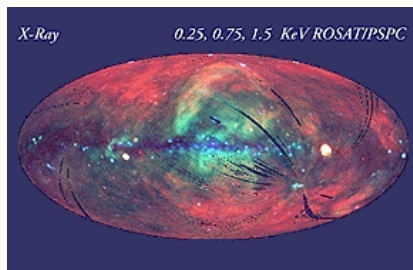
"Les concepts *relativistes* et les progrès de la *physique des particules* font évoluer la cosmologie."



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)

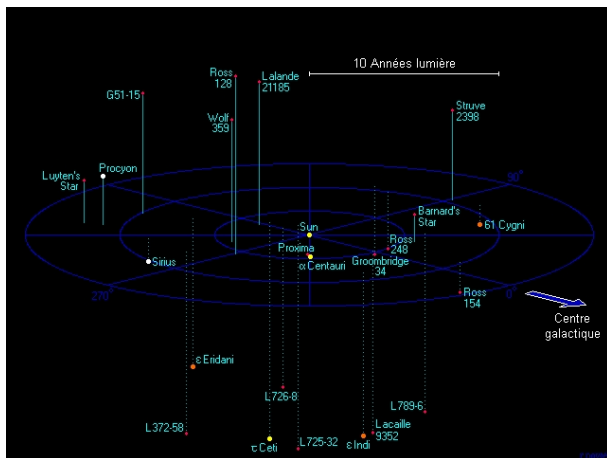
Quatre visages de l'Univers



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.

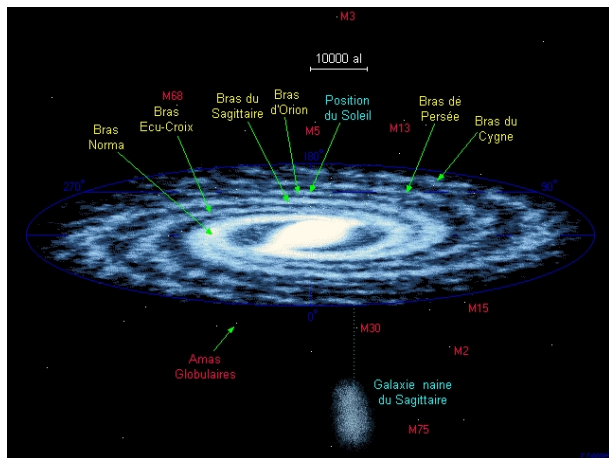
~ 30000 a.l.

~ 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.

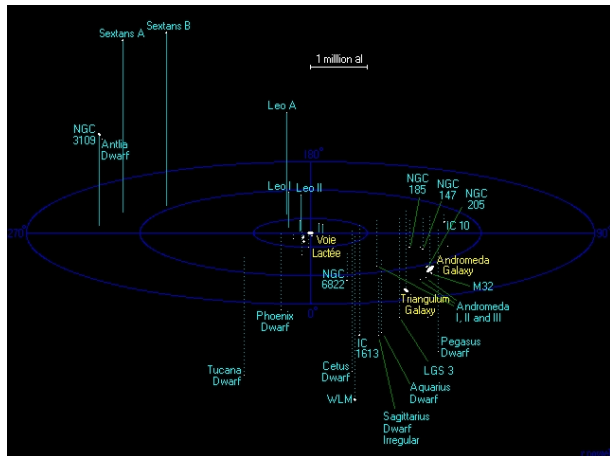
~ 30000 a.l.

~ **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.

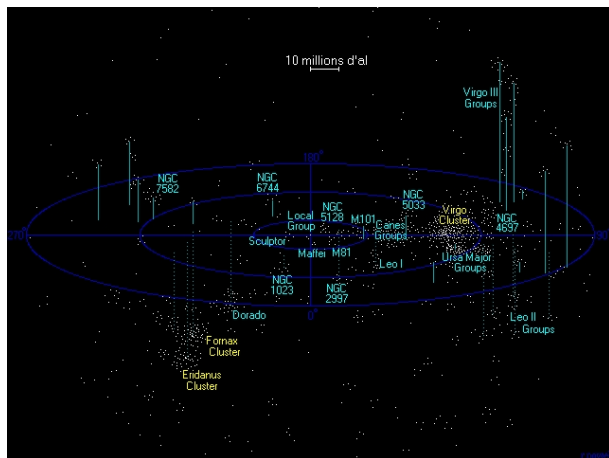
~ 30000 a.l.

~ 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.

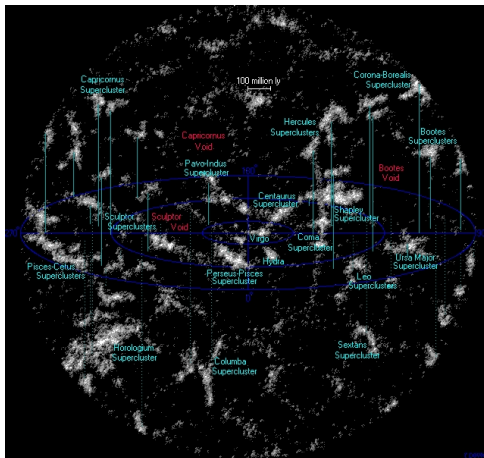
~ 30000 a.l.

~ 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.

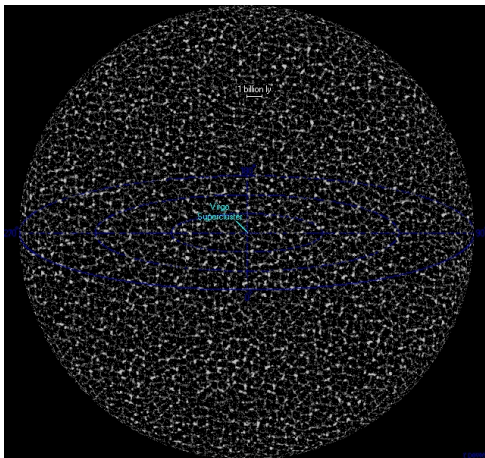
~ 30000 a.l.

~ 5 M a.l.

~ 80 M a.l.

~ 1000 M a.l.

~ **20000 M a.l.**

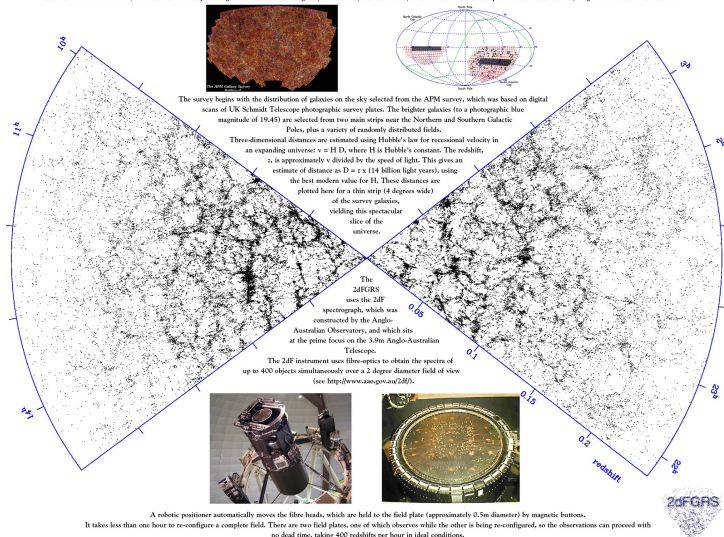


cf <http://atunivers.free.fr/>

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

2dFGRS

Les "trois piliers" du Big-Bang

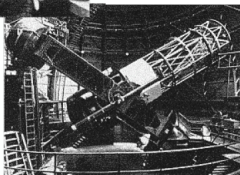
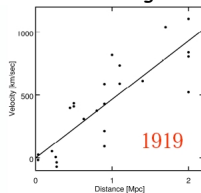
Trois observations :

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

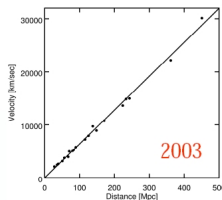
- ▶ Les galaxies lointaines s'"éloignent" de nous
- ▶ Plus elles sont loin, plus elles s'"éloignent" vite



Edwin Hubble



Mt. Wilson
100 Inch
Telescope



- ▶ ⇒ dilatation globale de l'Univers

Les "trois piliers" du Big-Bang

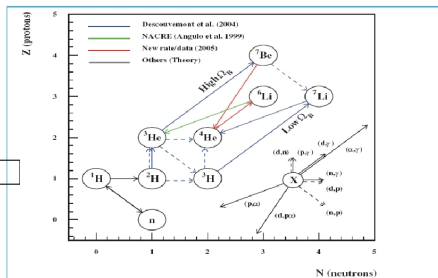
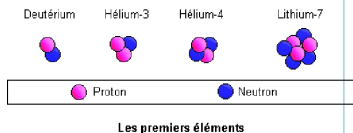
Trois observations :

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

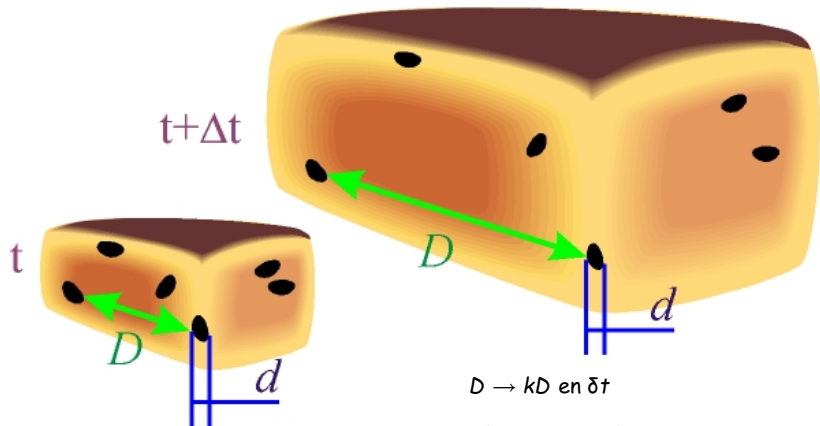
⇒ Il y a eu une "explosion"? ...

Le Big Bang



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

Une dilatation d'échelle



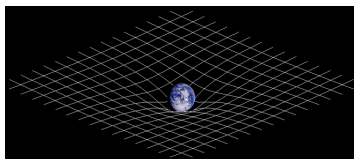
$$D \rightarrow kD \text{ en } \delta t$$

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



L'univers relativiste

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

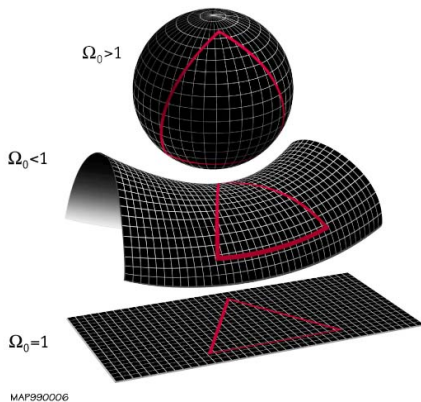


- application à l'univers (homogène isotrope) \rightarrow modèle du Big-Bang
- Lien entre géométrie (et son évolution) (macroscopique) et densité(s) d'énergie(s) (microscopique)
- Un paramètre important (parmi ~ 10) : densité totale d'énergie Ω_0

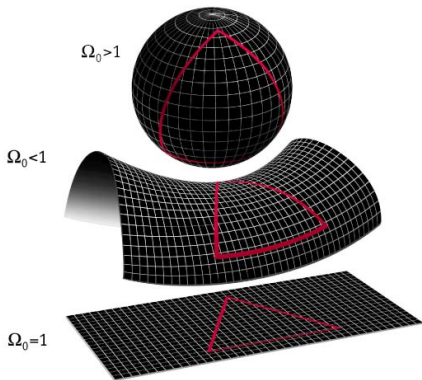
$\Omega_0 = 1 \Leftrightarrow$ Univers "plat" (euclidien)

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

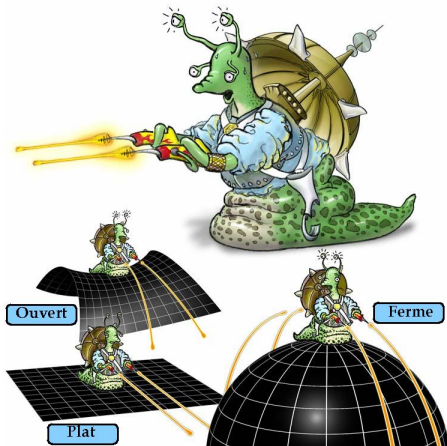
Géométrie(s) de l'univers

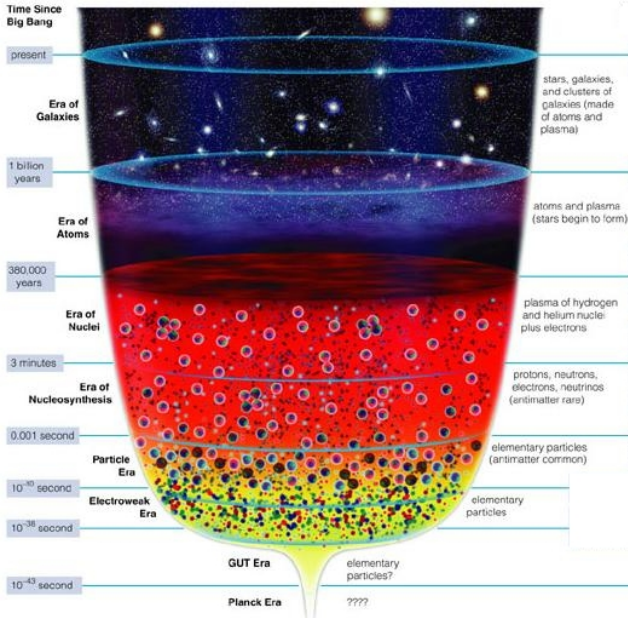


Géométrie(s) de l'univers



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



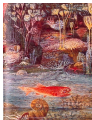
Premières cellules vivantes

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^{ème} 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

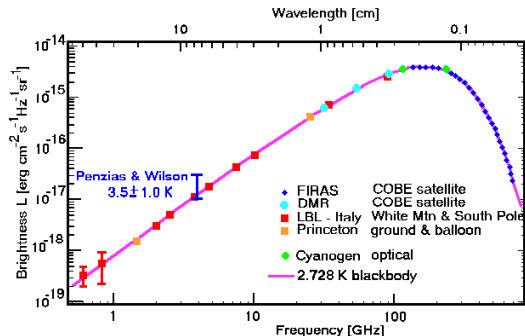
Robert Wilson



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/cm³
- ... qq % du bruit
d'une TV

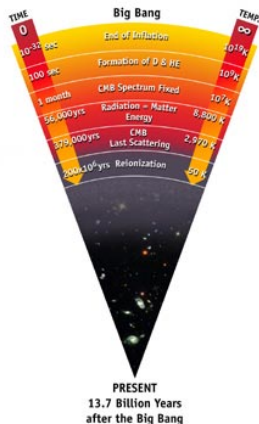
Emission du CMB

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

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

2 Quand $T \approx 3000^\circ K$ les électrons se lient aux noyaux \Rightarrow Univers transparent : émission du CMB

3 Expansion de l'univers \Rightarrow Décalage vers le rouge "cosmologique" : T_{CMB} apparente $\rightarrow 2.7^\circ K \Rightarrow$ CMB dans l'infra-rouge lointain



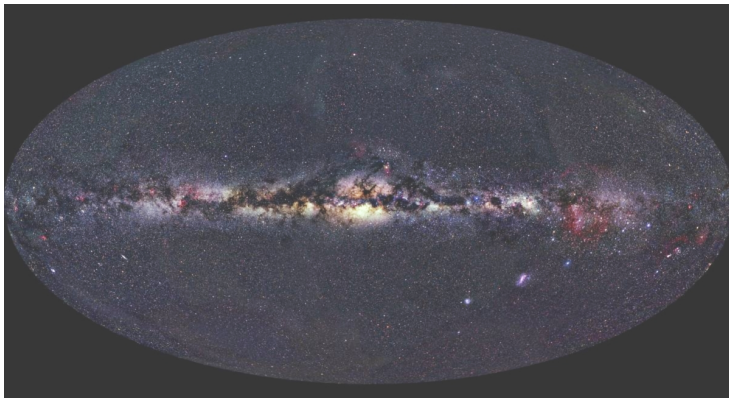
The cosmic microwave background Radiation's "surface of last scatter" is analogous to the light coming through the clouds to our eye on a cloudy day.

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



Des anisotropies dans le CMB!

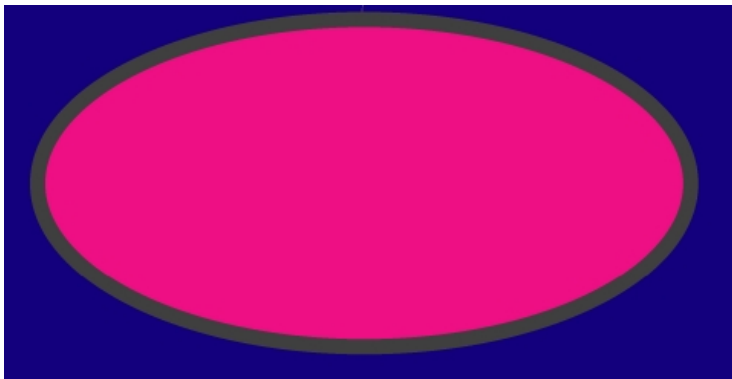
T_{CMB} dans chaque direction \rightarrow carte du "ciel" (couleur \leftrightarrow T)



Le ciel nocturne (visible)

Des anisotropies dans le CMB!

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

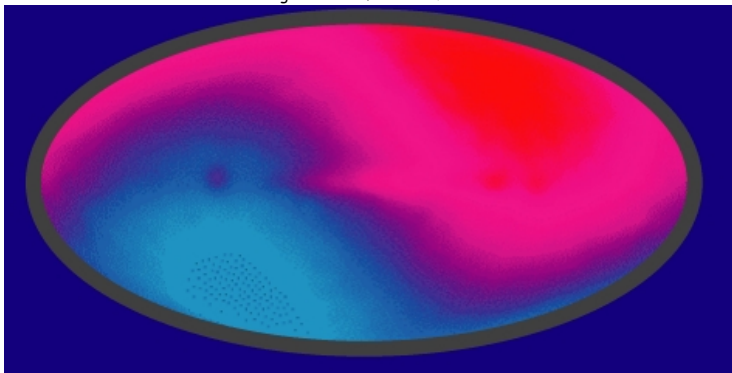


CMB (i.e. l'univers) très isotrope (à 1/1000 près)

Des anisotropies dans le CMB!

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

rouge \leftrightarrow chaud; bleu \leftrightarrow froid



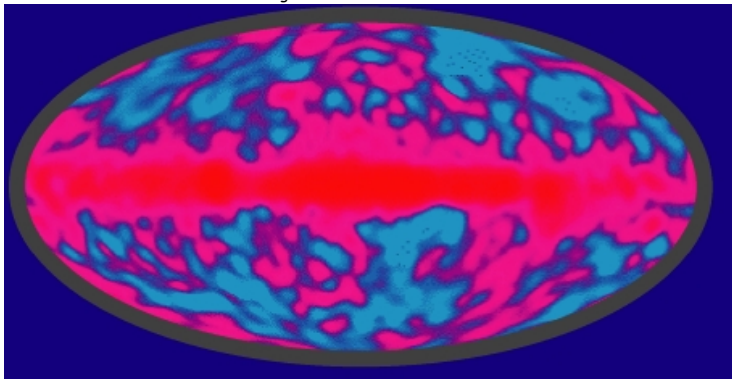
$$(\delta T/T \sim 10^{-3})$$

mvt de la Terre \Rightarrow effet Doppler
 ~ 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

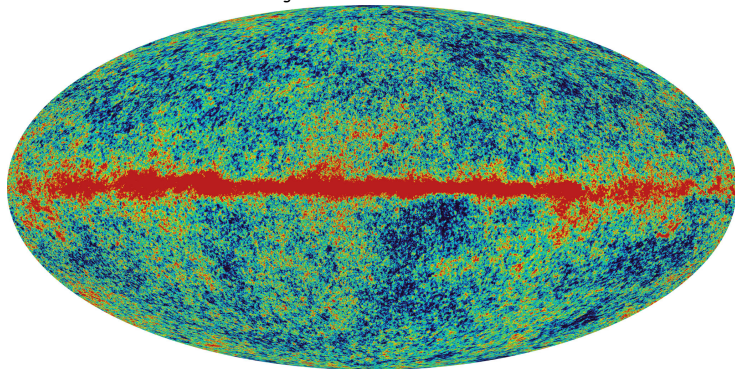


Anisotropies primordiales ($\delta T/T \sim 10^{-5}$) + Galaxie (1/100000 près)
COBE (1992)

Des anisotropies dans le CMB!

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

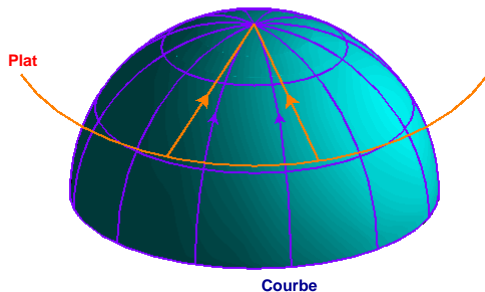
rouge \leftrightarrow chaud; bleu \leftrightarrow froid



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

De l'informations dans les anisotropies!

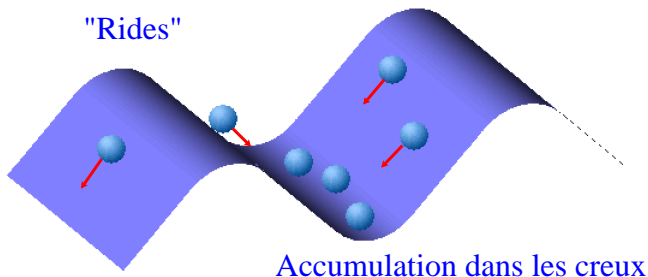
- (presque) origine des **structures**
- Etablissement : résultat de la propagation d'ondes (acoustiques) dans un plasma (**composition, densité**)
- Propagation : La taille (apparente) angulaire des anisotropies est modulée par la **géométrie** de l'Univers



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,...)

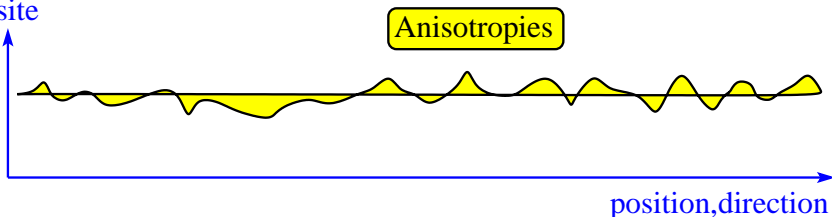


Le plasma primordial (le tambour)

- 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
 - ▶ ⇒ pression "de radiation"

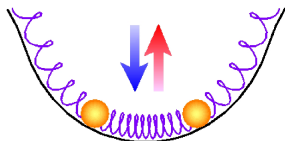
- milieu "presque" isotrope

température,
densité



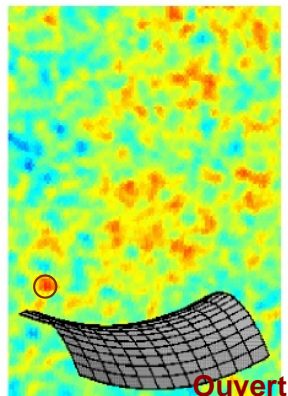
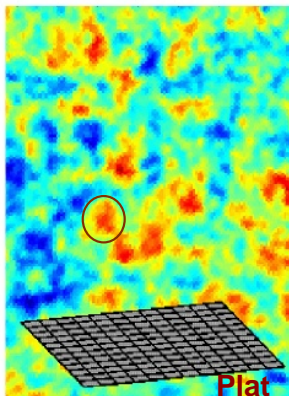
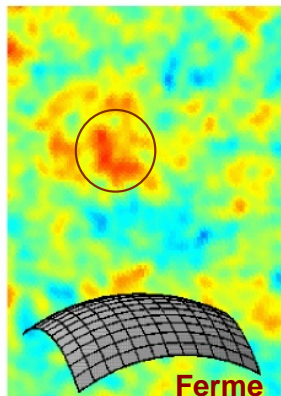
Des ondes acoustiques (le premier cri!)

- 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**

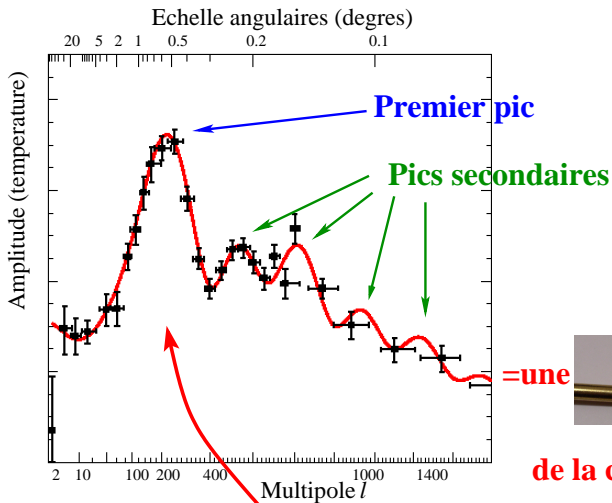
Géométries et anisotropies



Pb : extraire des infos quantitatives des cartes

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

La courbe des C_l

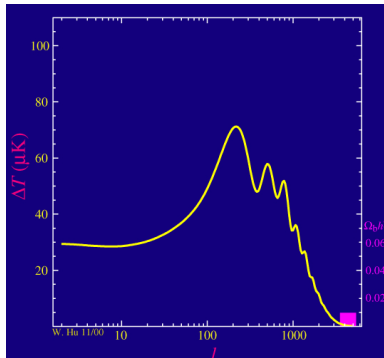


Beaucoup de structures de cette taille

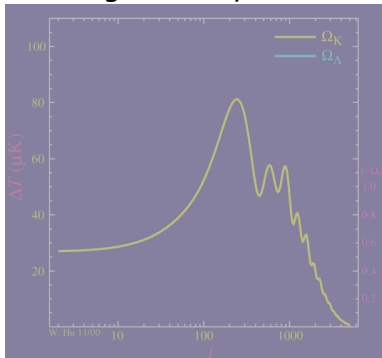
=une
de la cosmologie !

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



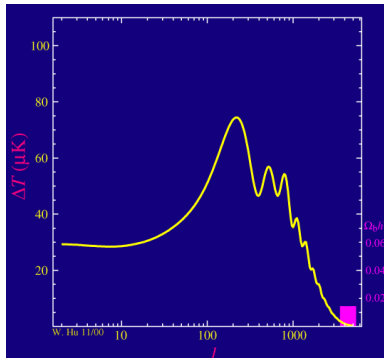
► Replay



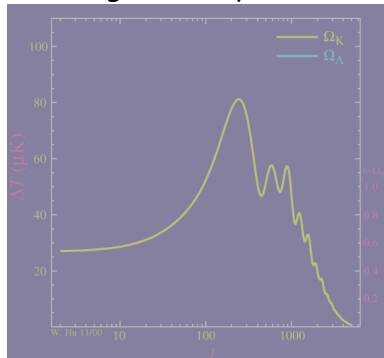
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



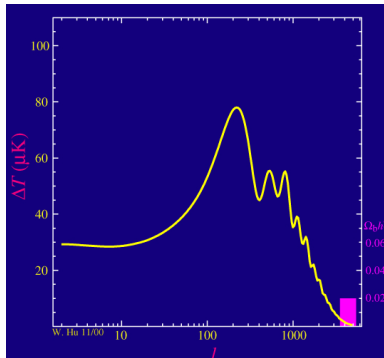
► Replay



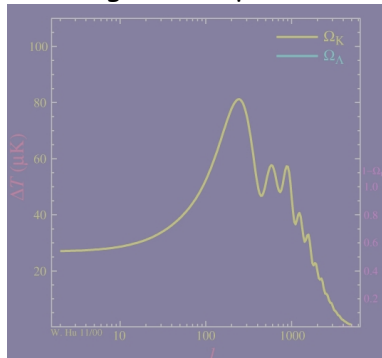
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



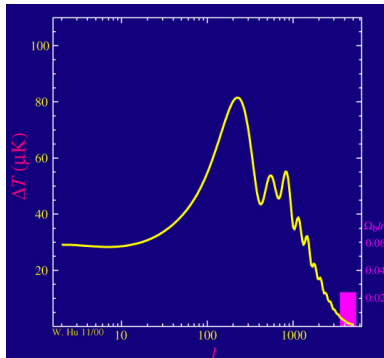
► Replay



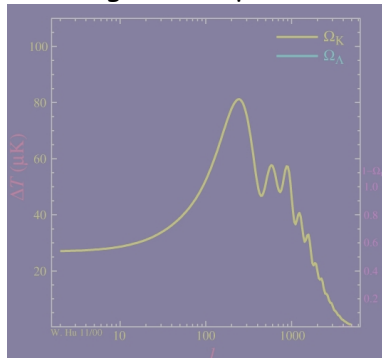
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



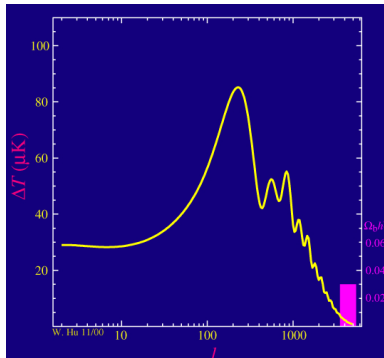
► Replay



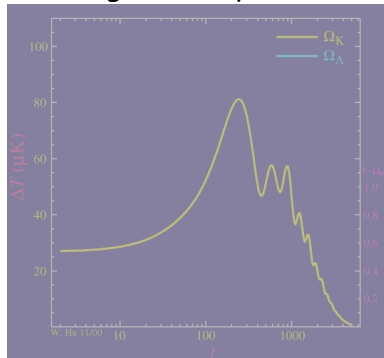
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



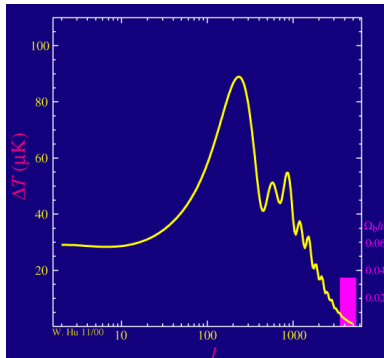
► Replay



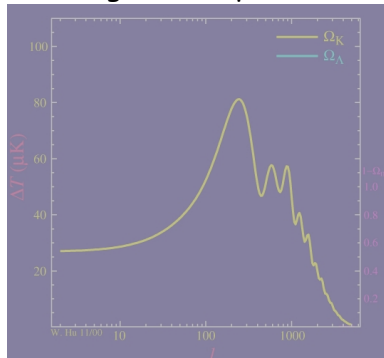
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



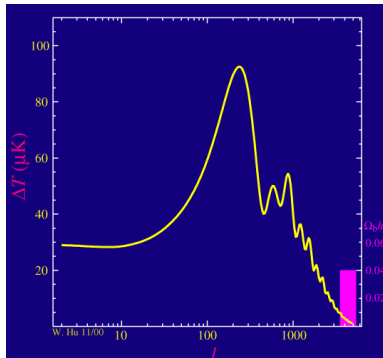
► Replay



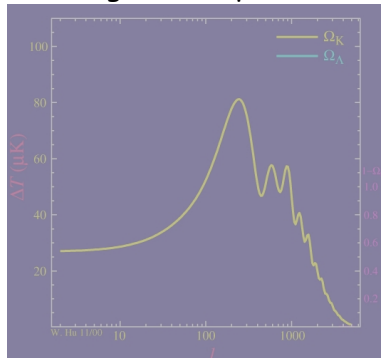
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



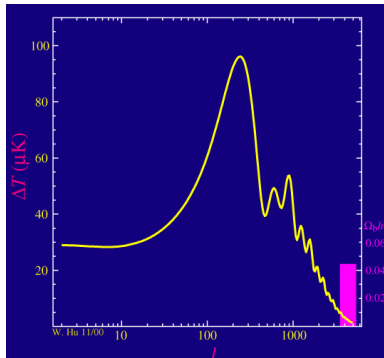
► Replay



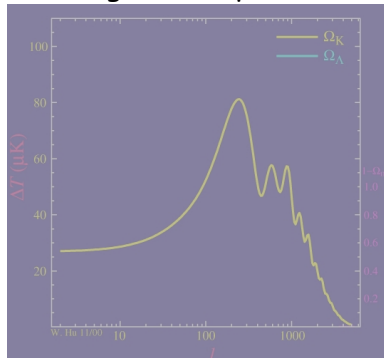
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



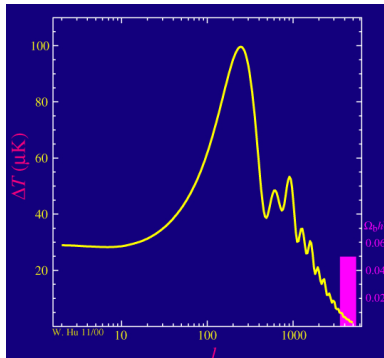
► Replay



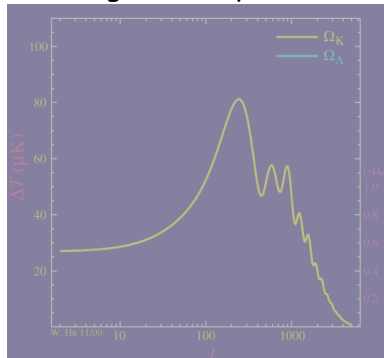
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



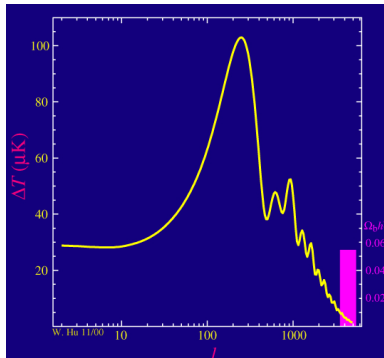
► Replay



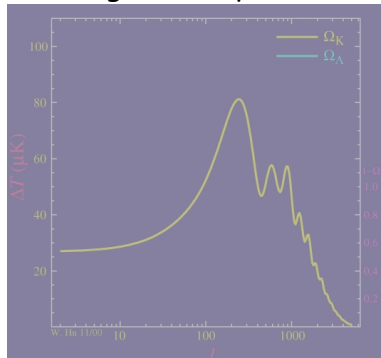
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



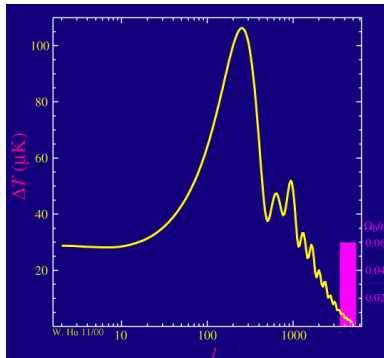
► Replay



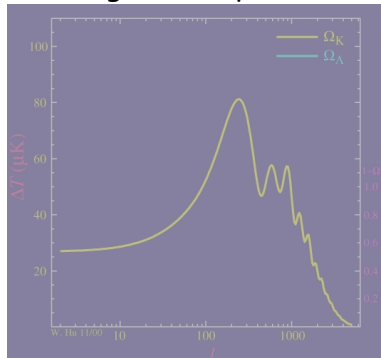
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



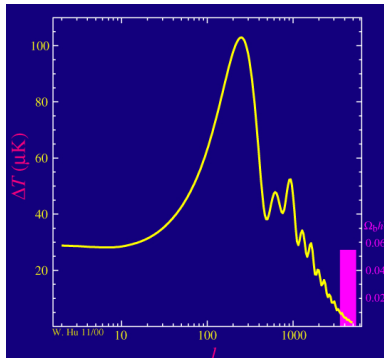
► Replay



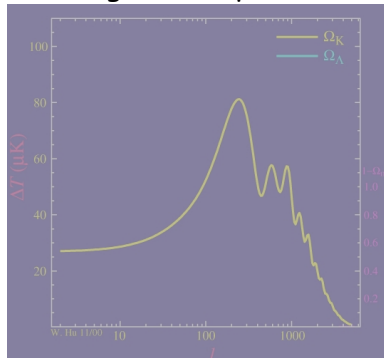
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



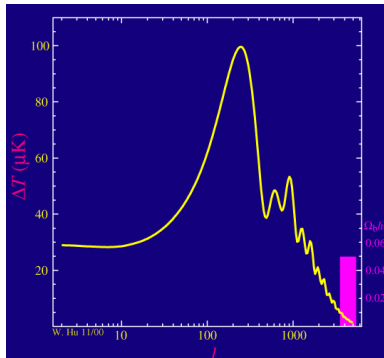
► Replay



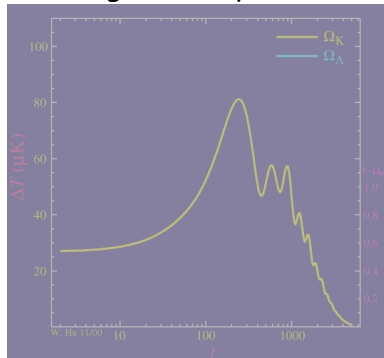
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



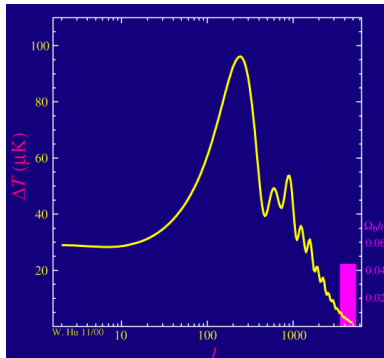
► Replay



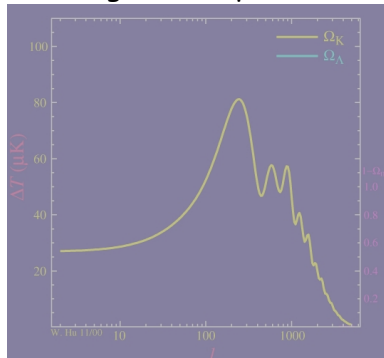
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



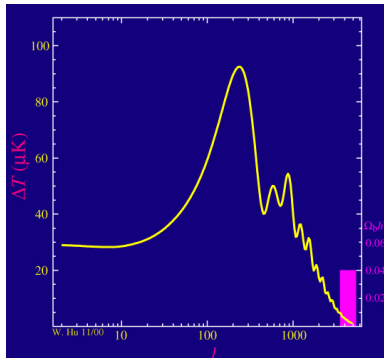
► Replay



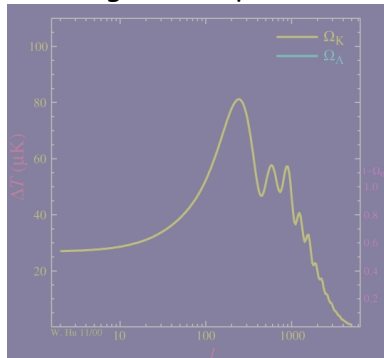
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



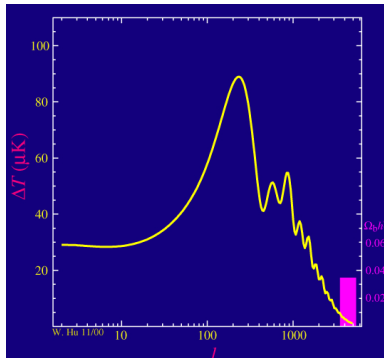
► Replay



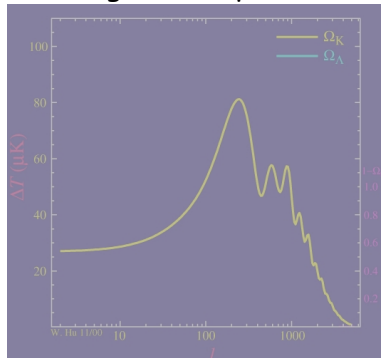
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



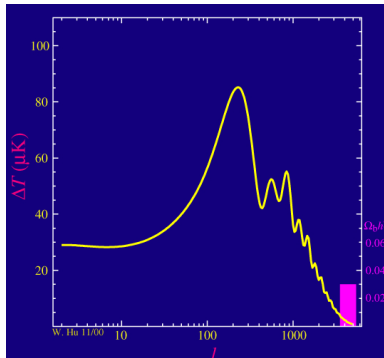
► Replay



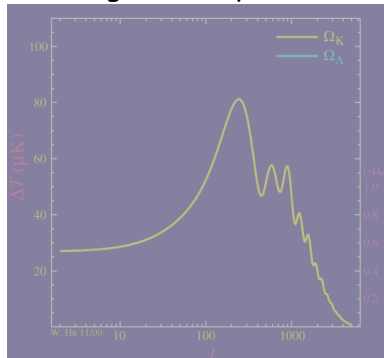
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



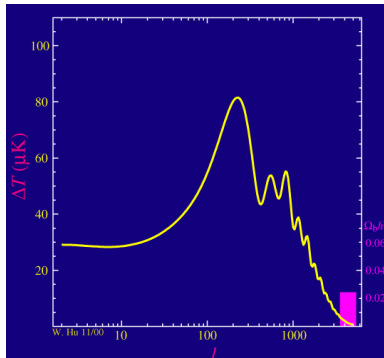
► Replay



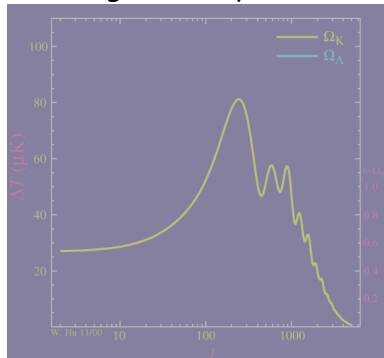
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



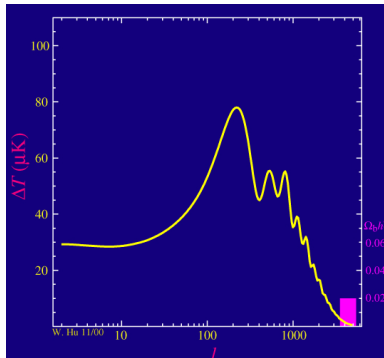
► Replay



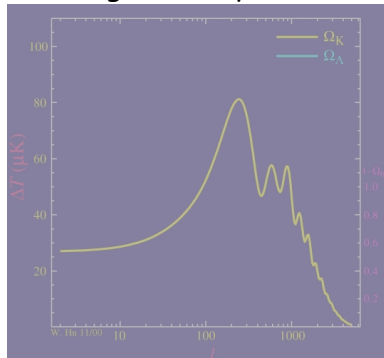
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



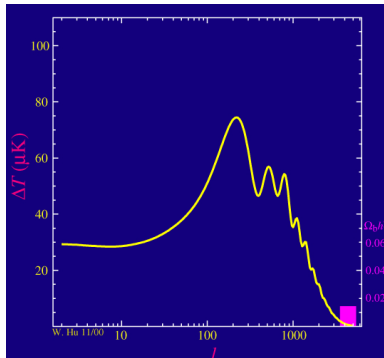
► Replay



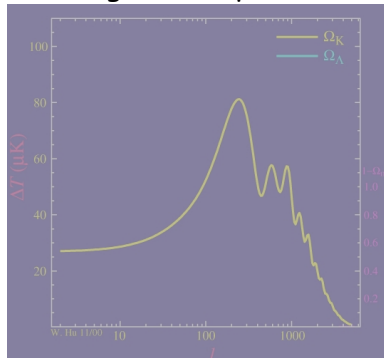
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



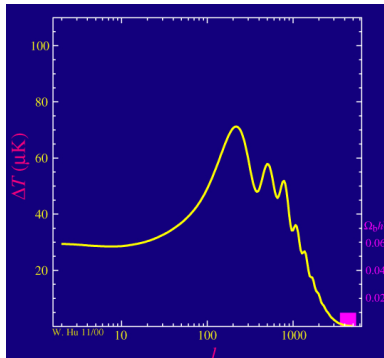
► Replay



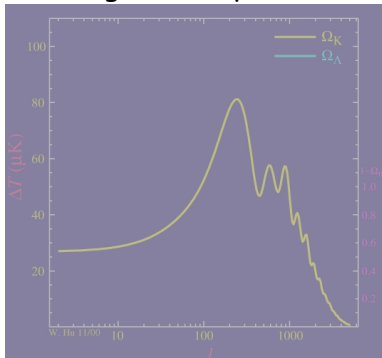
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



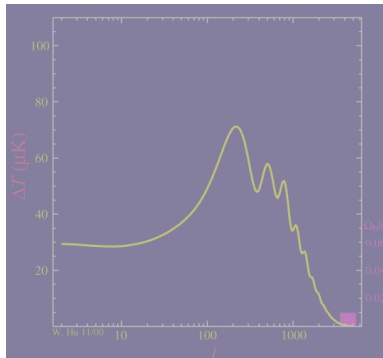
► Replay



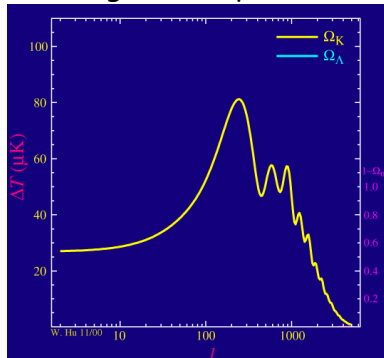
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



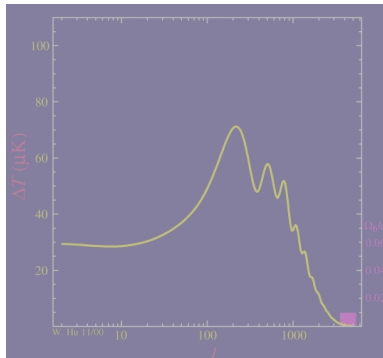
► Replay



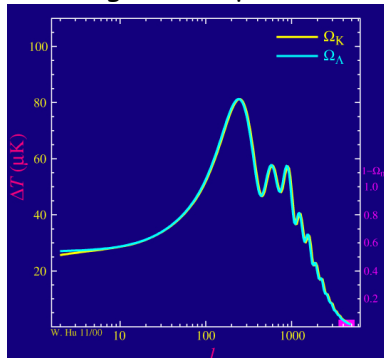
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



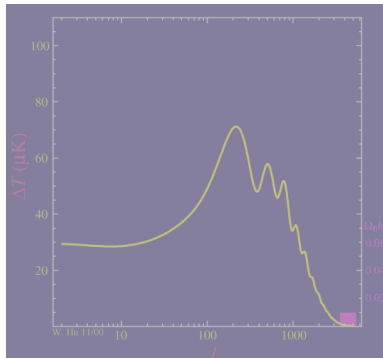
► Replay



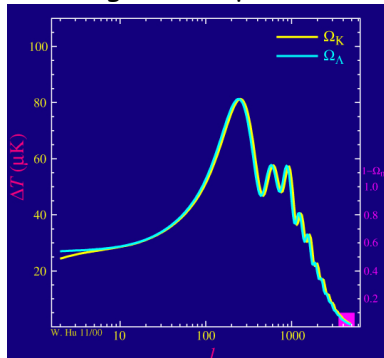
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



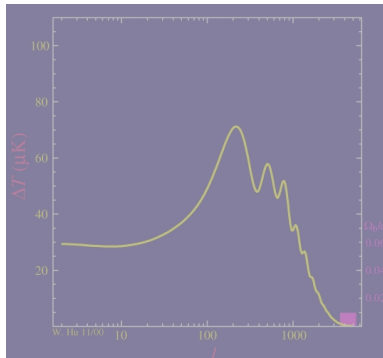
► Replay



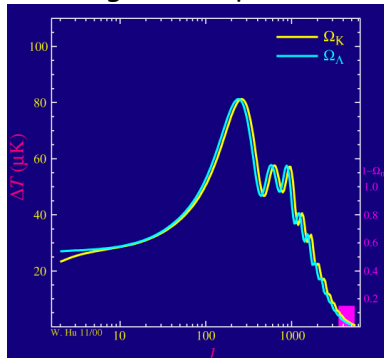
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



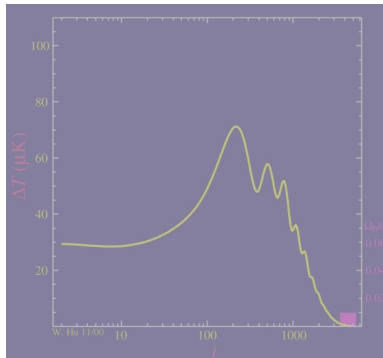
► Replay



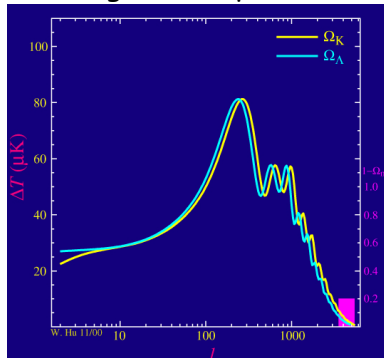
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



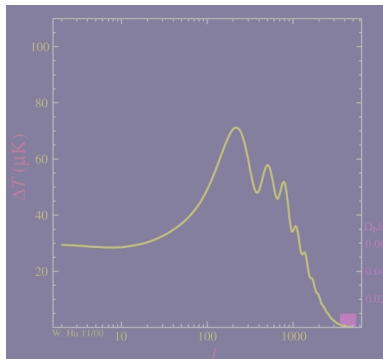
► Replay



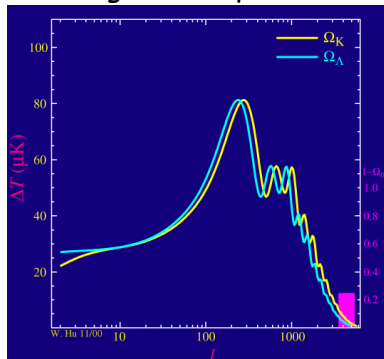
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



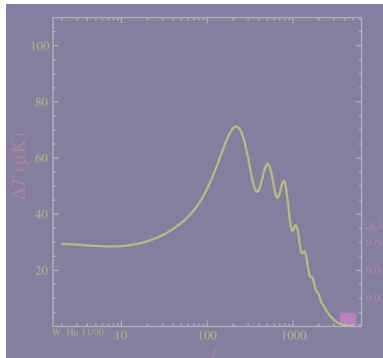
► Replay



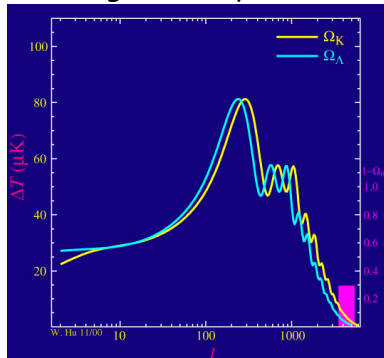
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



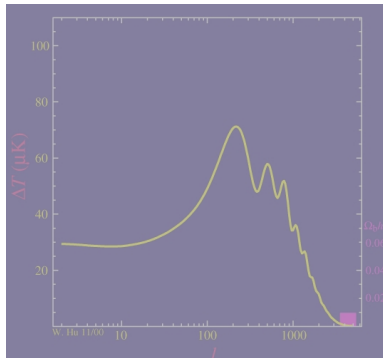
► Replay



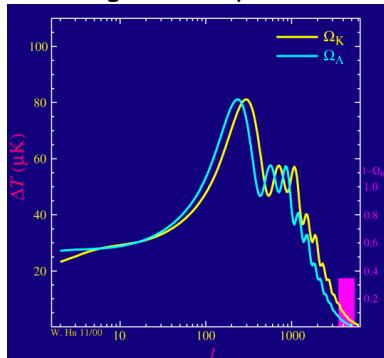
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



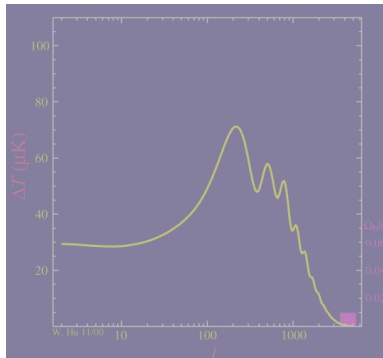
► Replay



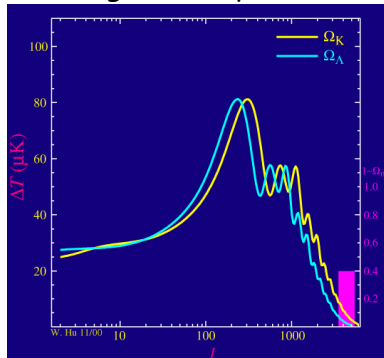
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



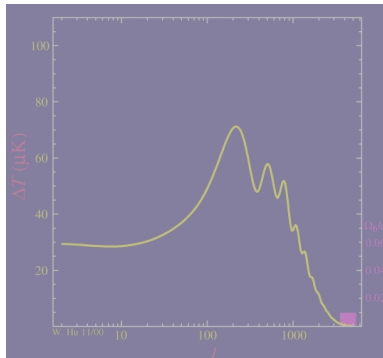
► Replay



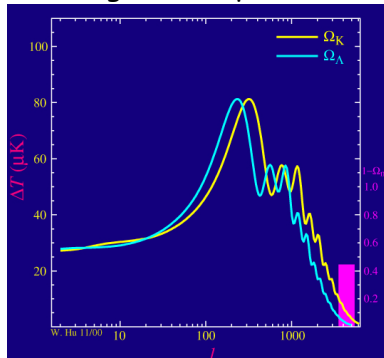
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



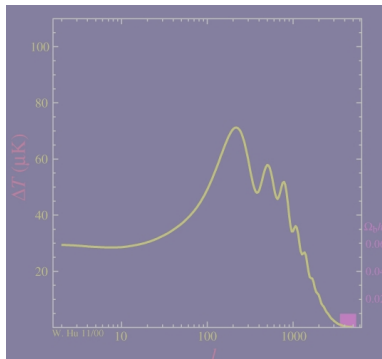
► Replay



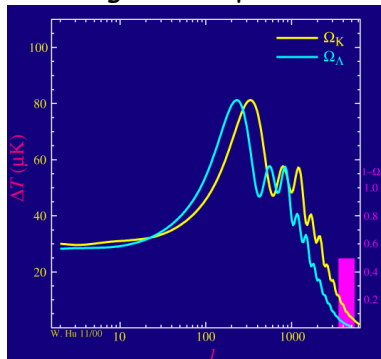
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



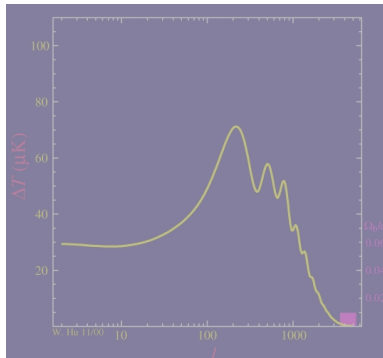
► Replay



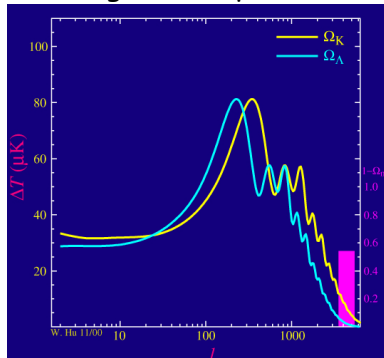
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



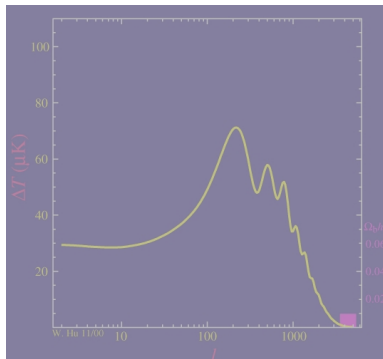
► Replay



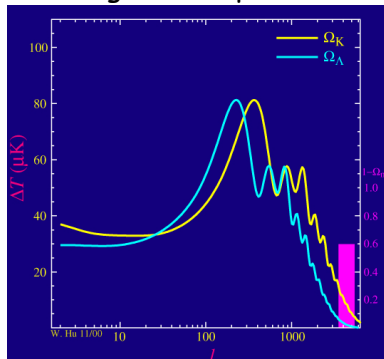
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



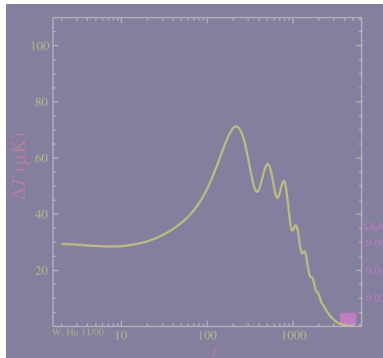
► Replay



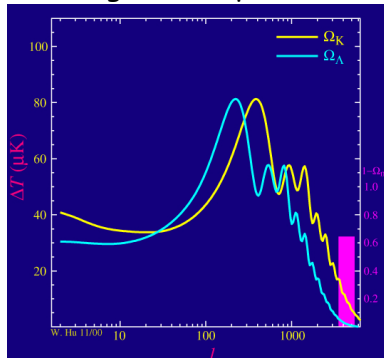
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



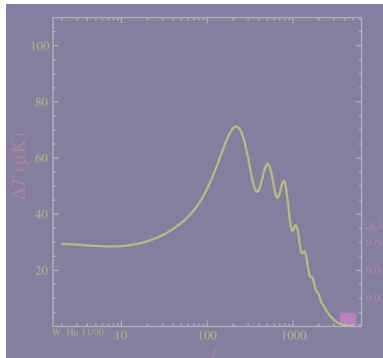
► Replay



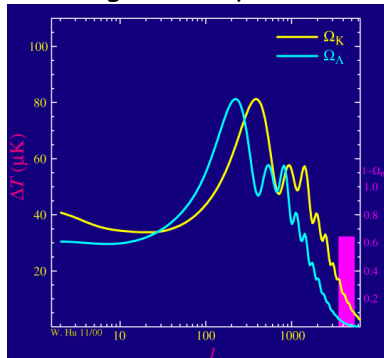
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



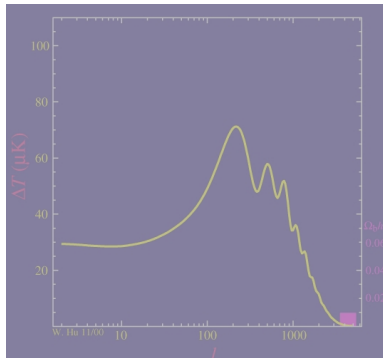
► Replay



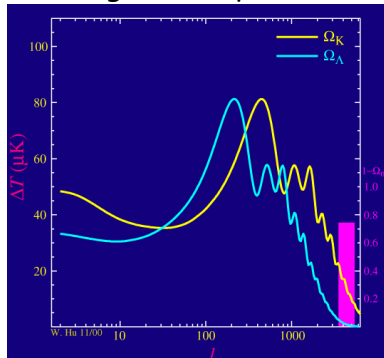
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



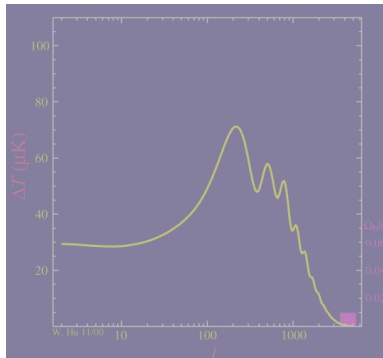
► Replay



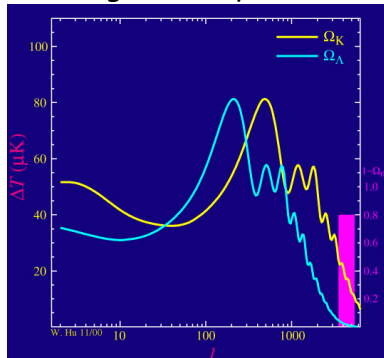
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



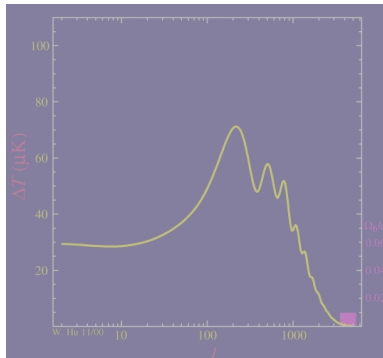
► Replay



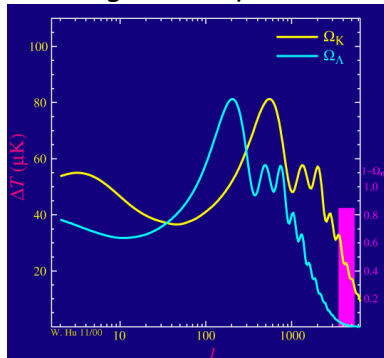
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



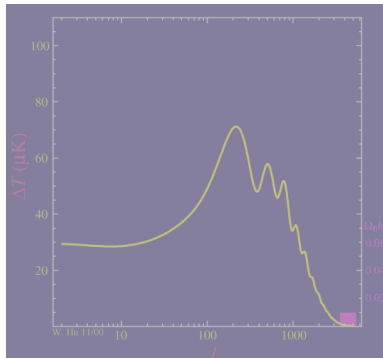
► Replay



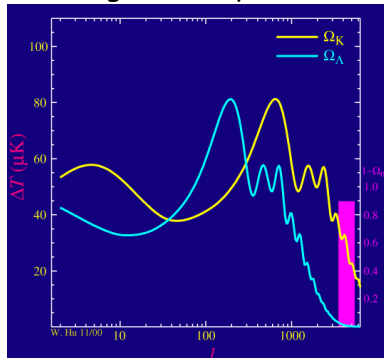
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



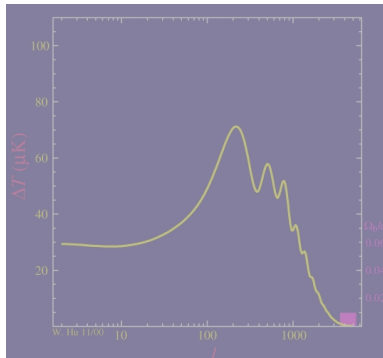
► Replay



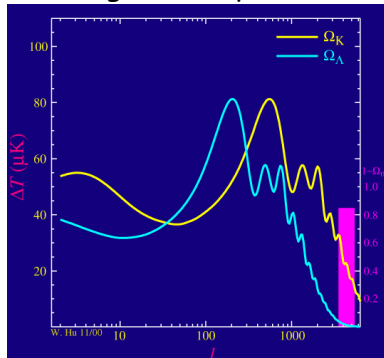
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



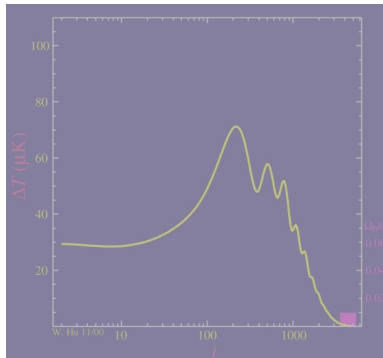
► Replay



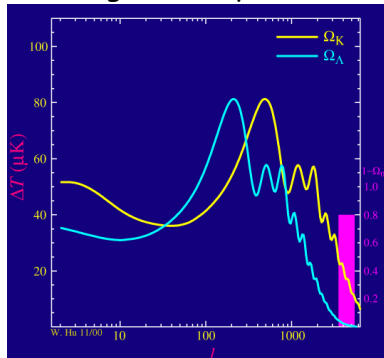
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



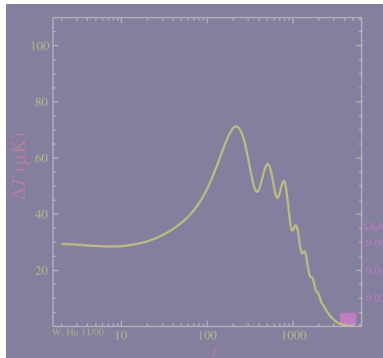
► Replay



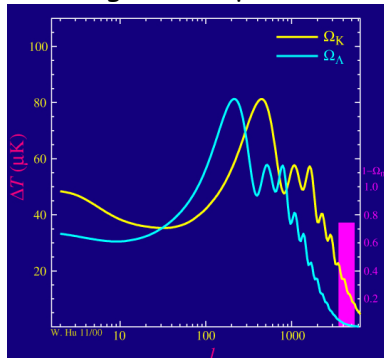
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



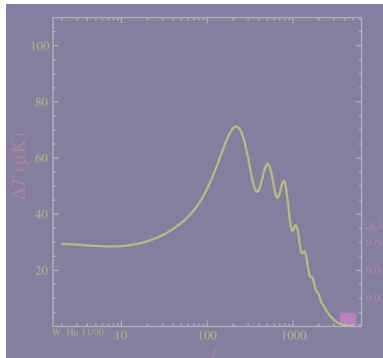
► Replay



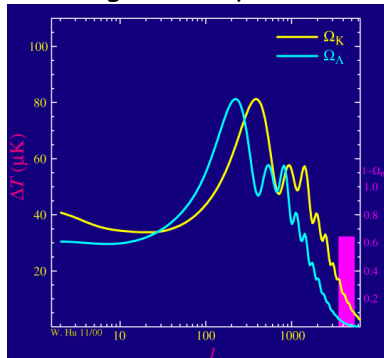
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



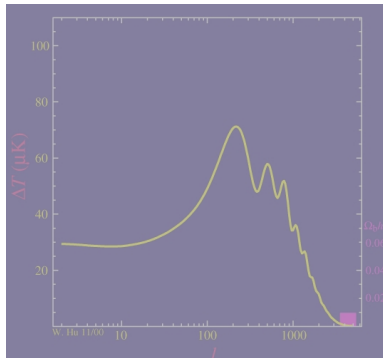
► Replay



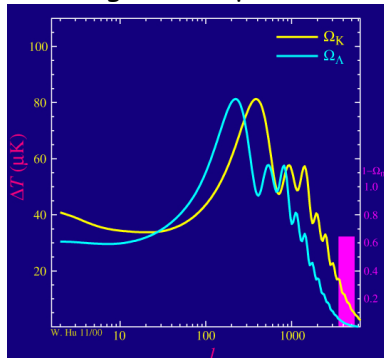
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



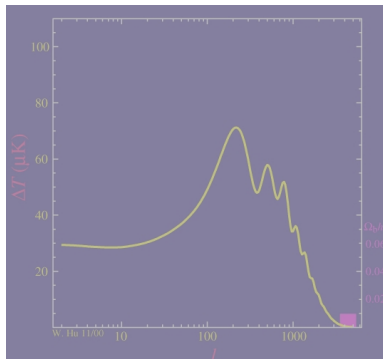
► Replay



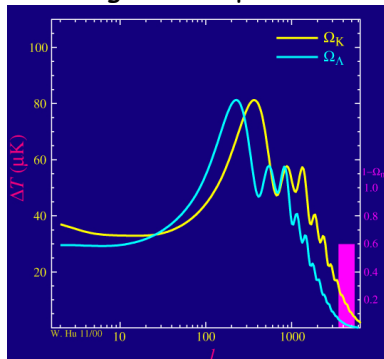
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



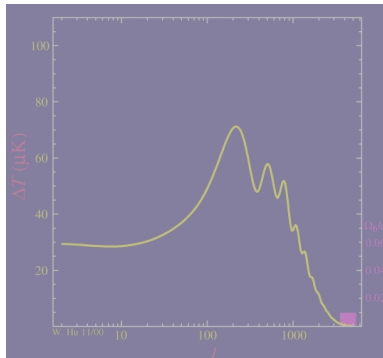
► Replay



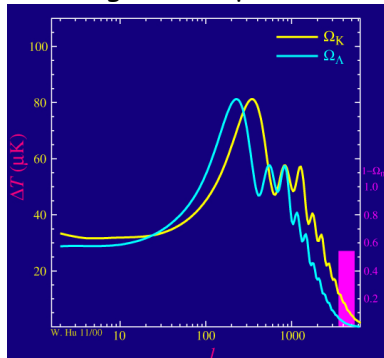
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



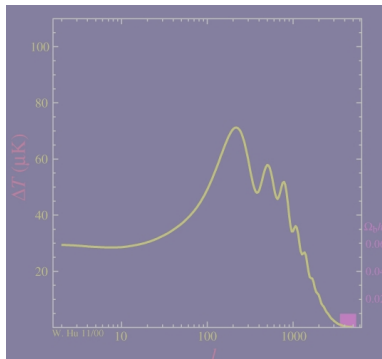
► Replay



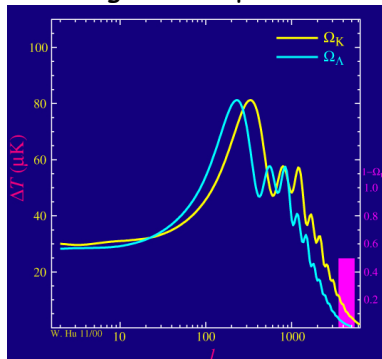
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



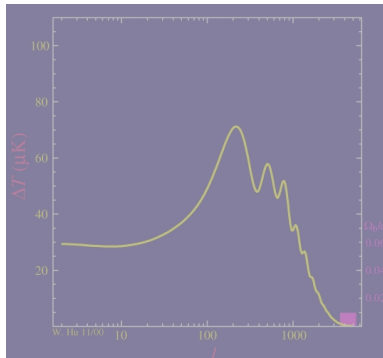
► Replay



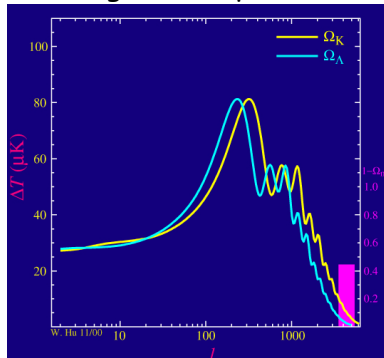
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



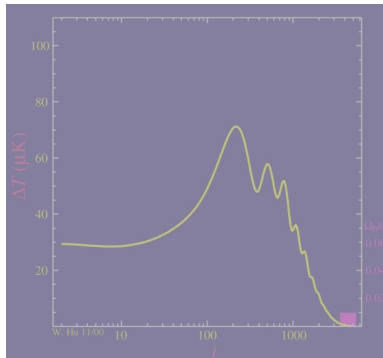
► Replay



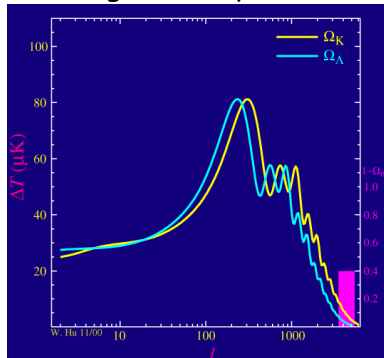
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



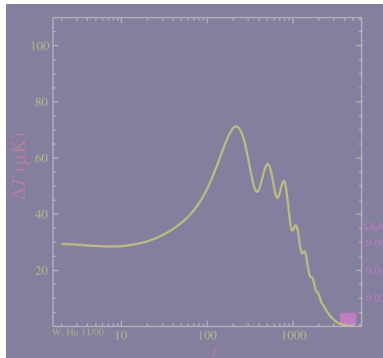
► Replay



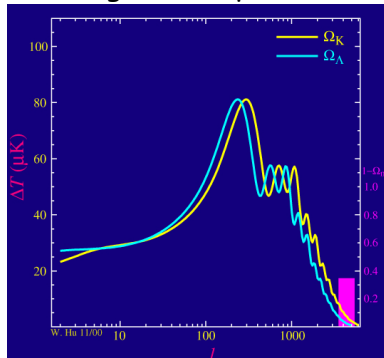
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



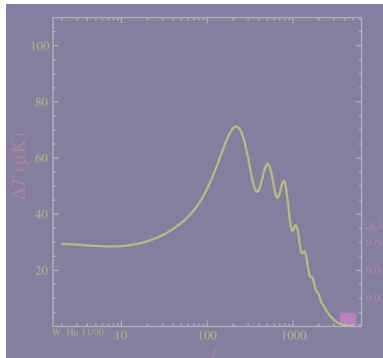
► Replay



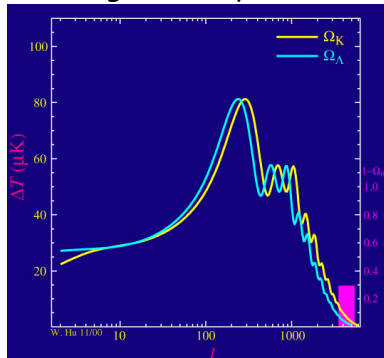
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



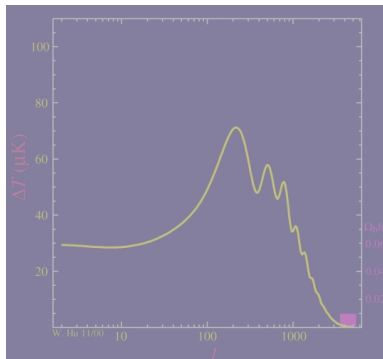
► Replay



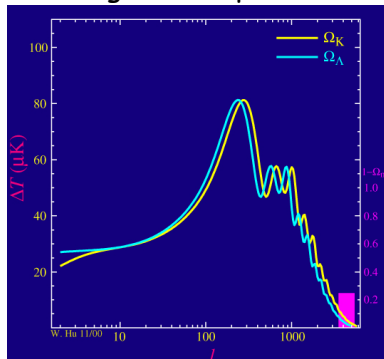
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



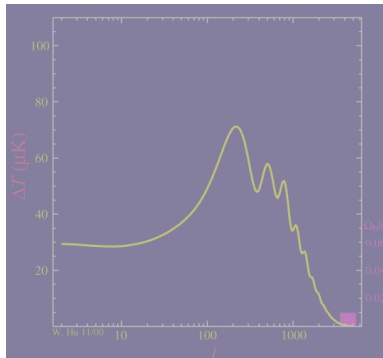
► Replay



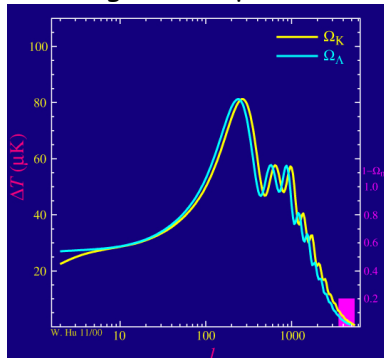
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



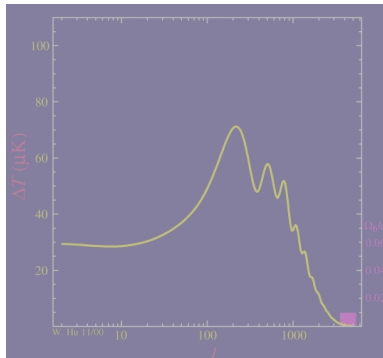
► Replay



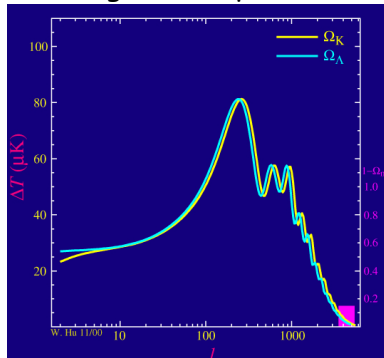
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



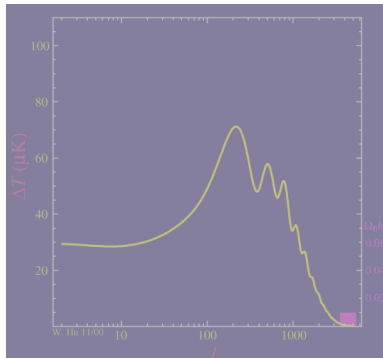
► Replay



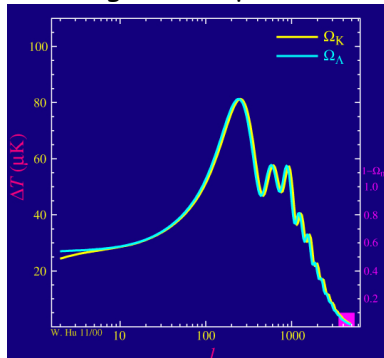
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



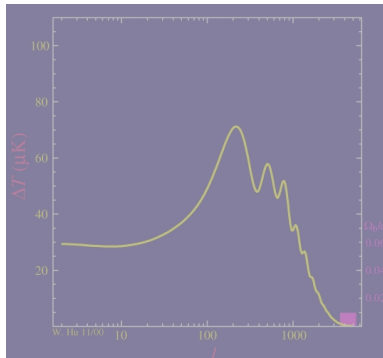
► Replay



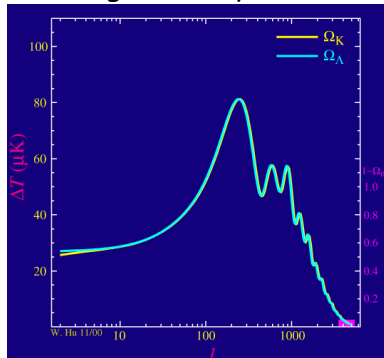
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



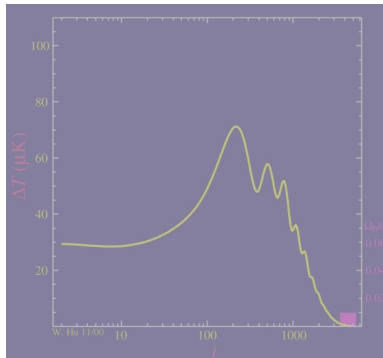
► Replay



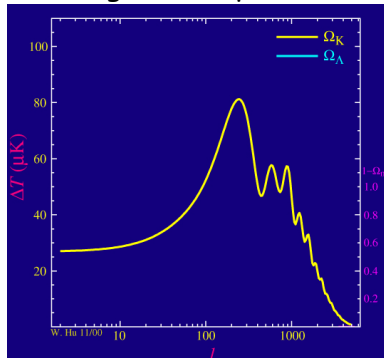
► Replay

Un outil sensible!

Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



► Replay

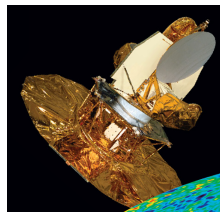


► Replay

Aperçu expérimental

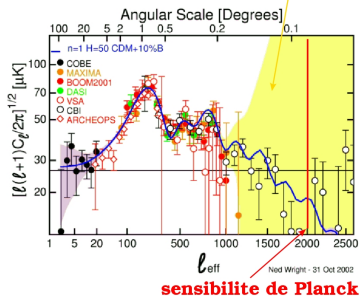
- COBE-DMR (1992) anisotropies (radio, espace)
- Boomerang, Maxima (1998, ballon + bolomètres) : 1eres mesures de Ω_0 avec le CMB
- Archéops (2002) (ballon + bolomètres)
- CBI, VSA, DASI (interférométrie radio, sol, 2000-2) : petites échelles
- WMAP 2003(-7-?) (radio, espace)
Mesures de $\delta T/T$ jusqu'à ~ 0.3 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"

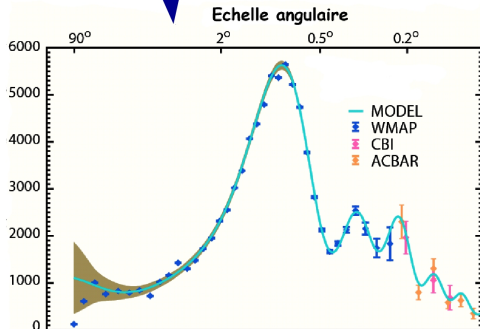


Les C_ℓ hier et aujourd'hui

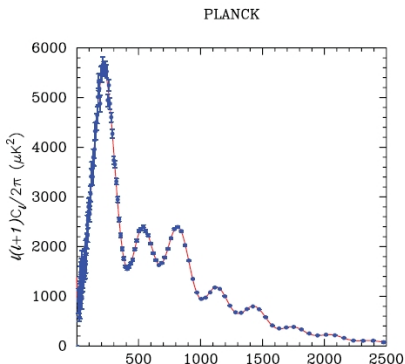
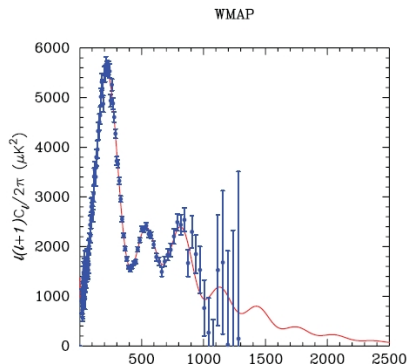
sensibilite (prevue) de WMAP



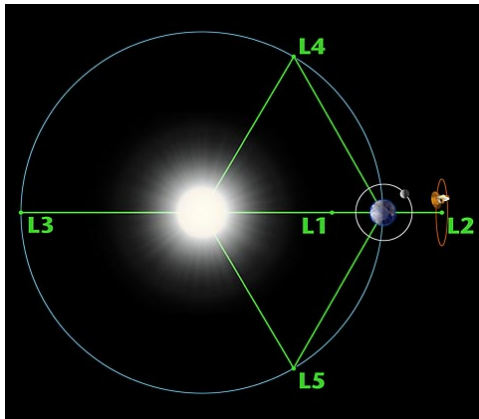
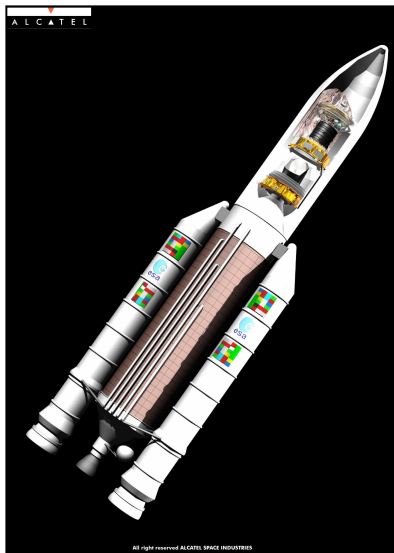
Resultats de WMAP



Planck vs WMAP (température)



Planck



Planck

Mission de l'ESA

Lancement 2008 (printemps?)

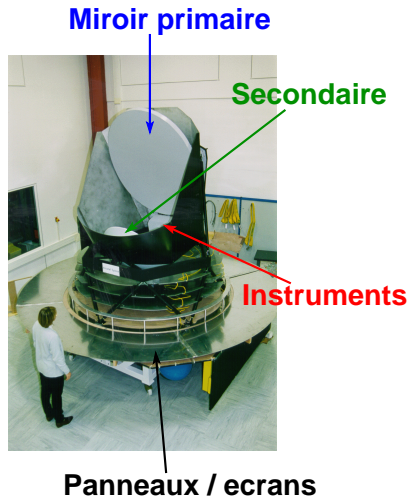
(avec Hershell)

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

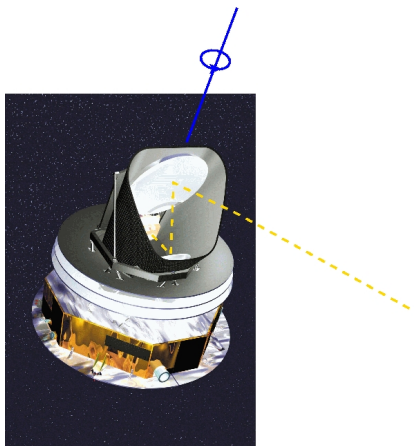
Lancement 2008 (printemps?)

(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 🇫🇷)

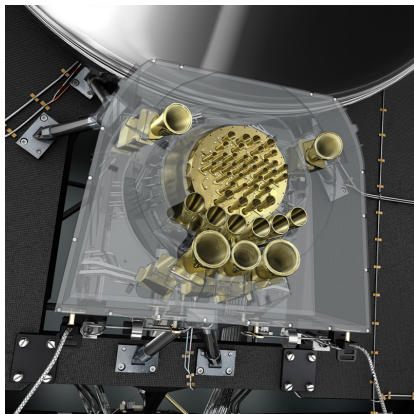
Coût : ~ 600Meuros
(HFI ~ 150Meuros)



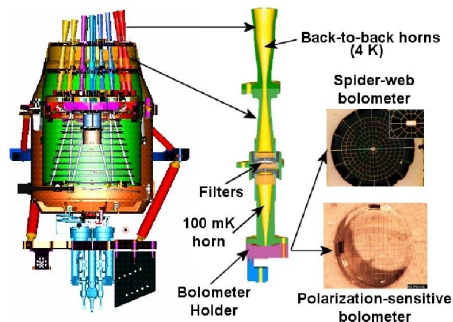
Mission de l'ESA
Lancement 2008 (printemps?)
(avec Herschell)
Durée garantie : 14 mois @ L2
(1.5Mkm)

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

Coût : ~ 600Meuros
(HFI ~ 150Meuros)

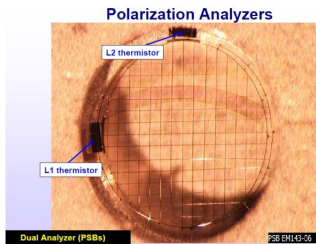
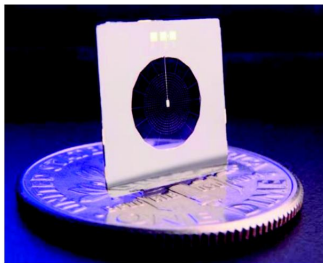
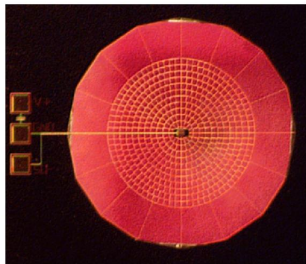


L'Instrument Haute Fréquence (HFI)



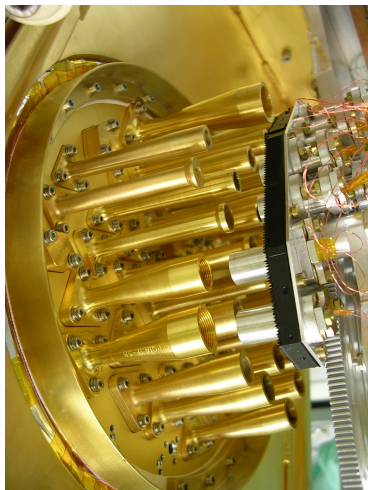
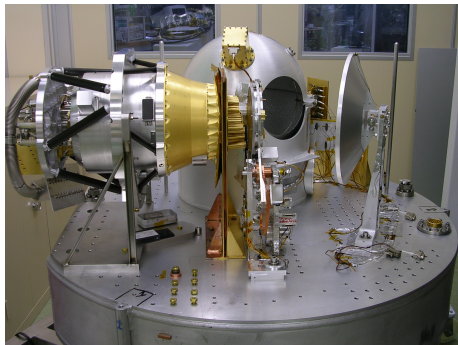
- Au foyer du télescope ("dans LFI")
- Refroidissement à plusieurs étages
- Dernier étage $T \sim 0.1$ K (dilution $^3\text{He}/^4\text{He}$)
- Détecteurs : bolomètres (52 voies)
- "prototype" = Archéops

Les bolomètres

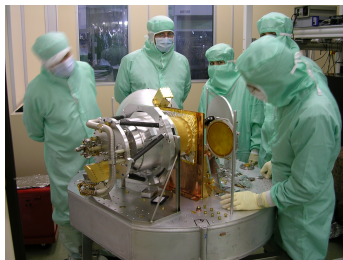
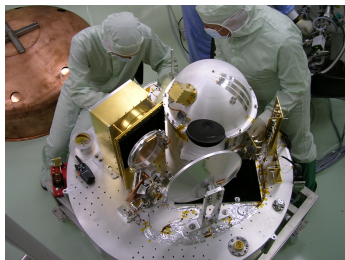


- mesurent la chaleur déposée par les γ
- grille \leftrightarrow détecteur
- diamètre **2.6mm**
- "fils" **4x1 μ m**
- **$T \sim 100\text{mK}$**
(sensibilité)

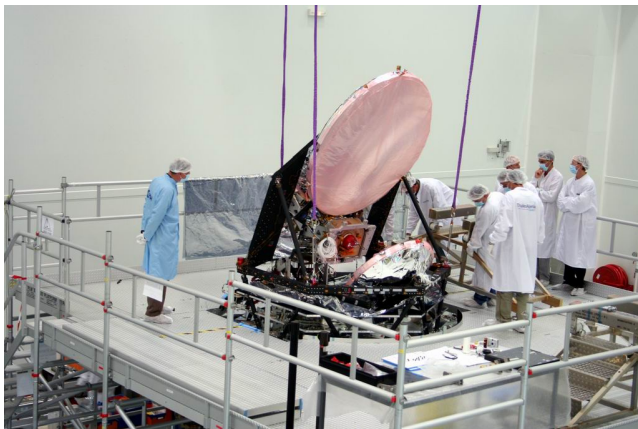
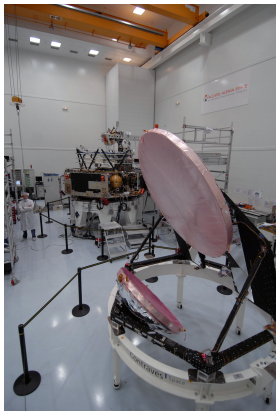
Etalonnage de Planck (2004,2006)



Etalonnage de Planck (2004,2006)










Etat "actuel" (2007)

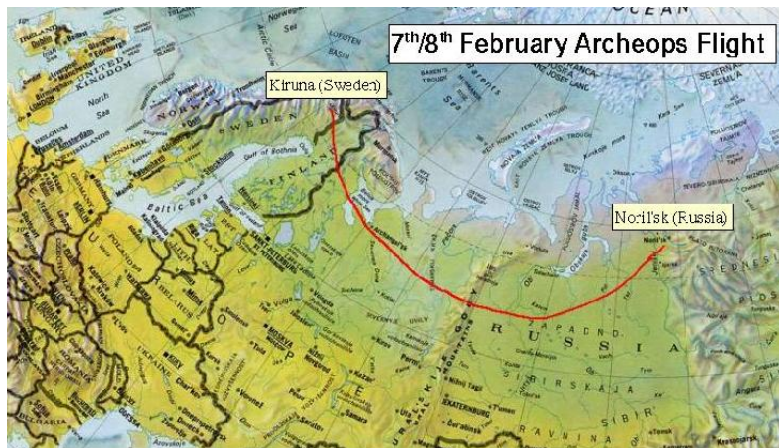




PI : A. Benoît (CRTBT Grenoble)

-  / 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



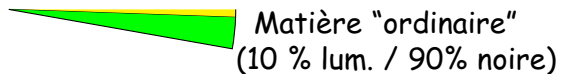
Récupérations



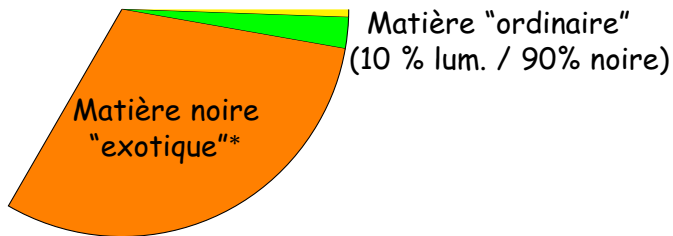
Conclusion(s)

- "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

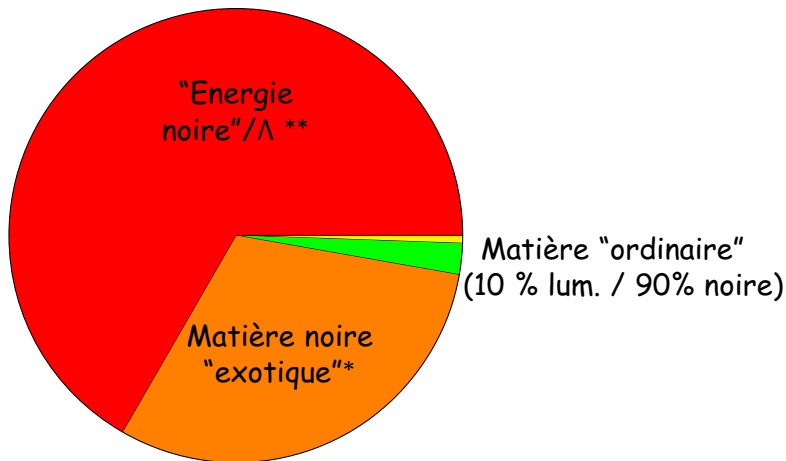


Composition de l'univers



*non identifiée

Composition de l'univers



* non identifiée

** encore plus mystérieuse



Dans la nuit des temps

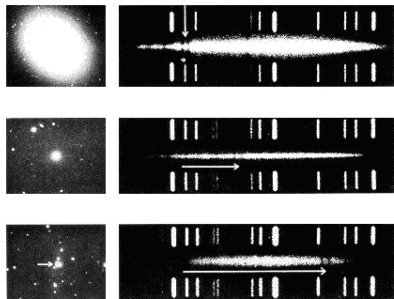
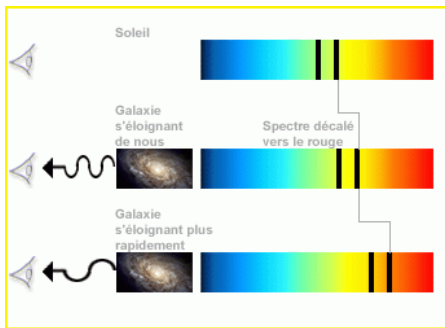


Sources

- site de Wayne Hu (background.chicago.edu/whu)
- Site de WMAP (map.gsfc.nasa.gov)
- cours de J. Wilms (Univ. Tuebingen astro.uni-tuebingen.de/wilms/teach/index)
- sites de Planck : planck.fr, ESA (www.esa.int/index.php?project=planck)
- Atlas de l'univers (atunivers.free.fr)
- Multiwavelength Milky Way (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)
- ...

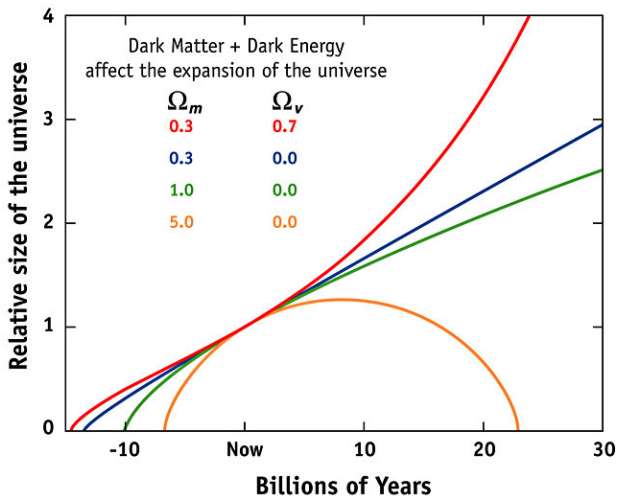
Un univers dynamique

- 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

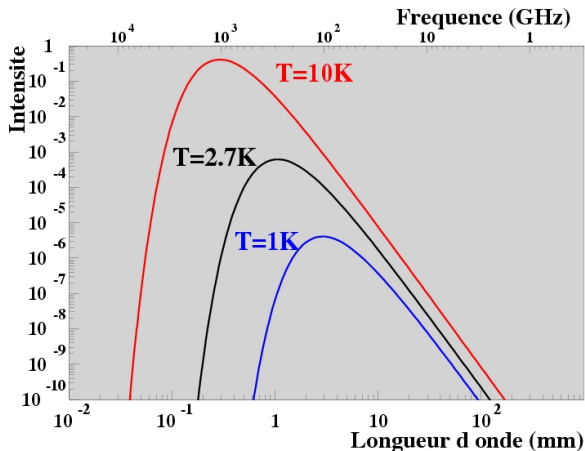


"Histoire" de la géométrie

EXPANSION OF THE UNIVERSE



Spectres de corps noirs



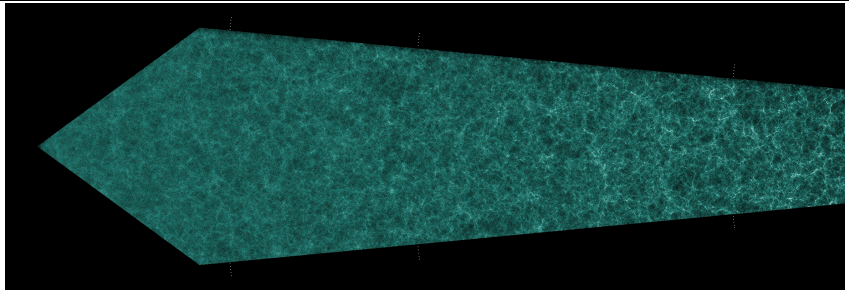
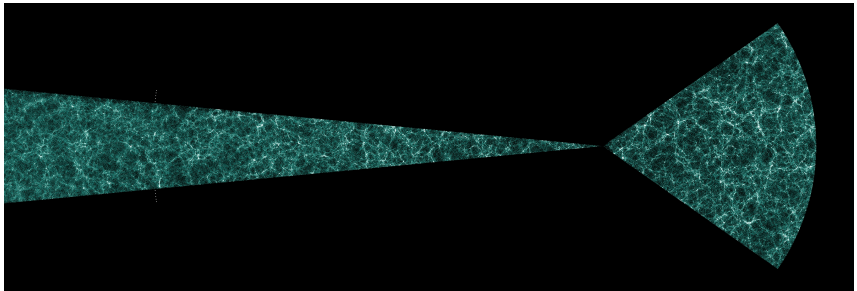
M. Planck 1900

spectre à UN param. : T

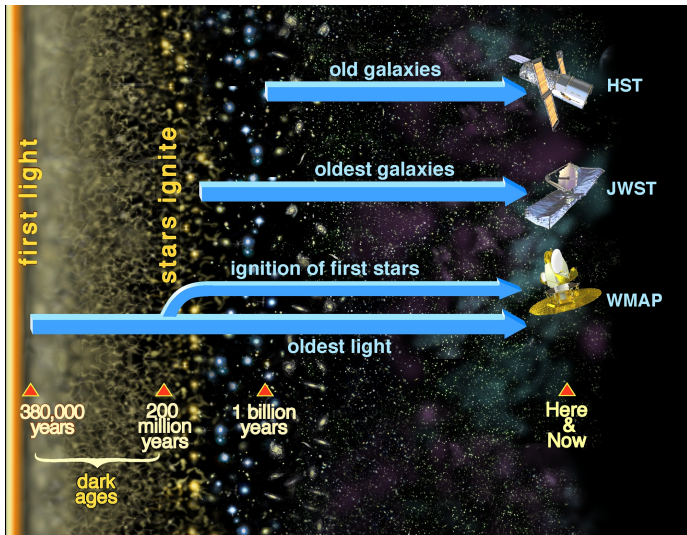
pdt l'expansion :

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

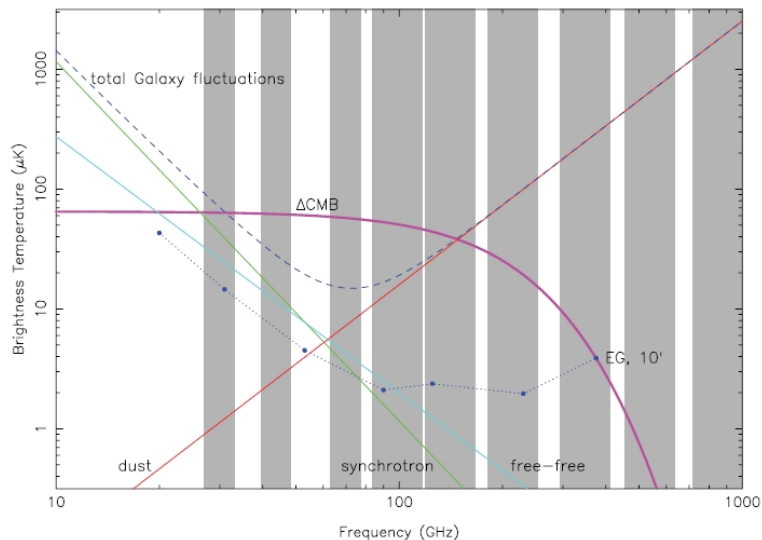
Une carte de l'univers calculée



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



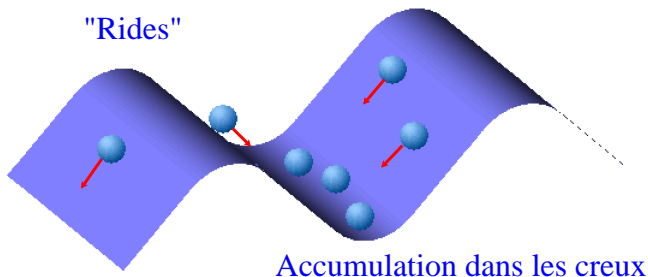
Bandes de fréquence de Planck



Des fluctuations aux anisotropies

Ou comment naissent les structures

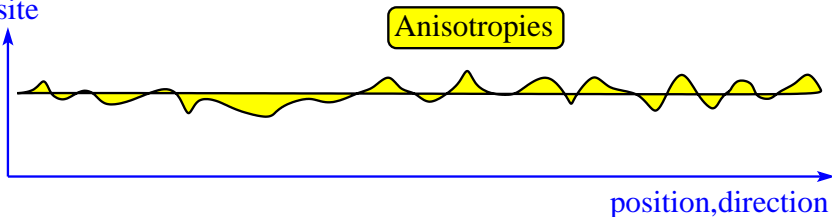
- Dans l'univers "quantique" \Rightarrow fluctuations de densité ($d = f(x, t)$)
 - Inflation \Rightarrow dilatation très rapide
- \Rightarrow "gel" des fluctuations \rightarrow anisotropies de densité
graines des grandes structures (amas, galaxies,...)



Le plasma primordial (le tambour)

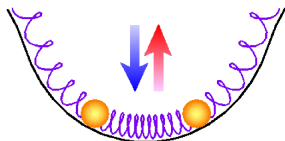
- milieu composé de protons (+ qq noyaux He,...), d'électrons ("libres") et de photons (rayonnement) : **plasma**
 - ▶ composante dominante = le rayonnement (photons)
 - ▶ interaction (électromagnétique) entre photons et électrons/protons
 - ▶ pression "de radiation"
- milieu "presque" isotrope

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

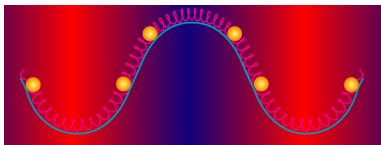


⇒ apparition d'oscillations (**ondes acoustiques**) ds le plasma primordial

Vitesse des ondes ↔ 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

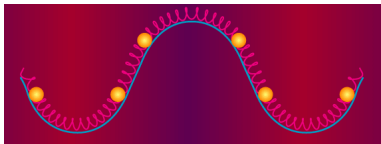


▶ Replay

⇒ 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

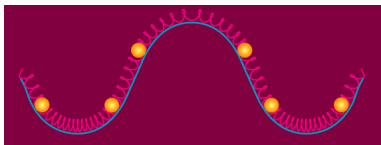


▶ Replay

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

Anisotropies de température

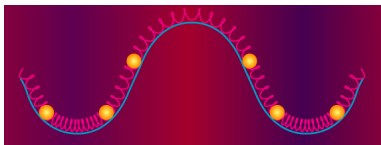
- ⇒ régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes
anisotropies de température



⇒ 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

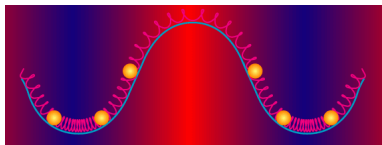


▶ Replay

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

Anisotropies de température

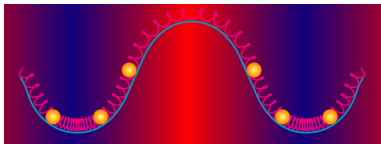
- ⇒ régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes
anisotropies de température



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

Anisotropies de température

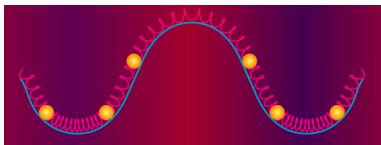
- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes
anisotropies de température



⇒ 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

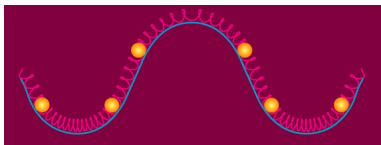


▶ Replay

⇒ 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



▶ Replay

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

Anisotropies de température

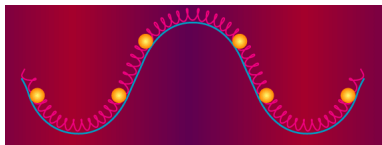
- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes
anisotropies de température

▶ Replay

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

Anisotropies de température

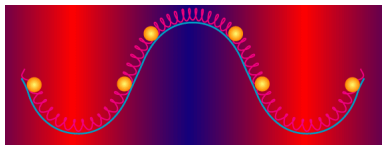
- ⇒ régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes
anisotropies de température



⇒ 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

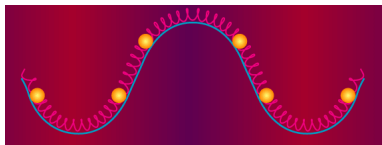


▶ Replay

⇒ 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

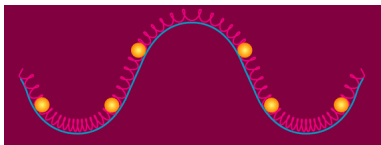


▶ Replay

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

Anisotropies de température

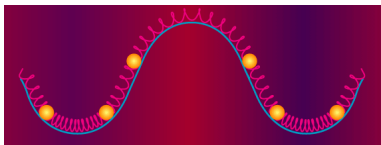
- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes
anisotropies de température



⇒ 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

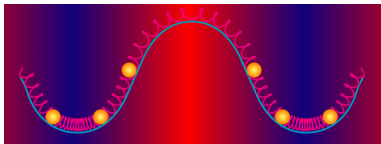


▶ Replay

⇒ 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

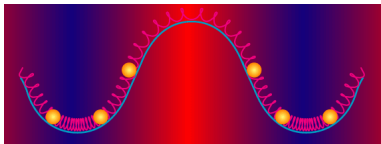


▶ Replay

⇒ 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

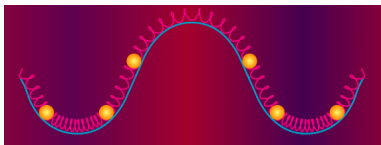


▶ Replay

⇒ 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

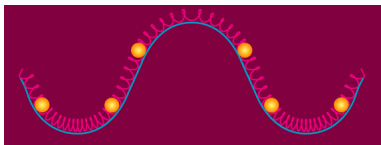


▶ Replay

⇒ 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

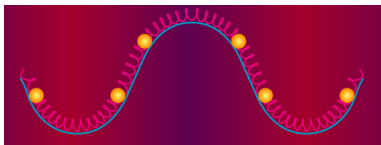


▶ Replay

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

Anisotropies de température

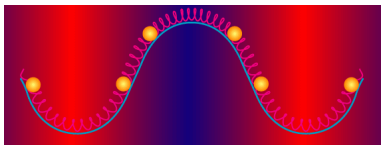
- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes
anisotropies de température



⇒ 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

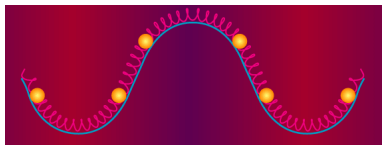


▶ Replay

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

Anisotropies de température

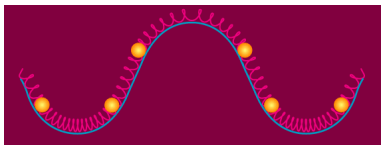
- ⇒ régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes
anisotropies de température



⇒ 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

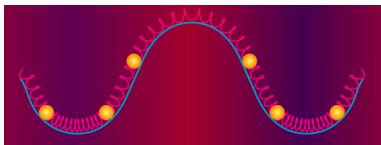


▶ Replay

⇒ 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

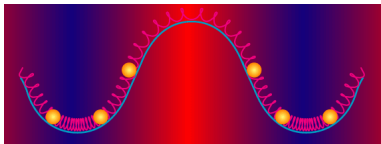


▶ Replay

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

Anisotropies de température

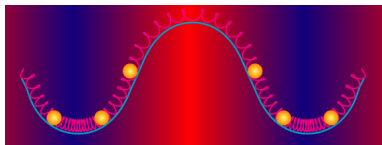
- ⇒ régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes
anisotropies de température



⇒ 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

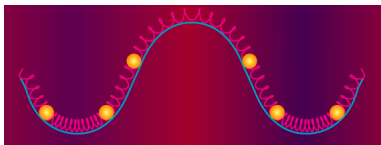


▶ Replay

⇒ 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

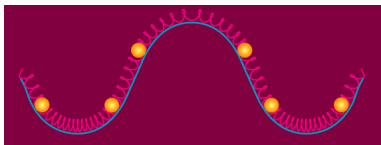


▶ Replay

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

Anisotropies de température

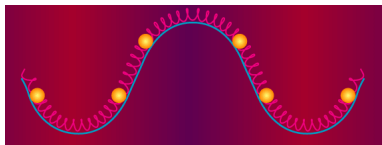
- ⇒ régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes
anisotropies de température



⇒ 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

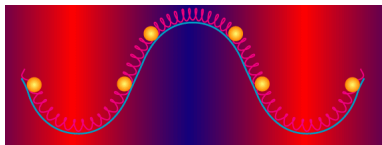


▶ Replay

⇒ 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

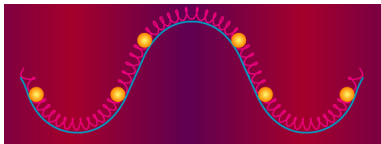


▶ Replay

⇒ 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

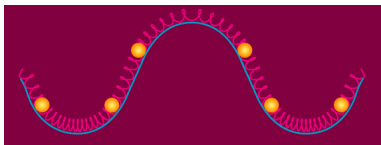


▶ Replay

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

Anisotropies de température

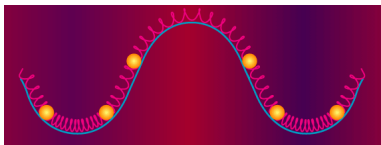
- ⇒ régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes
anisotropies de température



⇒ 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

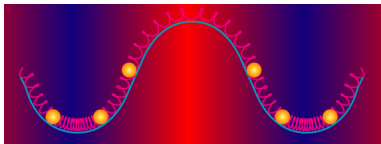


▶ Replay

⇒ 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

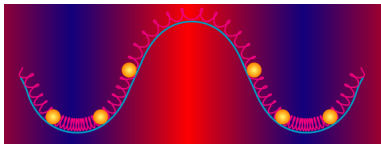


▶ Replay

⇒ 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

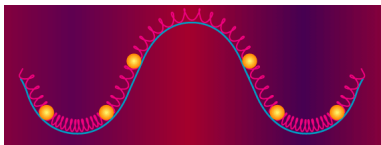


▶ Replay

⇒ 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

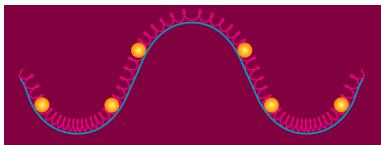


▶ Replay

⇒ 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

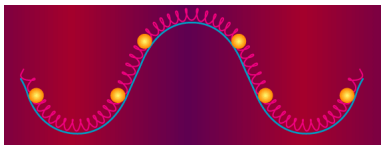


▶ Replay

⇒ 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

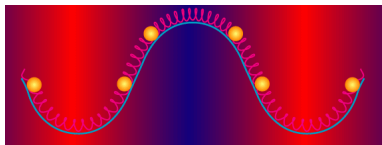


▶ Replay

⇒ 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

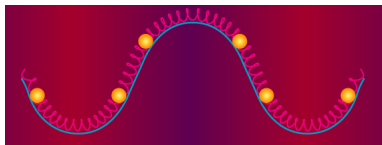


▶ Replay

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

Anisotropies de température

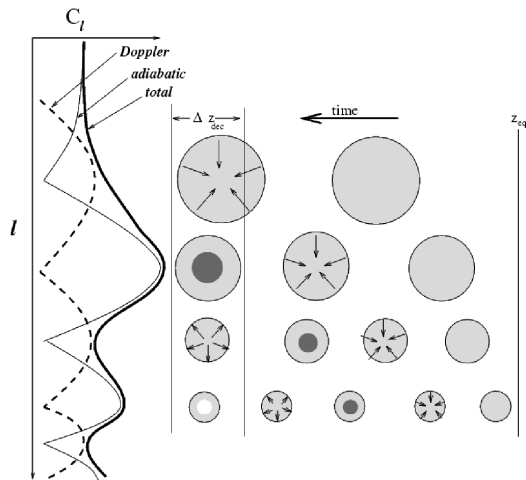
- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes
anisotropies de température



▶ Replay

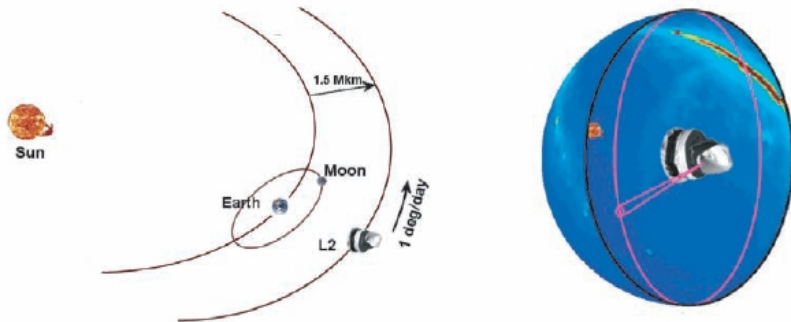
⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les *anisotropies de températures* du CMB

Pourquoi des pics dans les C_ℓ ?



A grande échelle (petit ℓ) : 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)