

# La cosmologie observationnelle dans l'IN2P3 (et l'IRFU, et ailleurs)

O. Perdereau



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

Ecole IN2P3 "De la physique au détecteur" - Fréjus 2008

## LE DIFFICILE COMBAT DE JOHANNES KEPLER



# Plan

## 1 Introduction

## 2 Le "modèle standard"

- Les "trois piliers" du Big-Bang
- Univers et Relativité
- Histoire(s) de l'univers
- Inflation ?

## 3 Recherche(s) de matière(s) noire(s)

- Motivations
- Recherches de WIMPS (Edelweiss, Antares,...)
- Microlentilles gravitationnelles (EROS, AGAPE)

## 4 Le rayonnement de fond cosmologique (ou CMB)

- Pourquoi des anisotropies?
- Planck & Archeops
- Retombées des anisotropies du CMB

## 5 Supernovæ de type Ia

- Intérêt cosmologique
- Energie noire
- Projets :SN factory, CFHLS, SNAP

## 6 Conclusions

## 7 Sources

## 8 Annexes

- Autour de la métrique
- Naine blanche

# 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  
petit



Modèle du  
"Big-Bang"



infiniment  
grand

# 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  
petit



Modèle du  
"Big-Bang"

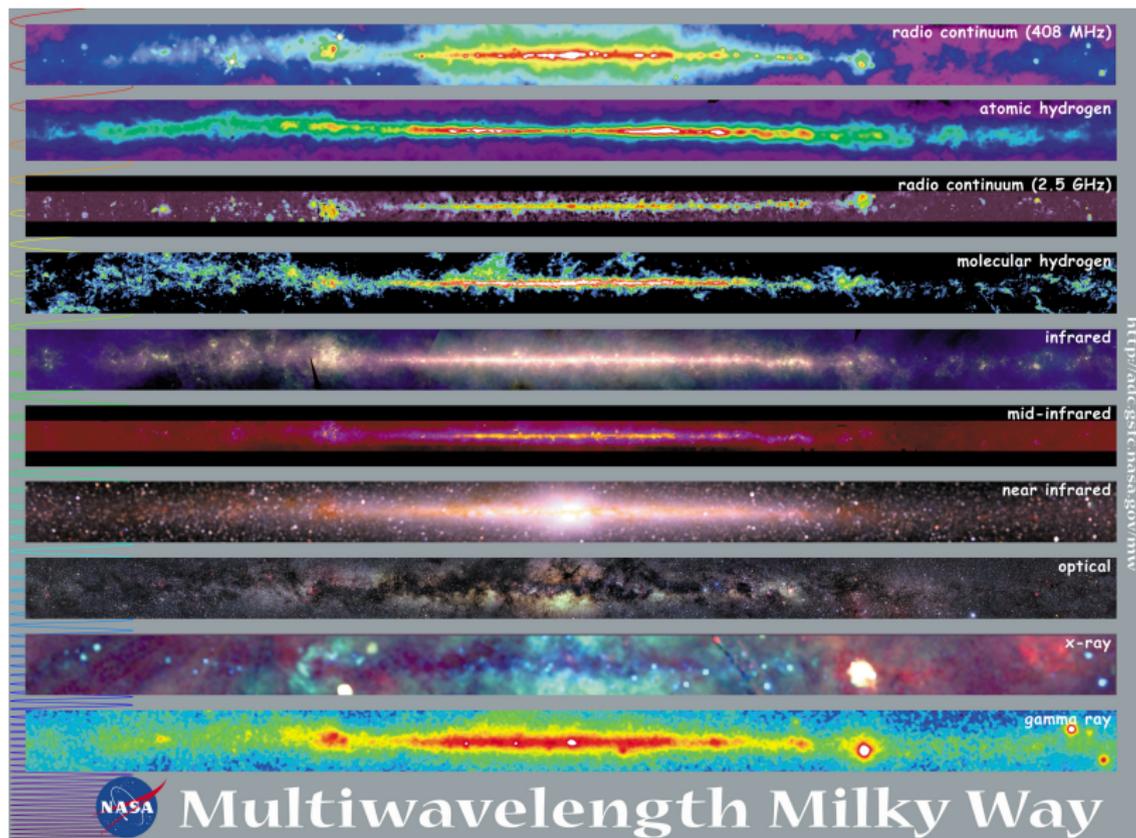


infiniment  
grand

# Remarques

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

# Différents visages de l'Univers



# Cartes de l'univers

Echelle

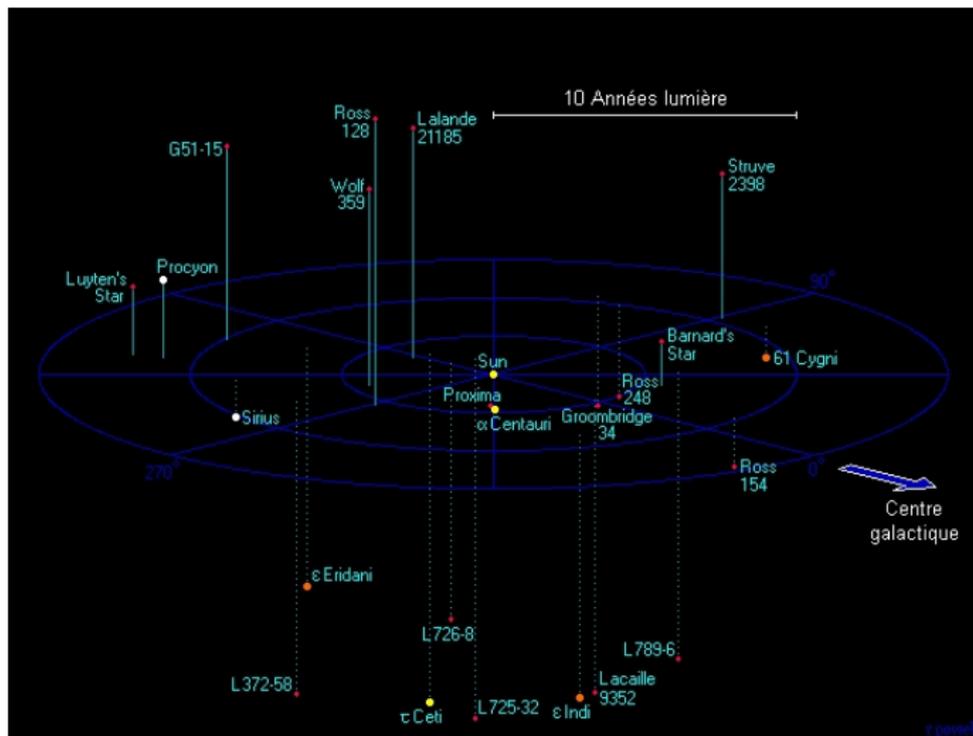
~ 10 a.l.

~ 40000 a.l.

~ 80 M a.l.

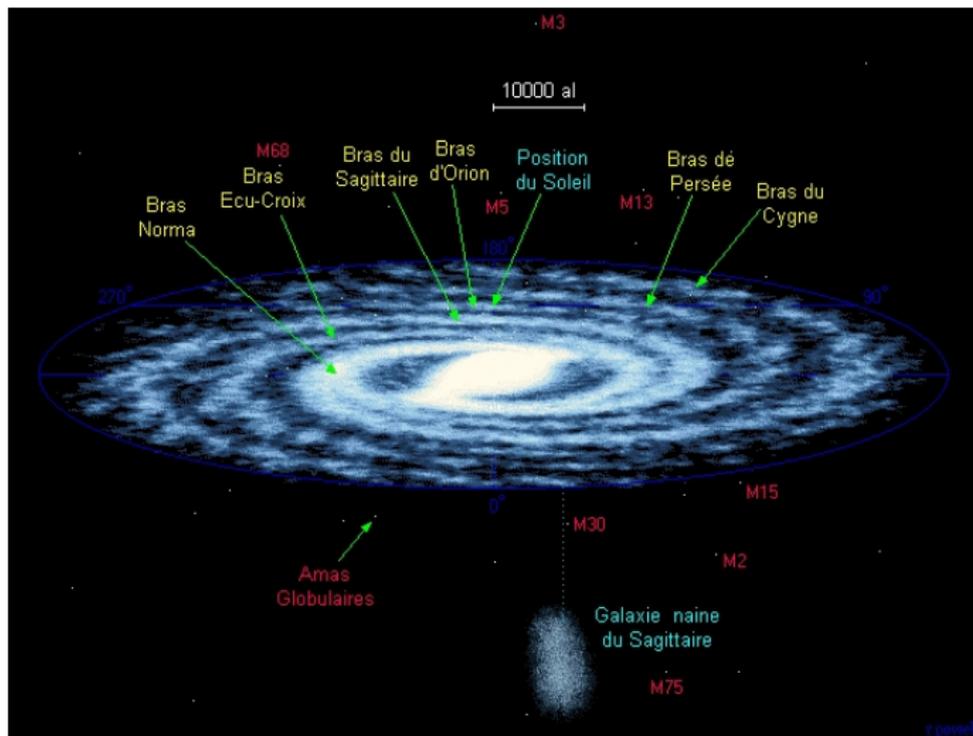
~ 1000 M a.l.

~ 14000 M a.l.



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

# Cartes de l'univers



Echelle

~ 10 a.l.

~ 40000 a.l.

~ 80 M a.l.

~ 1000 M a.l.

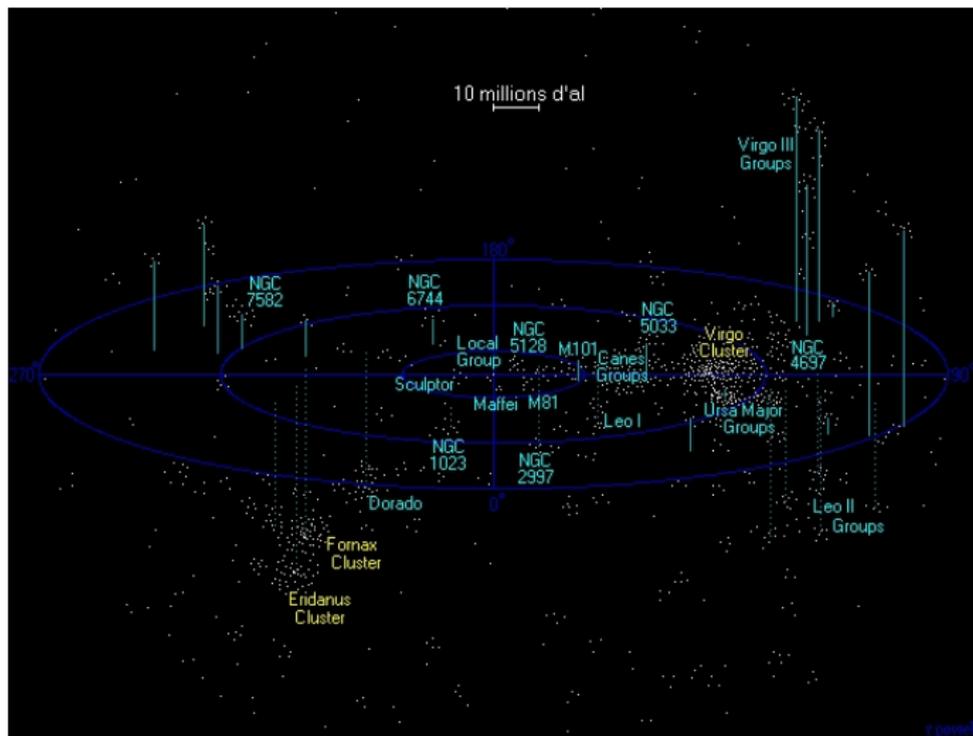
~ 14000 M a.l.

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

# Cartes de l'univers

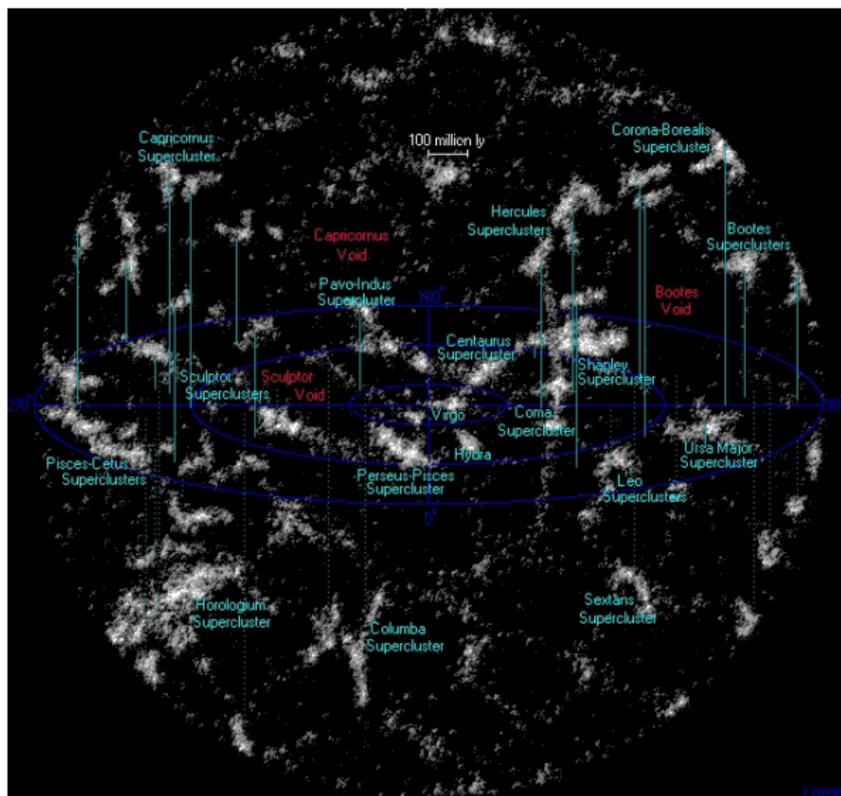
## Echelle

- ~ 10 a.l.
- ~ 40000 a.l.
- ~ **80 M a.l.**
- ~ 1000 M a.l.
- ~ 14000 M a.l.



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

# Cartes de l'univers



Echelle

~ 10 a.l.

~ 40000 a.l.

~ 80 M a.l.

~ **1000 M a.l.**

~ 14000 M a.l.

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

# Cartes de l'univers

Echelle

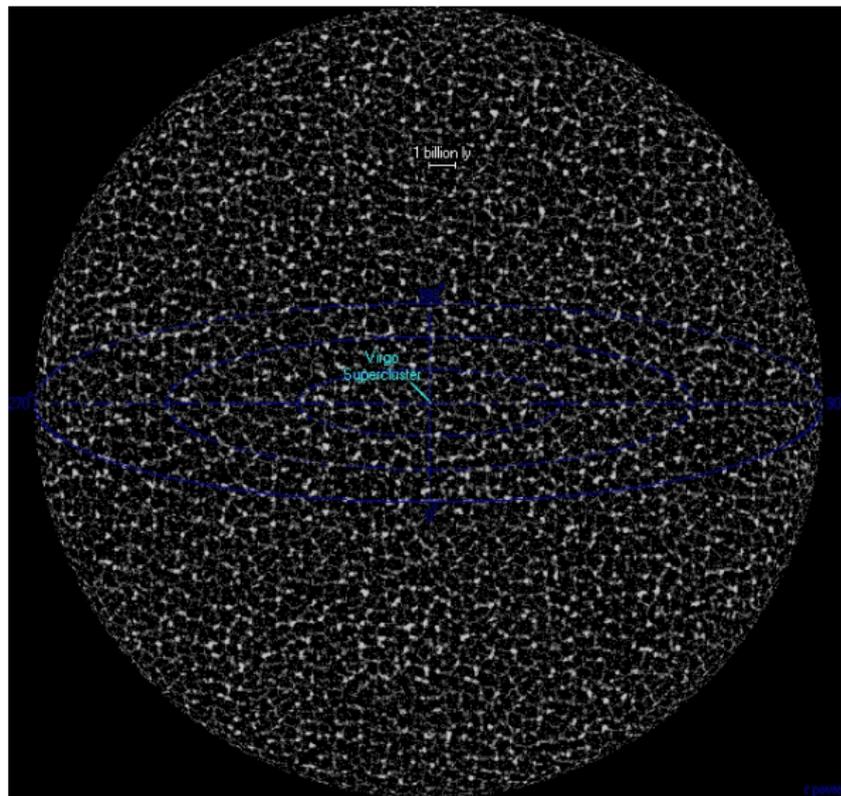
~ 10 a.l.

~ 40000 a.l.

~ 80 M a.l.

~ 1000 M a.l.

~ **14000 M a.l.**

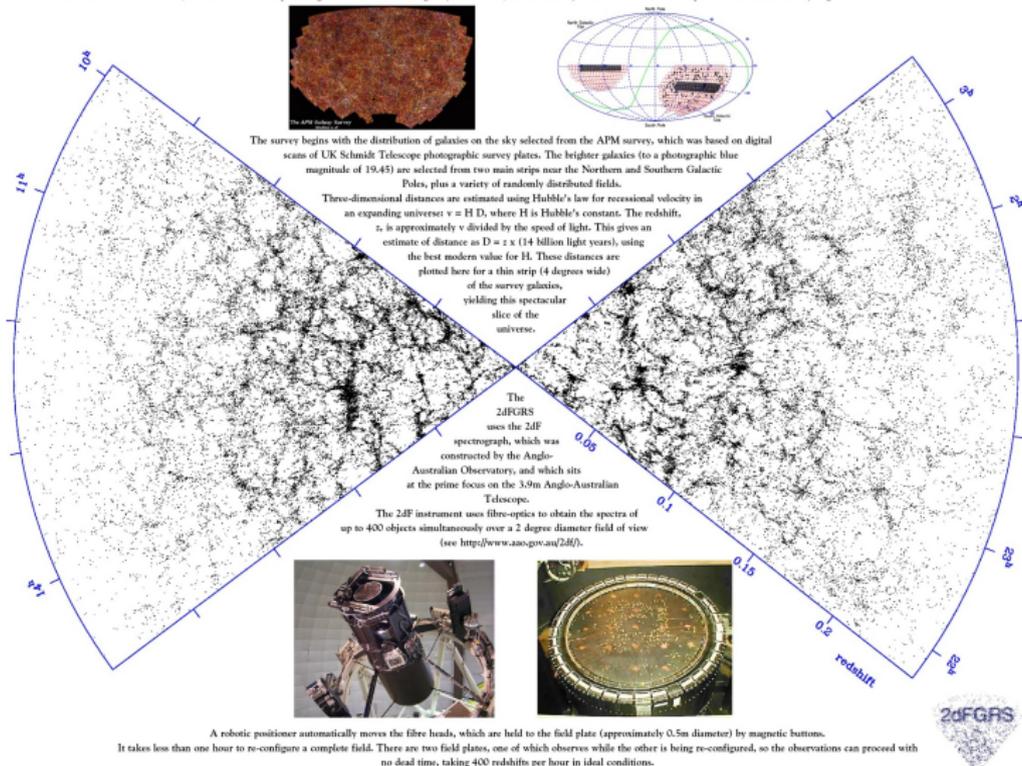


cf <http://atunivers.free.fr/>

# Carte de l'univers (observation)

## Mapping The Universe

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



© Mark Stinson, UATC, Royal Observatory, Edinburgh

# 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

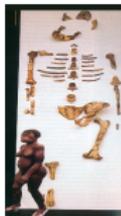
28 décembre



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

# Le modèle du Big-Bang

- Les trois piliers du big-bang
- Relativité Générale
- Histoire de l'Univers
- Inflation

# Les "trois piliers" du Big-Bang

Trois observations :

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

# Les "trois piliers" du Big-Bang

Trois observations :

- 1 "Récession" des galaxies lointaines (Univers en expansion)
  - ▶ Les galaxies lointaines s'"éloignent" de nous
  - ▶ Plus elles sont loin, plus elles s'"éloignent" vite
  - ▶  $\Rightarrow$  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 ?
  - ▶  $\Rightarrow$  fusion thermonucléaire de l'Hydrogène dans une phase primordiale dense et chaude

# Les "trois piliers" du Big-Bang

Trois observations :

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

# Les "trois piliers" du Big-Bang

Trois observations :

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

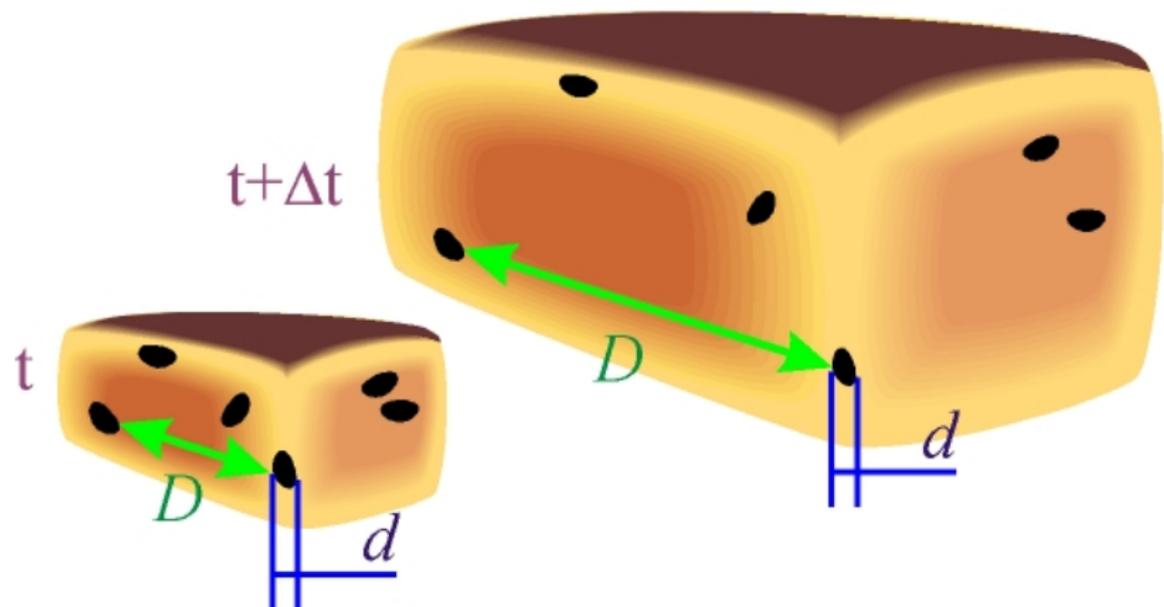
⇒ Il y a eu une "explosion" ? ...

# Le Big Bang



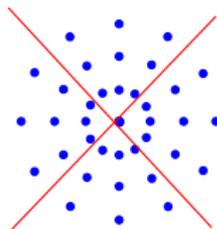
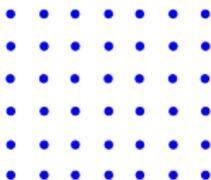
Quoi, c'est ça le Big-Bang? (S. Harris)

# Une dilatation d'échelle



# Principes de base

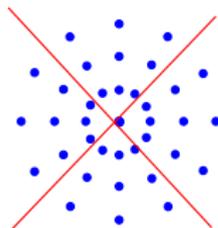
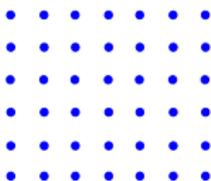
## 1 L'univers est homogène



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

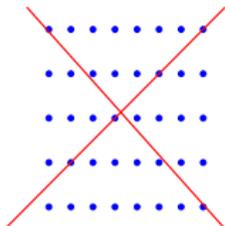
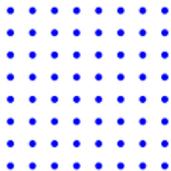
# Principes de base

## 1 L'univers est homogène



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

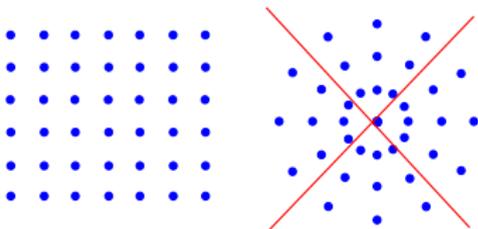
## 2 L'univers est isotrope



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

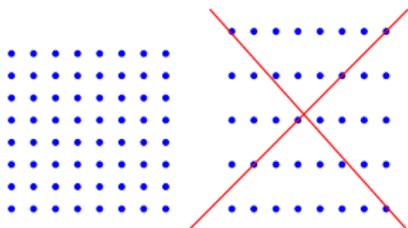
# Principes de base

## 1 L'univers est homogène



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

## 2 L'univers est isotrope



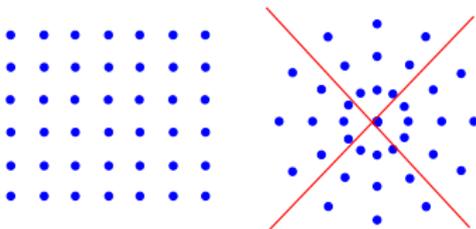
Même "aspect" dans toutes les directions  
Ex.: sources distantes, température du CMB

## 3 L'univers est en expansion

## 4 (nous sommes là $\Rightarrow$ "principe" anthropique)

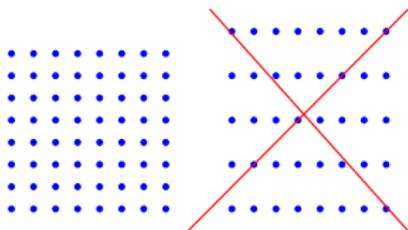
# Principes de base

## 1 L'univers est homogène



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

## 2 L'univers est isotrope



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

## 3 L'univers est en expansion

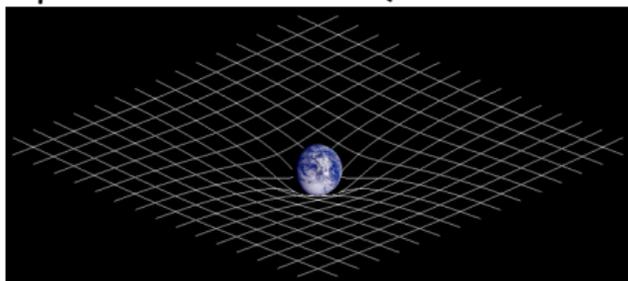
## 4 (nous sommes là $\Rightarrow$ "principe" anthropique)

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

# Cadre général

Recette pour un bon univers :

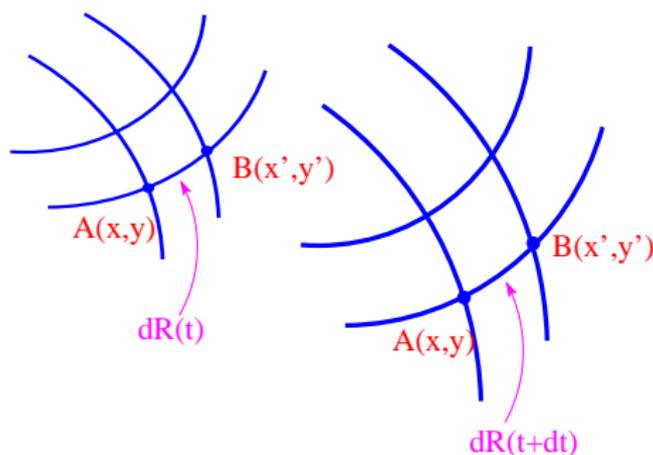
- 1 **Relativité générale** (Einstein ~ 1917) :
  - ▶ description **géométrique** de l'univers ("métrique")
  - ▶ équations d'évolution (dites "d'Einstein")



- 2 **Thermodynamique & Mécanique quantique** (+Physique Nucléaire et des Particules) → comportement des composants ("équation d'état")
- 3 ... cuire au four (le temps de résoudre les équations ?)

# Géométrie & facteur d'échelle

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



$R(t) :=$  Facteur d'échelle

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

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

Variations de  $R(t) \leftrightarrow$  expansion

# Conséquence (1) : loi de Hubble

Localement : géométrie euclidienne (habituelle)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## Conséquence(2) : "redshift" cosmologique

La distance comobile ( $d$ ) reste constante  $\Rightarrow$

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

Conséquence :

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

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

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

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

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

## Conséquence(3) : dilatation des temps

Soit deux pulses lumineux séparés par  $\Delta t$  (petit  $\Rightarrow$  expansion négligeable dans cet intervalle)

séparation spatiale  $D = c\Delta t(t_{emis.})$

Intervalle entre leur réception (loin/"plus tard"  $\Rightarrow$  expansion entre  $t_{emis.}$  et  $t_{recep.}$  non négligeable) ?

Séparation spatiale entre les deux impulsions :

$D(t_{recep.}) = c\Delta t(t_{recep.})$  ( $c$  est constante)

Et :  $D(t_{recep.}) = D(t_{emis.}) \frac{R(t_{recep.})}{R(t_{emis.})}$  (expansion d'échelle)

Donc :

$$\Delta t(t_{recep.}) = \Delta t(t_{emis.}) \frac{R(t_{recep.})}{R(t_{emis.})}$$

la durée d'un phénomène transitoire "distant" semble allongée observé p.ex. avec les variations lumineuses des SNe!

# Géométries possibles de l'univers

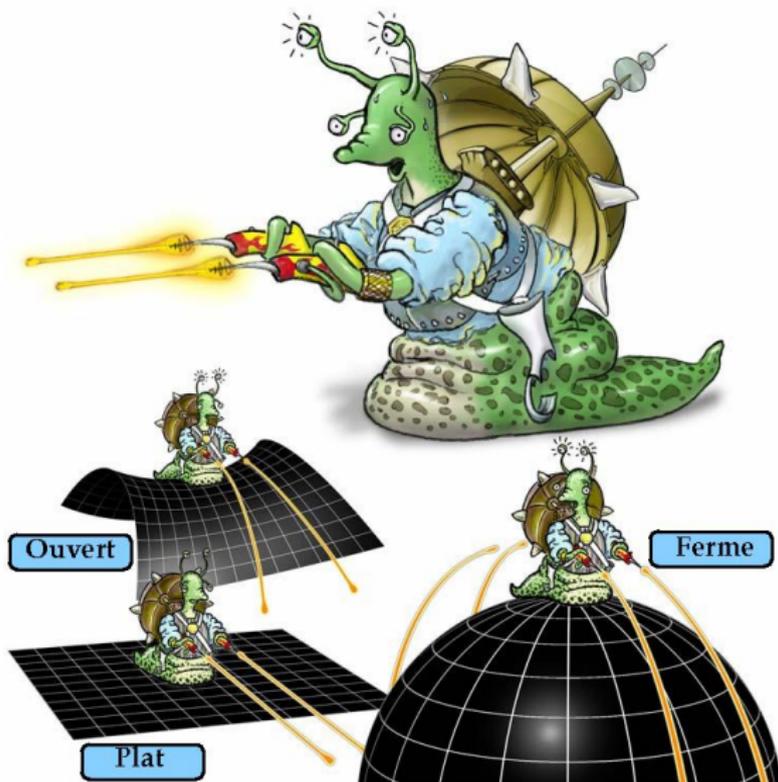
3 familles d'espaces homogènes & isotropes (indexées par  $k$ )  
A 2 dimensions spatiales (+ le temps) :

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

**géométrie locale sur ces surfaces**  $\leftrightarrow$  **structure globale**

Mêmes catégories à 3 dimensions spatiales

# Géométrie(s) de l'univers



# Densité critique

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

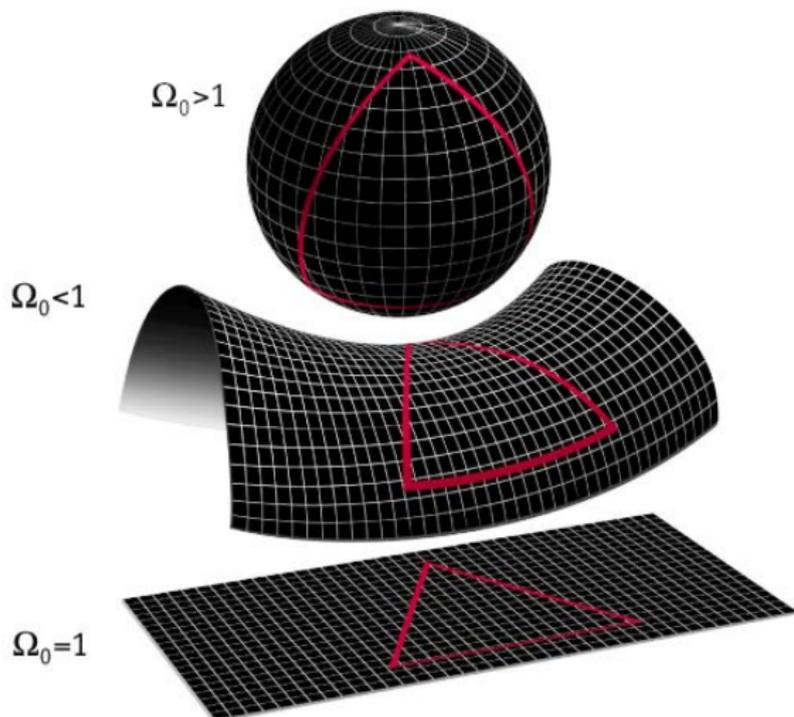
- **géométrie (et son évolution) (macroscopique)**
- **densité(s) d'énergie(s) (microscopique)**

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

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

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

# Géométrie(s) de l'univers (bis)



MAP990006

# L'équation fondamentale de la RG

ou équation d'Einstein :

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

# L'équation fondamentale de la RG

ou équation d'Einstein :

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

tenseur d'Einstein  
fonction de la métrique

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

# L'équation fondamentale de la RG

ou équation d'Einstein :

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

tenseur d'Einstein  
fonction de la métrique

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

Impulsion-  
énergie

# L'équation fondamentale de la RG

ou équation d'Einstein :

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

tenseur d'Einstein  
fonction de la métrique

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

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

Impulsion-  
énergie

Constante  
cosmologique

# L'équation de Friedman

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

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

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

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

En posant :

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

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

# Equation d'état

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

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

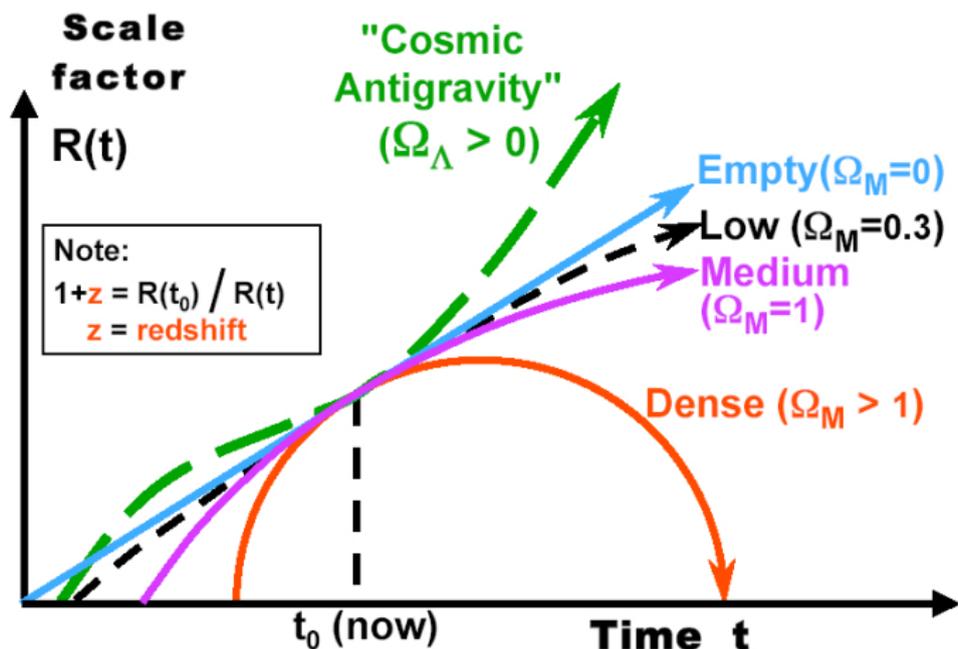
- **"Rayonnement"** (photons, particules de haute énergie / température) : "dilution" par l'expansion + **redshift**

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

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

$$\rho_{vac} = cste$$

# Facteur d'échelle



# Cosmologie "classique"

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

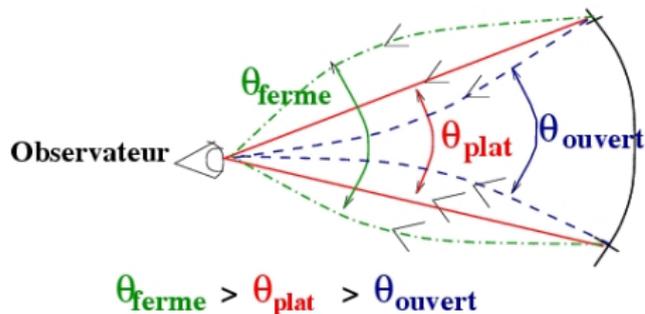
$\rightarrow$  tests cosmologiques "classiques" :

- **luminosité apparente de "chandelles standard"** :  
luminosité absolue (intrinsèque)  $\mathcal{L}$  connue  $\Rightarrow$  flux apparent  $\Phi \propto 1/R^2$   
**Distance de luminosité**  $d_L^2 = \frac{\mathcal{L}}{4\pi\Phi}$
- Taille apparente de "règles standard" ...
- Comptage de galaxies (variation de l'élément de volume)
- ...

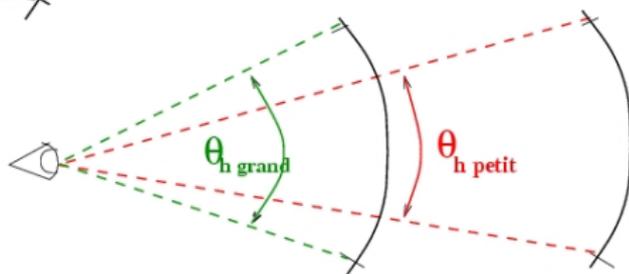
Age, taille de l'univers  $\Rightarrow$  cohérence du modèle

# Géométrie et tailles angulaire

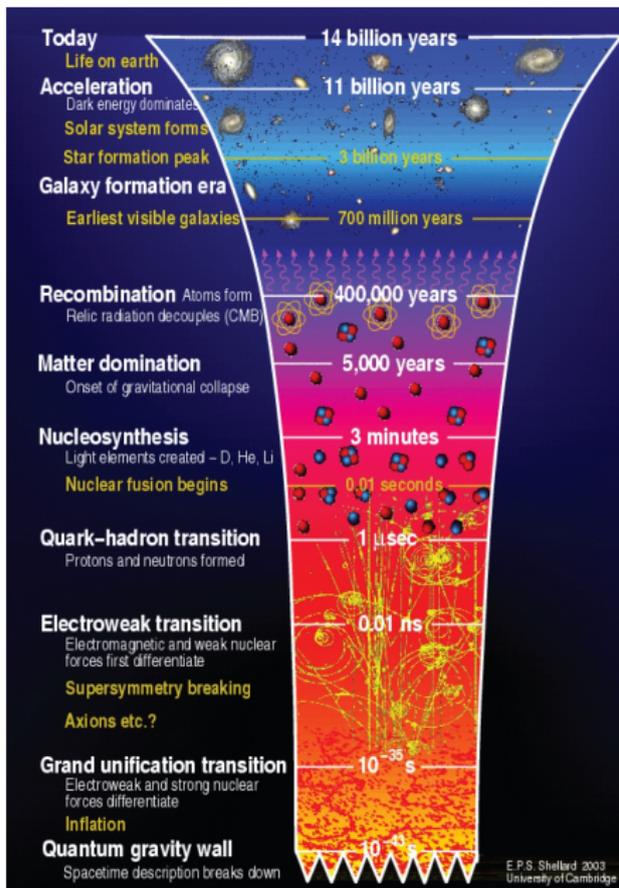
## Geometrie de l'Univers et taille angulaire



## Effet de l'expansion



D'après C. Lineweaver



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

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

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

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

(1) inflation

(0) état initial (??)

# Problèmes du modèle du Big-Bang

- **Platitude** : eq. de Friedman quand  $R \rightarrow 0$  : le terme en  $\rho$  (radiation) domine  $\Rightarrow \Omega \rightarrow 1$   
 $\Omega_{tot} \sim .01 - 1$  "maintenant"  $\Rightarrow \Omega_{tot} \sim 1 \pm 10^{-16}$  pendant la BBN
- **Scories** : Les extensions au MS de la physique des particules  $\Rightarrow$  existences de monopoles mgn, gravitinos (particules très exotiques) **pas observées**
- **Horizon** : CMB **très uniforme** sur des régions spatiales *non causales*
- **Formation des structures** : Quelle est leur origine (cf ci-dessus ... & le dernier cours) ?
- **Antimatière?** : Pas d'antimatière observée ...

Une (des) réponse à (presque) toutes ces questions : **l'inflation**

# L'inflation

Période (brève) d'expansion **exponentielle** de l'univers primordial

Origine : une "constante cosmologique" domine - brièvement -  
l'évolution de l'univers  $\Rightarrow$  expansion exponentielle

en  $\sim 10^{-32}$  s, facteur d'échelle  $x \sim 10^{80}$

- "dilution" des scories
- Expansion de l'horizon  $\rightarrow$  plus de pb
- $\Rightarrow \Omega$  exponentiellement proche de 1  $\Rightarrow$  platitude OK
- fluctuations quantiques  $\Rightarrow$  anisotropies spatiales = "graines" des (grandes) structures

"cste(s) cosmologique(s)" "naturelle" ds **transition de phase d'un champ scalaire** associé aux GUT / supercordes / ??

**Quelques signatures possibles** (structures, CMB)

# Matière(s) noire(s)

- Motivations
- Matière noire non-baryonique
  - ▶ Recherche(s) directe(s) (WIMPS)
  - ▶ Recherche(s) indirecte(s)
- Matière noire baryonique

# Motivations

- Amas de galaxies (dynamique, émission X, effet S-Z sur le CMB, **lentilles gravitationnelles**)
- Anisotropies du CMB

⇒  $\Omega_m \sim 0.25$  (densité de la matière)

- **Nucléosynthèse primordiale**
- Anisotropies du CMB
- ...

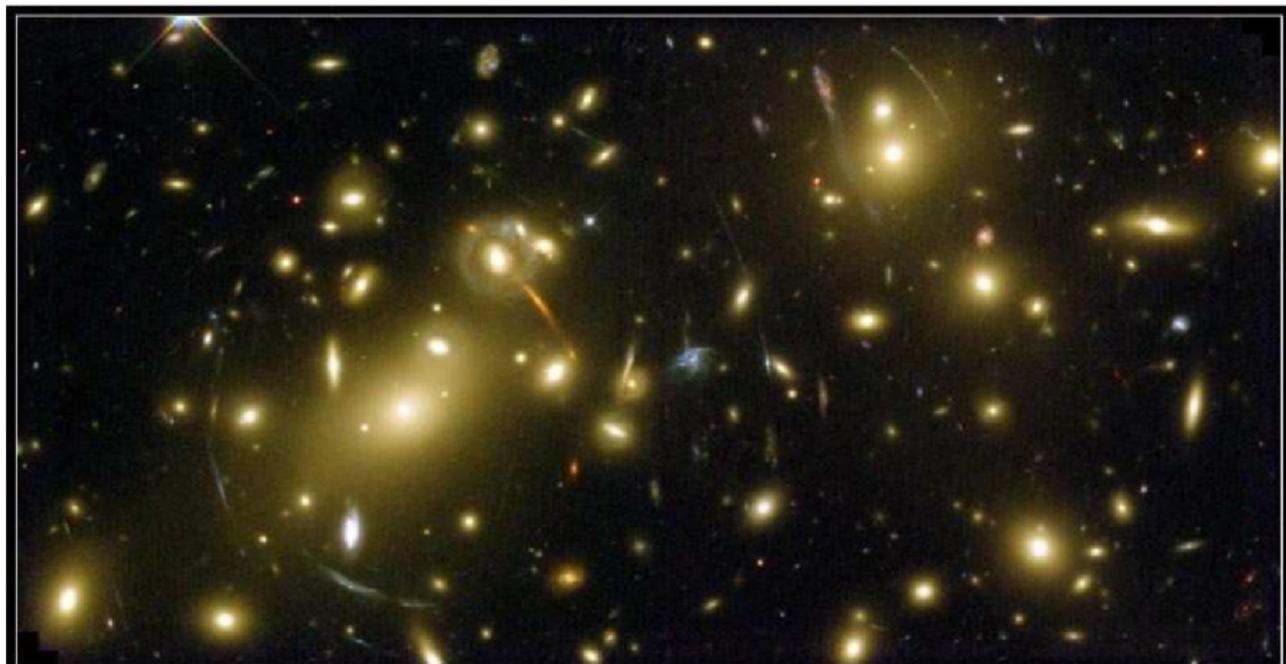
⇒  $\Omega_b \sim 0.05$  (densité baryonique cad  $p, n$ )

Pour la matière "visible" (rayonnements) :  $\Omega_\star \sim 0.001$

**Deux problèmes de "masse cachée"**

$$\Omega_\star \leftarrow ? \rightarrow \Omega_b \leftarrow ? \rightarrow \Omega_m$$

# Lentilles gravitationnelles (1)

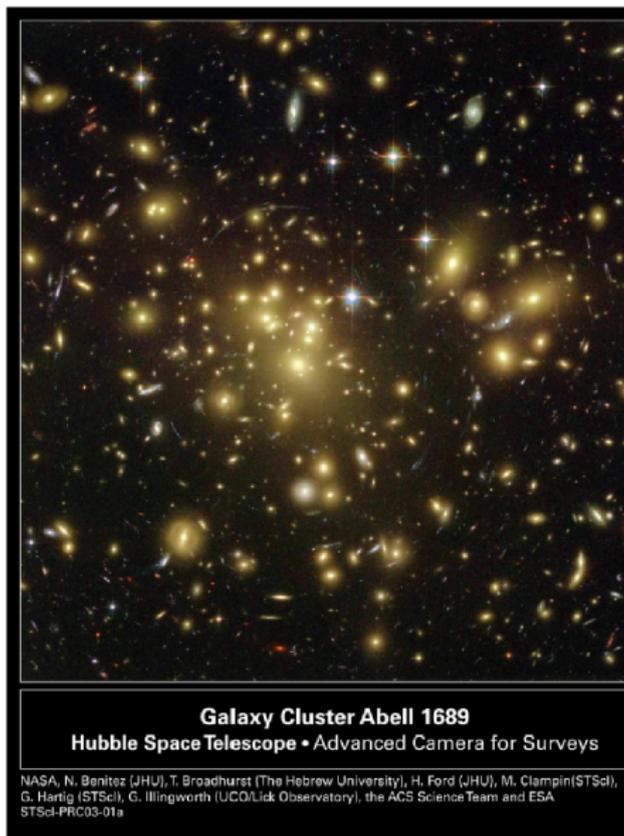


**Galaxy Cluster Abell 2218**

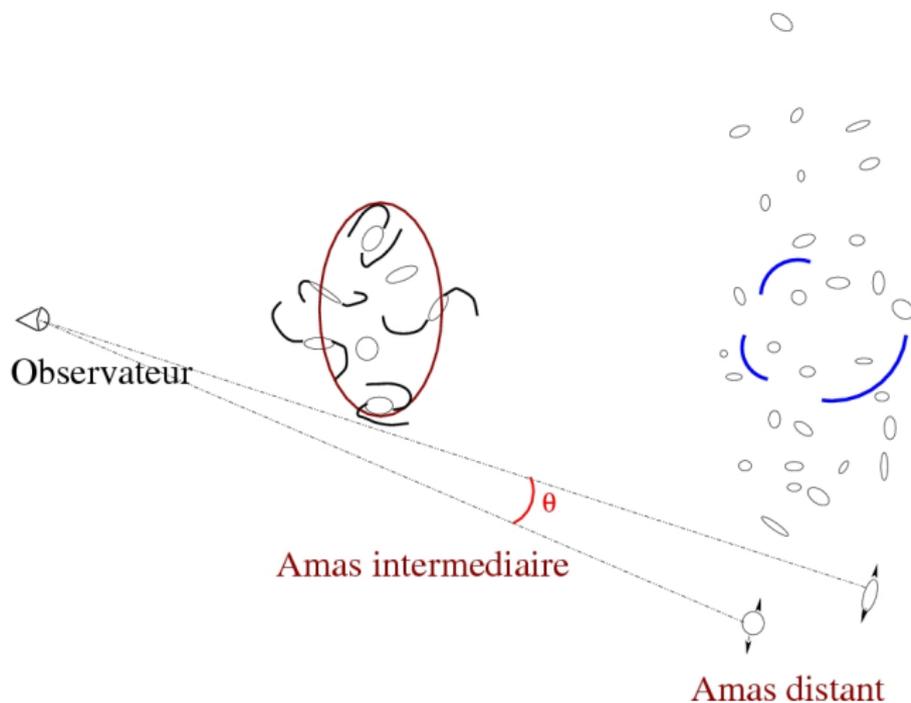
**HST • WFPC2**

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI) • STScI-PRC00-08

# Lentilles gravitationnelles (2)



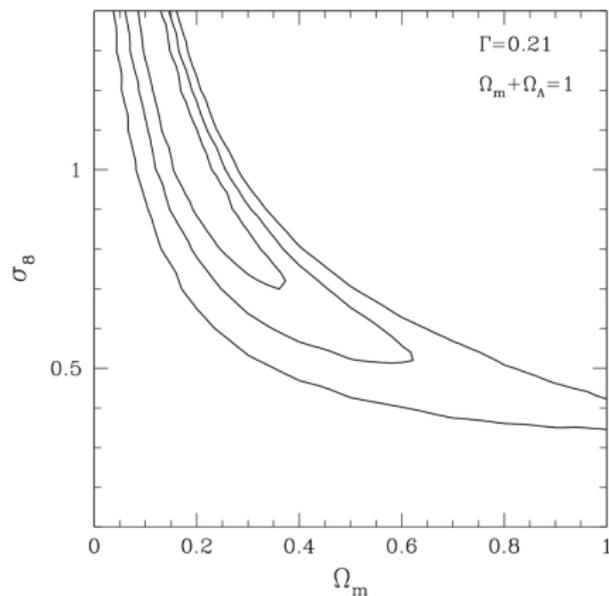
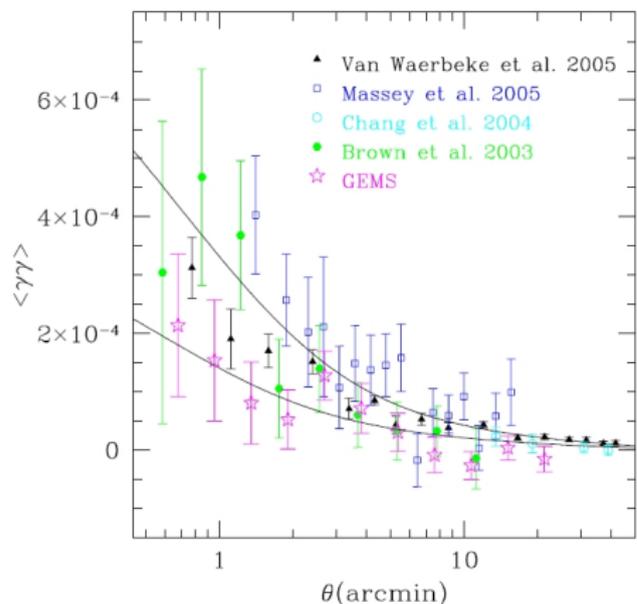
# Weak lensing



Statistique des allongements (formes)  $\leftrightarrow$  répartition de masse  $\Rightarrow$  contrainte sur  $\sigma_8, \Omega_m$

Etudes des arcs  $\rightarrow$  masse totale  $\rightarrow \Omega_m$

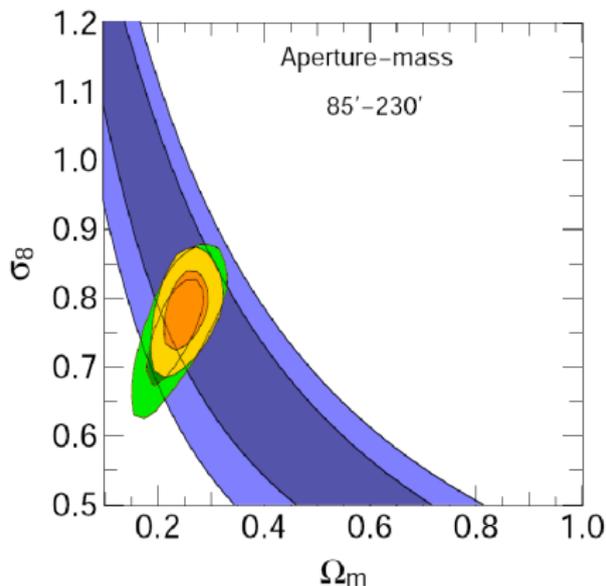
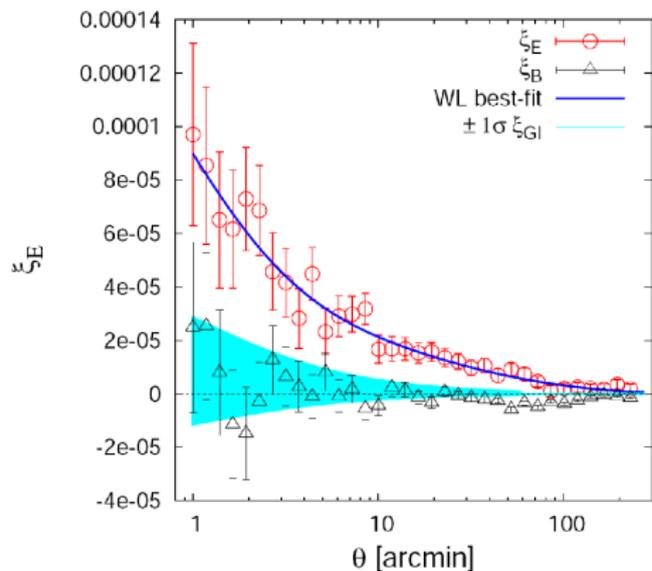
# Contraintes extraites du WL



Y. Mellier astro-ph/0206245 ; Heymans et al astro-ph/0411324  
Fu et al (CFHLS) arXiv:0712.0884 ;

$\sigma_8$  : paramètre de la distribution de la matière (rms de  $\delta\rho/\rho$  ds cube de 8Mpc)

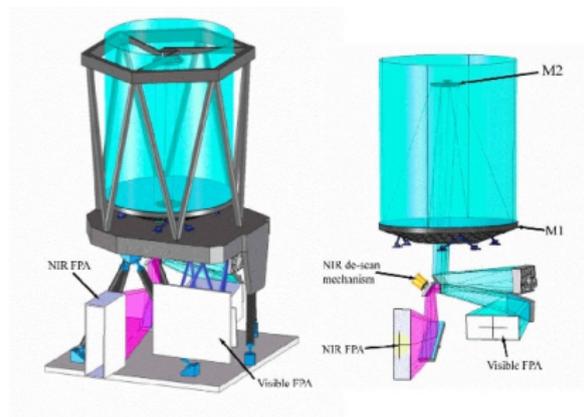
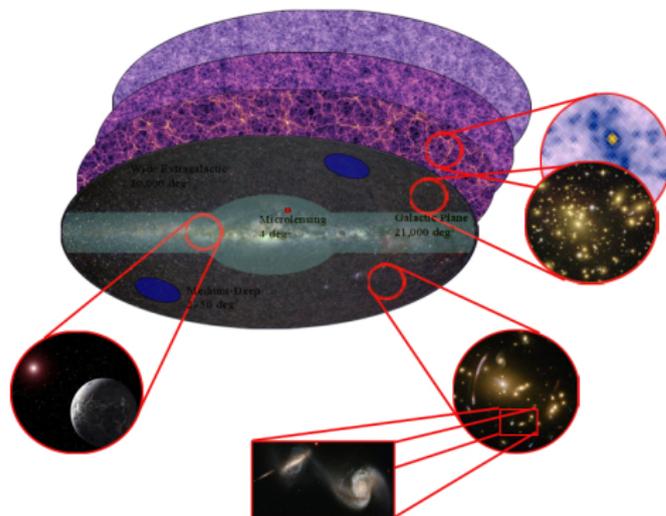
# Contraintes extraites du WL



Y. Mellier astro-ph/0206245 ; Heymans et al astro-ph/0411324  
Fu et al (CFHLS) arXiv:0712.0884 ;

$\sigma_8$  : paramètre de la distribution de la matière (rms de  $\delta\rho/\rho$  ds cube de 8Mpc)

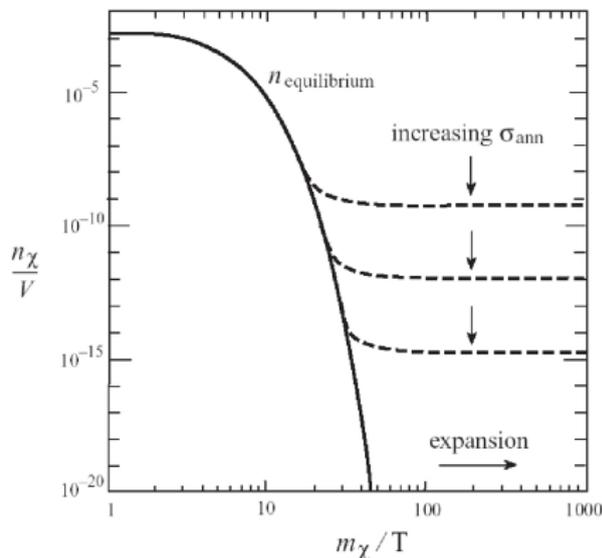
# Futur du WL : DUNE



Telescope (1.2m) + imagerie visible+IR ( $\sim 0.5 \text{deg}^2$  chaque)

# Le miracle des WIMPS

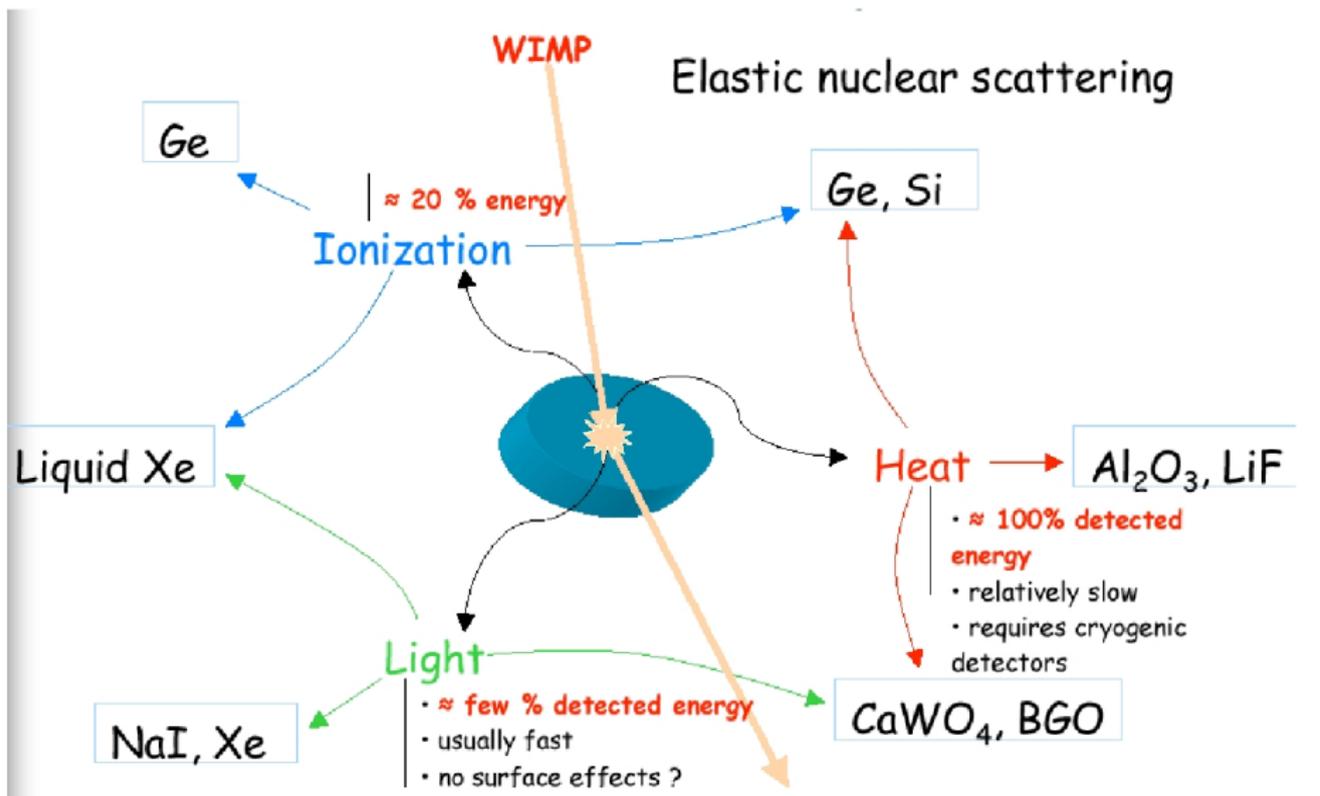
- univers primordial : équilibre thermique  $X\bar{X} \leftrightarrow Y\bar{Y}$
- nombre de particules : solution eq. Boltzman
- lors de l'expansion :  $T \searrow \Rightarrow$  libre parcours moyen  $\nearrow$
- quand libre parcours moyen  $\geq$  taille de l'univers  $\Rightarrow$  "gel" : abondance figée
- pour masses et cstes de couplages  $\sim$  int. faible :  $\Omega_\chi = .01 - 1$  !
- bcp de candidats pour  $\chi$  (e.g. neutralino SUSY) : recherche complémentaire de LHC/ILC



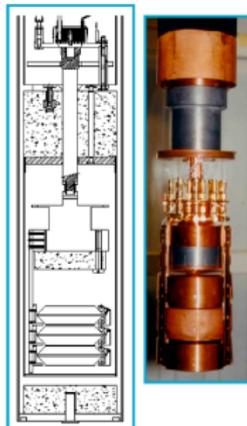
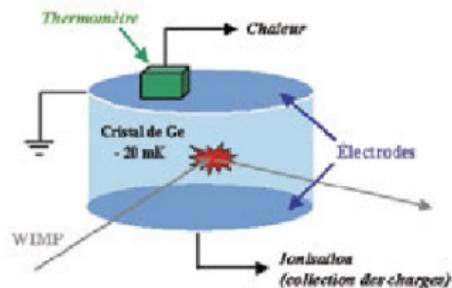
# Detections?

- $\Omega_{DM} \sim 0.2 \Rightarrow \rho_{local} \sim 0.3 - 0.5 \text{ GeV/cm}^3$
- **Directe** : interaction élastique  $\chi + N \rightarrow \chi + N$   
 $\sigma \approx \sigma_{faible} \Rightarrow$  rare (**1 evt/t/an**)!  
bdf: radioactivité, R.C.  
**croisement de signatures**  
Nombreuses expériences & techniques (cibles)
- **Indirecte** : annihilations de WIMP dans  
Terre/Soleil/Galaxie(s)  $\rightarrow$  signatures possibles dans les  
détecteurs de R.C. (Antares, AMS, GLAST, HESS, ...)  
**bdf : sources astro !**

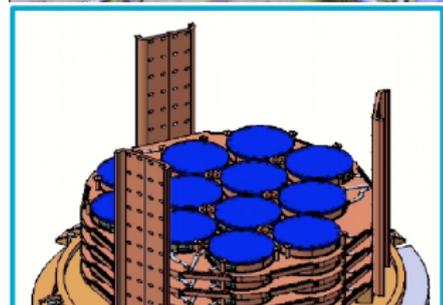
# Signaux des WIMPs



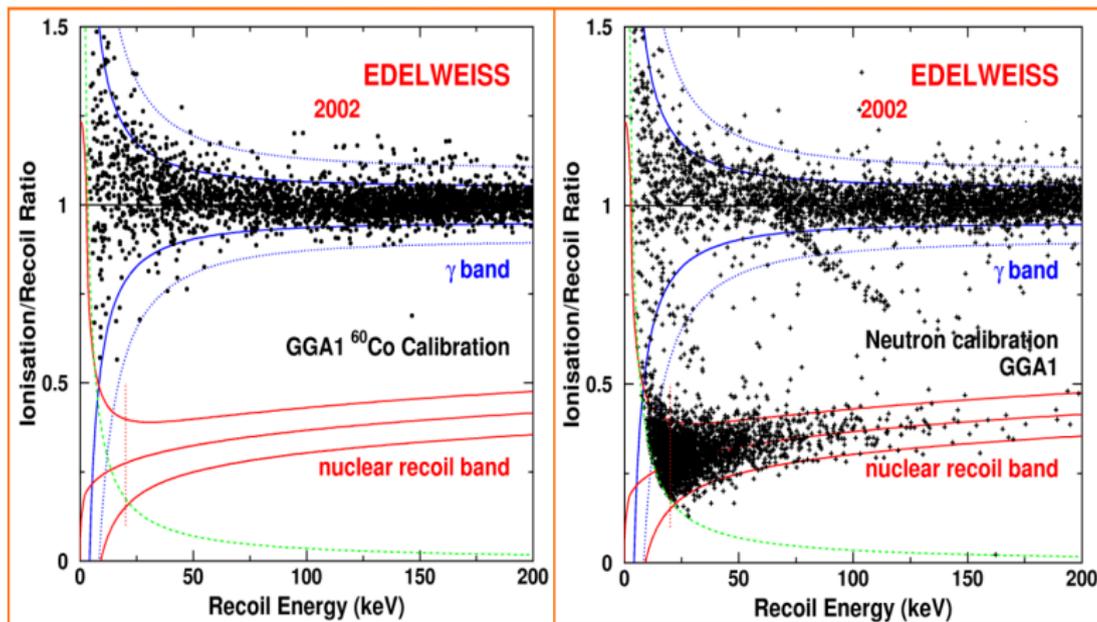
# Edelweiss I et II



- contamination ( $^{210}\text{Pb}$  radioactif  $\Rightarrow$  evts "de surface" 0.3 evt/kg/j)
- blindage contre les n



# Edelweiss : Calibrations

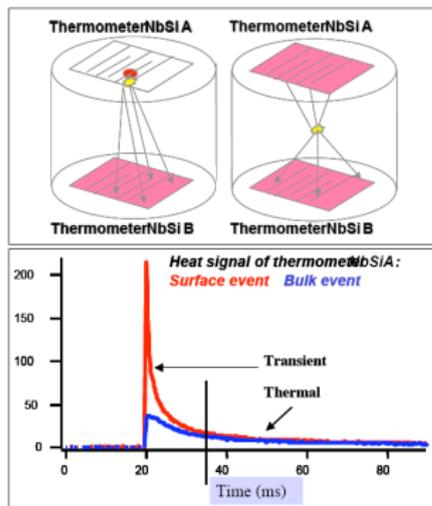
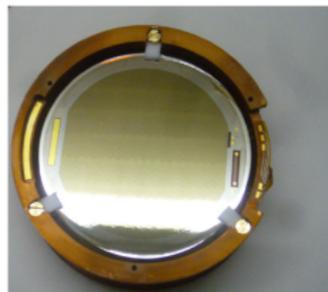


A. Juillard (CSNSM) - IAP 2008

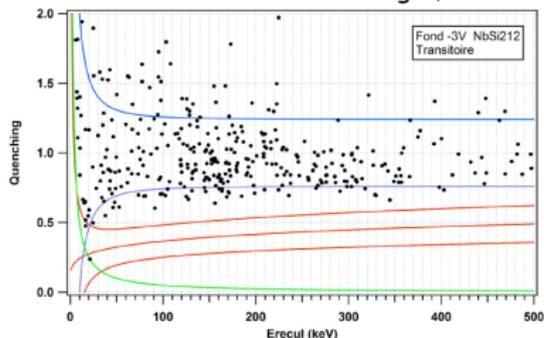
# Nouveaux détecteurs (1)

## NbSi detectors

- Detectors developed at CSNSM : identify surface events = athermal phonon measurement with Nb-Si films « replacing » the NTDs
- Surface event rejection ok, some problems in 2007 with film contacts / leak currents



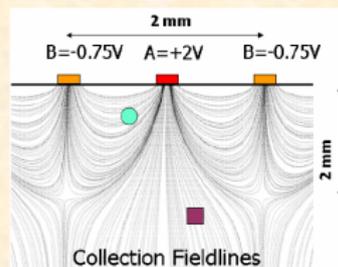
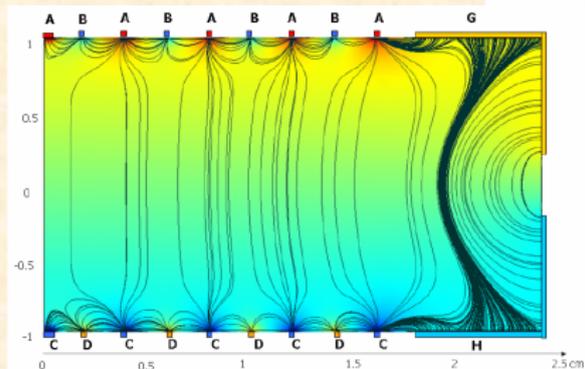
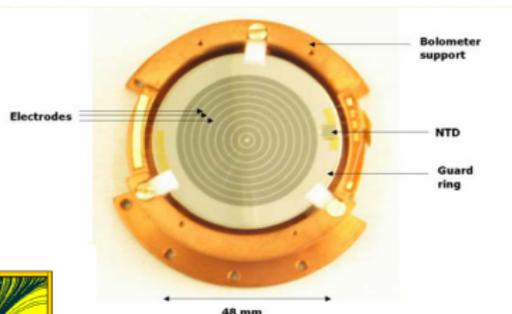
1.5 fiducial kg.d, 2007



# Nouveaux détecteurs (2)

## 1<sup>er</sup> Proto ID201 (juin 2007):

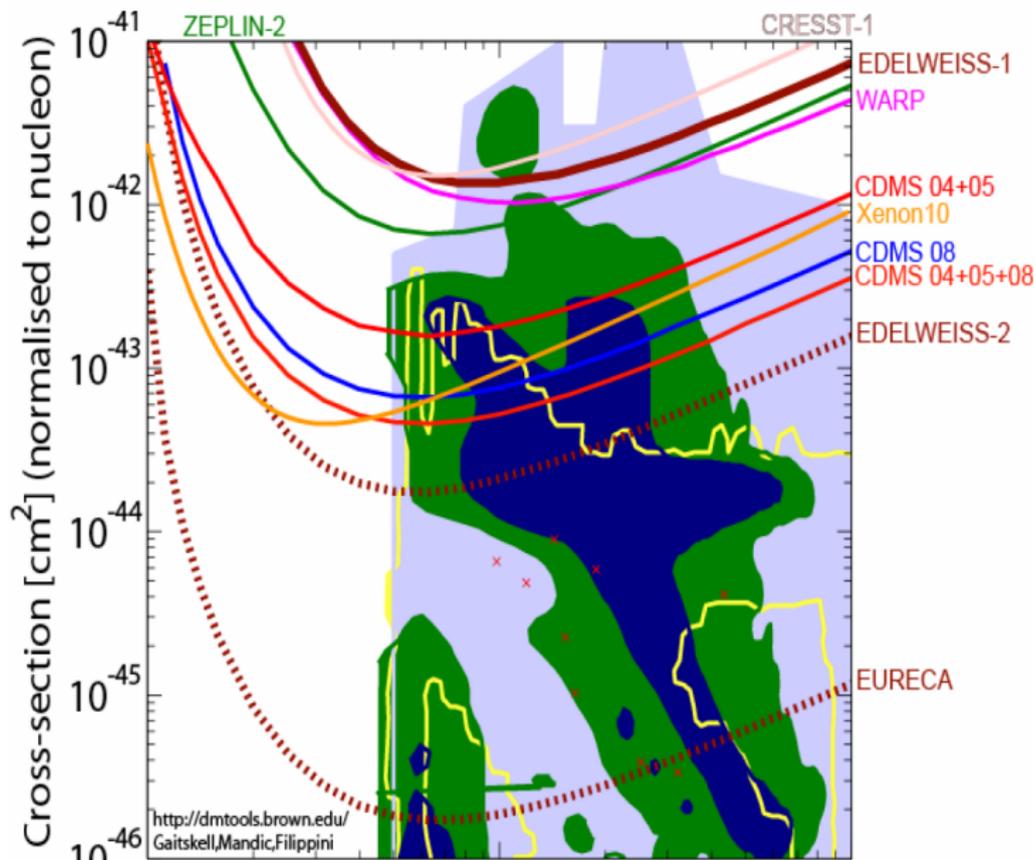
- 193g crystal
- Germanium amorphous underlayer
- 6 ionisation channels
- 1 heat channel (NTD thermometer)



- Identification des événements de surface par utilisation des voies ionisation
- Application de champs électriques verticaux dans le volume et horizontaux en surface
- Toute collecte sur B ou D signe un evt de surface

A. Juillard (CSNSM) - IAP 2008

# Résultats vs prédictions (petite sélection)



# Détection indirecte

Par collisions élastiques  $\rightarrow$  WIMPS freinés

$\Rightarrow$  accumulation aux centres de la Terre, du Soleil, des galaxies

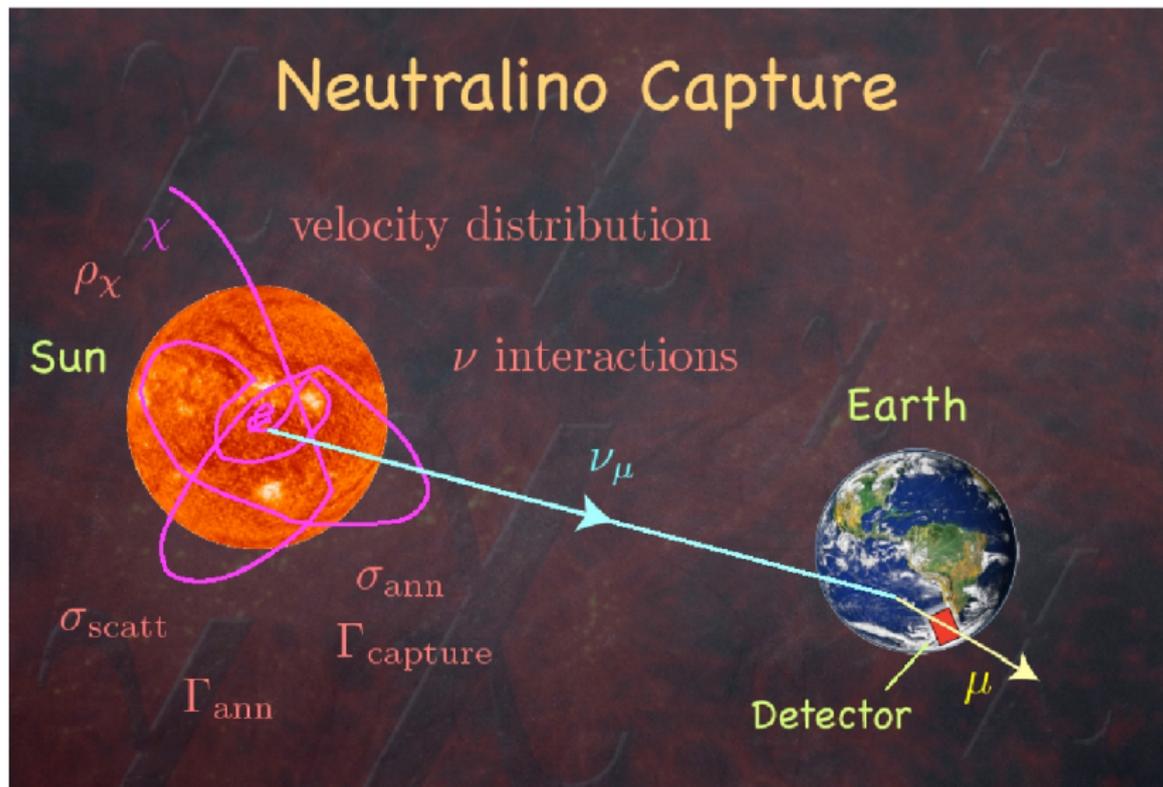
WIMP Majorana  $\Rightarrow$  annihilations  $\chi\chi \rightarrow p\bar{p}/q\bar{q}/e\bar{e}/\gamma\gamma/...$

Signatures :

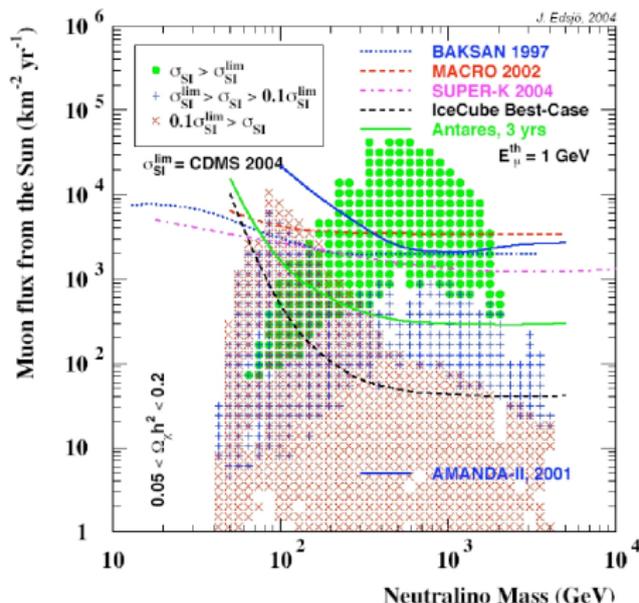
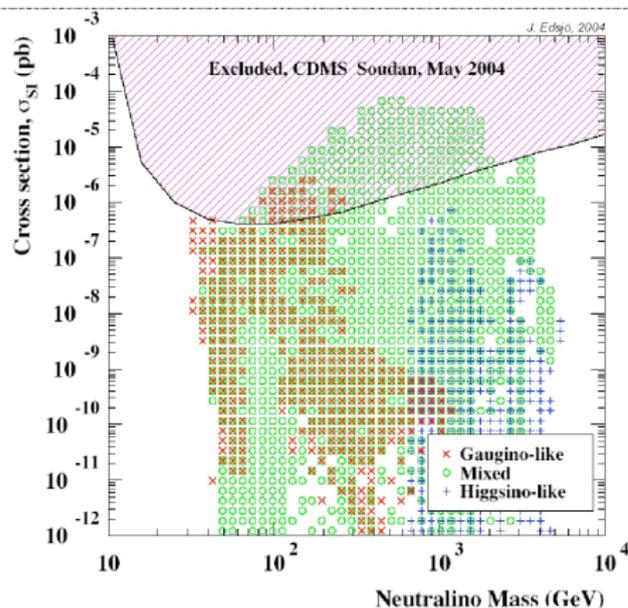
- $\nu_\mu$  : (Terre, Soleil, galaxie?)  $\rightarrow$  Antares
- $\gamma$  : raie ou flux en excès / sources (compliqué!)  $\rightarrow$  HESS, GLAST, ...
- antiparticules cosmiques : (distinction primaire/secondaire ?)  
 $\rightarrow$  AMS

approche complémentaire (et nécessaire) de la détection directe

## Neutralino Capture



# Résultats et perspectives



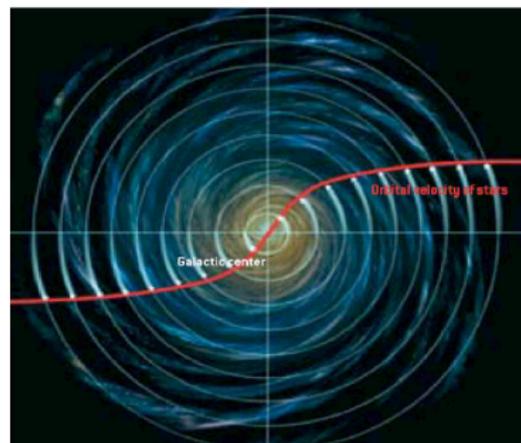
Domaine "intéressant" à portée de détecteur !  
Complémentaire aussi des recherches de NP au LHC !

# Matière (noire) baryonique

Peu de formes possibles :

- nuages moléculaires (froids)
- objets compacts sombres (**MACHOs**)

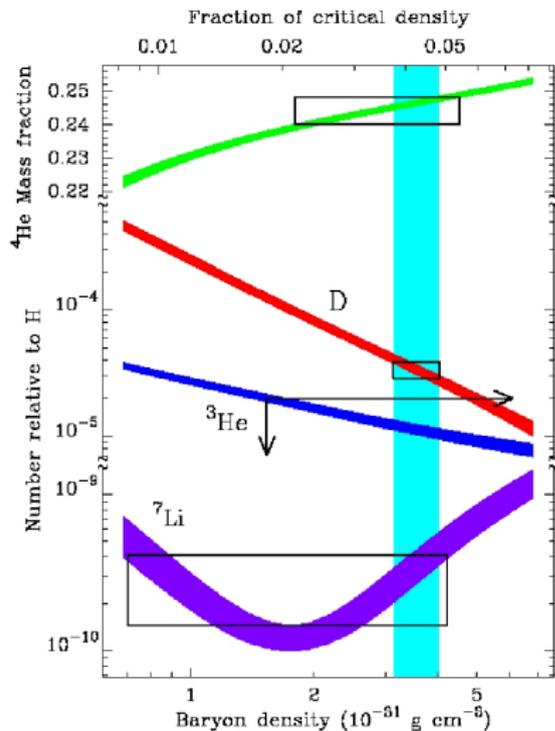
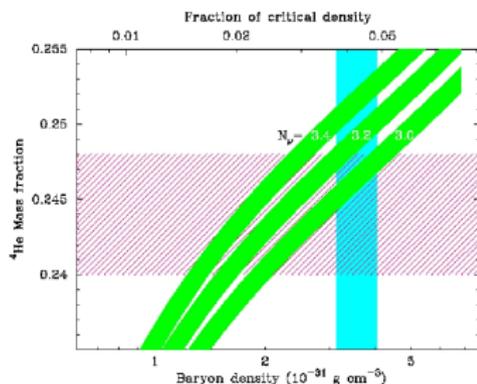
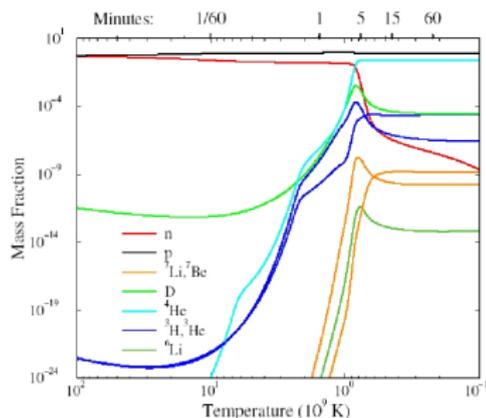
courbes de rotation des galaxies spirale (e.g. la notre!)  $\Rightarrow$   
existence de halos *galactiques* sombres



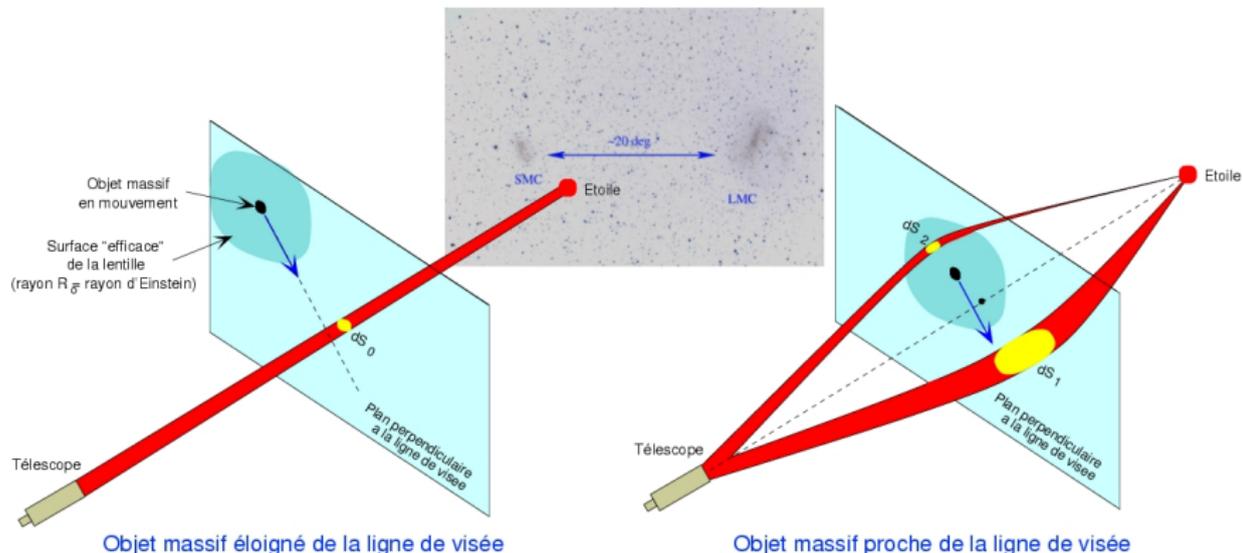
$$\text{Gravitation} \rightarrow v_{\text{rot}}^2(r) = \frac{GM(\leq r)}{r}$$
$$v(r) = \text{cste} \Rightarrow M(\leq r) = \frac{rv^2}{G} \propto r$$

$\rightarrow \exists$  matière cachée (baryonique?)

# Nucléosynthèse primordiale

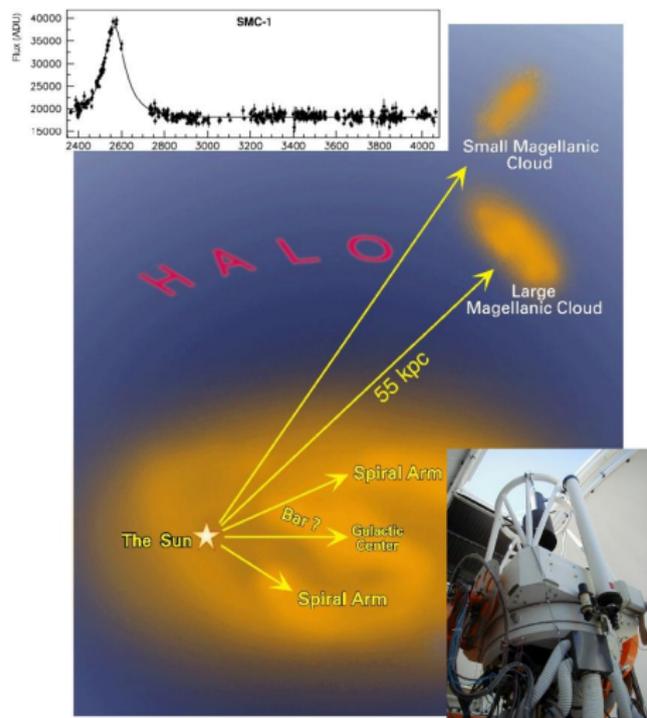


# L'effet de microlentille



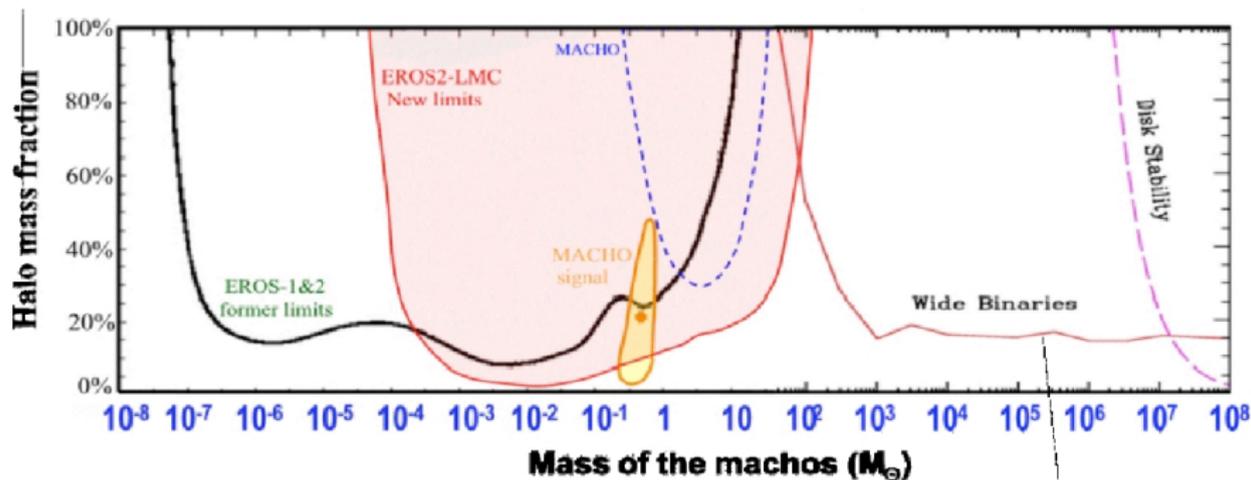
image(s) non résolue (séparation  $\lesssim 3 \cdot 10^{-6}$  deg) mais lentille mobile  
 $\Rightarrow$  variation temporelle de flux  
\* dans le LMC ; lentille ds halo : Proba  $\sim 10^{-6} \text{an}^{-1}$

# EROS-II



- IN2P3 - Dapnia - INSU
- Tel. de 1m dédié & automatisé à La Silla (ESO)
- 06/1996 → 02/2003
- Deux caméras  $2 \times 4$  CCD ( $1 \text{ deg}^2$ ) chacune
- divers programmes en alternance (ML, SN, ...)
- vers LMC/SMC 4 candidats  
~ 100 attendus si halo 100% MACHO ...

# Contraintes d'EROS-II



Yoo, Chaname and Gould [ApJ 601 (2004) 311]

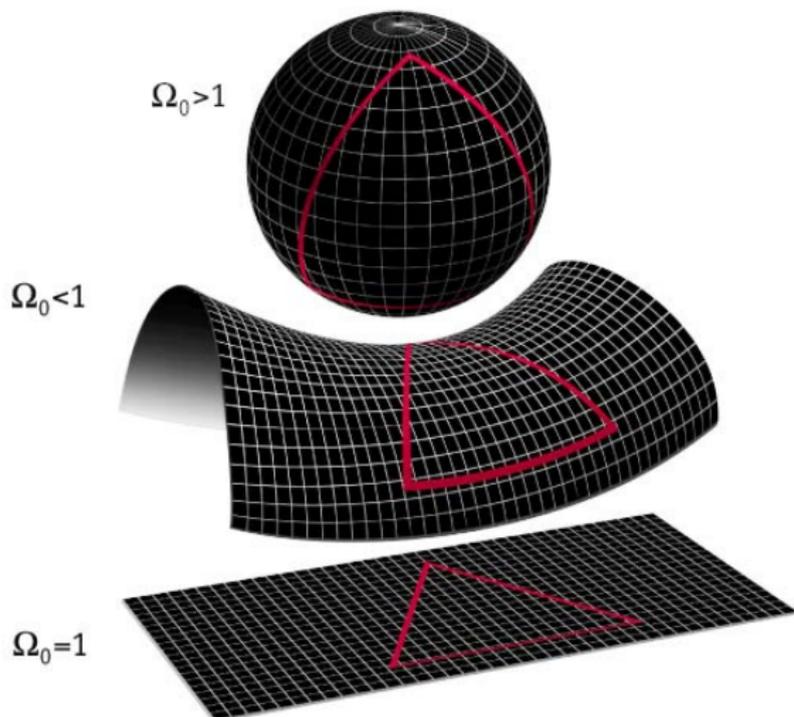
P. Tisserand Hanoi 2004

⇒ Plus beaucoup de place pour les MACHOs !

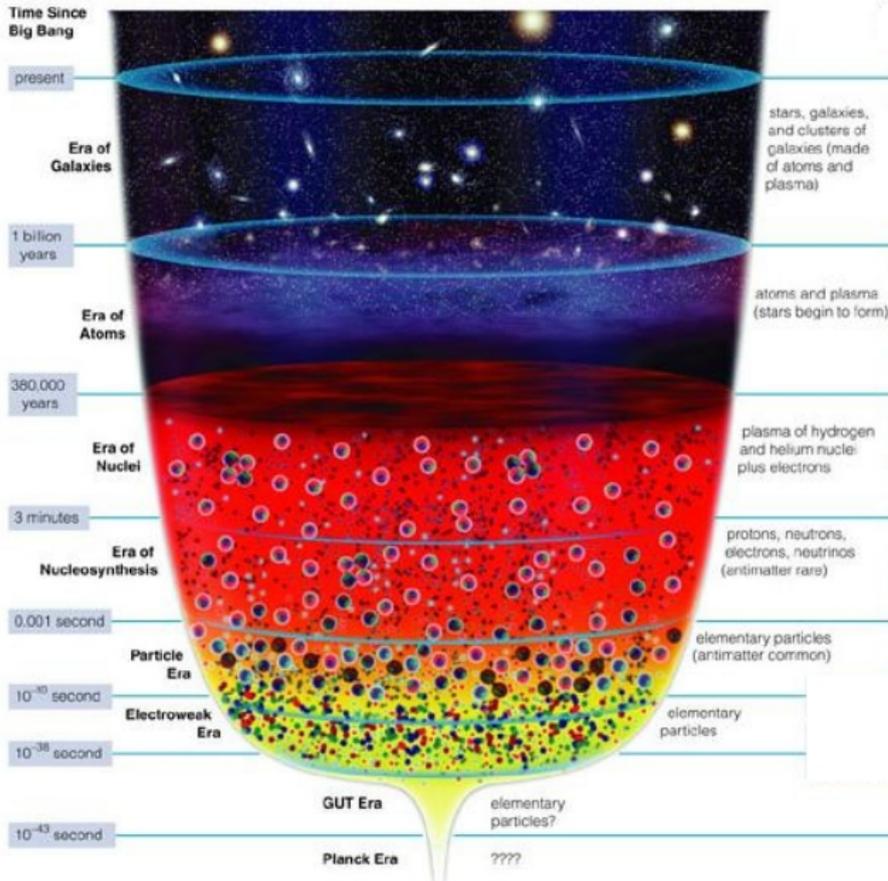
# Anisotropies du CMB

- Emission & caractéristiques du CMB
- Pourquoi des anisotropies ?
- Méthodes d'analyse
- Programme(s)
  - ▶ (Archeops)
  - ▶ Planck
- Développements récents

# Géométrie(s) de l'univers (rappel)



MAP990006



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

(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 (??)

- 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

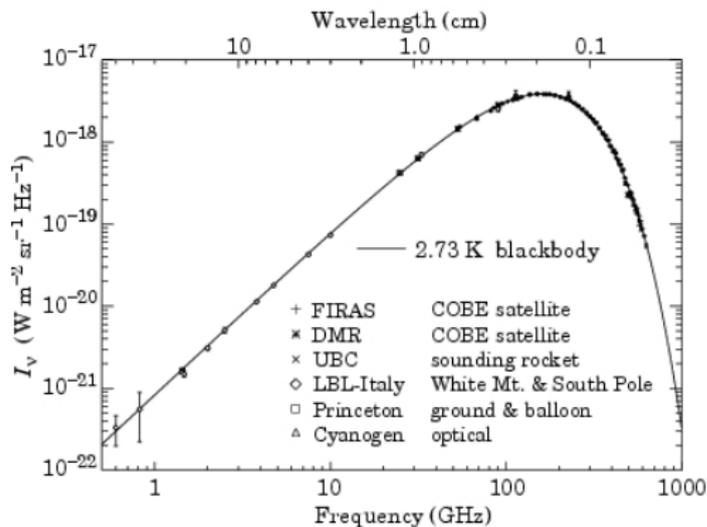
Robert Wilson



Arno Penzias

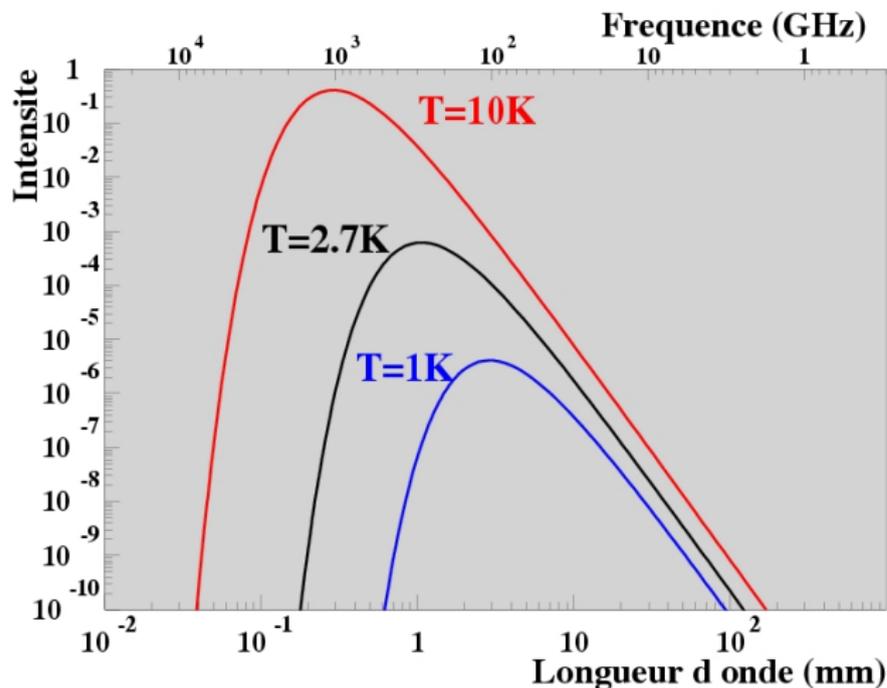
# Le CMB

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



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

# Spectre de corps noirs



M. Planck 1900

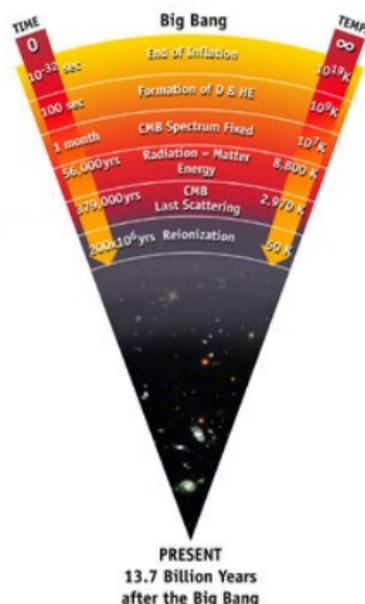
spectre à un seul param. :  $T$

pdt l'expansion :

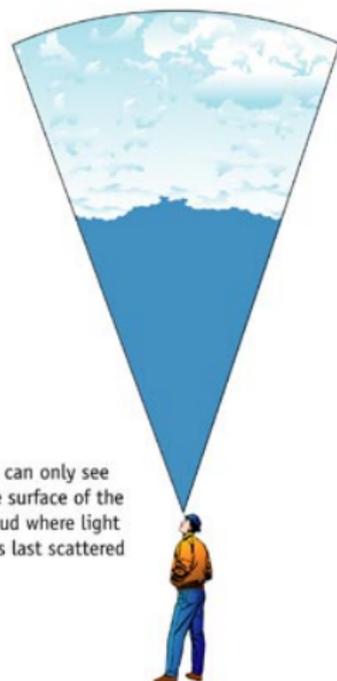
$$T(t) \rightarrow \frac{R(t_0)}{R(t)} T(t_0)$$

# Emission du CMB

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



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



# Des anisotropies dans le CMB !

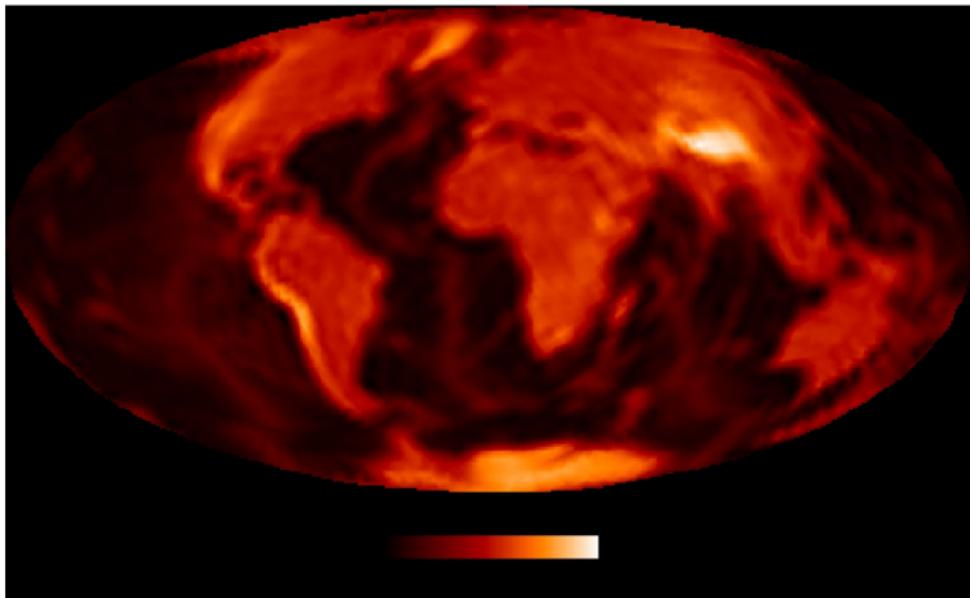
$T_{CMB}$  dans chaque direction  $\rightarrow$  carte du "ciel" (couleur  $\leftrightarrow$  T)



Le ciel nocturne (visible)

# Des anisotropies dans le CMB !

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

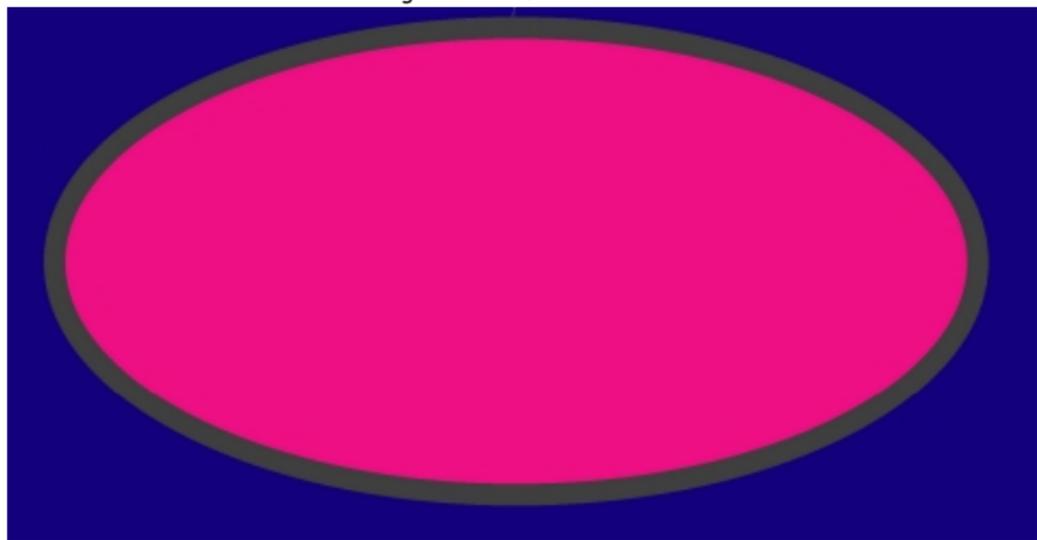


Représentation d'une sphère connue

# Des anisotropies dans le CMB !

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

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

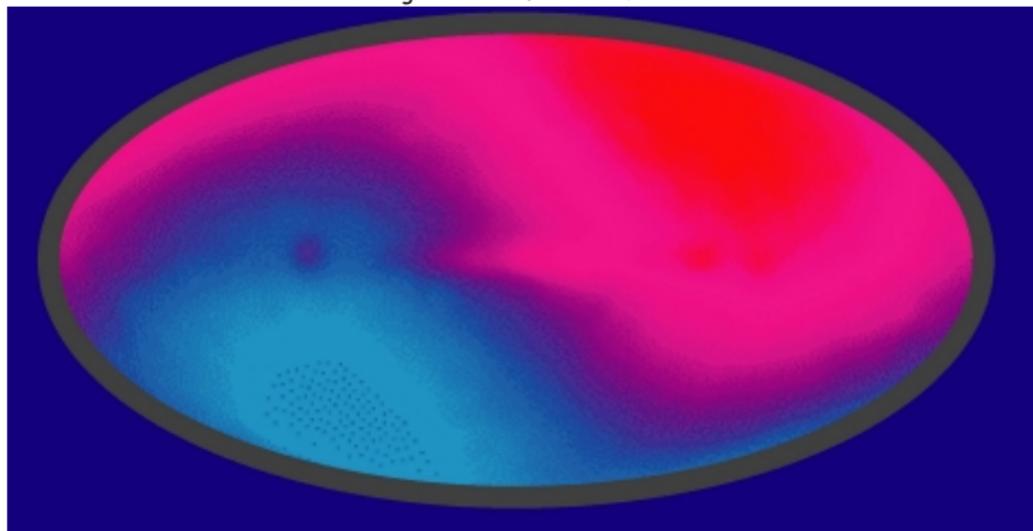


*CMB très uniforme (à 1/1000 près)*

# Des anisotropies dans le CMB !

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

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



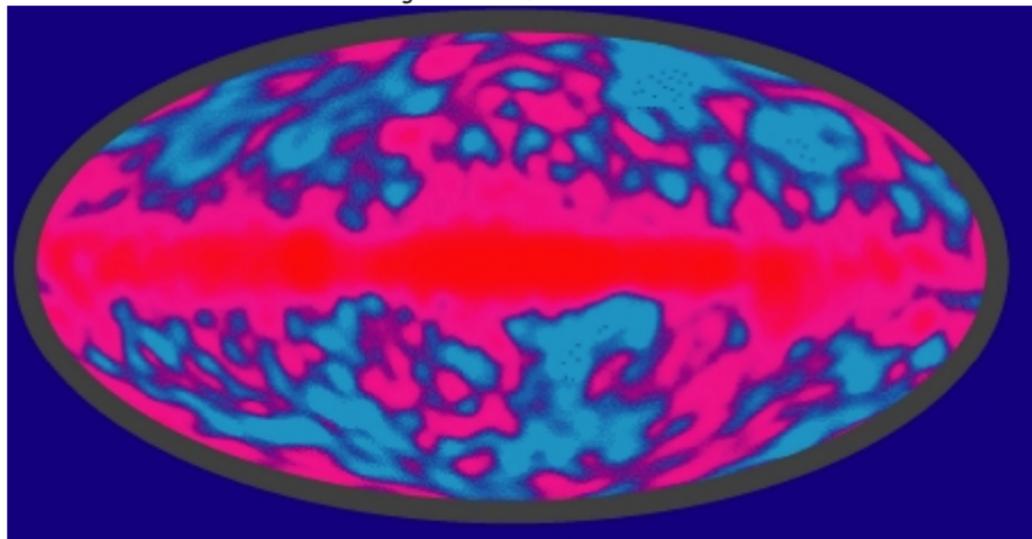
$$(\delta T/T \sim 10^{-3})$$

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

# Des anisotropies dans le CMB !

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

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

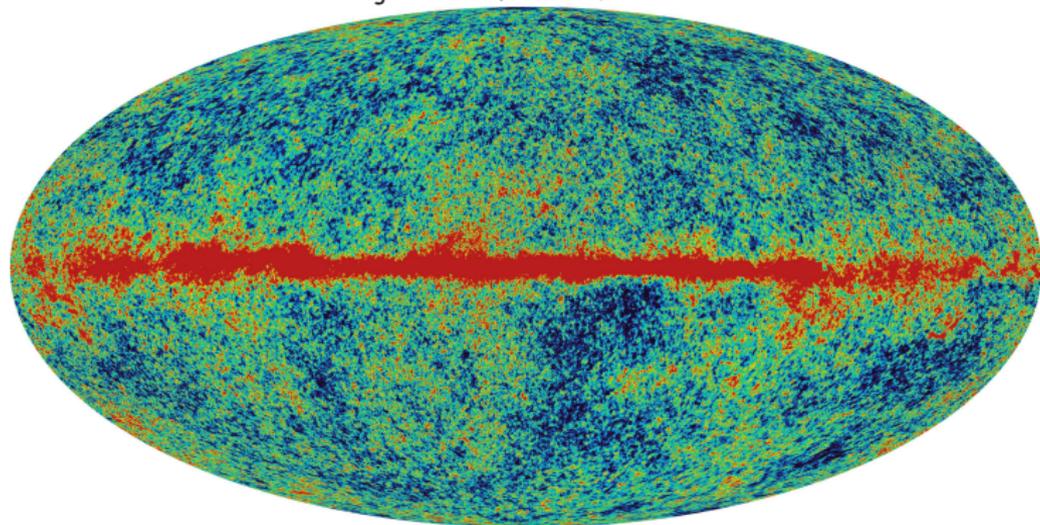


Fluctuations primordiales ( $\delta T/T \sim 10^{-5}$ ) + Galaxie (1/100000 près)  
COBE (1992)

# Des anisotropies dans le CMB !

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

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

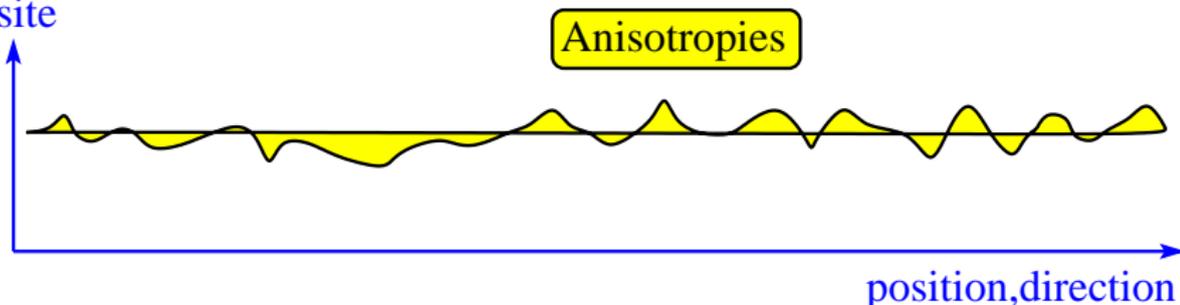


Fluctuations primordiales ( $\delta T/T \sim 10^{-5}$ ) + Galaxie (1/100000 près)  
WMAP (2003)

# Le plasma primordial (le tambour)

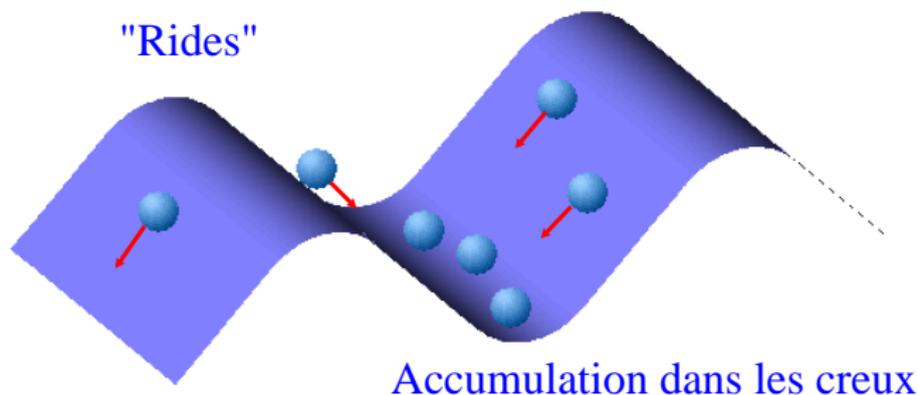
- milieu composé de protons (+ qq noyaux He,...), d'électrons ("libres") et de photons
- composante dominante = les photons
- interaction entre photons et électrons/protons
- les photons résistent à une compression
- milieu "presque" isotrope

température,  
densité



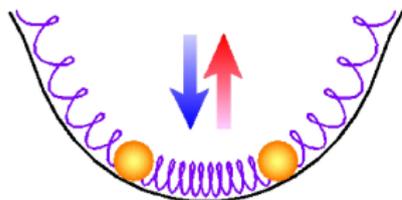
# Des fluctuations aux anisotropies

- 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



# Des ondes acoustiques

- Il existe des zones plus denses et moins denses
- la matière "tombe" là où c'est plus dense (gravitation)
- ... mais la pression réagit

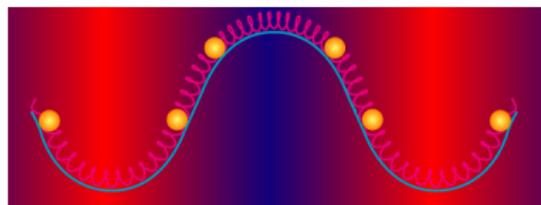


⇒ apparition d'oscillations (ondes acoustiques) ds le plasma primordial

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**

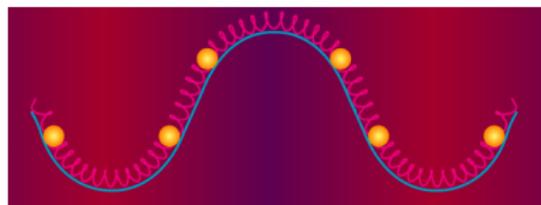


▶ Replay

⇒ 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**

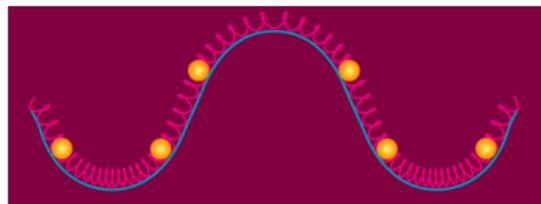


▶ Replay

⇒ 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**

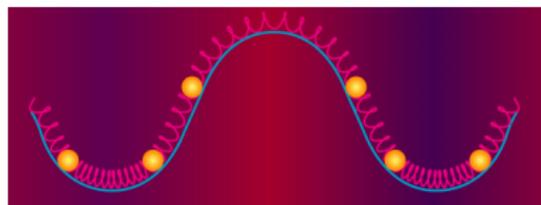


▶ Replay

⇒ 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**

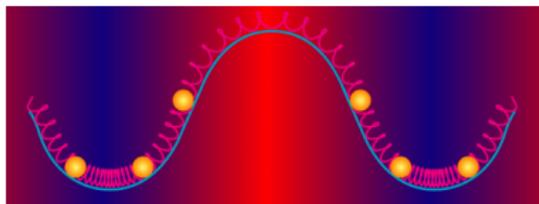


▶ Replay

⇒ 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**

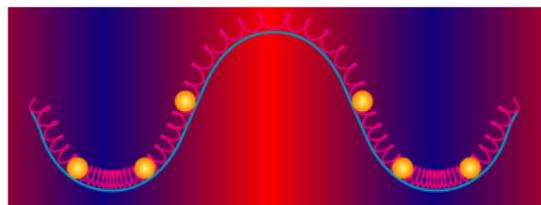


▶ Replay

⇒ 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**

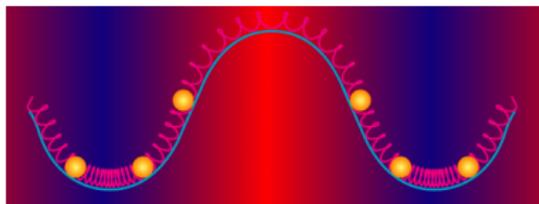


▶ Replay

⇒ 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**

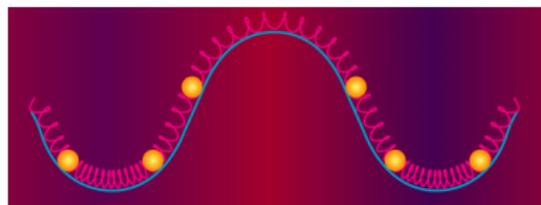


▶ Replay

⇒ 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**

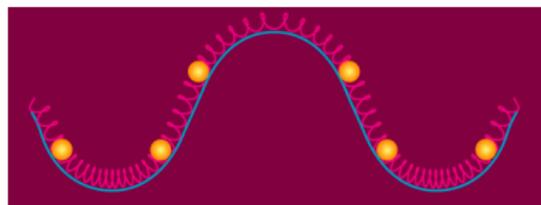


▶ Replay

⇒ 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**

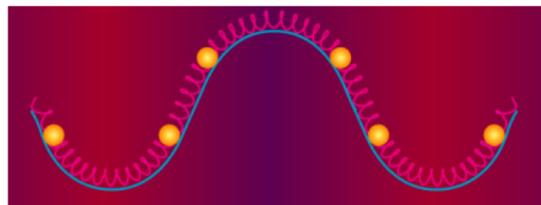


▶ Replay

⇒ 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**

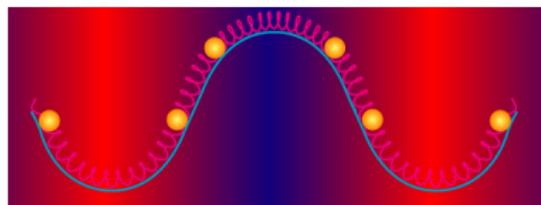


▶ Replay

⇒ 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**

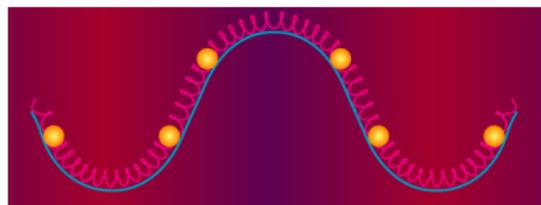


▶ Replay

⇒ 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**

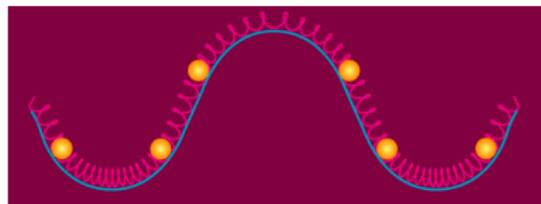


▶ Replay

⇒ 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**

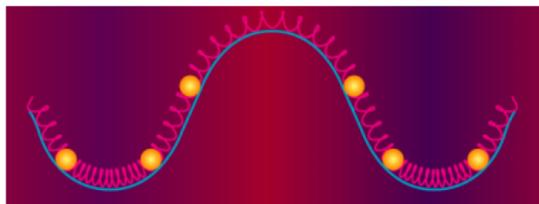


▶ Replay

⇒ 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**

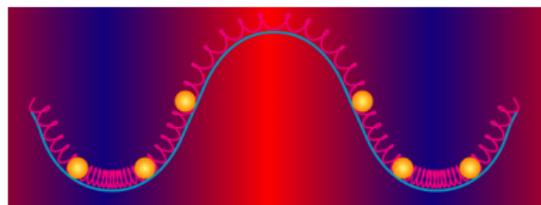


▶ Replay

⇒ 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**

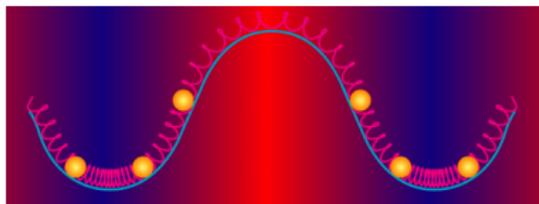


▶ Replay

⇒ 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**

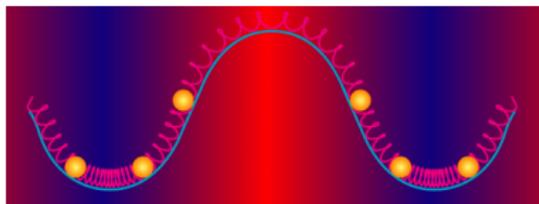


▶ Replay

⇒ 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**

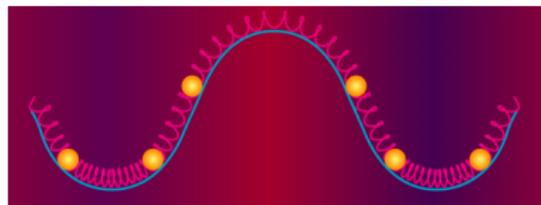


▶ Replay

⇒ 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**

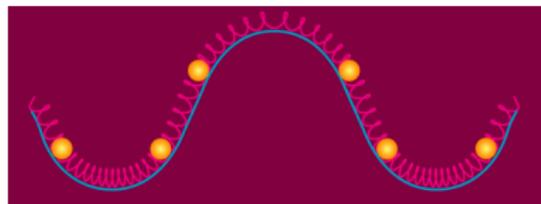


▶ Replay

⇒ 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**

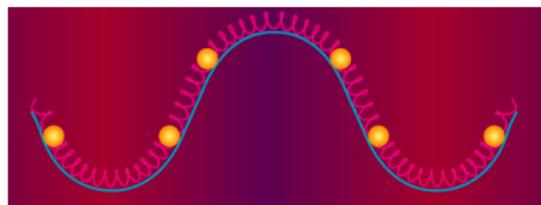


▶ Replay

⇒ 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**

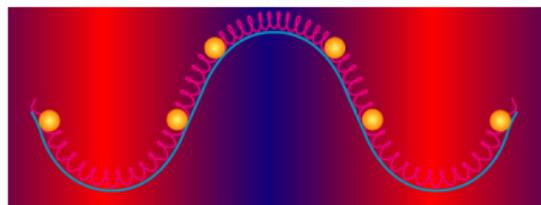


▶ Replay

⇒ 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**

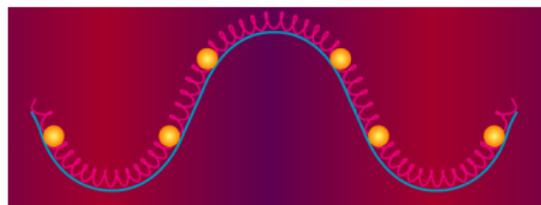


▶ Replay

⇒ 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**

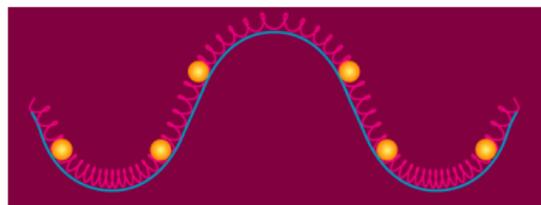


▶ Replay

⇒ 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**

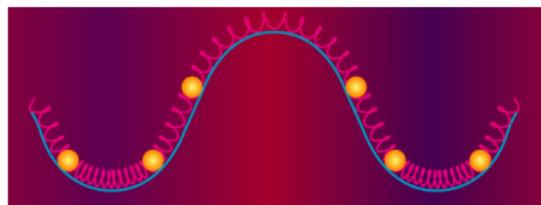


▶ Replay

⇒ 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**

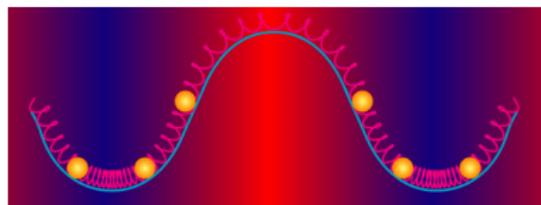


▶ Replay

⇒ 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**

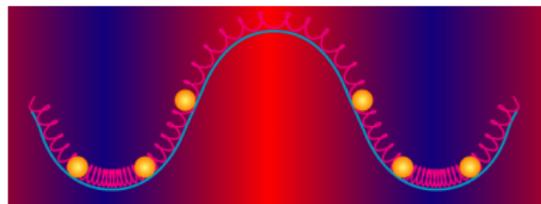


▶ Replay

⇒ 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**

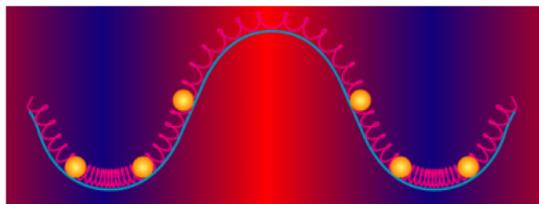


▶ Replay

⇒ 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**

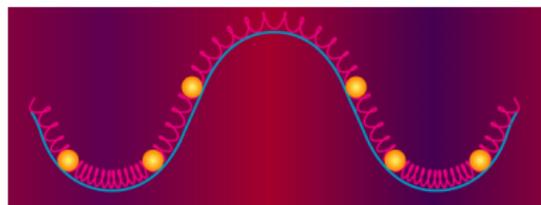


▶ Replay

⇒ 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**

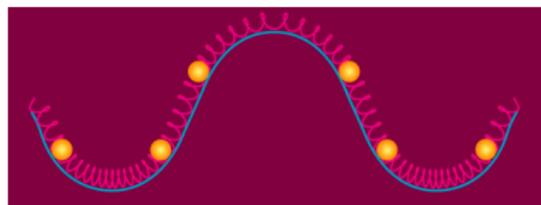


▶ Replay

⇒ 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**

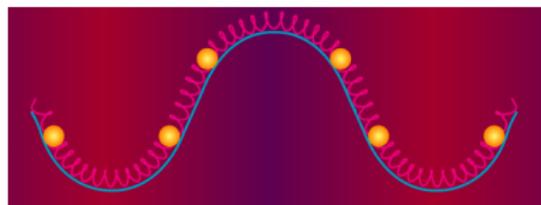


▶ Replay

⇒ 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**

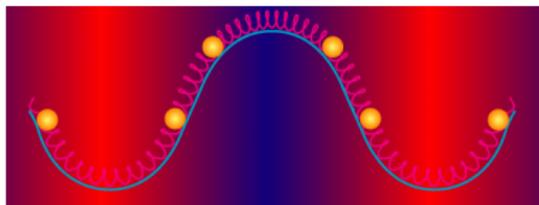


▶ Replay

⇒ 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**

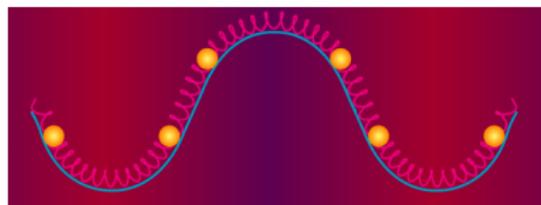


▶ Replay

⇒ 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**

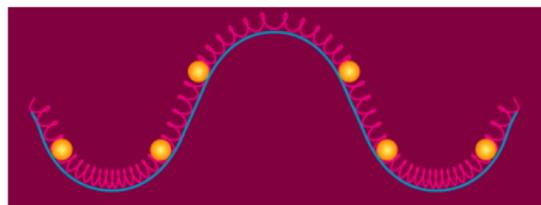


▶ Replay

⇒ 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**

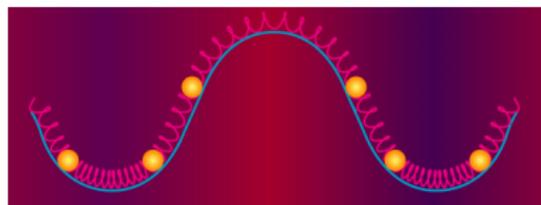


▶ Replay

⇒ 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**

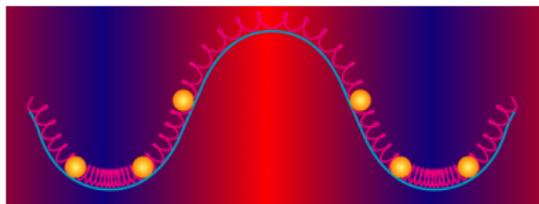


▶ Replay

⇒ 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**

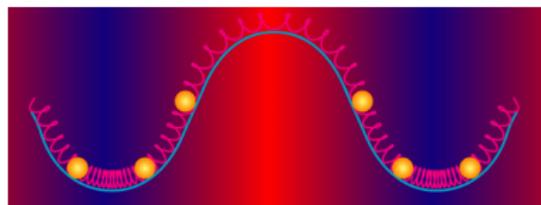


▶ Replay

⇒ 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**

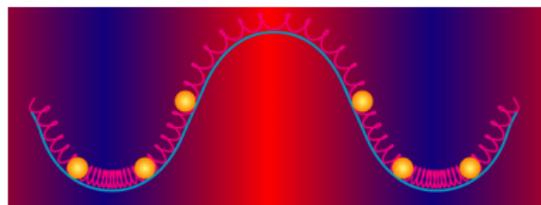


▶ Replay

⇒ 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**

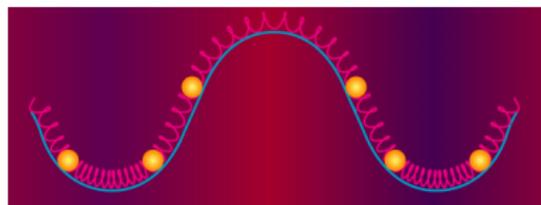


▶ Replay

⇒ 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**

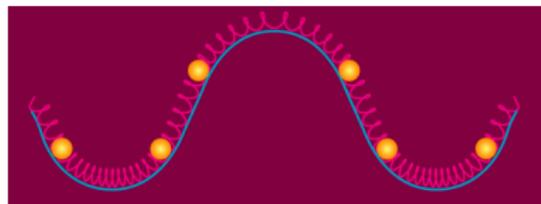


▶ Replay

⇒ 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**

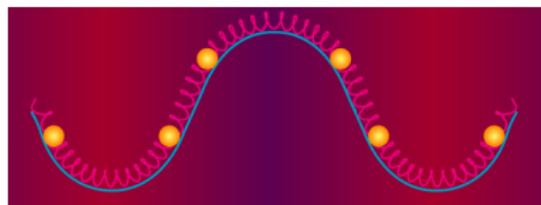


▶ Replay

⇒ 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**

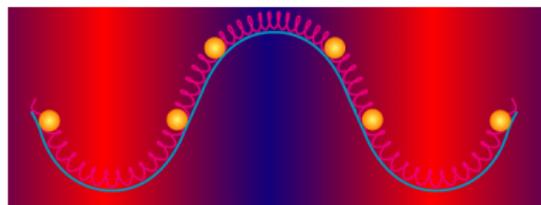


▶ Replay

⇒ 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**

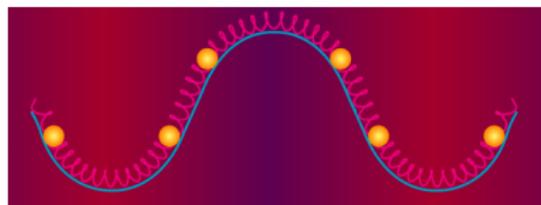


▶ Replay

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

# Anisotropies de température

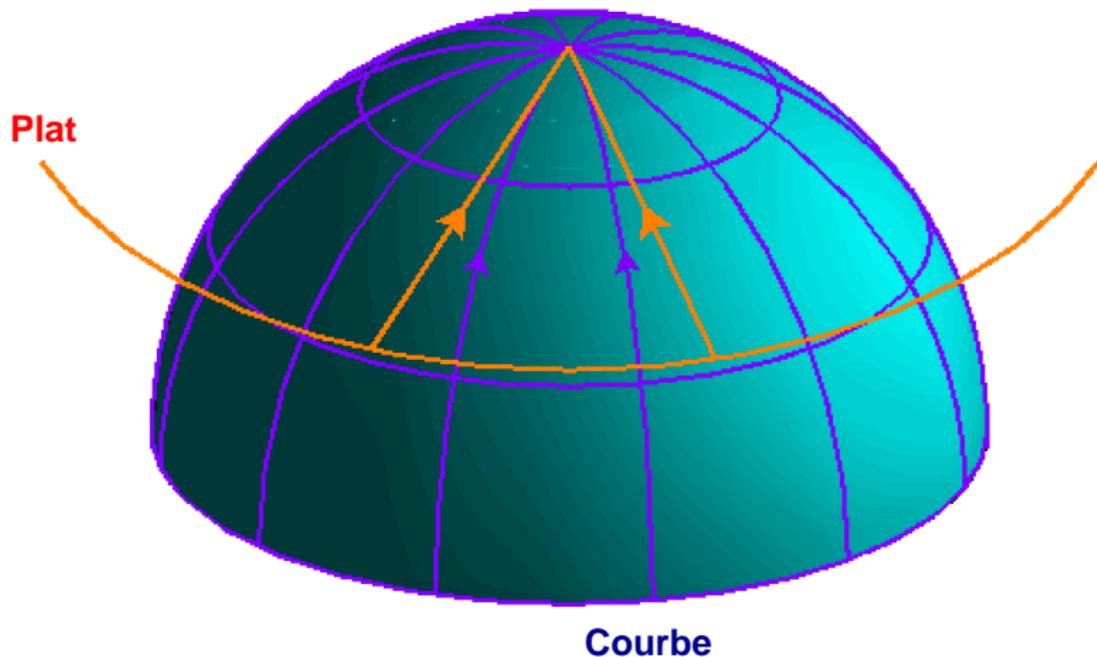
- régions sur(sous-) denses : **anisotropies de densité**
- ⇒ existence d'ondes "sonores" (jusqu'au découplage)
- ⇔ régions + ou - chaudes  
**anisotropies de température**



▶ Replay

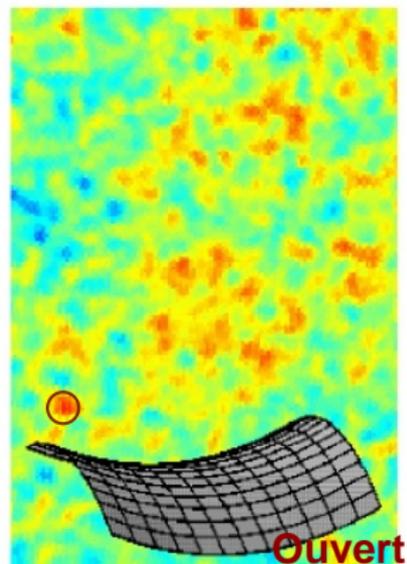
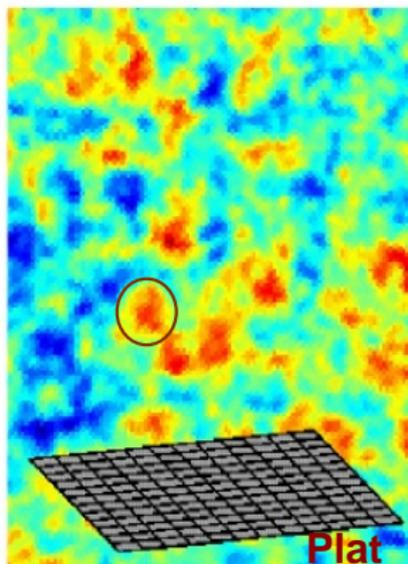
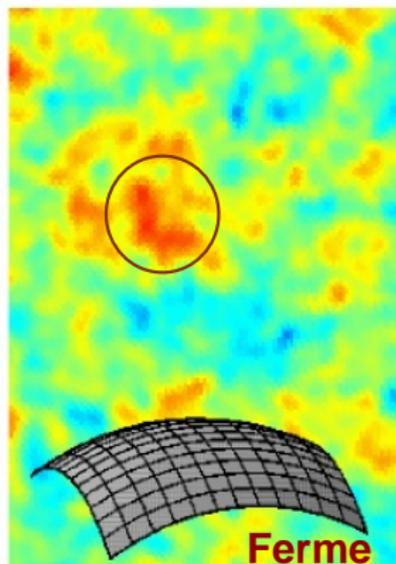
⇒ la (micro-)physique du plasma primordial laisse une signature dans les **anisotropies de températures** du CMB

# Propagation du CMB



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

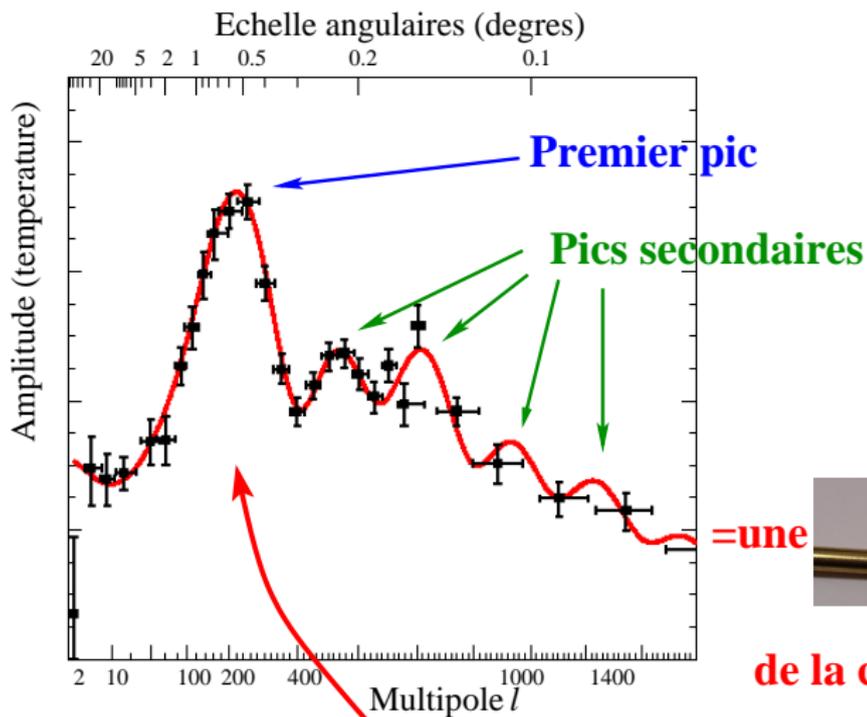
# Géométries et anisotropies



Pb : extraire des infos quantitatives des cartes

Principe : estimer parmi les fluctuations la fréquence de chaque taille

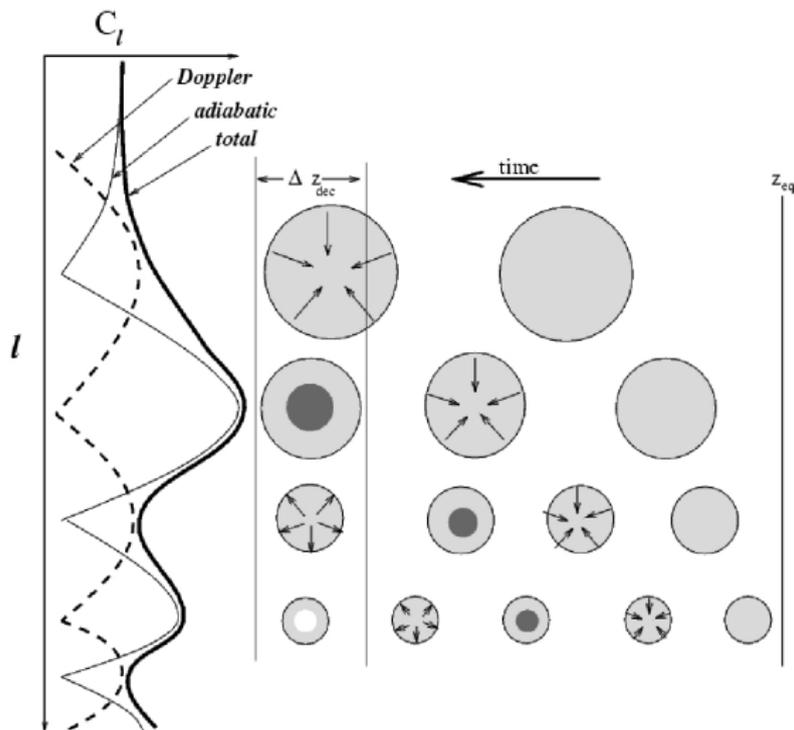
# La courbe des $C_\ell$



Beaucoup de structures de cette taille

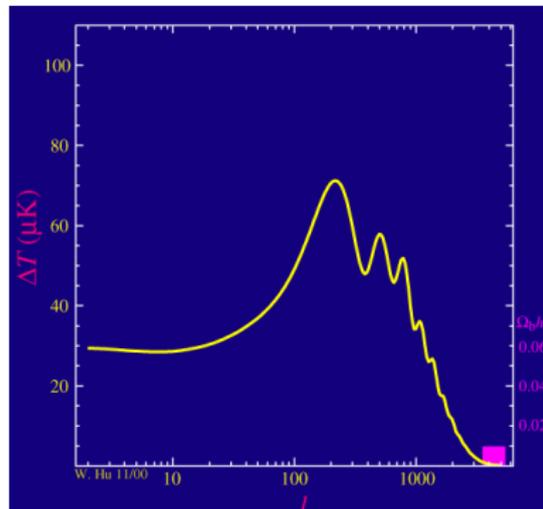
# Pourquoi des pics ?

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

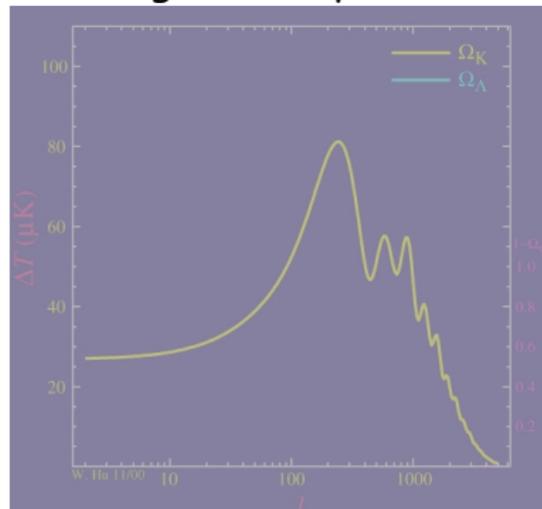


# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



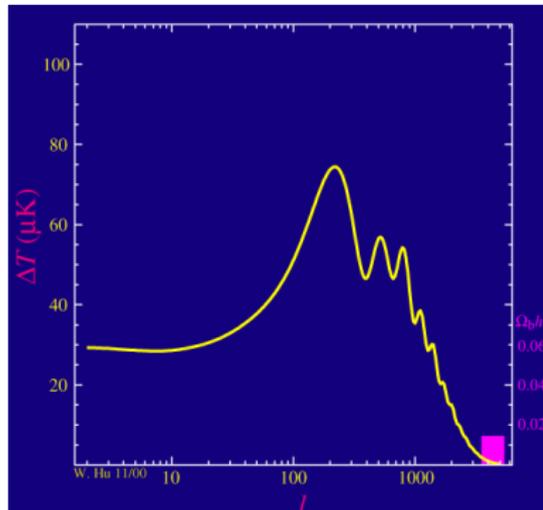
► Replay



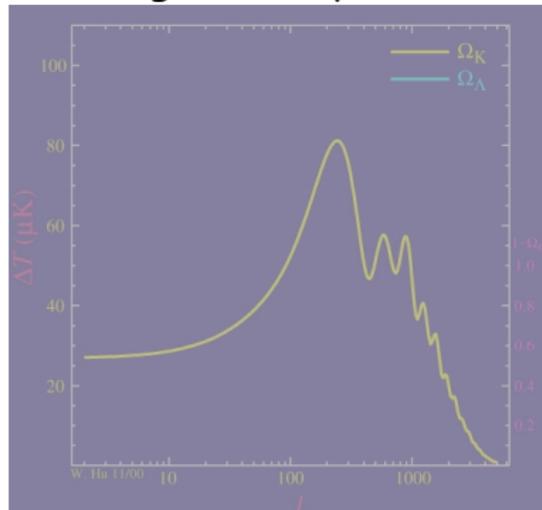
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



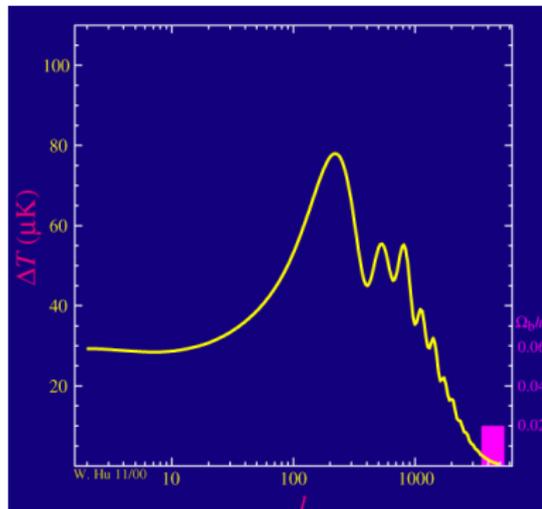
► Replay



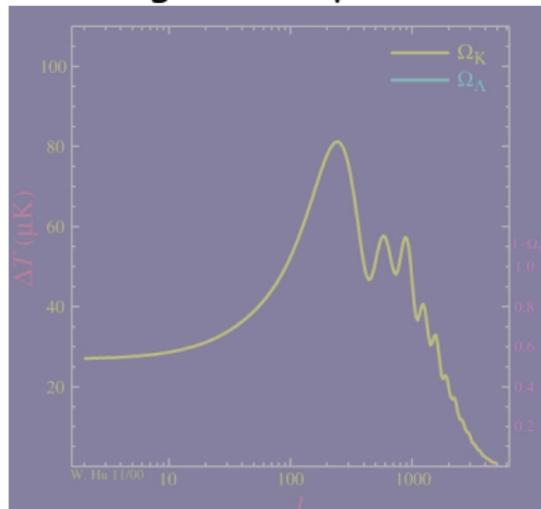
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



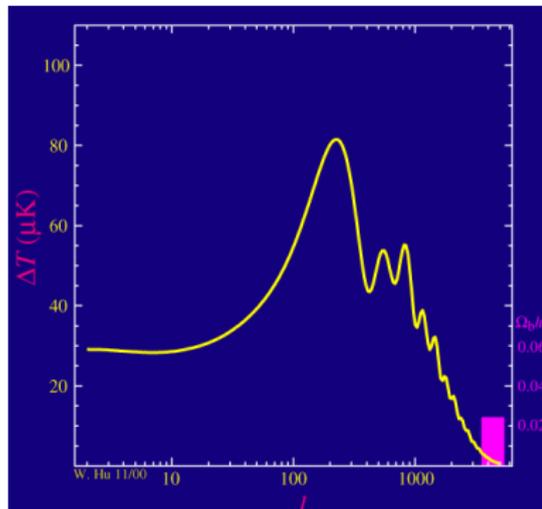
► Replay



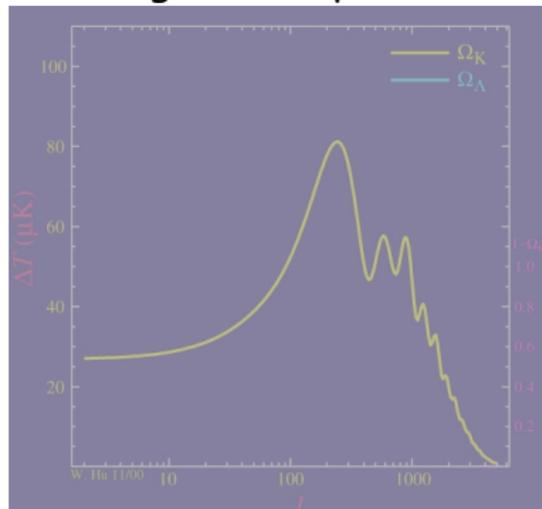
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



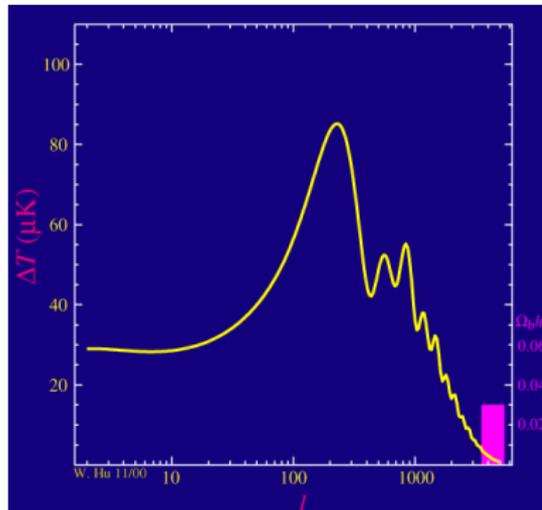
► Replay



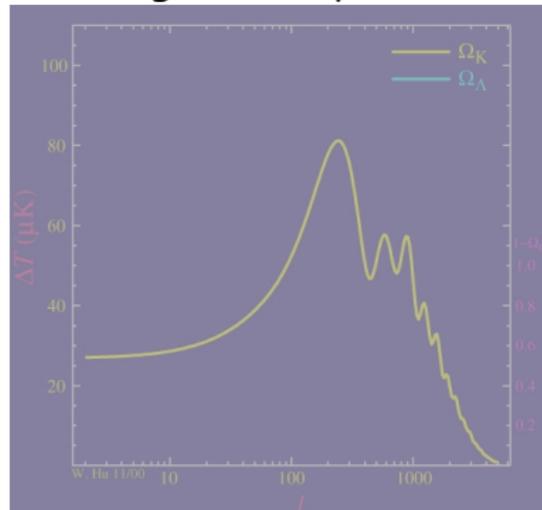
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



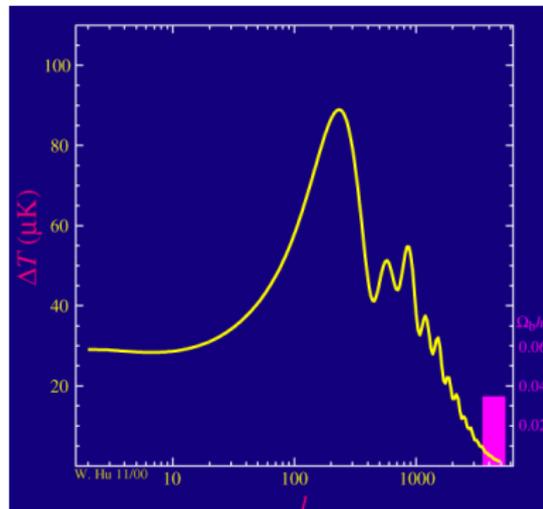
► Replay



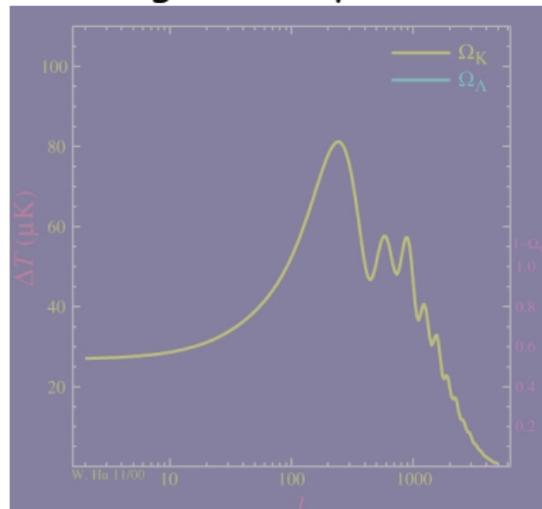
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



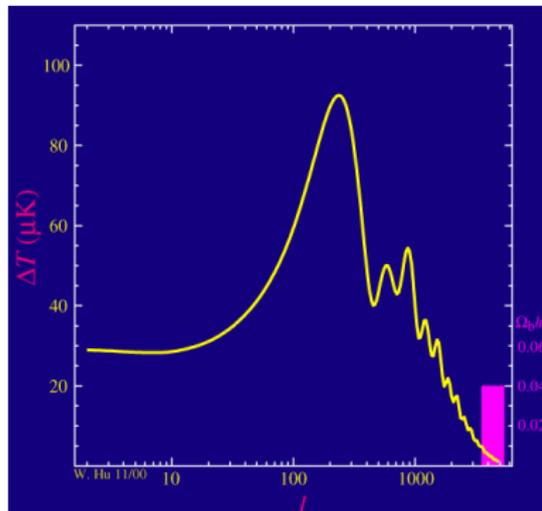
► Replay



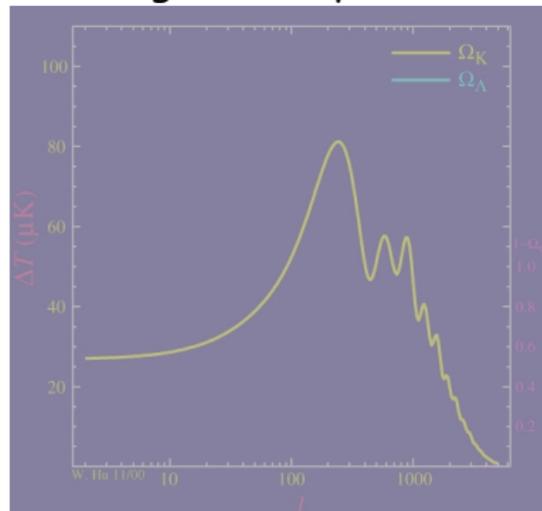
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



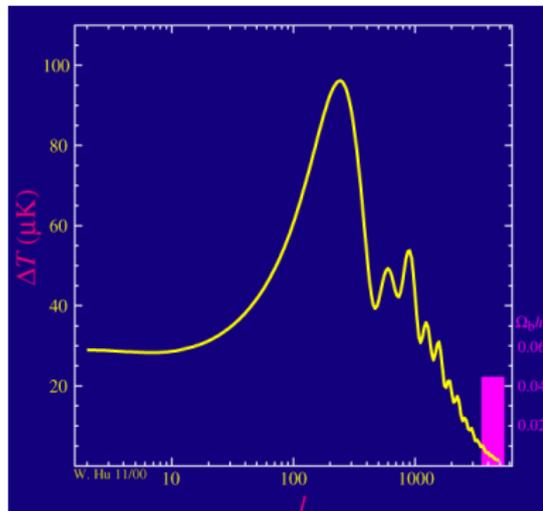
► Replay



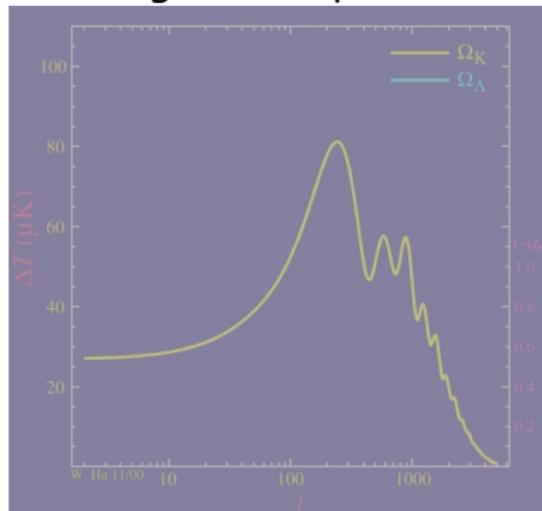
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



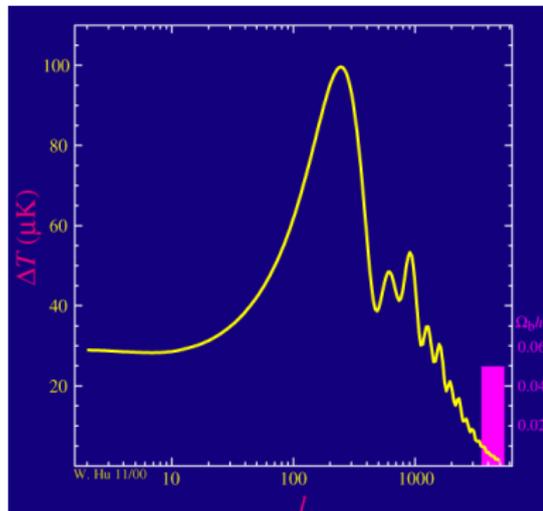
► Replay



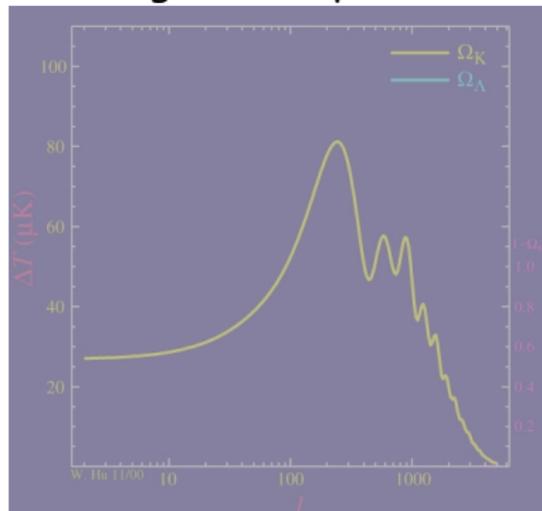
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



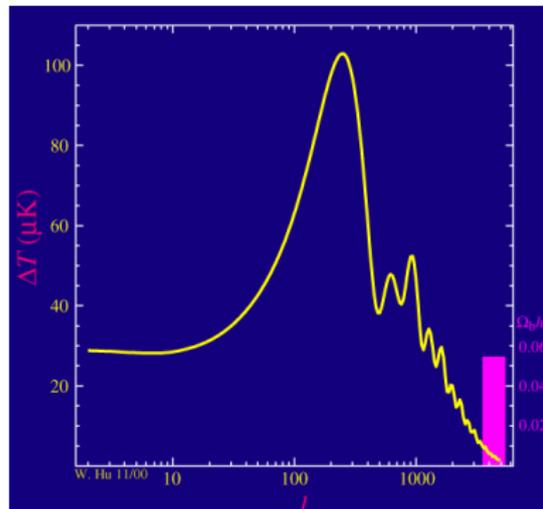
► Replay



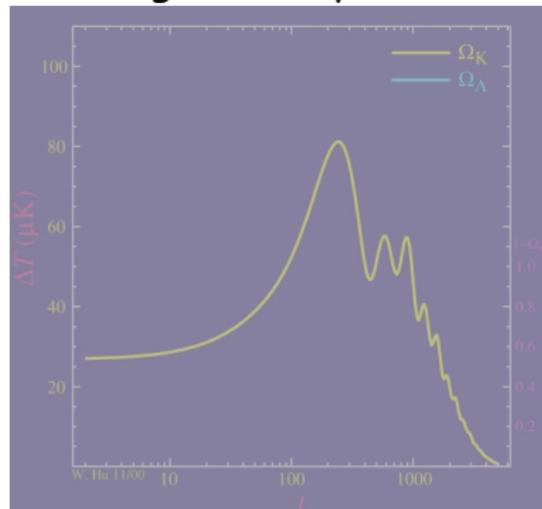
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



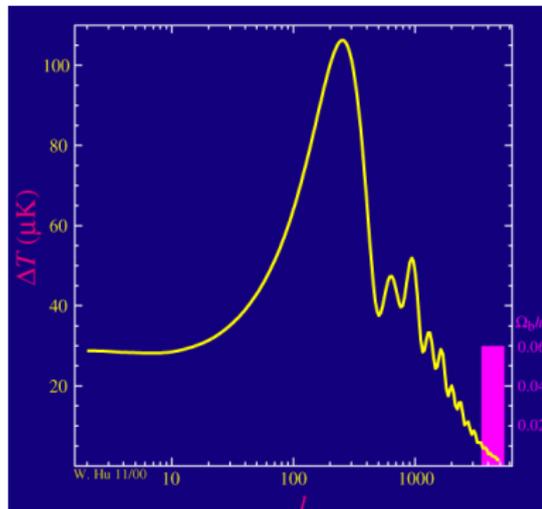
► Replay



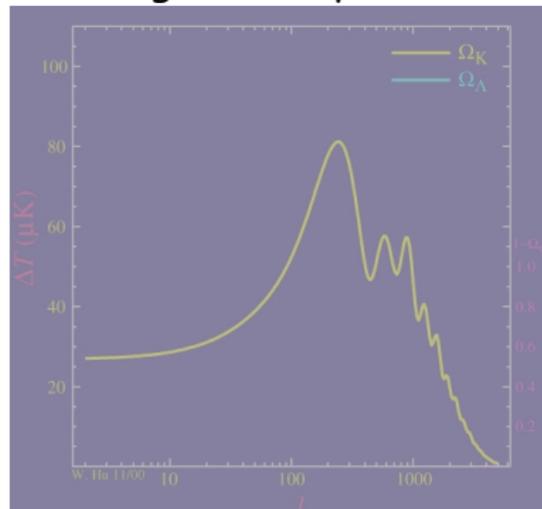
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



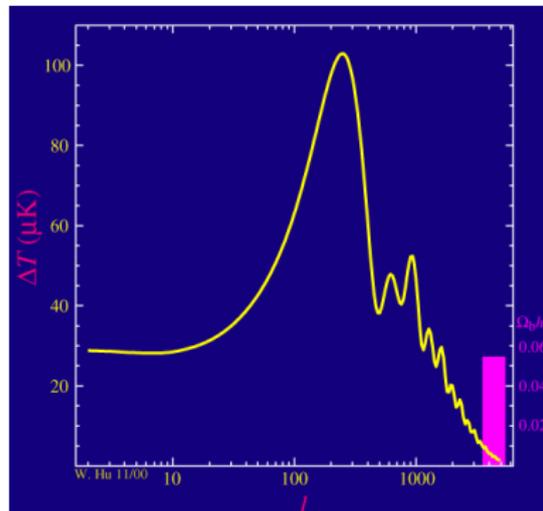
► Replay



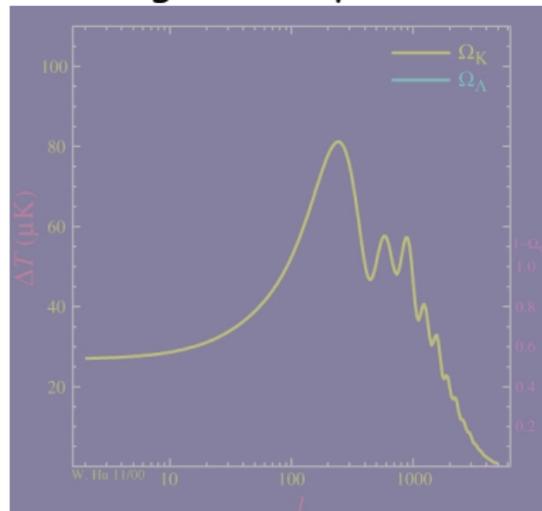
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



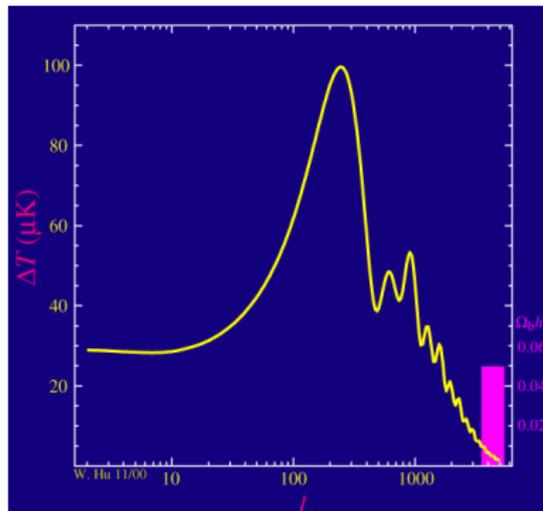
► Replay



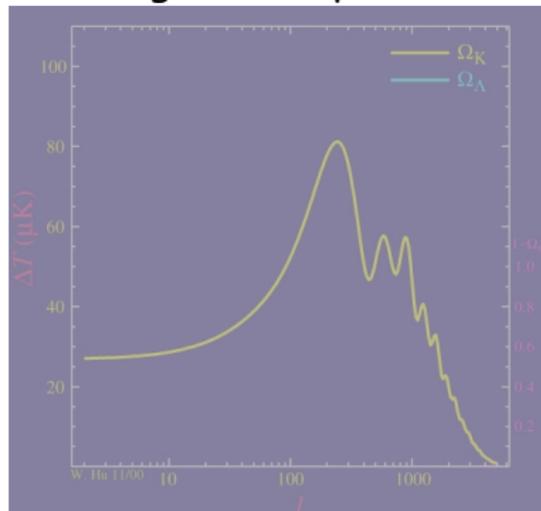
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



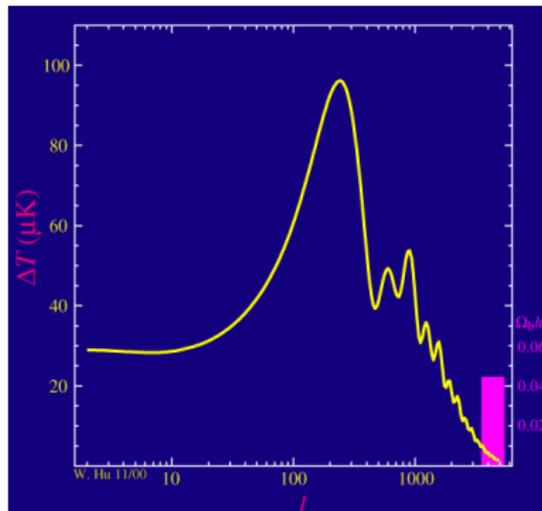
► Replay



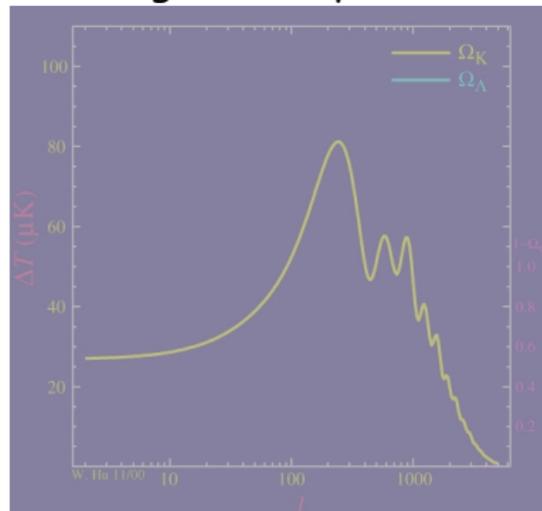
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



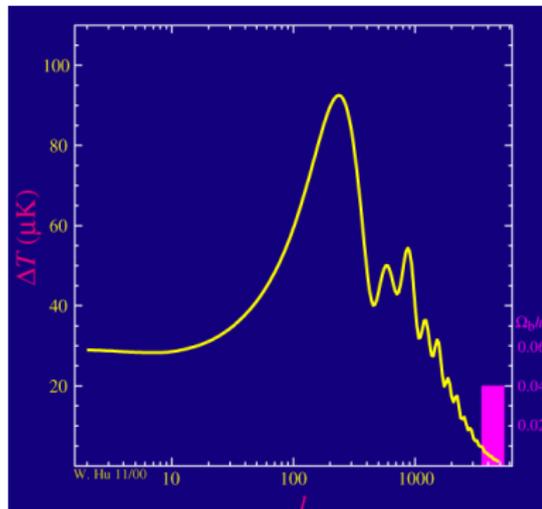
► Replay



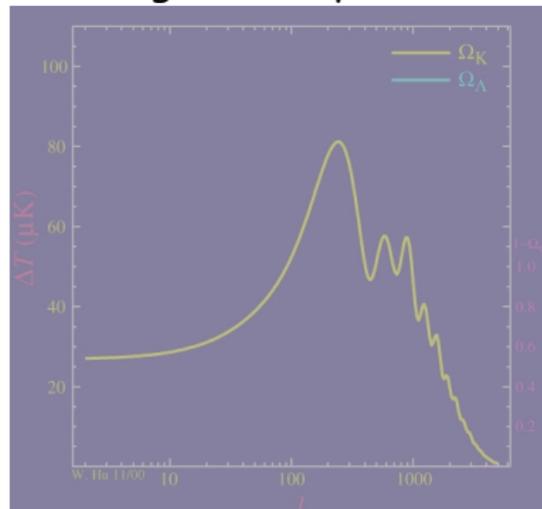
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



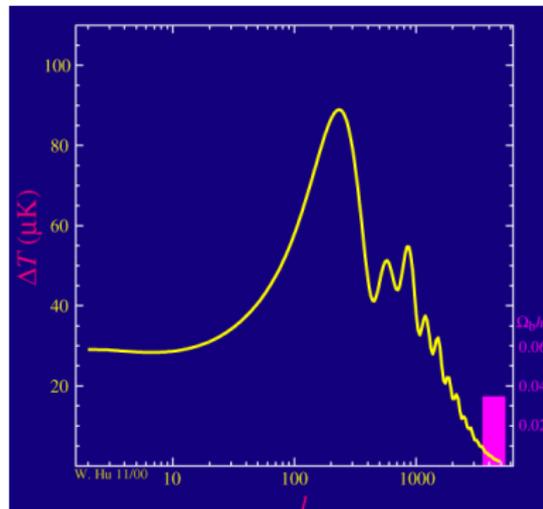
► Replay



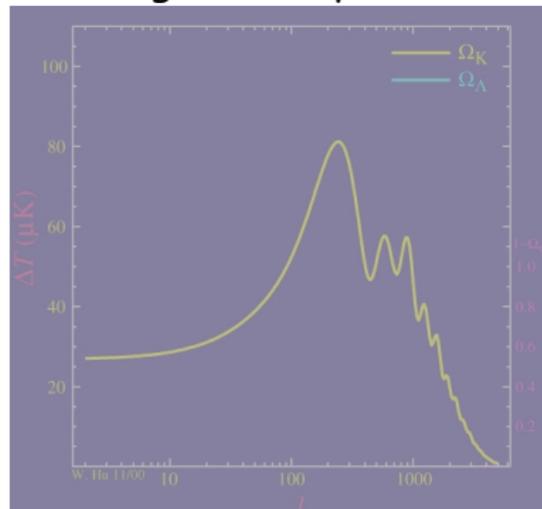
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



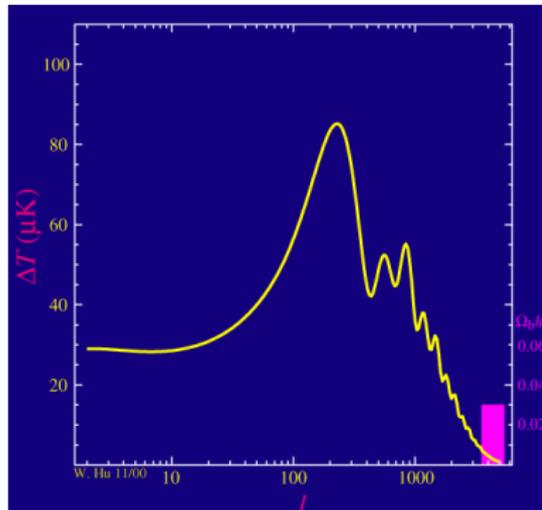
► Replay



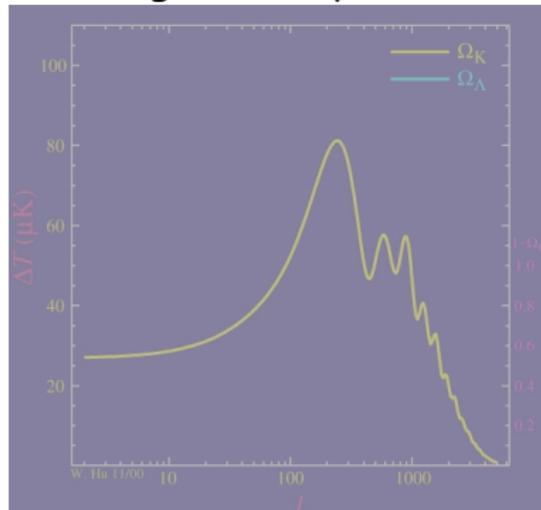
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



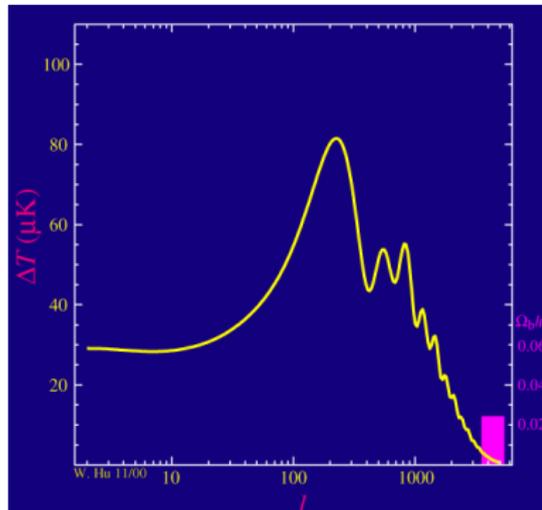
► Replay



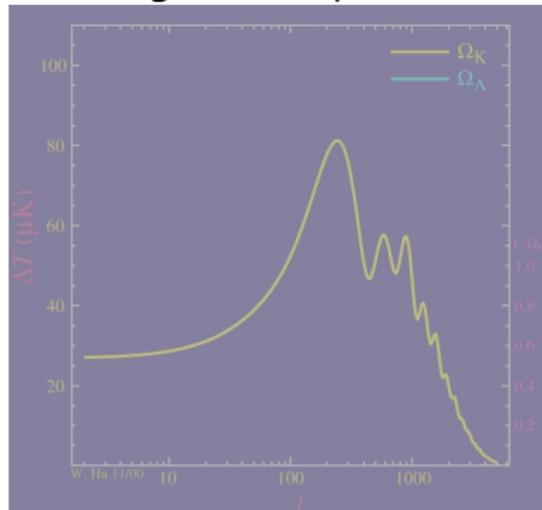
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



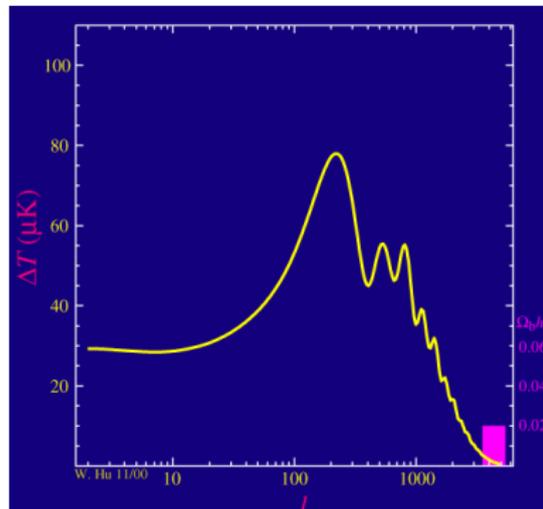
► Replay



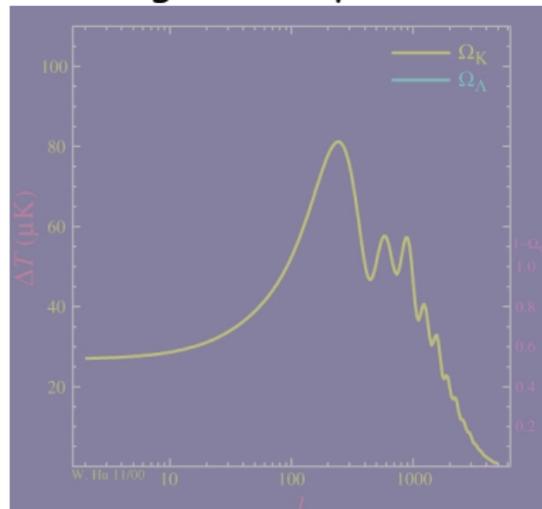
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



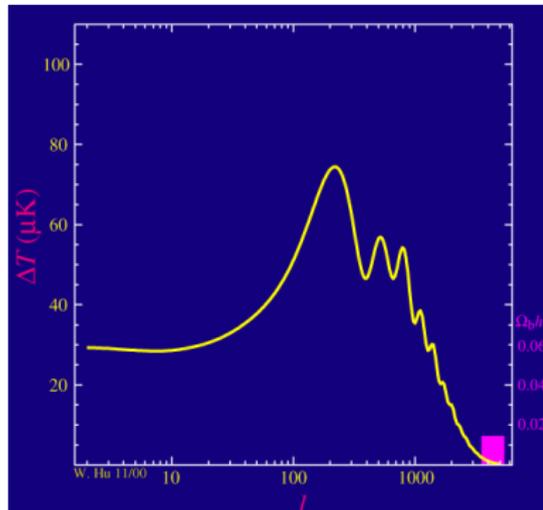
► Replay



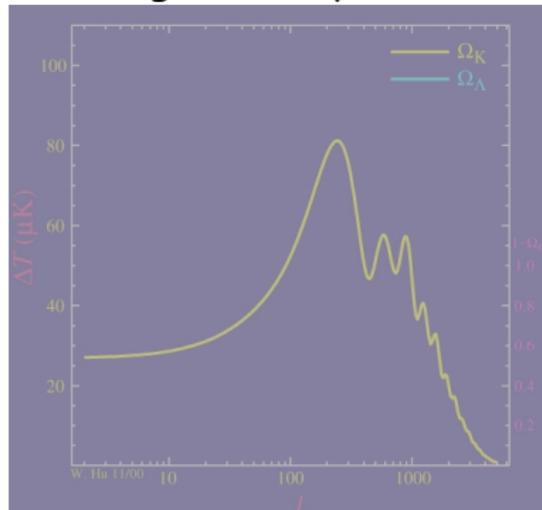
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



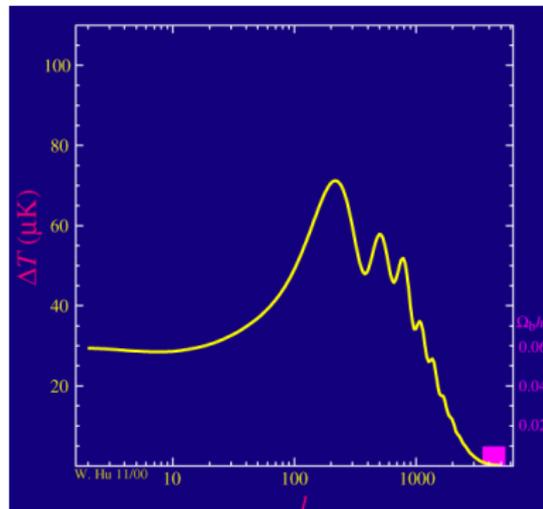
► Replay



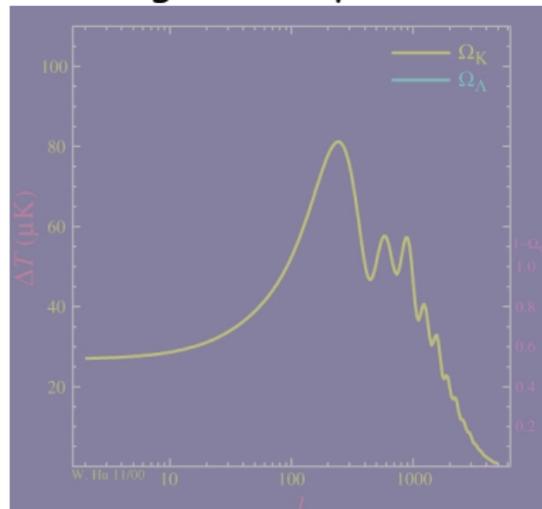
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



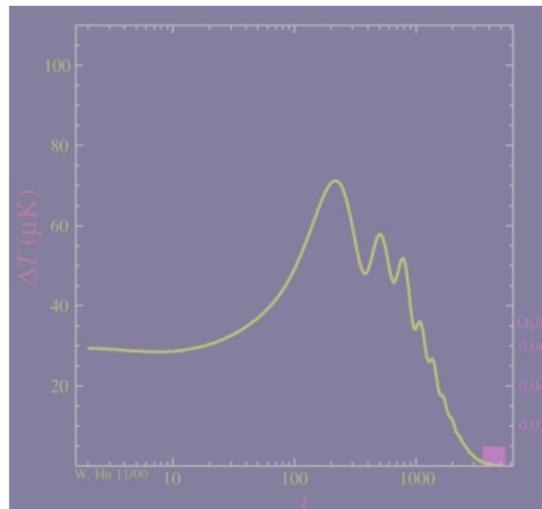
► Replay



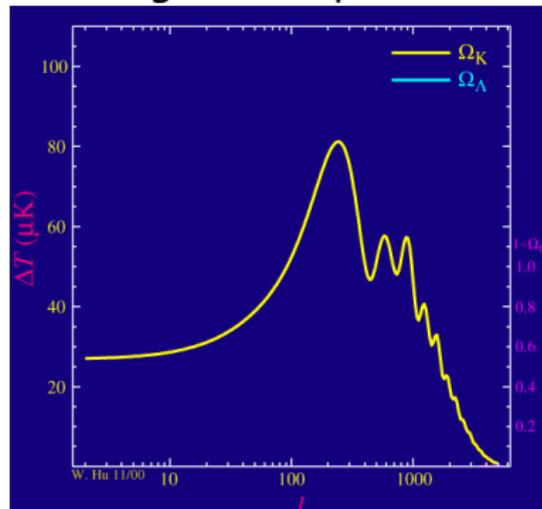
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



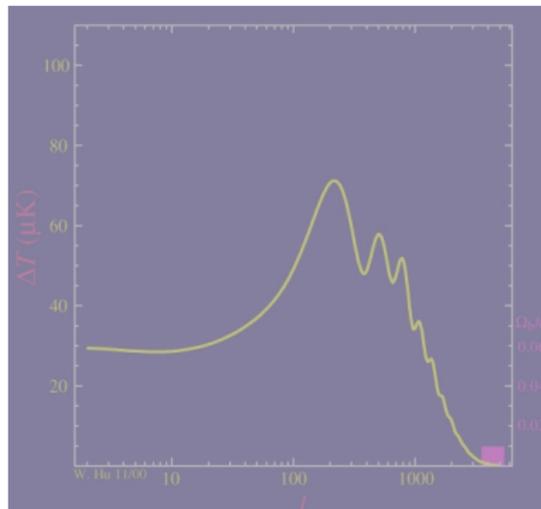
► Replay



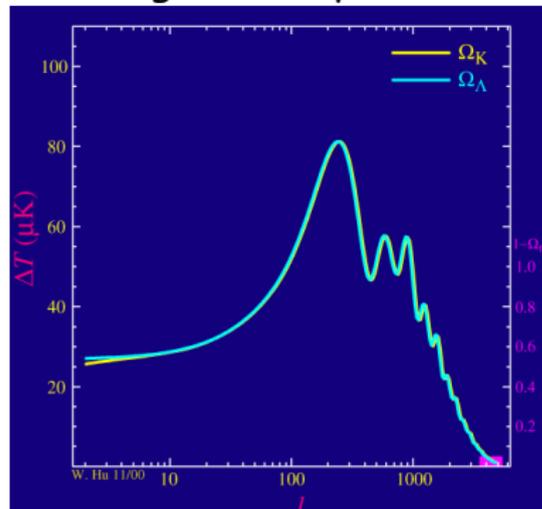
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



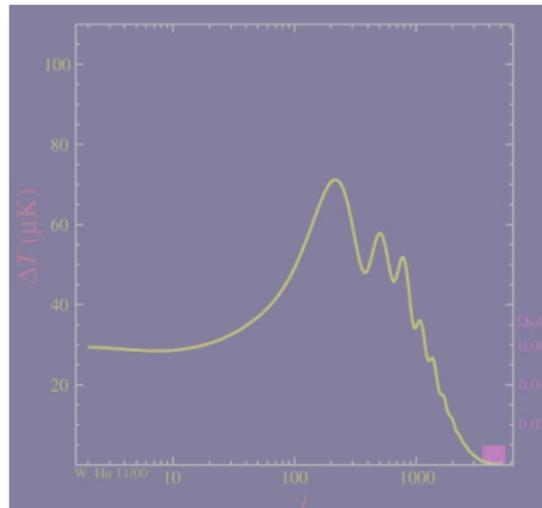
► Replay



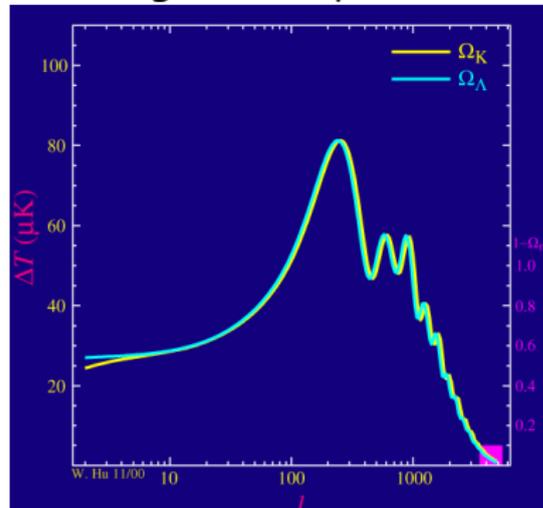
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



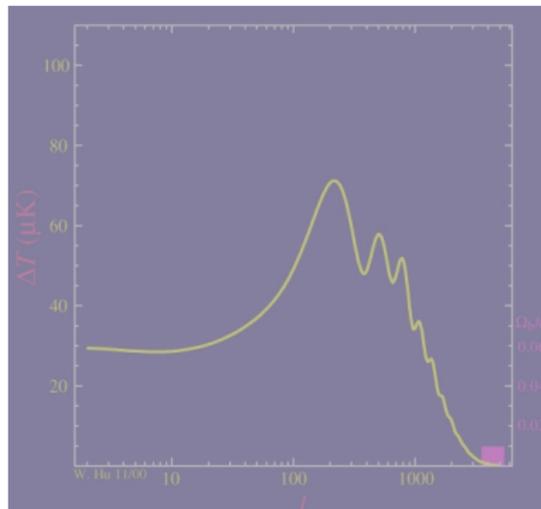
► Replay



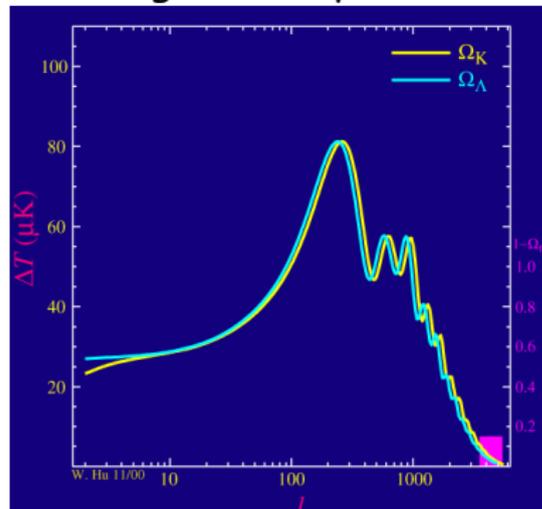
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



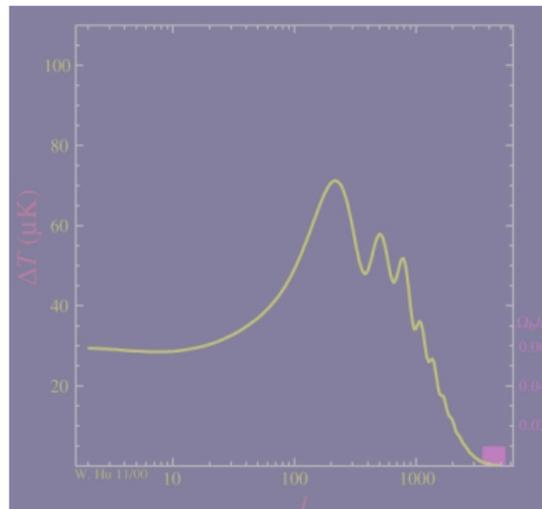
► Replay



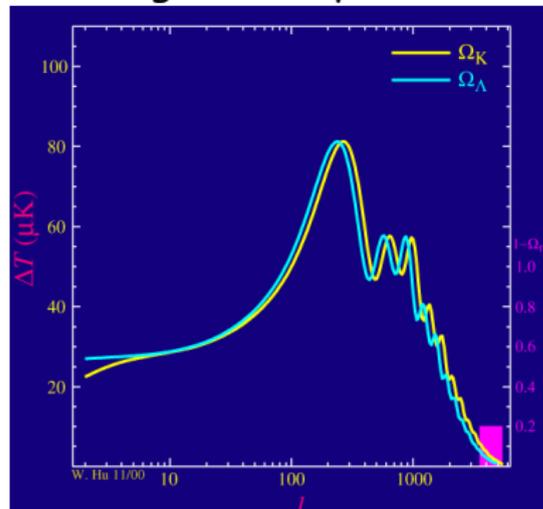
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



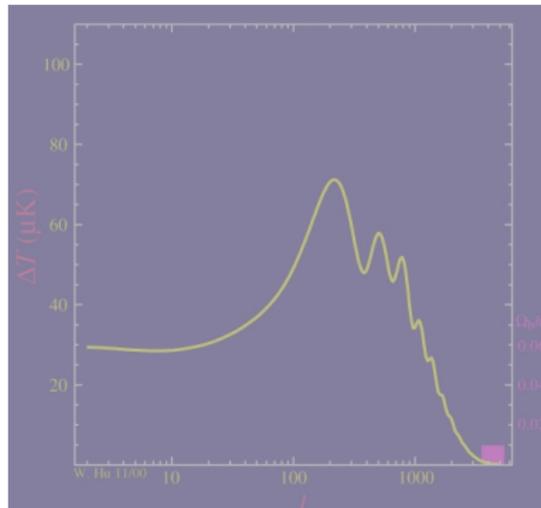
► Replay



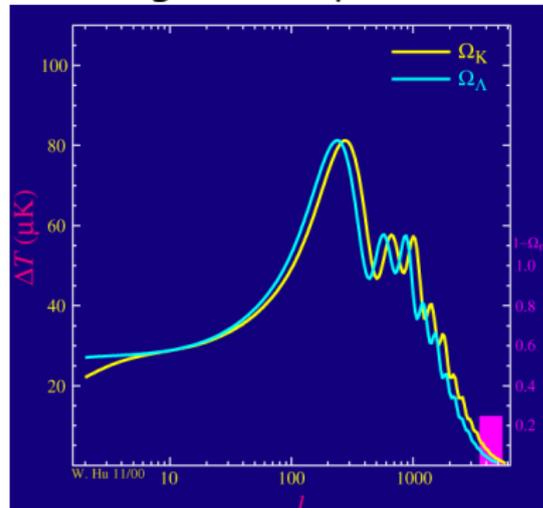
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



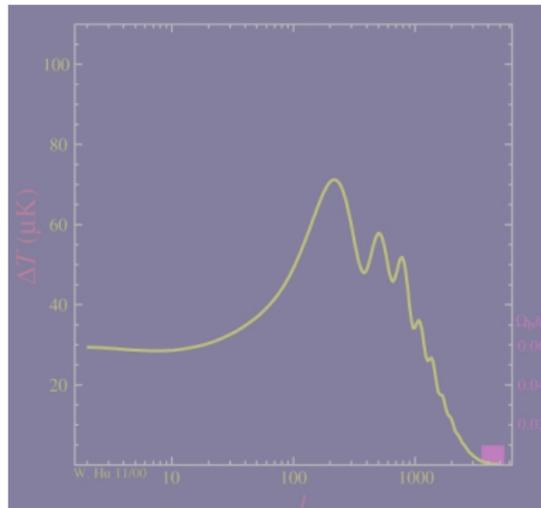
► Replay



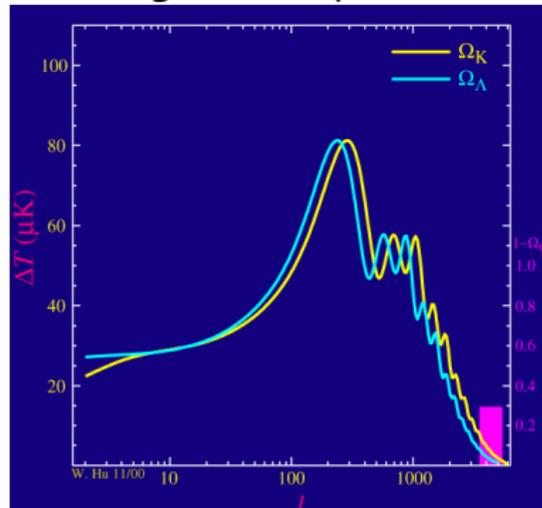
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



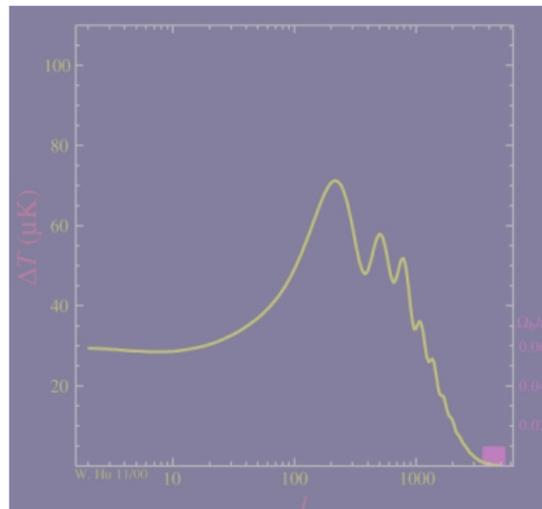
► Replay



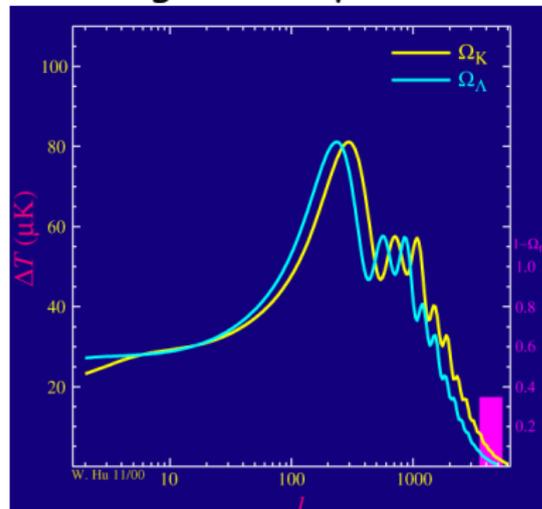
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



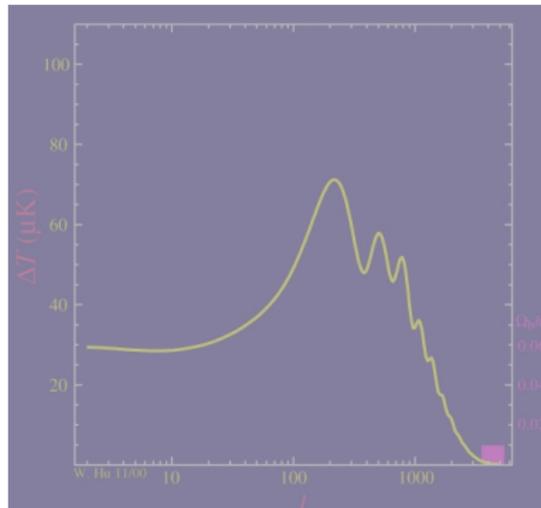
► Replay



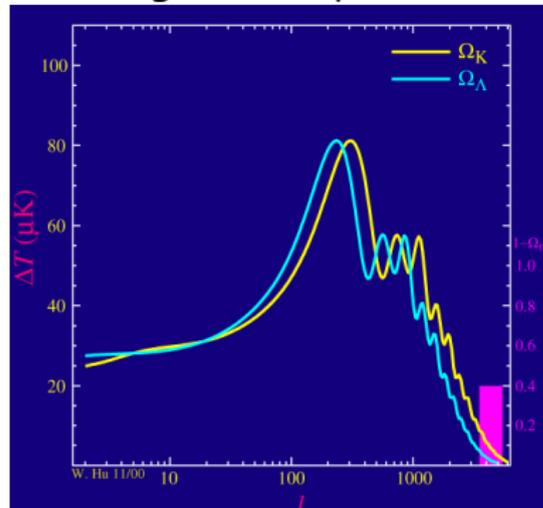
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



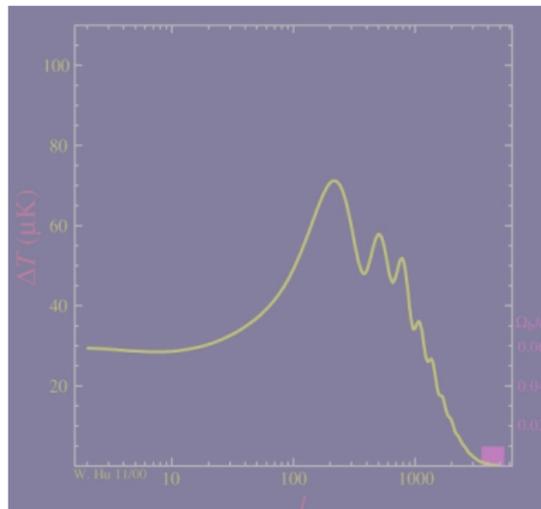
► Replay



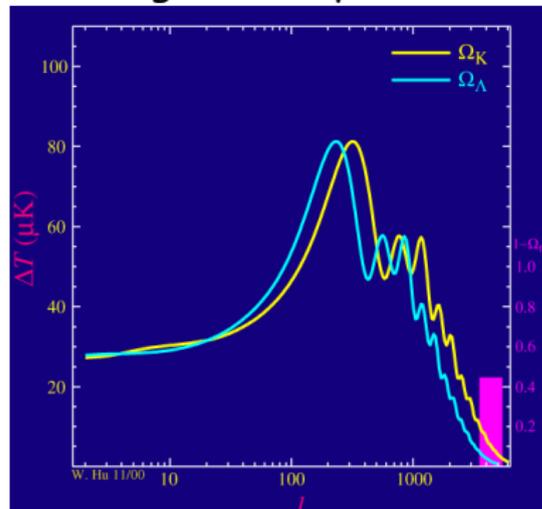
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



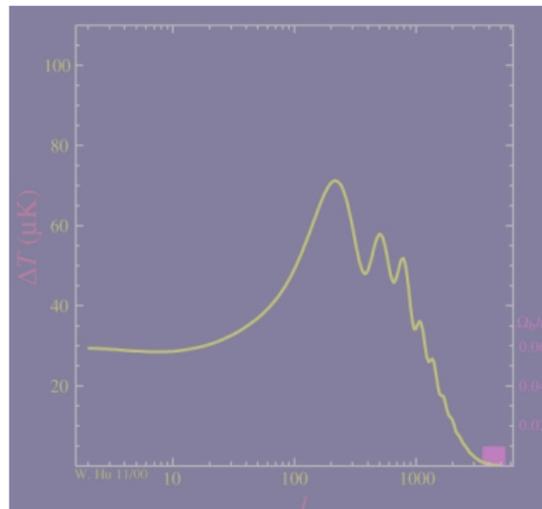
► Replay



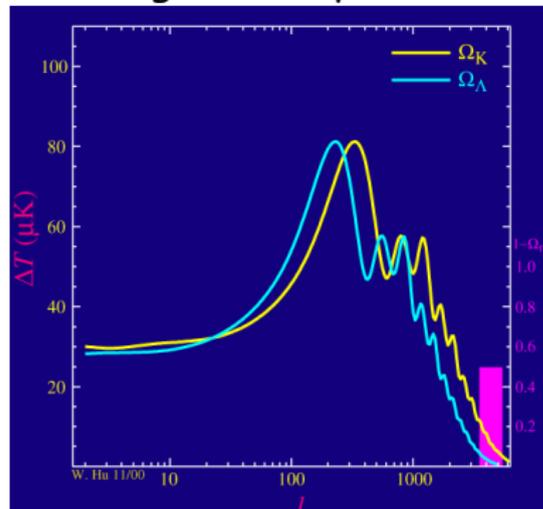
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



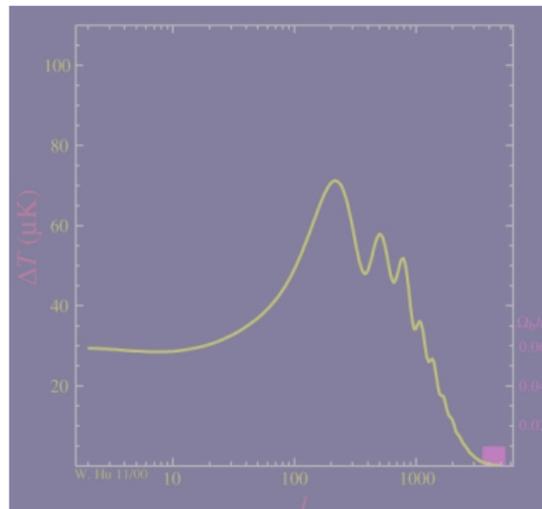
► Replay



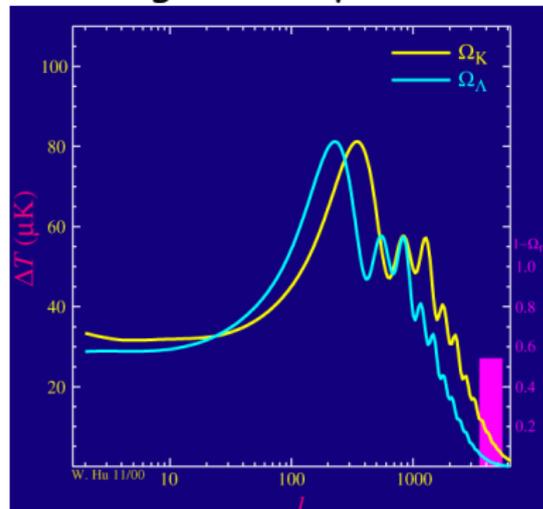
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



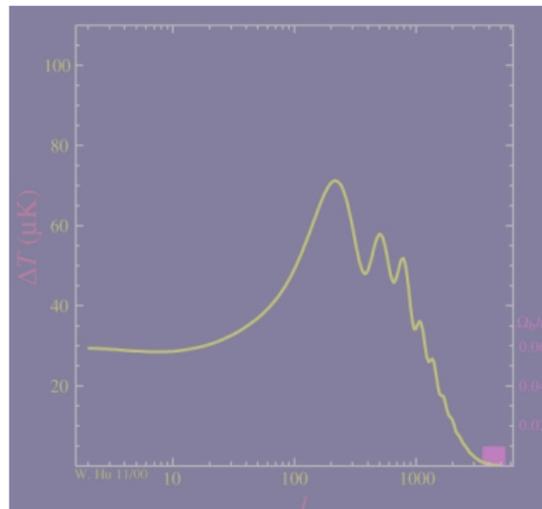
► Replay



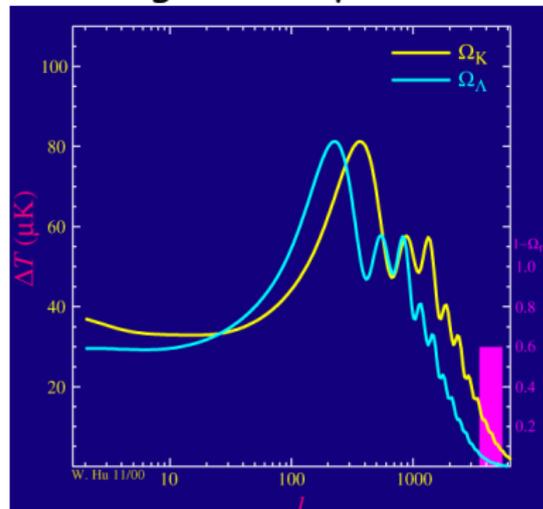
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



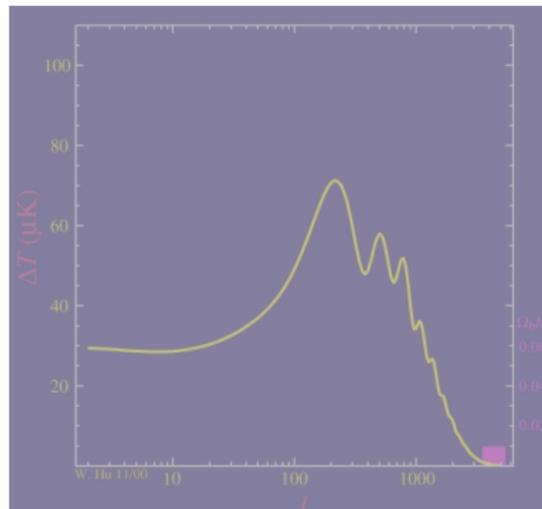
► Replay



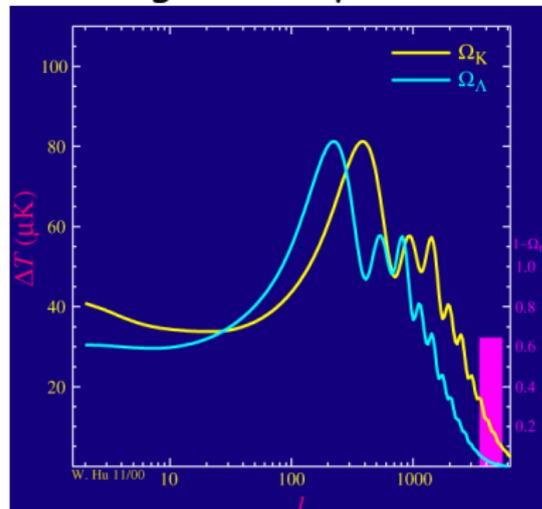
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



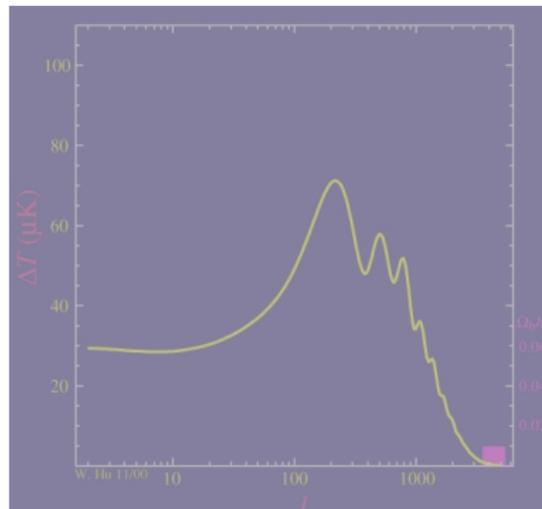
► Replay



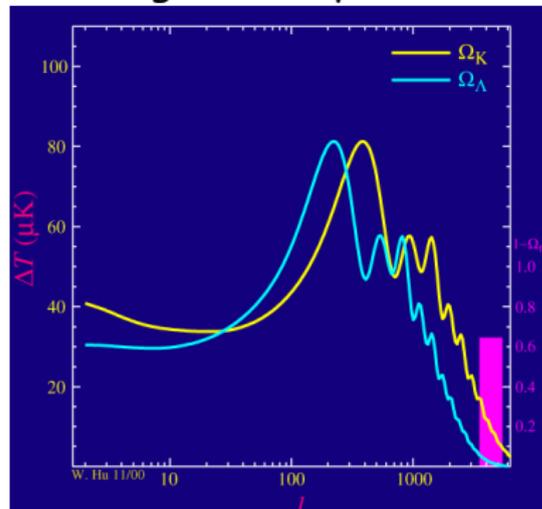
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



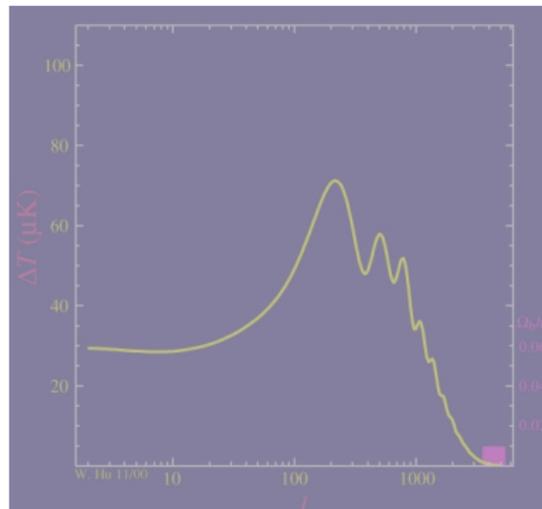
► Replay



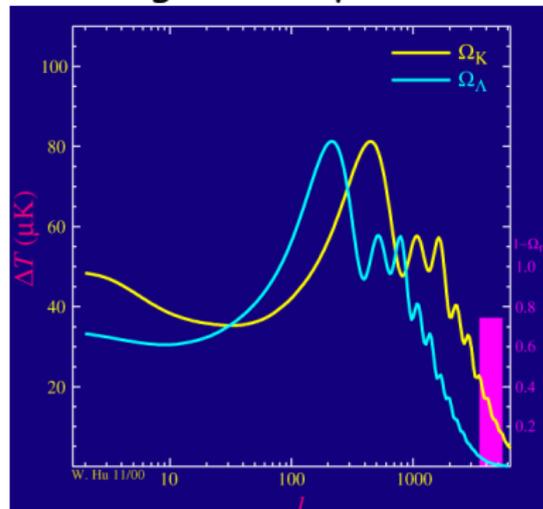
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



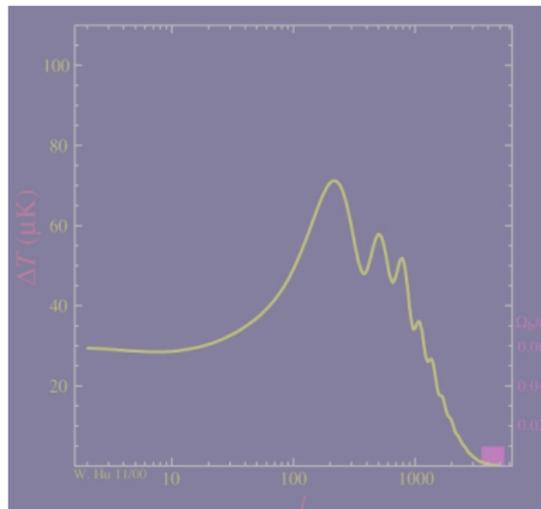
► Replay



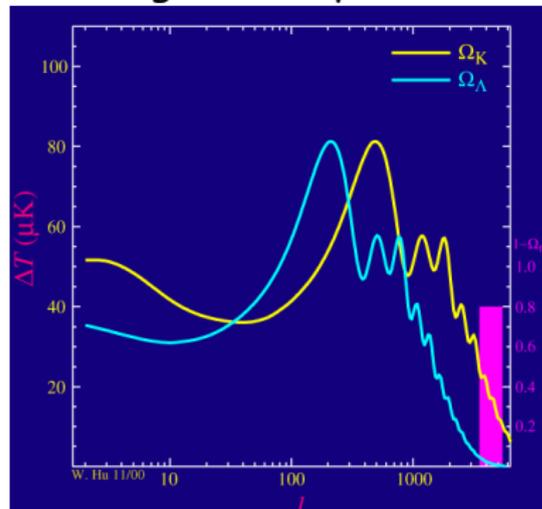
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



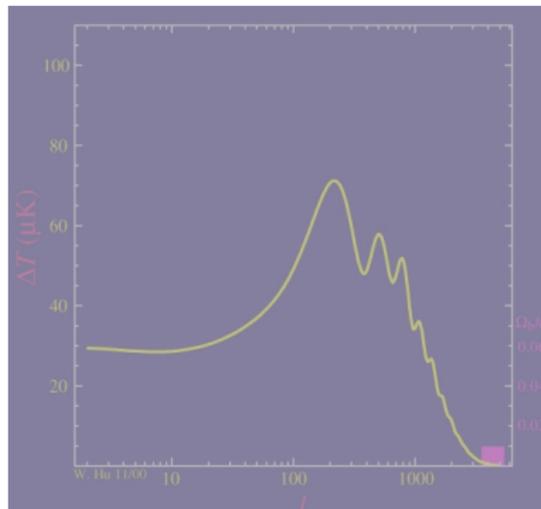
► Replay



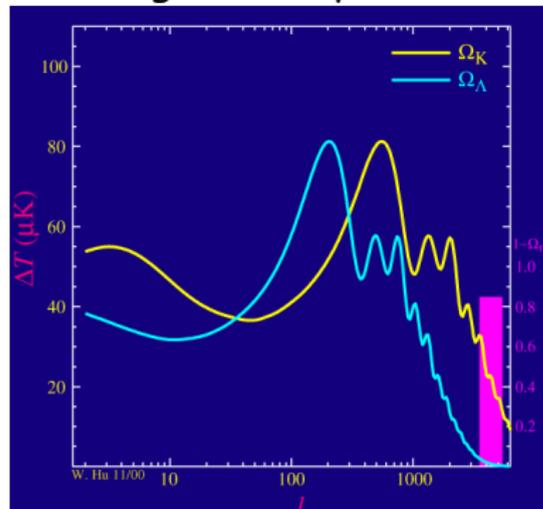
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



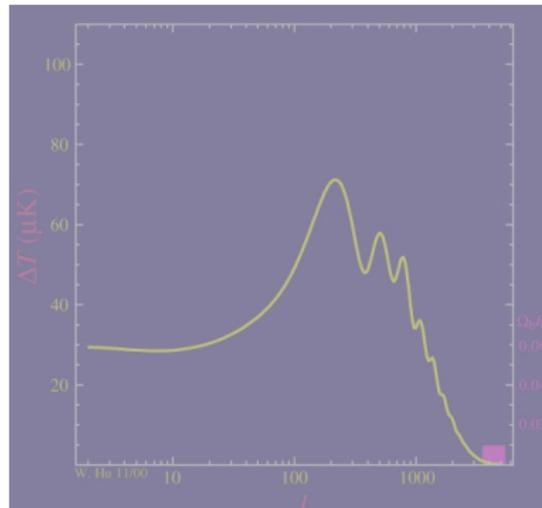
► Replay



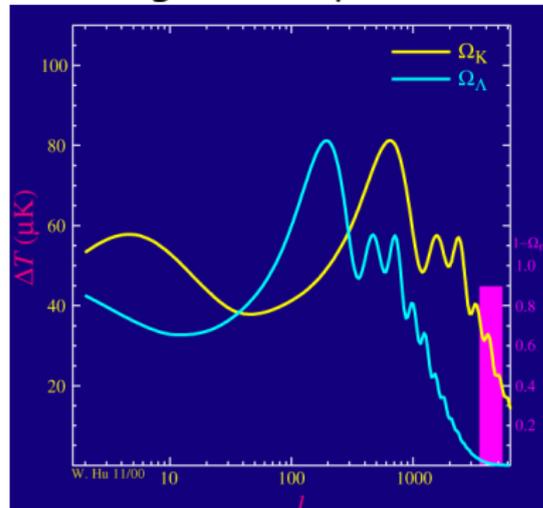
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



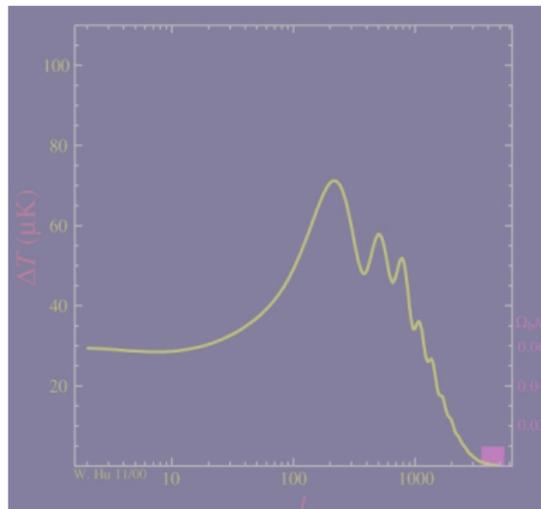
► Replay



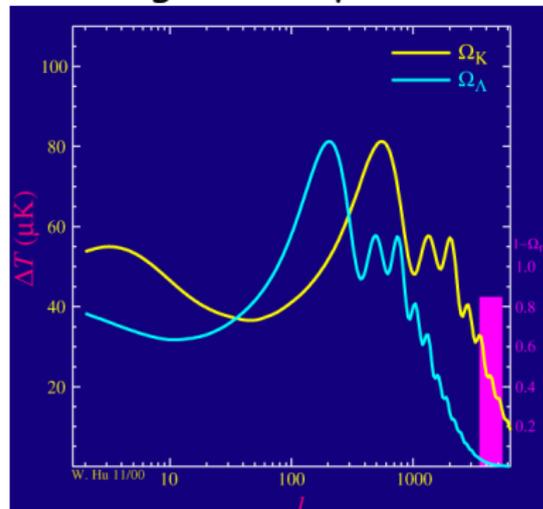
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



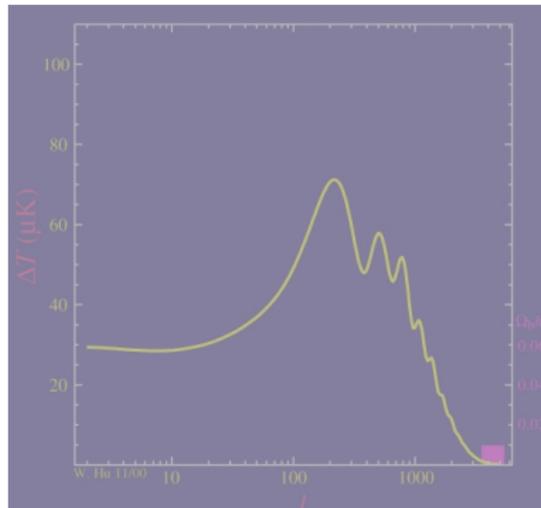
► Replay



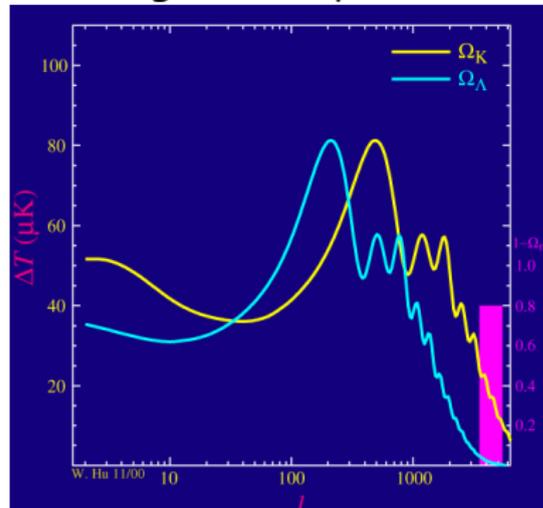
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



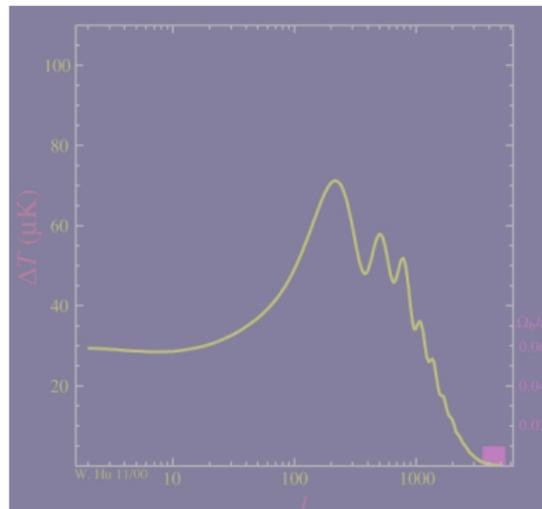
► Replay



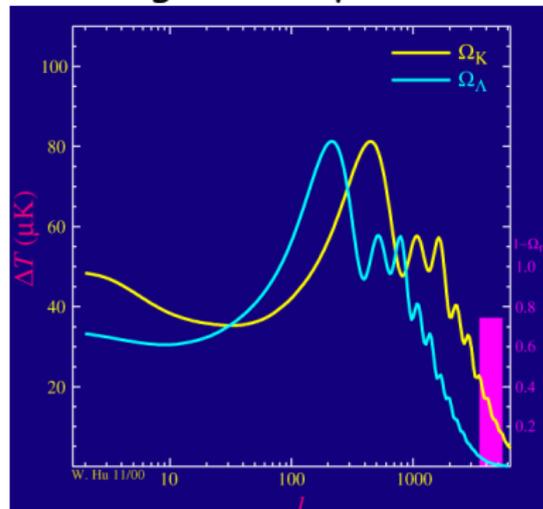
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



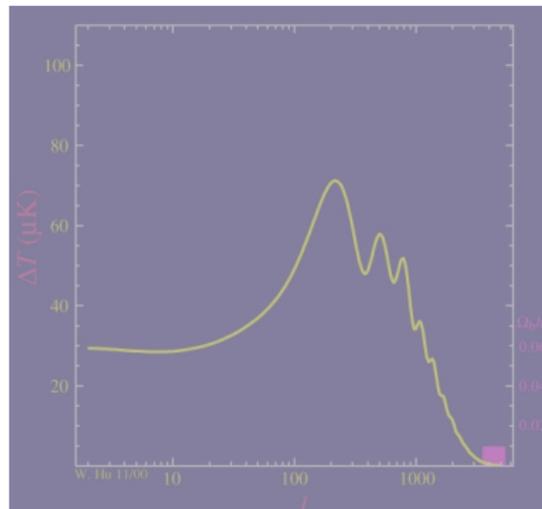
► Replay



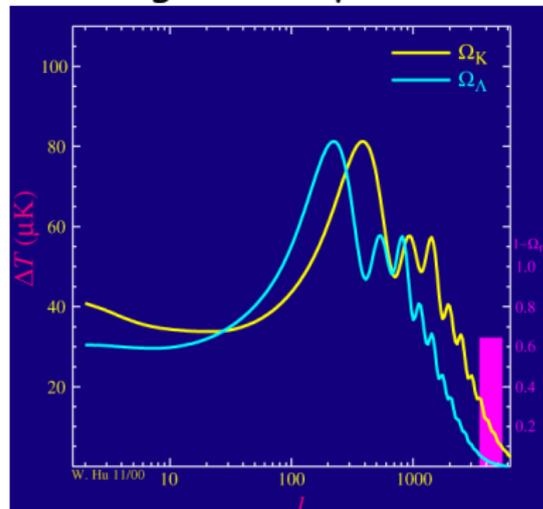
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



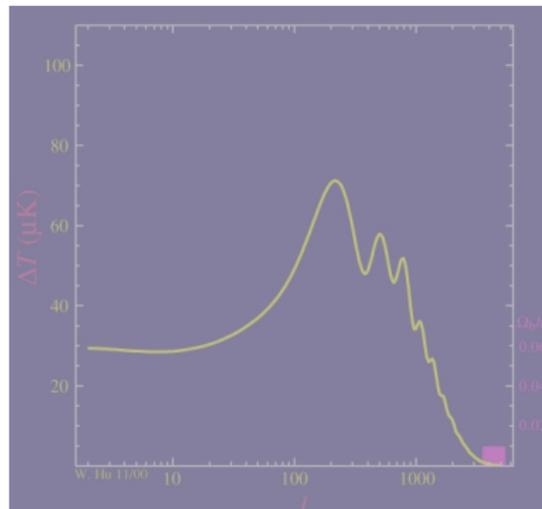
► Replay



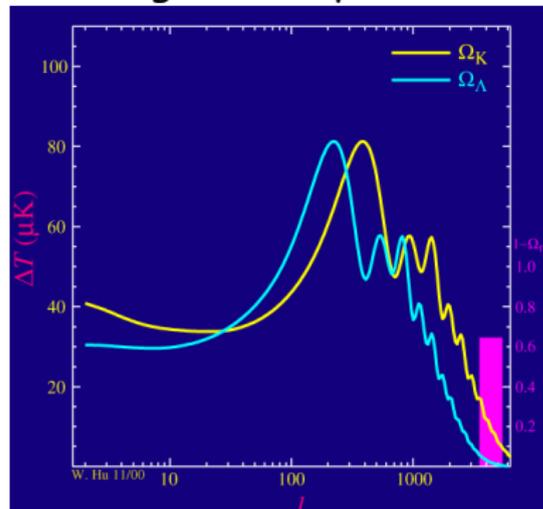
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



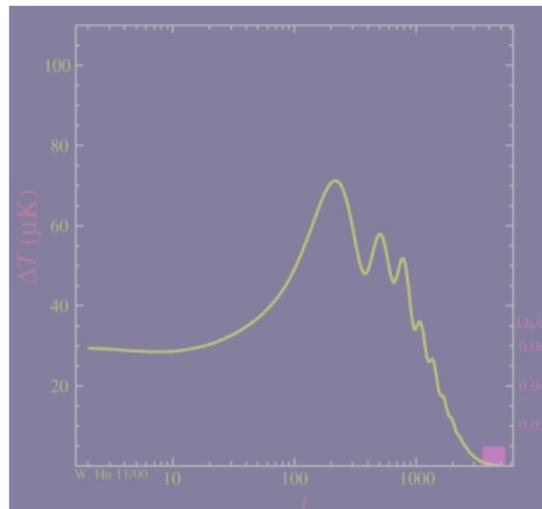
► Replay



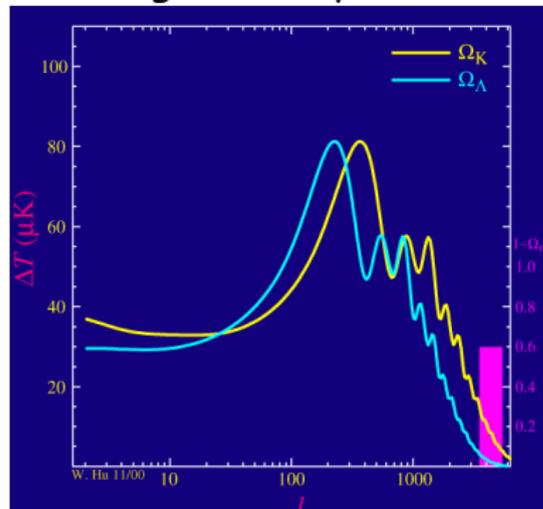
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



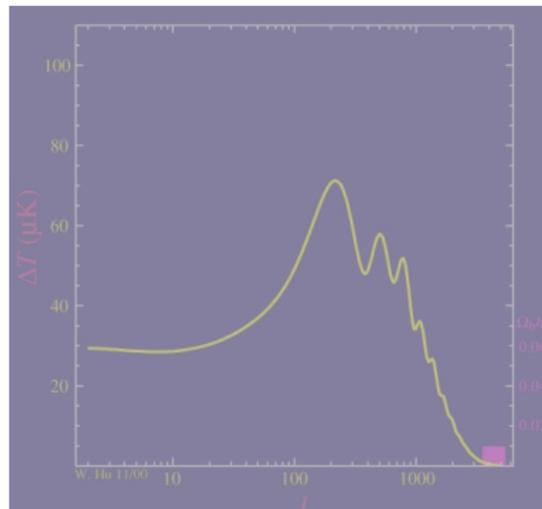
► Replay



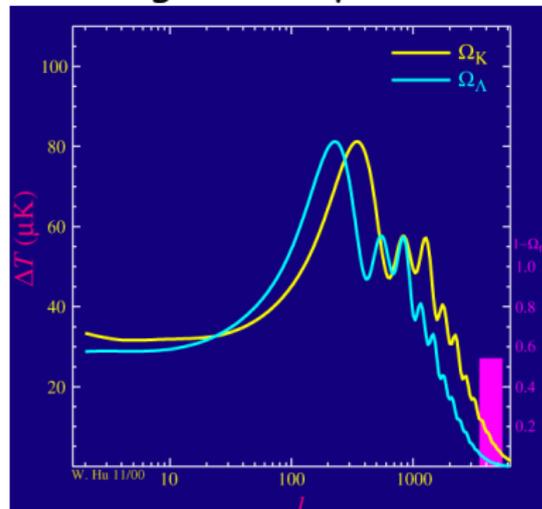
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



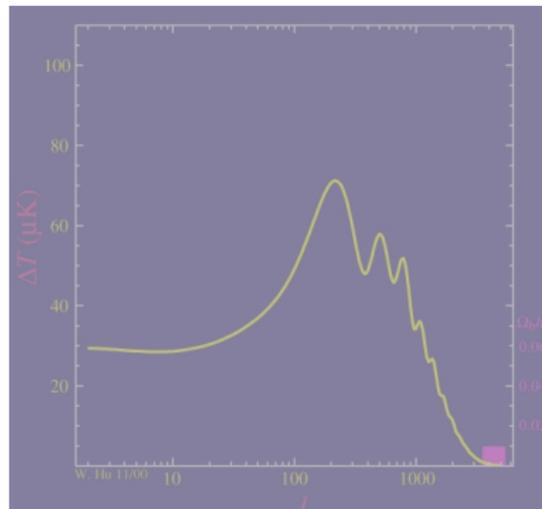
► Replay



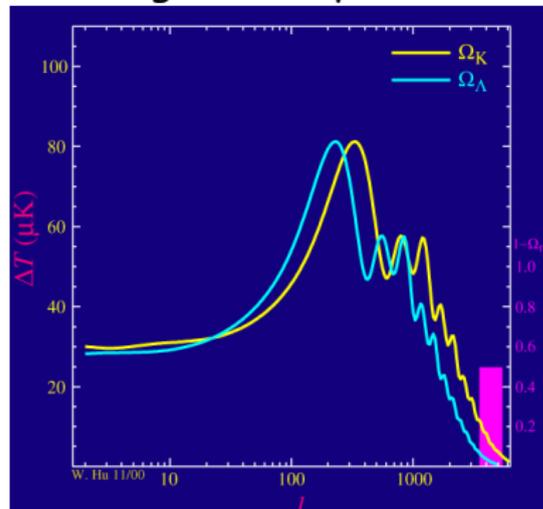
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



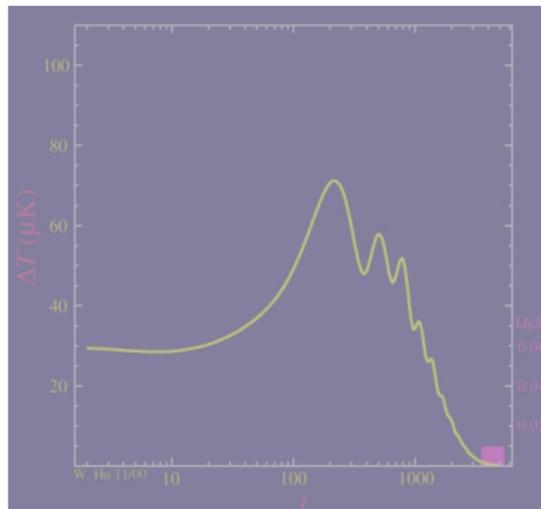
► Replay



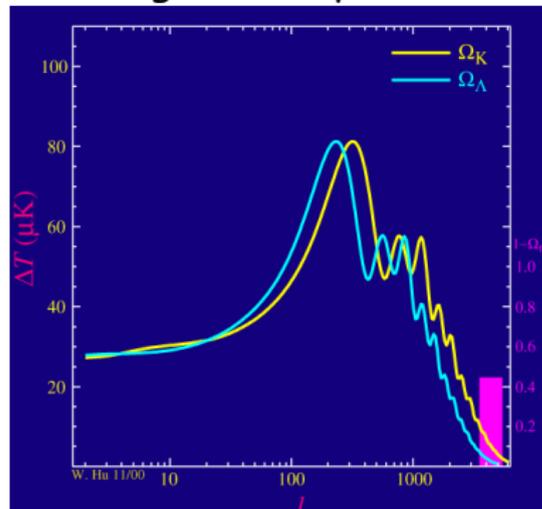
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



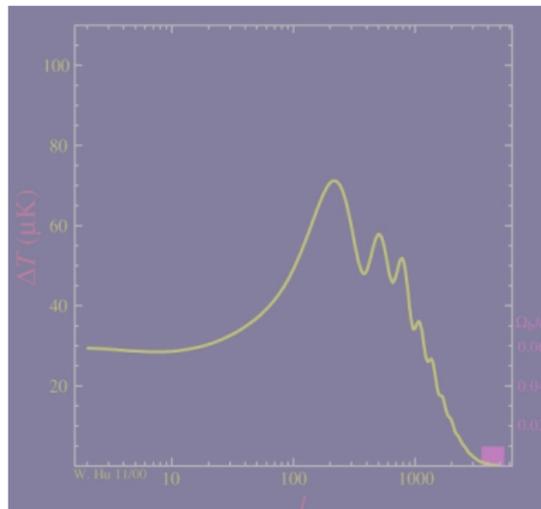
► Replay



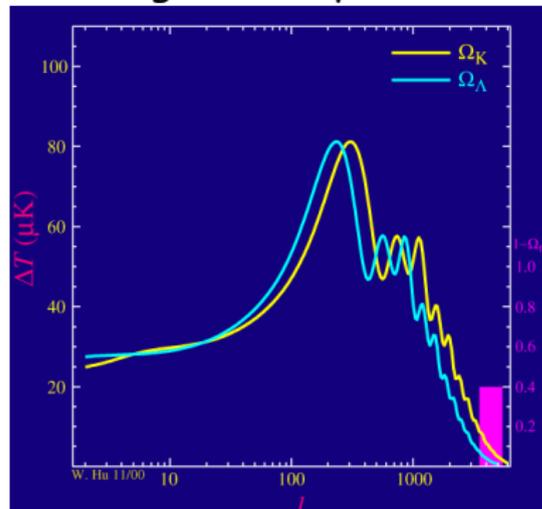
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



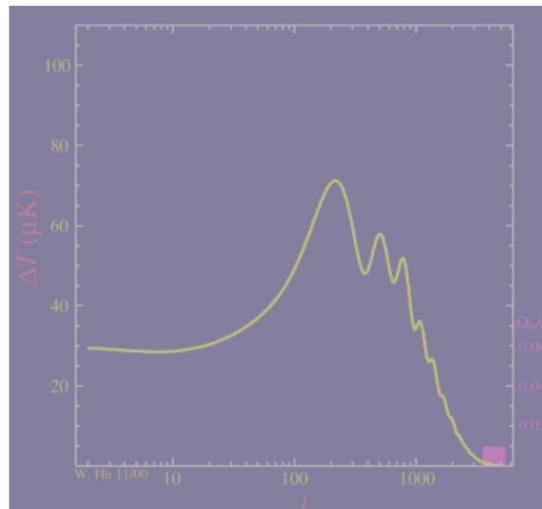
► Replay



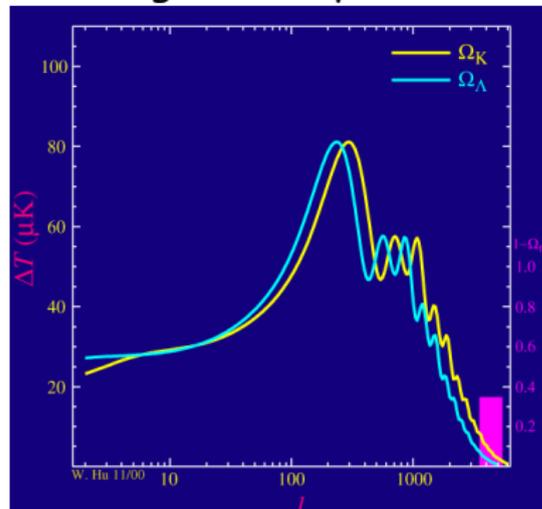
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



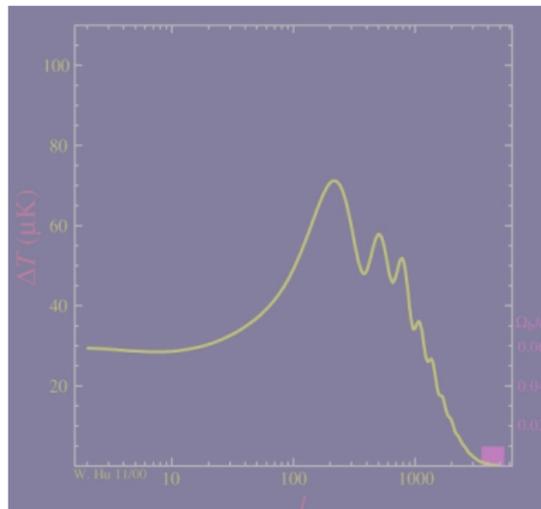
► Replay



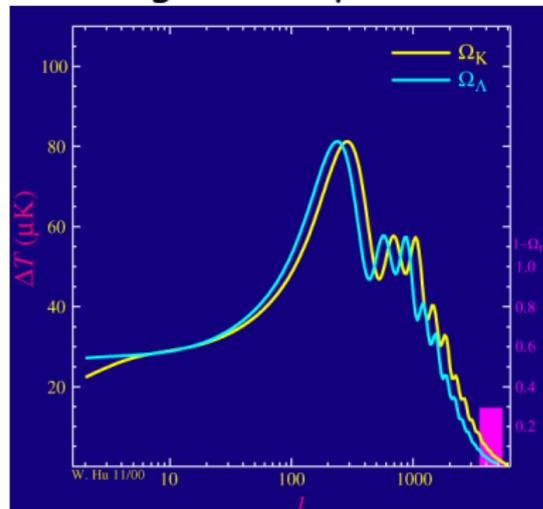
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



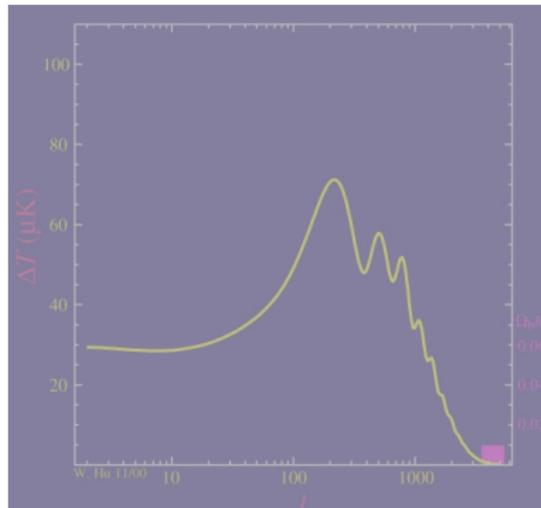
► Replay



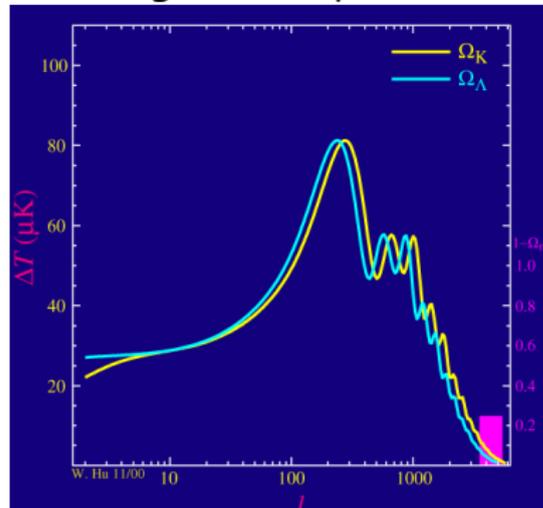
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



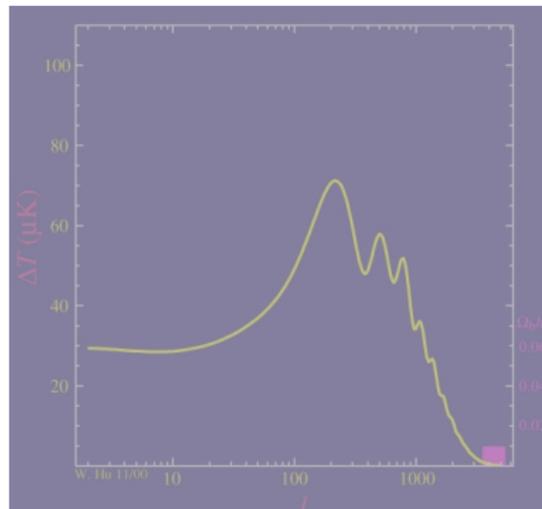
► Replay



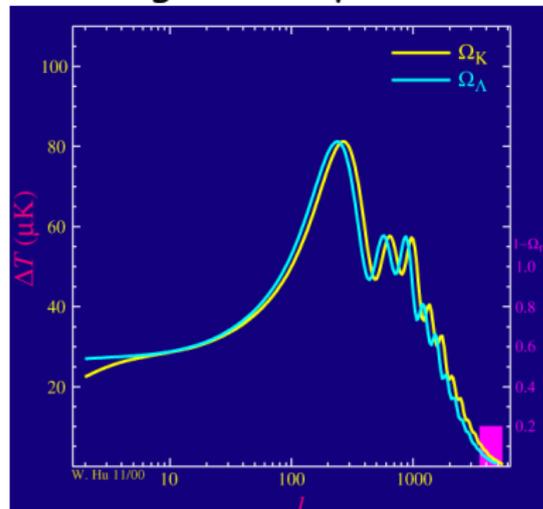
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



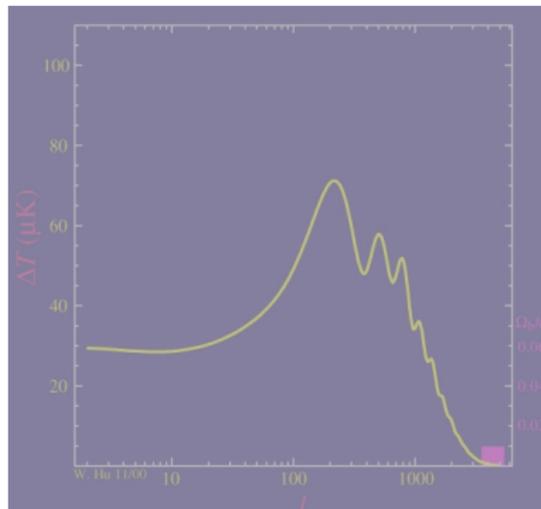
► Replay



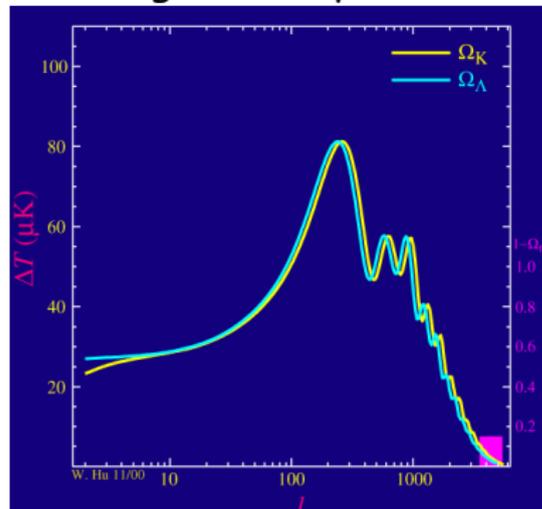
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



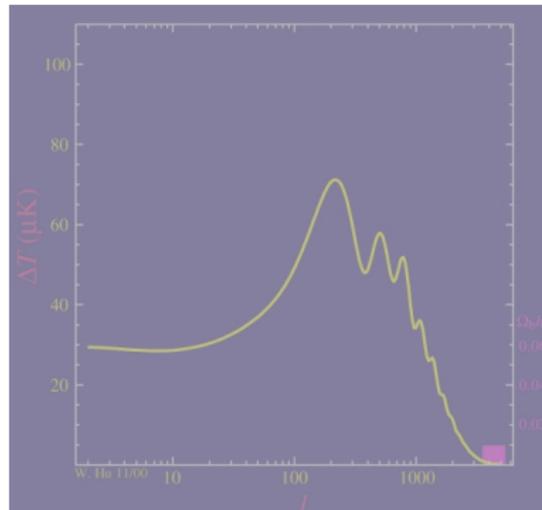
► Replay



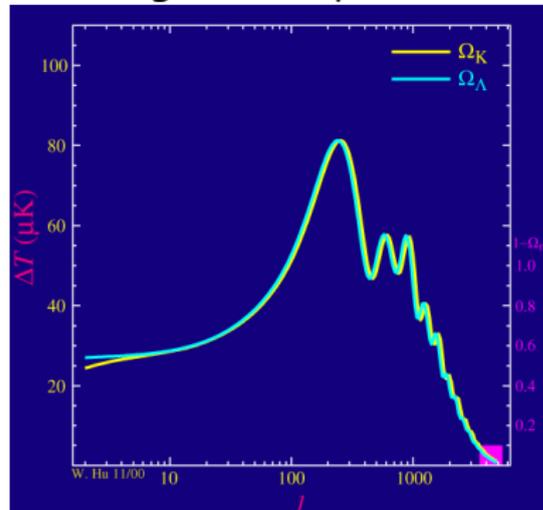
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



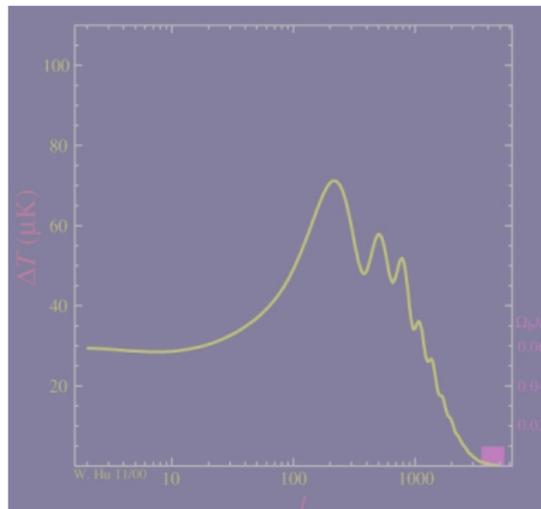
► Replay



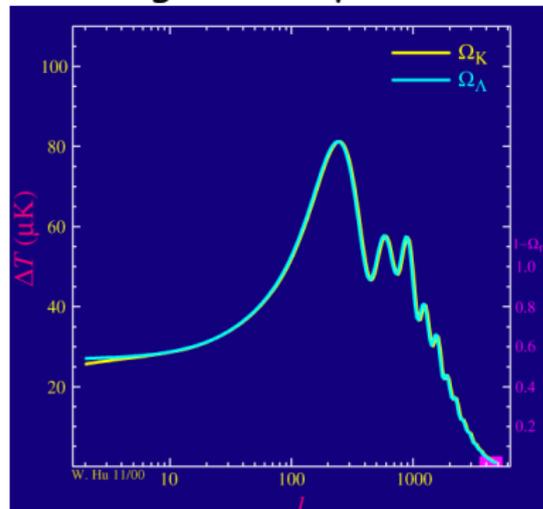
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



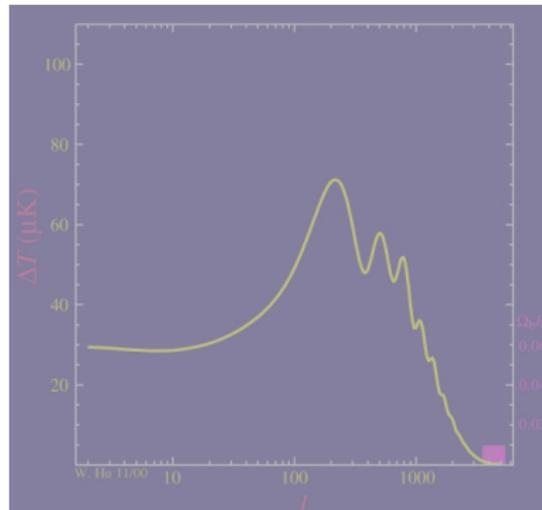
► Replay



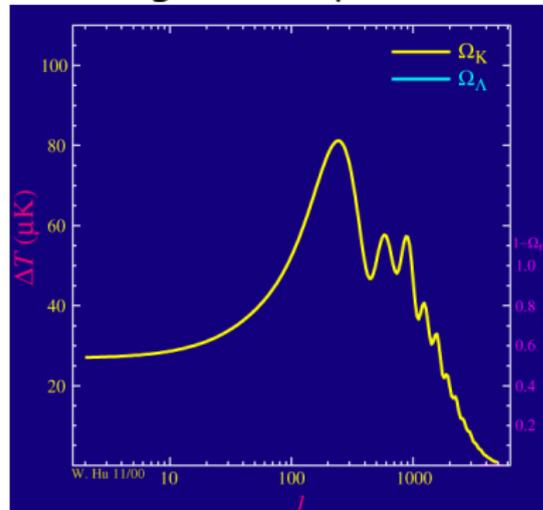
► Replay

# Un outil sensible !

## Fraction de matière "ordinaire" Effets géométriques



► Replay



► Replay

# Une mesure de ... tout !?

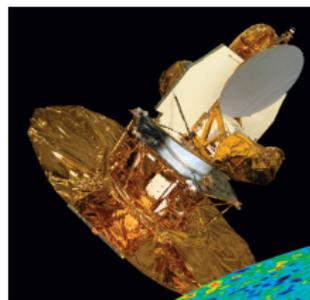
Les anisotropies du CMB combinent :

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

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

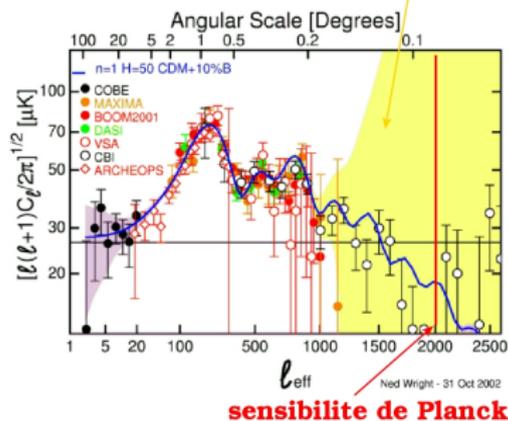
# Aperçu expérimental

- COBE-DMR (1992) anisotropies (radio)
- WMAP 2003(-7) Mesures de  $C_\ell \rightarrow \ell = 1000$  - radio
- Planck 2007(-8)  $C_\ell \rightarrow \ell = 2000$  COBE $\times 1000$ , WMAP $\times 10$
- Boomerang, Maxima (1998) : 1er pic (bolomètres)
- Archéops (2002)
- CBI, VSA, DASI (radio, 2000-2) : grands  $\ell$
- futur à tous les etages : sol (BRAIN, CLOVER, POLARBEAR,...), ballon (OLYMPO, EBEX, ...), espace (BPOL?)

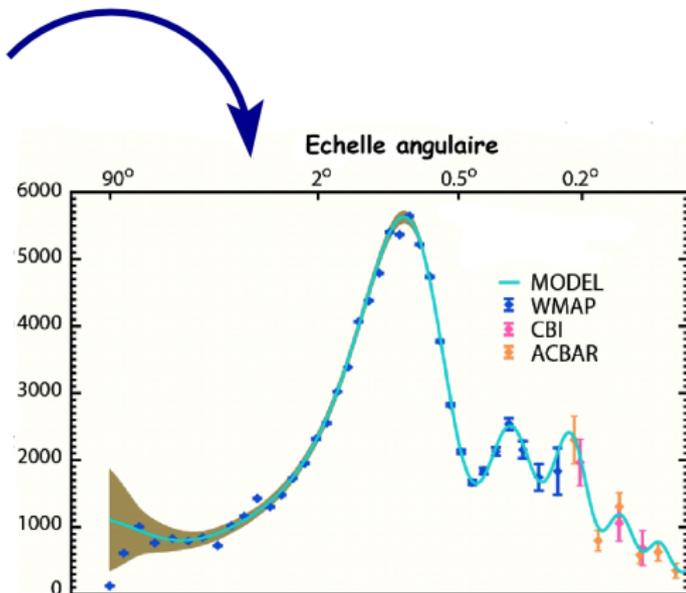


# Les $C_l$ hier et aujourd'hui

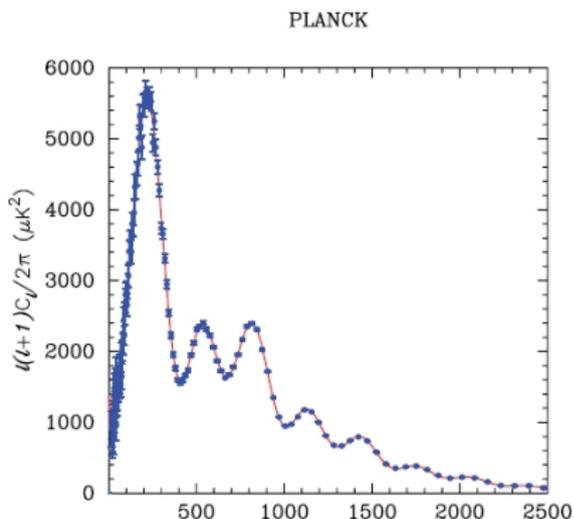
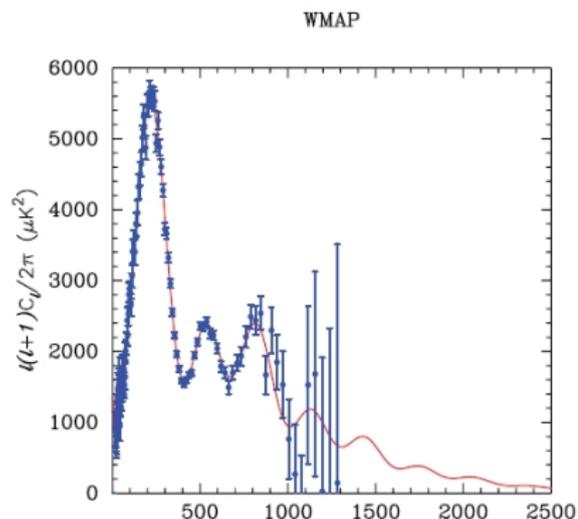
sensibilite (prevue) de WMAP



Resultats de WMAP



# Planck vs WMAP (température)



# Planck : la mission

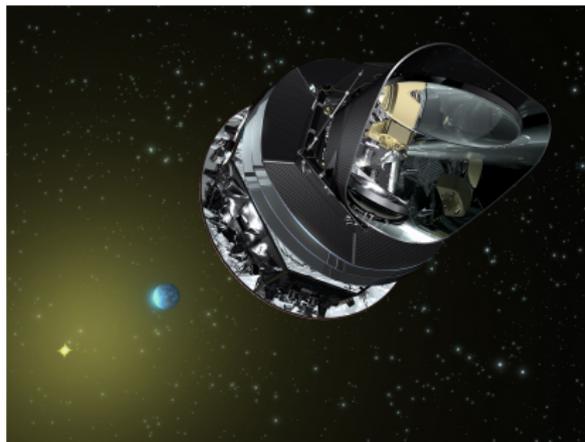
Mission de l'ESA

Lancement 2009 (15 Avril?)

(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 🇫🇷)



# Planck : la mission

Mission de l'ESA  
Lancement 2009 (15 Avril?)  
(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 🇫🇷)



# Planck : la mission

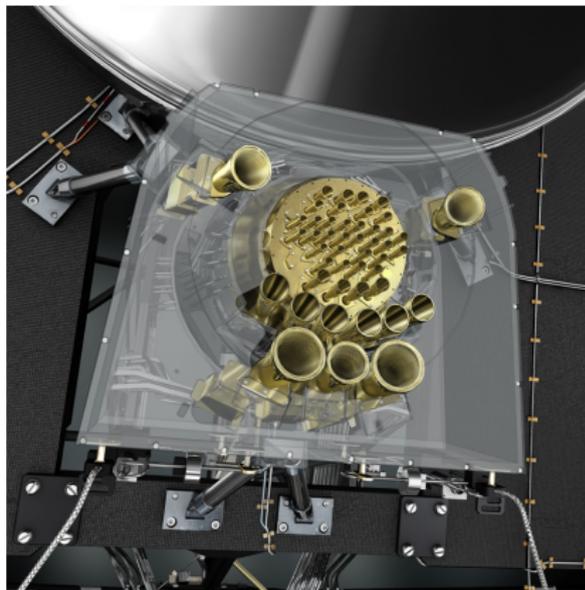
Mission de l'ESA

Lancement 2009 (15 Avril?)

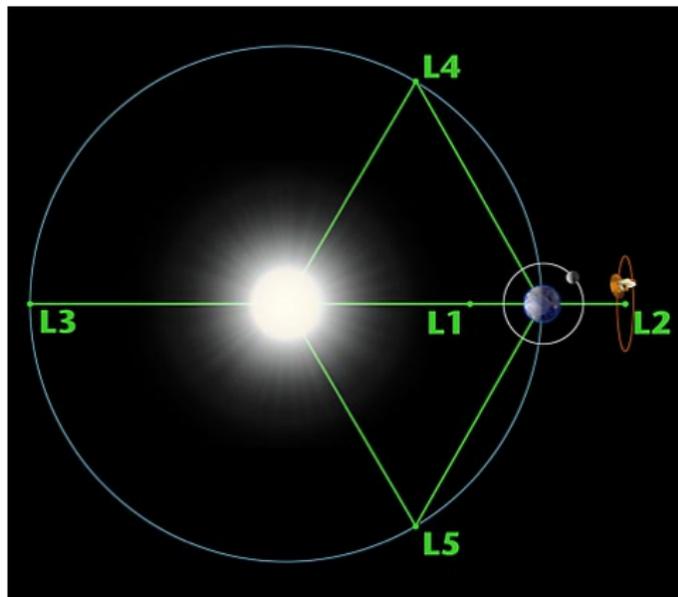
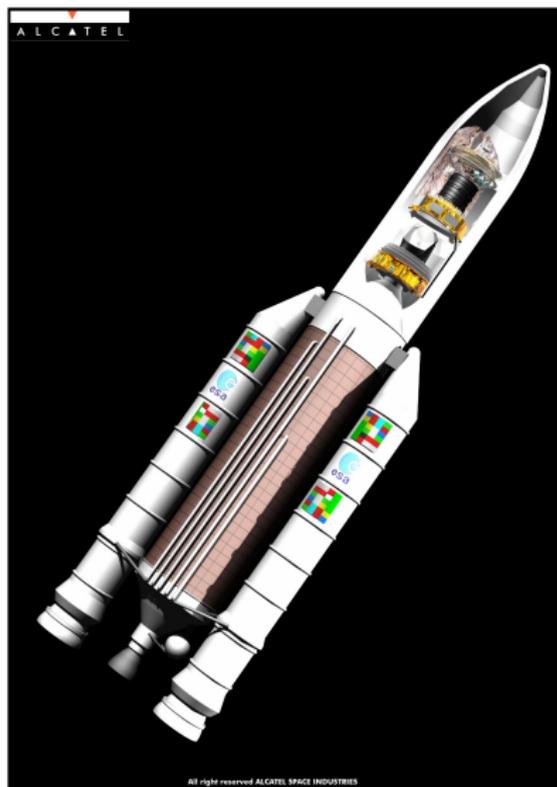
(avec Herschell)

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 🇫🇷)

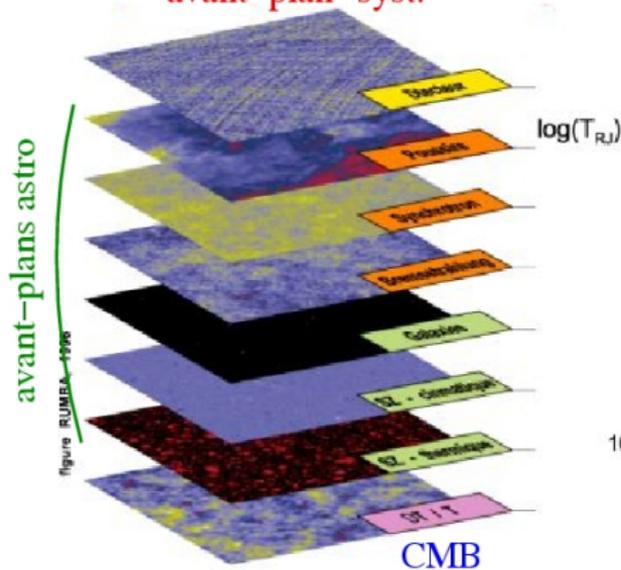


# Planck : le vol



# Avant-plans

"avant-plan" syst.



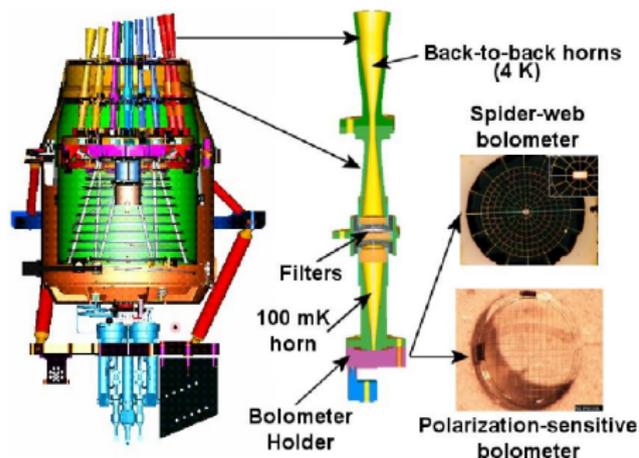
Canaux de Planck (approx)

LFI

HFI

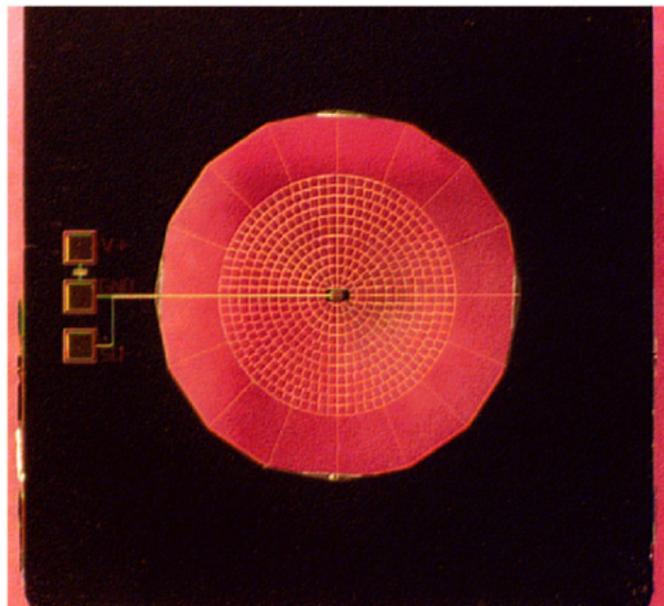
143 217 353 450 GHz





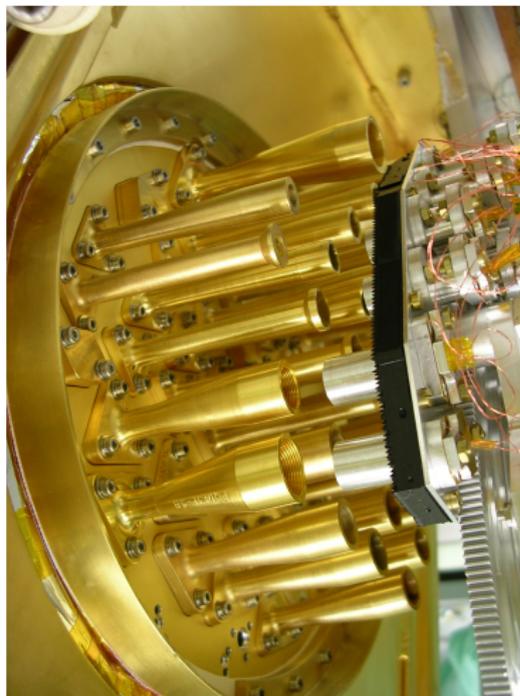
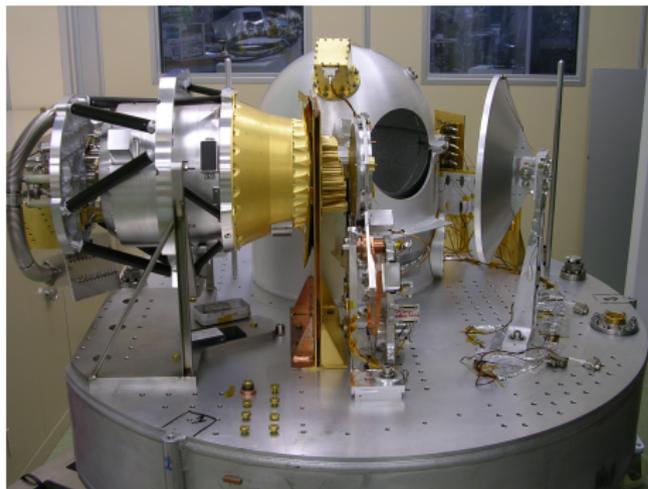
- Au foyer du télescope ("dans LFI")
- Refroidissement à plusieurs étages
- Dernier étage (dilution  $^3\text{He}/^4\text{He}$ )  $T \sim 0.1 \text{ K}$
- Détecteurs : bolomètres (52 voies)
- "prototype" = Archéops

# Les bolomètres

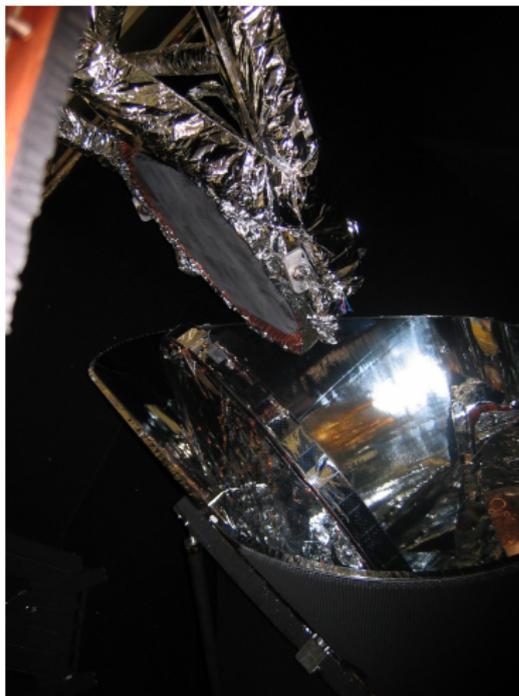
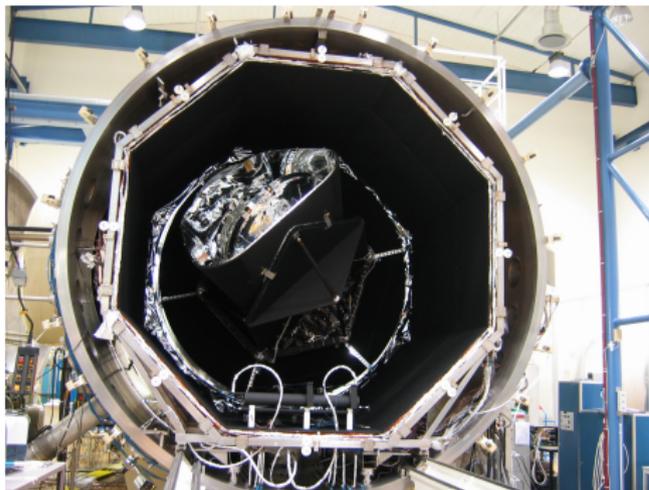


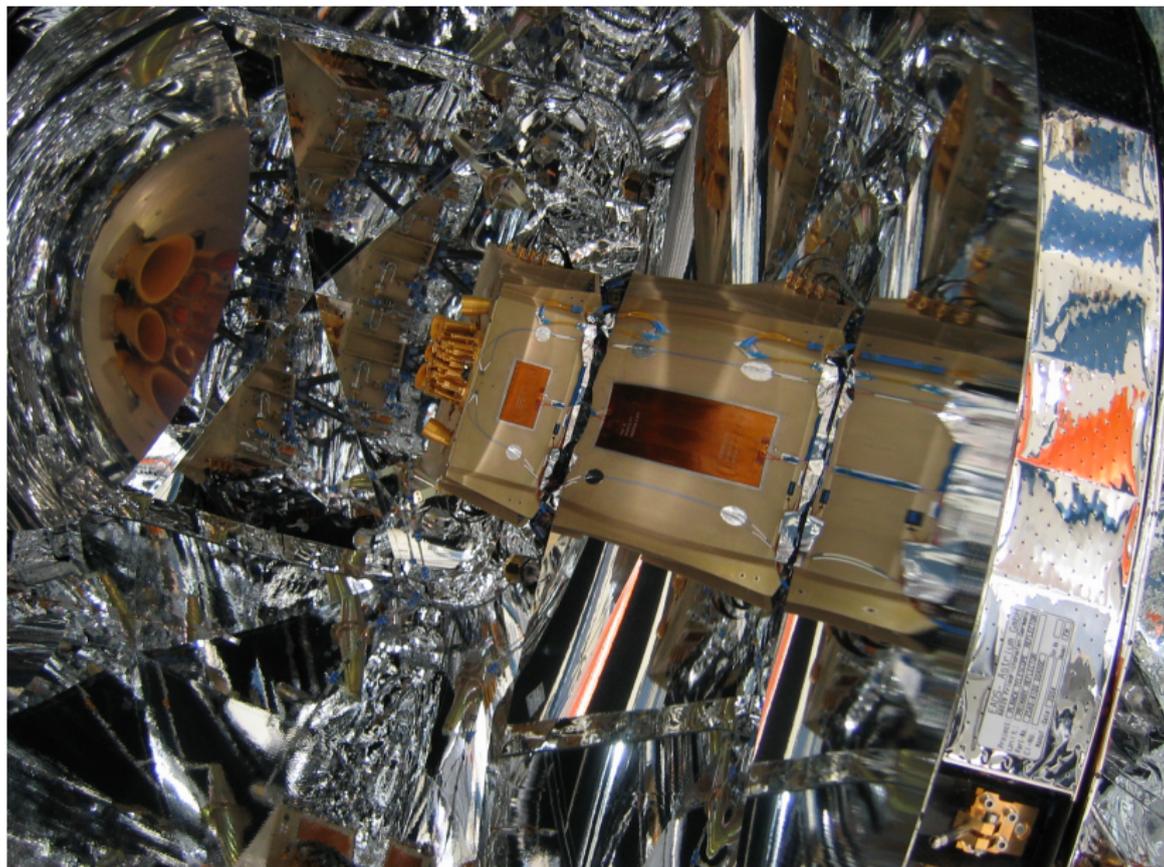
- mesurent la chaleur déposée par les  $\gamma$
- grille  $\rightarrow$  cosmiques
- taille 2.6mm
- "fils"  $4 \times 1 \mu\text{m}$
- $T \sim 100 \text{mK}$  (sensibilité)

# Etalonnage de HFI (2006)

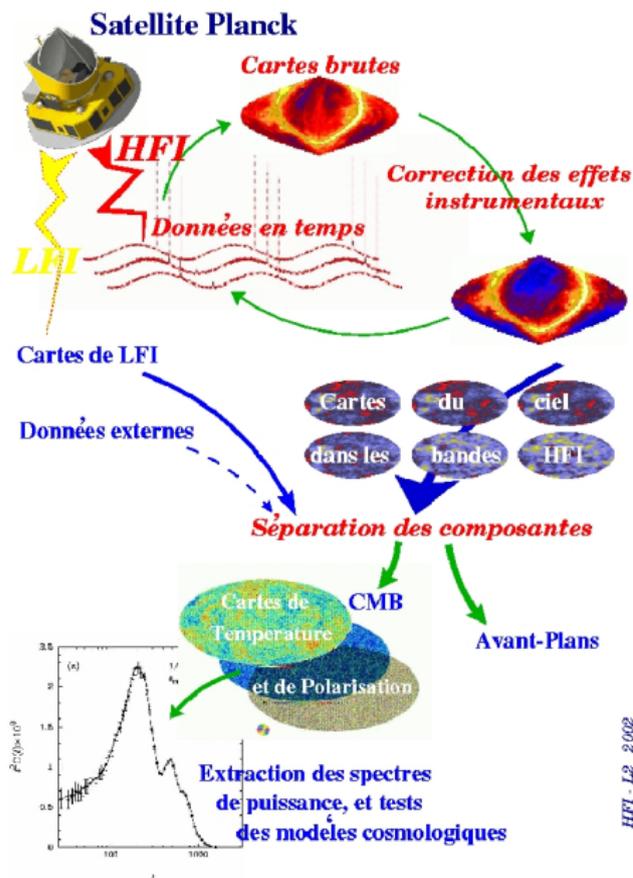


# Etalonnage de Planck (2008)





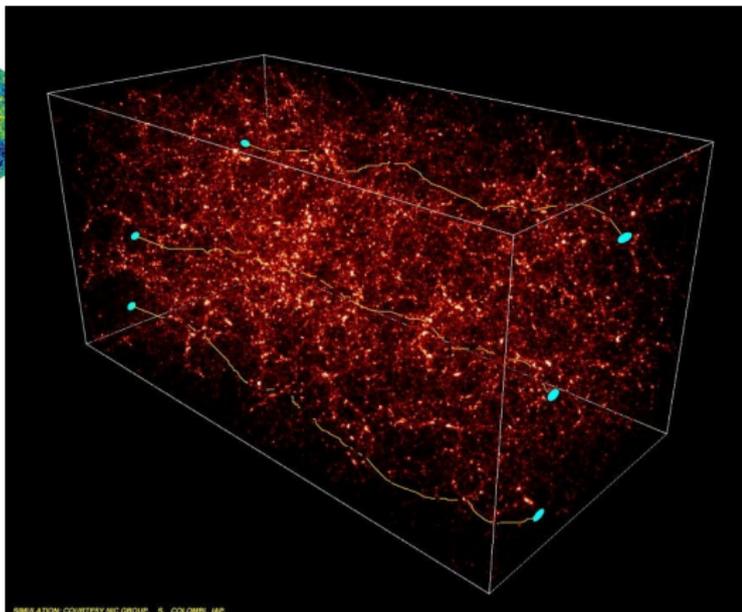
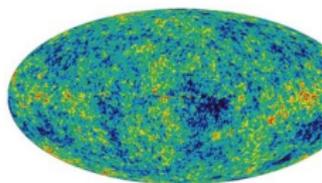
# Traitement de données



- plusieurs niveaux
- C'EST COMPLIQUE !
- collaboration multi-instituts
- calculs massivement parallèles (bcp de mémoire et d'I/O) i.e. reconstruction de cartes ( $\sim 6.5 \cdot 10^6$  pixels  $S_p$ ) données d'un an (tout le ciel)  $\sim 6 \cdot 10^9$  échantillons  $M_i$  (25 Go) problème matriciel  $M_i = A_{ip} S_p + N_i$  ( $N :=$  bruit)
- Rappel : données "publiques" après un an ( $\sim 2012-3!$ )

HFI - L2 2002

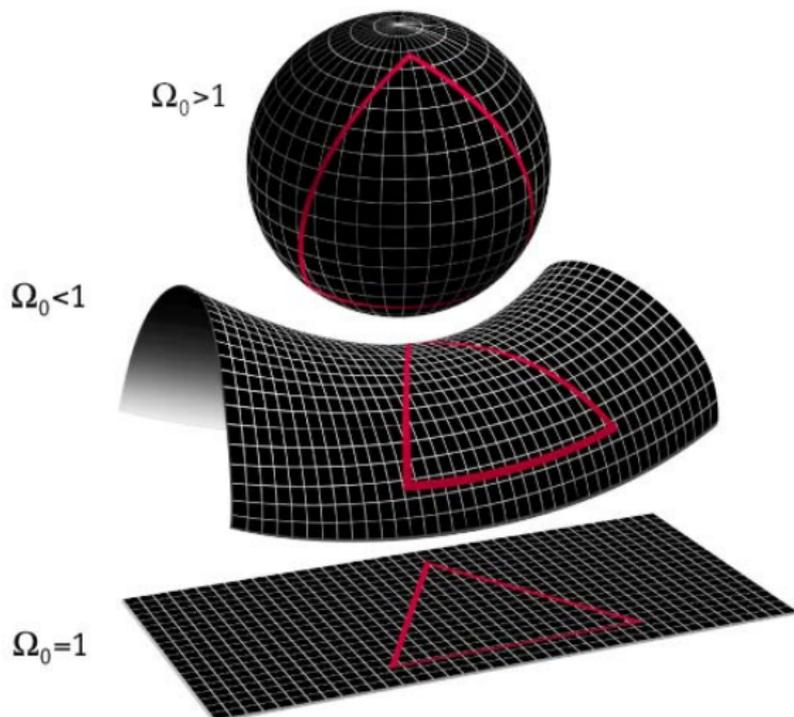
# Lensing du CMB



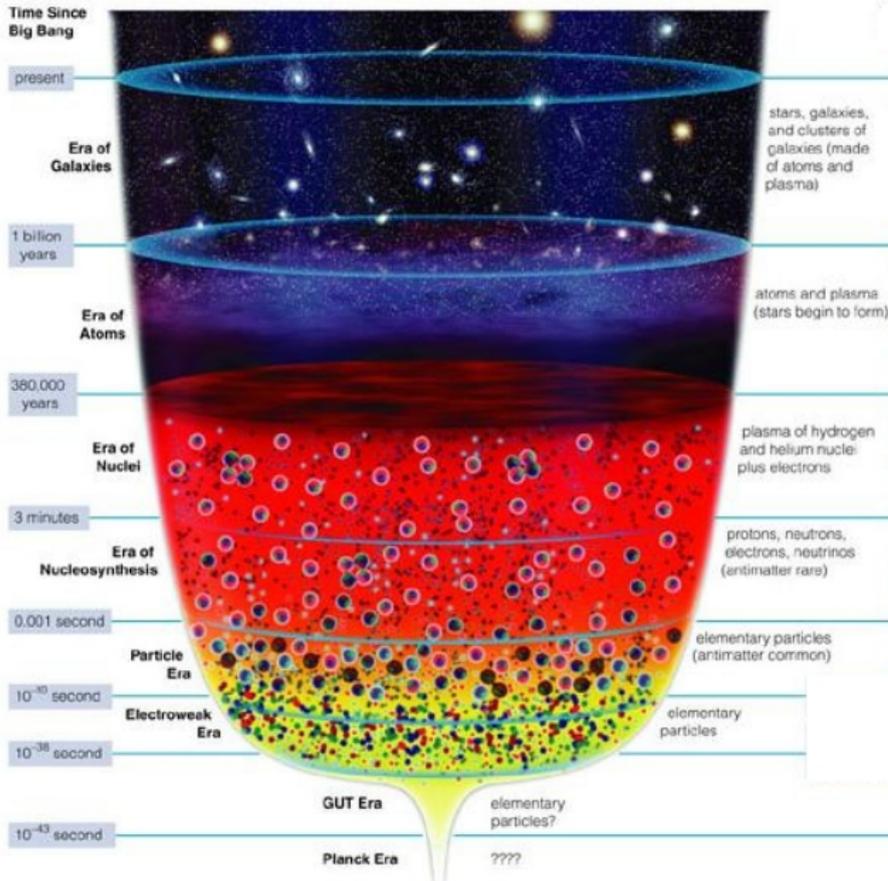
Petites (mais détectables) distorsions de l'image du CMB par la matière sur son parcours → contraintes cosmologiques

Planck seul  $\Rightarrow m_\nu < .15eV$

# Géométrie(s) de l'univers (rappel)



MAP990006



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

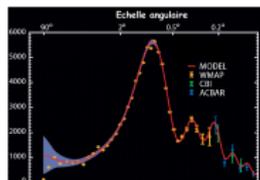
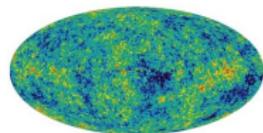
(4) "Libération" des photons = **découplage** (à 300000 ans) → **émission du CMB**

(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 (??)



Observations des anisotropies du CMB (WMAP) & modèles  $\Rightarrow$   
A l'époque de la recombinaison (émission du CMB)

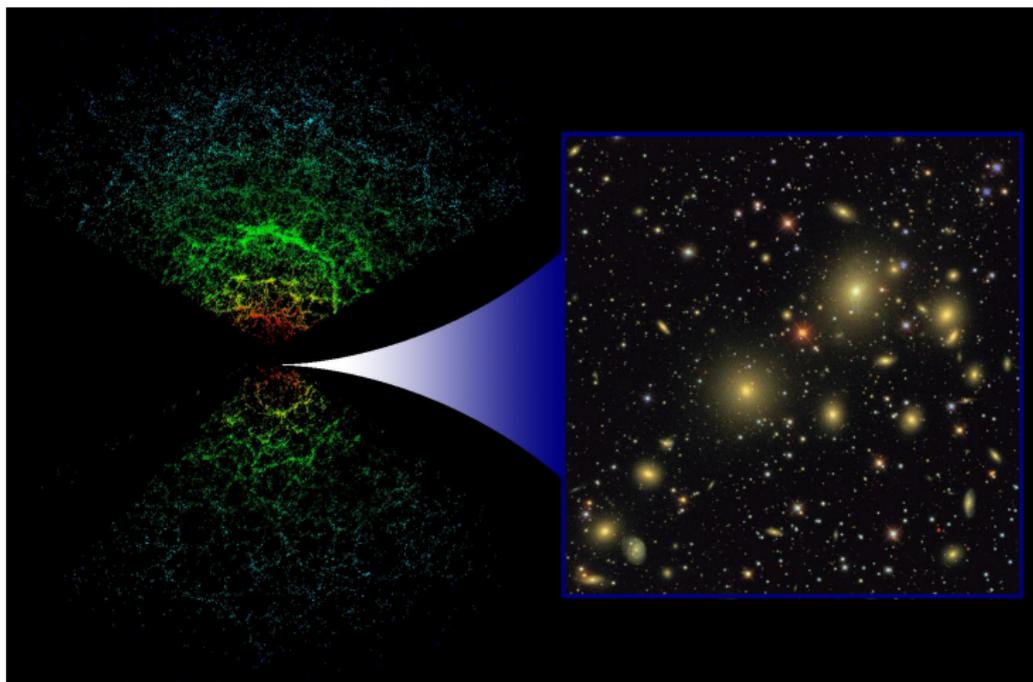
$\rightarrow \exists$  une taille de structure "préférée" (1er pic des  $C_l$ ) pour baryons

Evolution des structures ultérieure : gravitation (newtonnienne)

$\rightarrow$  "croissance" (linéaire d'abord) des plus grosses

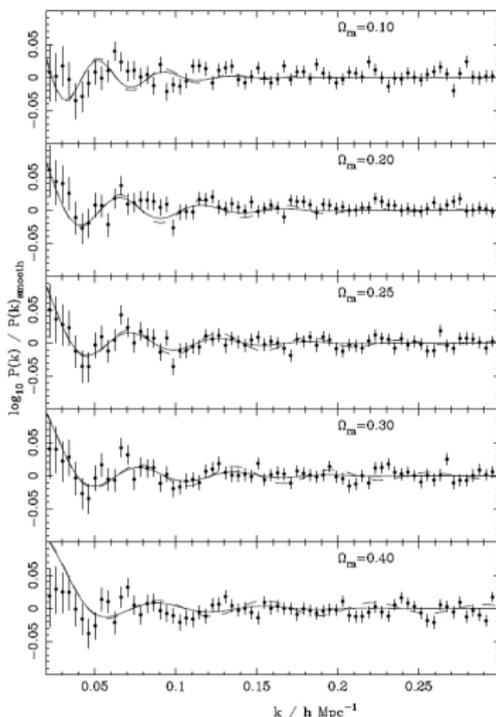
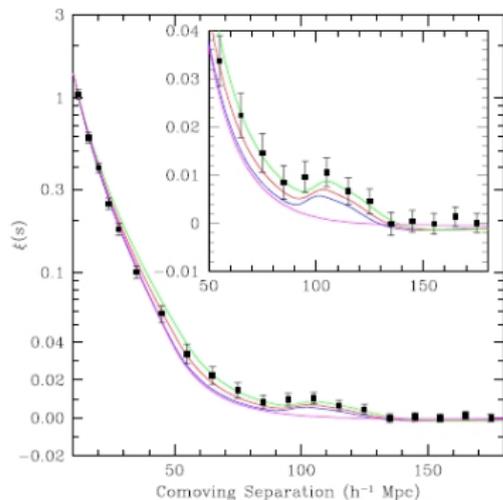
$\Rightarrow$  échelle préférée dans la distribution de la matière (baryonique (galaxies) ou non)  $\sim 500$  M années lumières

$\rightarrow$  suivi de l'évolution de cette taille vs  $z$



Distribution spatiale  $\rightarrow$  analyse "spectrale" / fonction de corrélation

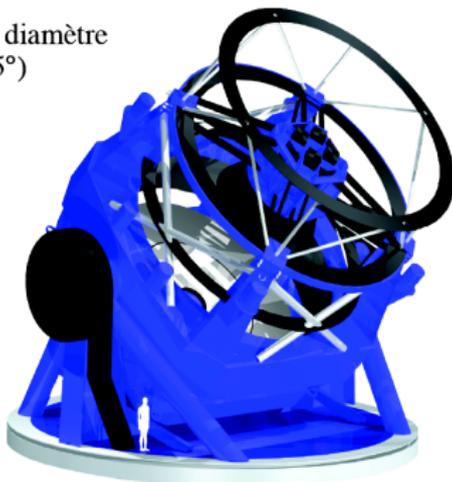
# Pic(s) acoustique(s) ds la distri des galaxies





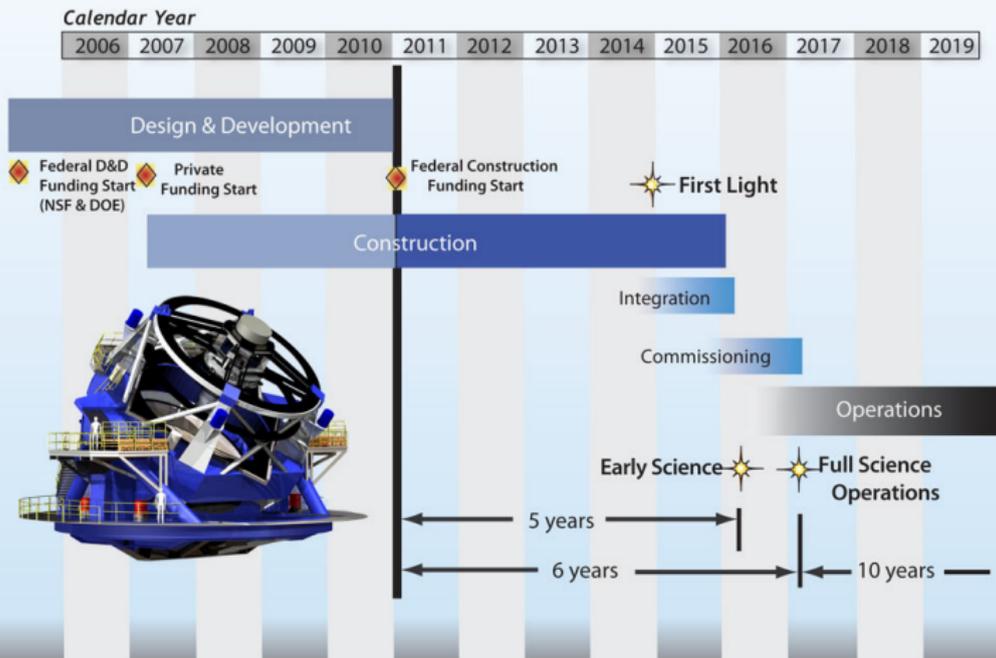
## LSST : Large Synoptic Survey Telescope

- Télescope optique de 8,4 m de diamètre avec caméra grand champ ( $3,5^\circ$ )
- Au Chili (Cerro Pachon)
- imaginé fin des années '90
- Caméra de 3.2 Gpixels
- Lecture 2s
- 6 filtres ugrizy
- WL jusqu'à  $z \sim 3$
- SNIa jusqu'à  $z \sim 1$
- BAO: oscillations acoustiques
- Galaxies et amas de galaxies
- Phénomènes transitoires



<http://www.lsst.org/>

## LSST Project Schedule



# Projet BAO radio

- collab. IRFU, LAL, CMU, CITA, Fermilab + Obs. de Paris (Nancay), SAAO, ...
- carte 3D de la distribution de l'hydrogène atomique (HI) par son émission 21cm
- technique : interféromètre grand champ (10-100 deg<sup>2</sup>)
- récepteurs large bande
- technologie **numérique**
- antennes de grande surface à bas coût (cylindres?)  $\sim 10000m^2$
- test a Nancay (élect.) puis Pittsburgh (électronique + antenne, 2009)
- deux pistes : Canada (projet en cours d'laboration), Maroc (univ. Al Akhawayn, Ifrance)
- cout  $\sim 12$  Meuros ?? ; planning :  
2008-10 R& D 2011-13 construction  
2014 oprations



# Supernovæ de type Ia

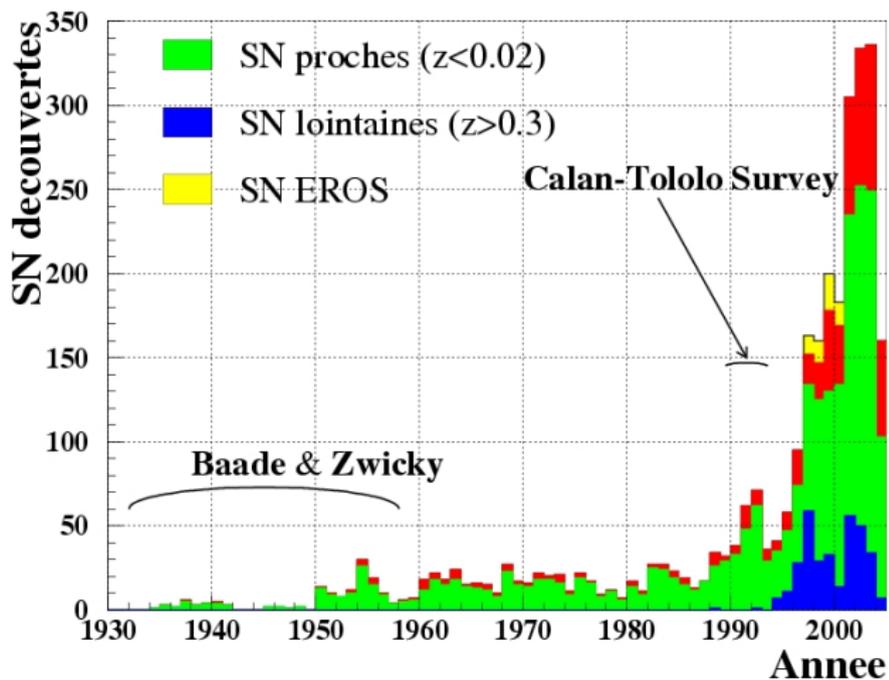
- Intérêt cosmologique
- Modèle d'explosion
- Projets : SNLS, SNIFS, SNAP/JDEM

# Supernovæ

- Explosion d'étoiles
- $L \sim 10^{10} - 10^{11} L_{\odot}$  (SNIa)  
(détectables jusqu'à des redshift  $\approx 1$ )
- fréquence : 1 SN/GAL/siècle
- 2 espèces :
  - ▶ SNIa
    - ★ SNe **thermonucléaires**
    - ★ caractéristiques **homogènes**
  - ▶ SNII,Ib,c
    - ★ SNe **gravitationnelles**
    - ★ grande diversité, continuité entre classes?

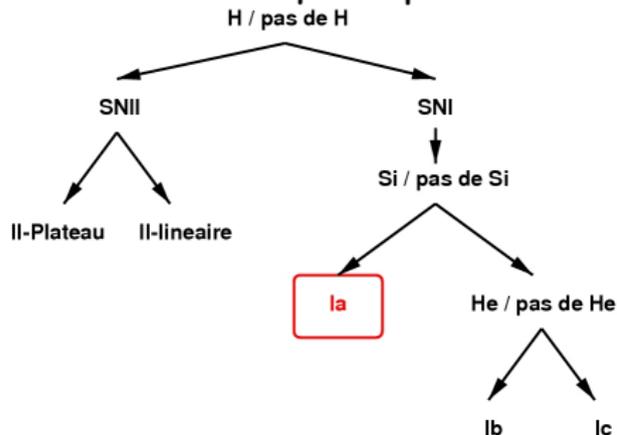


# Taux de découvertes

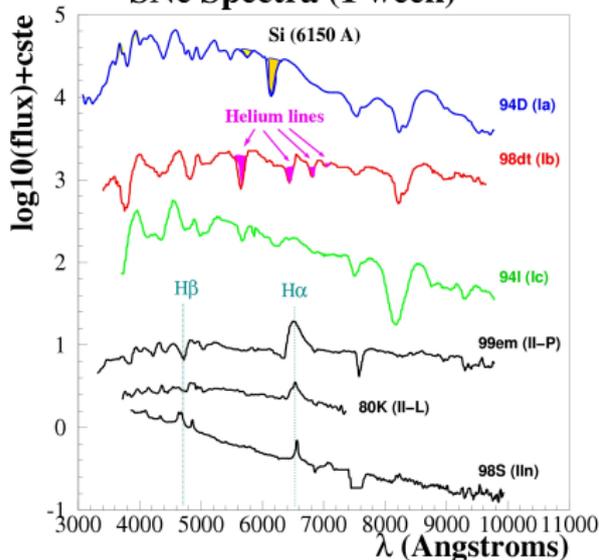


# Classification des SN

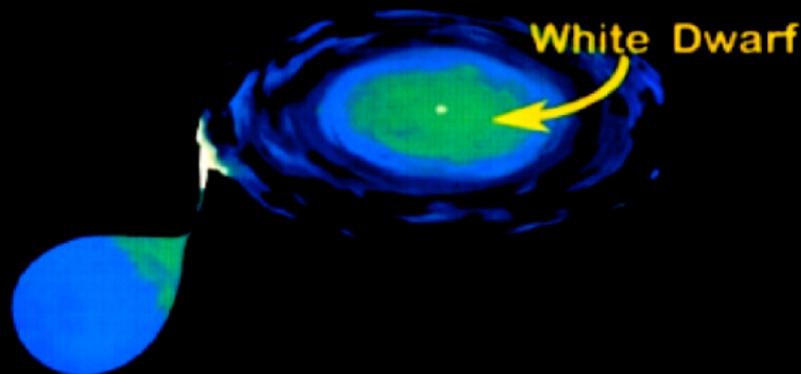
## Caractéristiques spectrales



## SNe Spectra (1 week)



## Type Ia Supernova



An explosion resulting from the thermonuclear detonation of a White Dwarf Star.

# Naine Blanche

"fin de vie" d'une étoile "ordinaire" ( $\sim 2M_{\odot}$ )

Fusion thermonucléaire  $H \rightarrow He \rightarrow C, O$

A l'arrêt de la fusion (plus de combustible)  $\rightarrow$  contraction  $\rightarrow$  ionisation

Stabilité de la NB : gravitation  $\leftrightarrow P_{Fermi}$ (electrons) (matière dégénérée)

Equilibre maintenu (cf annexes) tant que

$$M_{\star} \leq M_{Chandrasekhar} = \left( \frac{hc}{3G} \right)^{3/2} \left( \frac{1}{\mu m_p} \right)^2 (\sim 1.44M_{\odot})$$

# Naine Blanche

"fin de vie" d'une étoile "ordinaire" ( $\sim 2M_{\odot}$ )

Fusion thermonucléaire  $H \rightarrow He \rightarrow C, O$

A l'arrêt de la fusion (plus de combustible)  $\rightarrow$  contraction  $\rightarrow$  ionisation

Stabilité de la NB : gravitation  $\leftrightarrow P_{Fermi}$ (electrons) (matière dégénérée)

Equilibre maintenu (cf annexes) tant que

$$M_{\star} \leq M_{Chandrasekhar} = \left( \frac{hc}{3G} \right)^{3/2} \left( \frac{1}{\mu m_p} \right)^2 (\sim 1.44M_{\odot})$$



# Naine Blanche

"fin de vie" d'une étoile "ordinaire" ( $\sim 2M_{\odot}$ )

Fusion thermonucléaire  $H \rightarrow He \rightarrow C, O$

A l'arrêt de la fusion (plus de combustible)  $\rightarrow$  contraction  $\rightarrow$  ionisation

Stabilité de la NB : gravitation  $\leftrightarrow P_{Fermi}$ (electrons) (matière dégénérée)

Equilibre maintenu (cf annexes) tant que

$$M_{\star} \leq M_{Chandrasekhar} = \left( \frac{hc}{3G} \right)^{3/2} \left( \frac{1}{\mu m_p} \right)^2 (\sim 1.44M_{\odot})$$



'One is left speculating on other possibilities.' S. Chandrasekhar

'I think there should be a law of nature to prevent a star from behaving in this absurd way' sir A. Eddington



# Mécanisme d'explosion (SNIa)

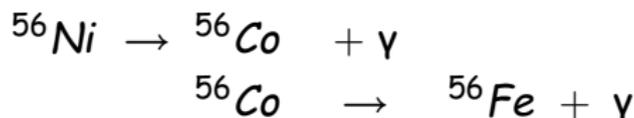
Système progéniteur = naine blanche (C/O) + géante rouge

**accretion** vers la NB (+ compacte)  $\Rightarrow M_{star} \nearrow$

Quand  $M_{*} \sim M_{Chandrasekhar} (1.4M_{\odot})$  : **explosion thermonucléaire**

Combustion totale (**masse cste de combustible !**)

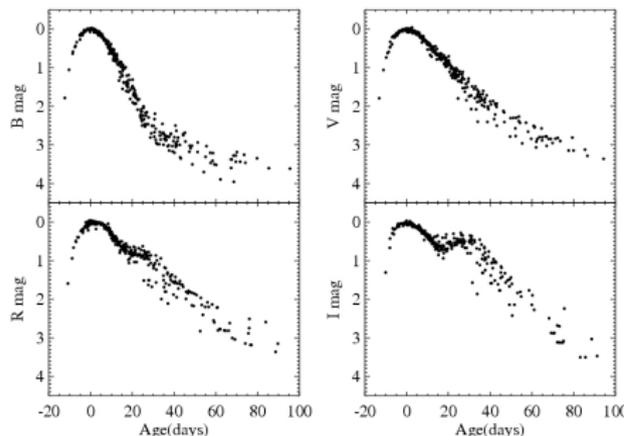
C/O  $\rightarrow$  éléments plus lourds -  $0.5M_{\odot}$  de  $^{56}\text{Ni}$



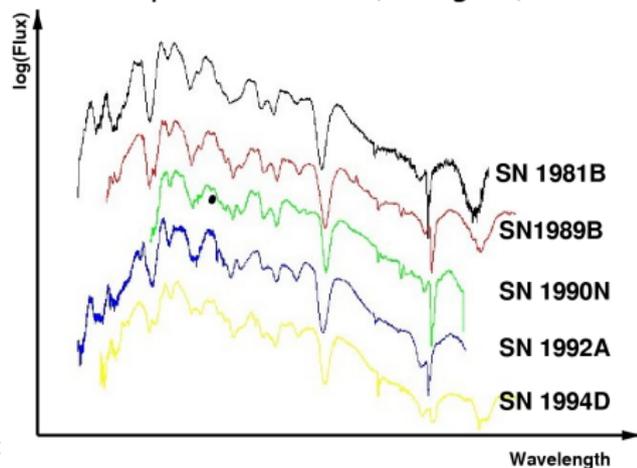
$\rightarrow$  forme de la "courbe de lumière"

# Homogénéité des SNIa

SNIa du survey CfA (Riess *et al.*)



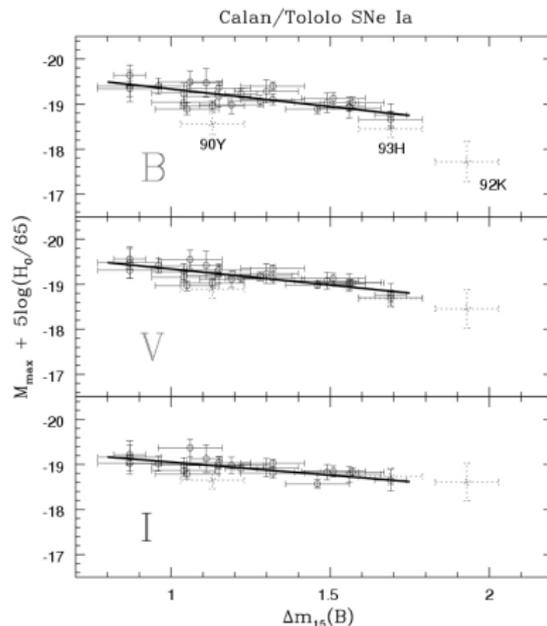
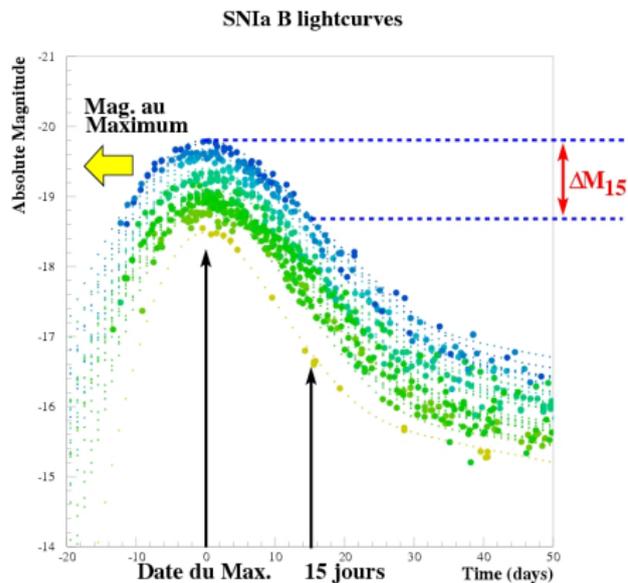
Spectres @ max (P. Nugent)



$$\sigma_{M(B)} \sim 0.4 \text{ mag} \quad (\text{mag} = -2.5 * \log(\text{flux}) + \text{cste})$$

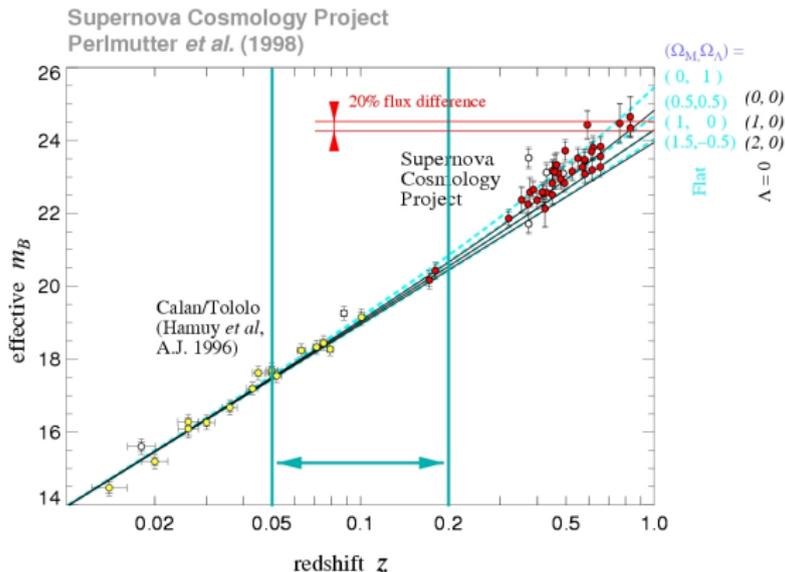
Mais qq SNIa : bleues & "surlumineuses" (91T, 99ac)  
rouges & souslumineuses (86G, 91bg)

# Standardisation des SNIa



Hamuy et al 1996

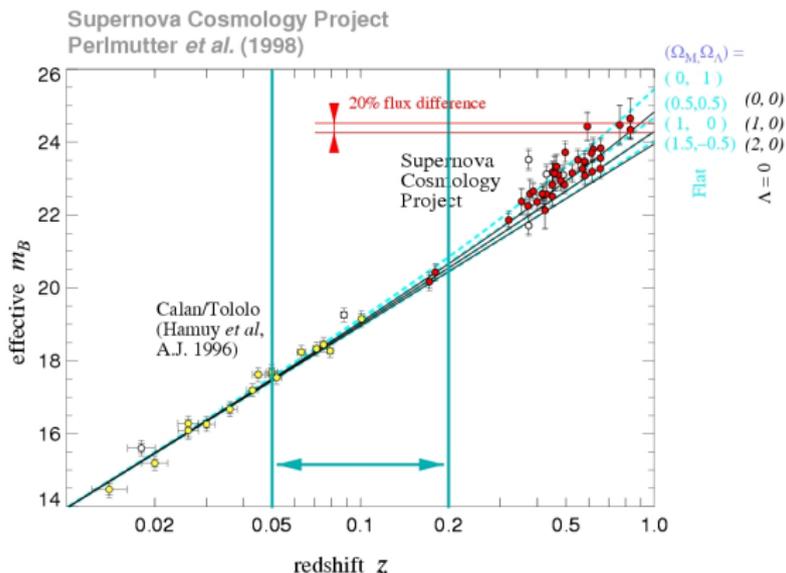
# Relation magnitude $\leftrightarrow$ redshift



$$m \sim M - 5 \log_{10}(H_0) + 5 \log_{10}(cz)$$

lois  $1/R^2$  et de Hubble

# Relation magnitude $\leftrightarrow$ redshift



$$m \sim M - 5 \log_{10}(H_0) + 5 \log_{10}(cz) + 1.086 (1 - q_0)z + O(z^2)$$

$$q_0 = \Omega_0/2 - \Omega_\Lambda$$

lois  $1/R^2$  et de Hubble  
(à + grande distance)

# "Energie noire"



# "Energie noire"

MQ : niveaux d'énergie de l'oscillateur harmonique  $E_n = (n + 1/2)\hbar\omega$

$\Rightarrow$  énergie du vide  $E_0 = 1/2\hbar\omega$

Du point de vue thermodynamique :  $\rho_{vac}$  est constant  $\Rightarrow P = -\rho c^2$   
(csq du 1er principe)

$$\Lambda \equiv 8\pi G\rho_{vac}$$

MAIS  $\Sigma$ (énergies de p.z. des champs) pour modèle std  $\rightarrow 10^{120}$  odg  
trop grand ...

$\rightarrow$  autre origine (niveau champ) = "quintessence"

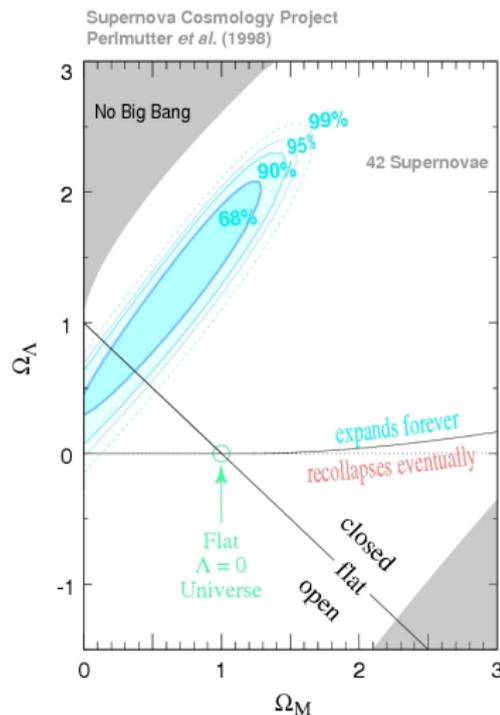
Equation d'état paramétrée :  $\rho \sim V^{-(1+w)}$

- $\Lambda$  :  $w = -1$
- matière  $w = 0$ ,
- cordes cosmiques  $w = -1/3$
- ...

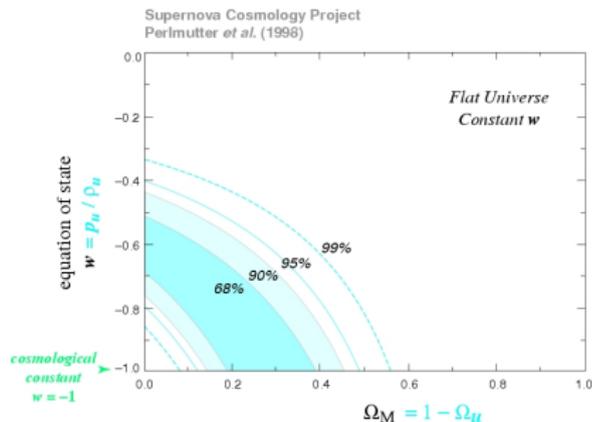
"Signature" de  $w$  : évolution avec  $z$  ( $m(z)$ )

# Dégénérescences

$$(\Omega_m, \Omega_\Lambda)$$



$$(\Omega_x, w_x)$$



⇒ Plus de statistique + **contrôle des systematiques**

# Découvertes et suivi

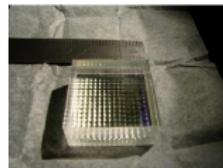
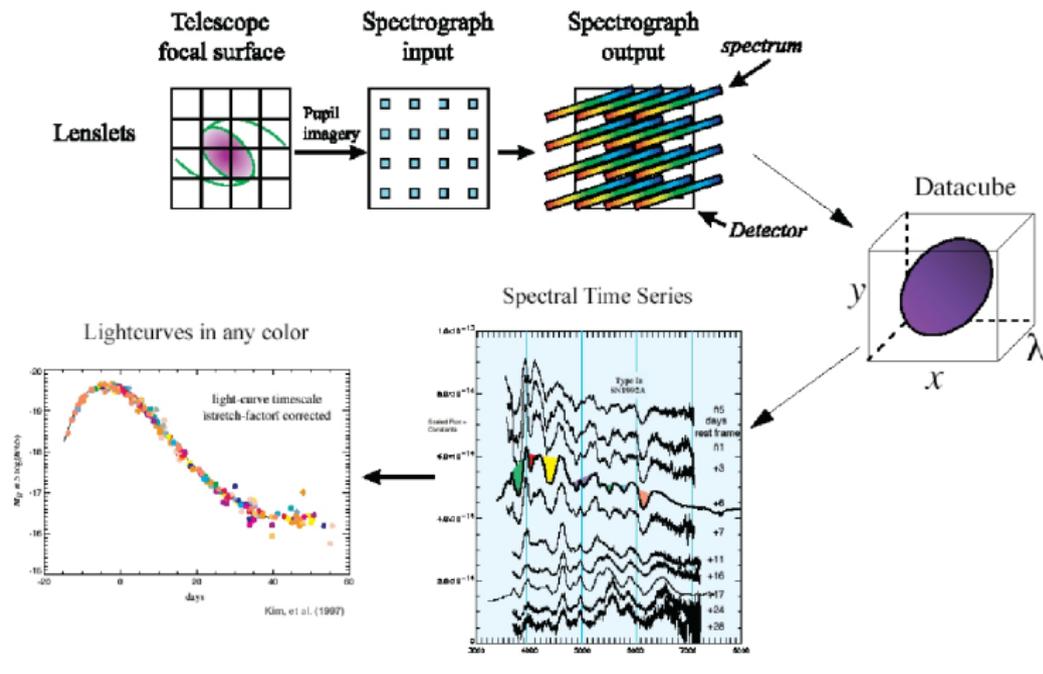
- Découvertes "automatiques"
  - ⇒ programmables
  - télescope grand champ
  - quelques nuits
  - ex. EROS-II : 1 SNIa / 2h
- Suivi plus demandeur : plusieurs télescopes ou tel. dédié
  - ⇒ instrument SNIFS, SNAP/JDEM
  - ⇒ mode "suivi" (découverte et suivi simultanés) → CFHLS, ESSENCE



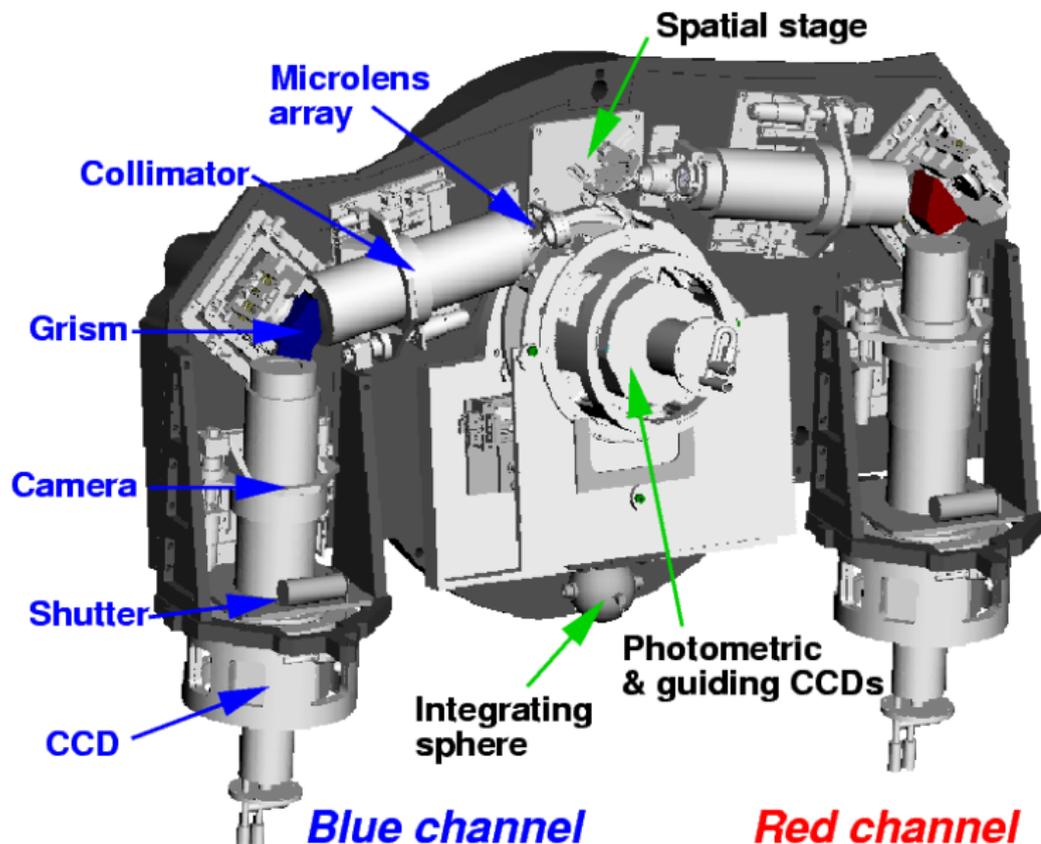
# SN Factory ("usine à SN")

- But :  $\sim 100 - 200$  SNIa proches ( $z \leq 0.1$ )
- Découvertes faites en "parasite" avec les images de NEAT (recherche automatique d'astéroïdes, 2 télescopes @ Palomar et Hawaï) - traitement à Berkeley
- Identification et suivi : temps garanti sur tel. de 2.2m de l'U. de Hawaï équipé du SNIFS ([made in France](#): CRAL, IPNL, LPNHE )
- $\sim 20$  SNe découvertes en 2003 (pb soft ?) ; SNIF livré mi-2004; tests sur le ciel en cours
- Fonctionnement "routinier" depuis 2005 (?)

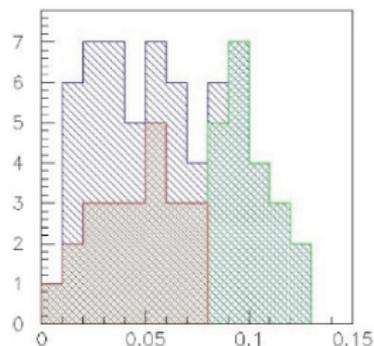
# Principe du SNIFS



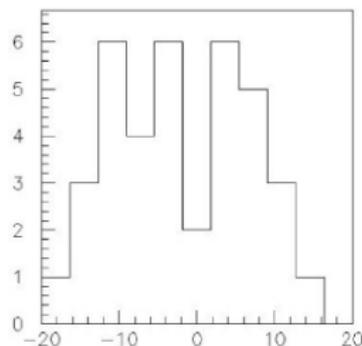
# Le SNIFS (2)



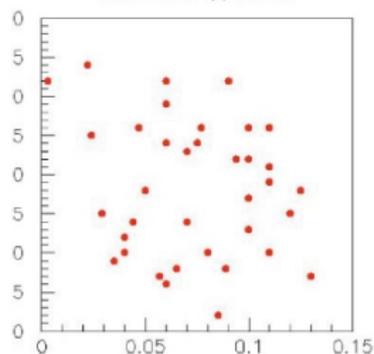
# Produits SN Factory (depuis juin 2005)



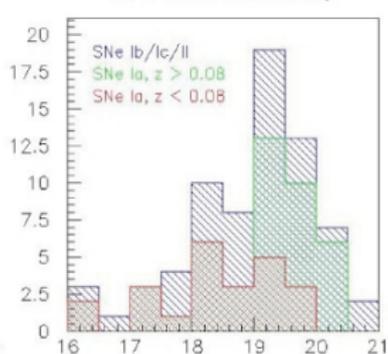
Redshift of Typed SNe



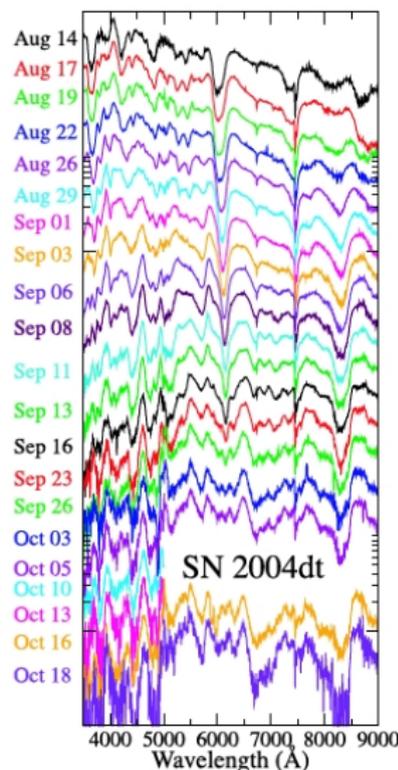
SN Ia Phase at Discovery



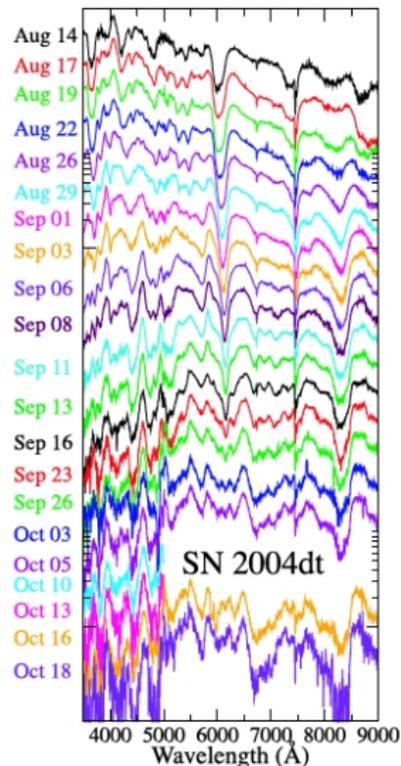
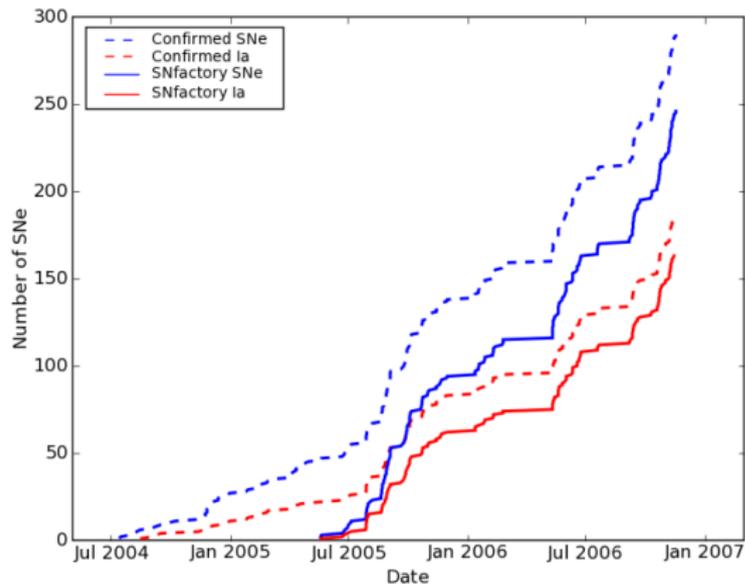
Discovery Phase vs. Redshift



Discovery Magnitude of Typed SNe

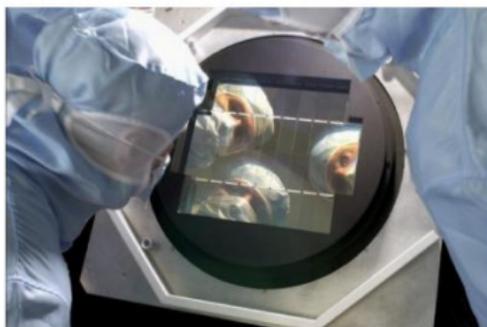
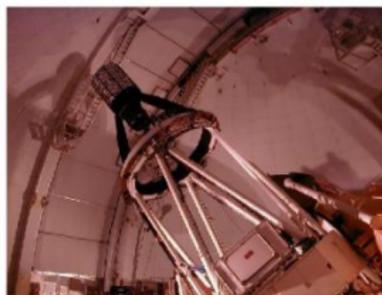


# Produits SN Factory (depuis juin 2005)

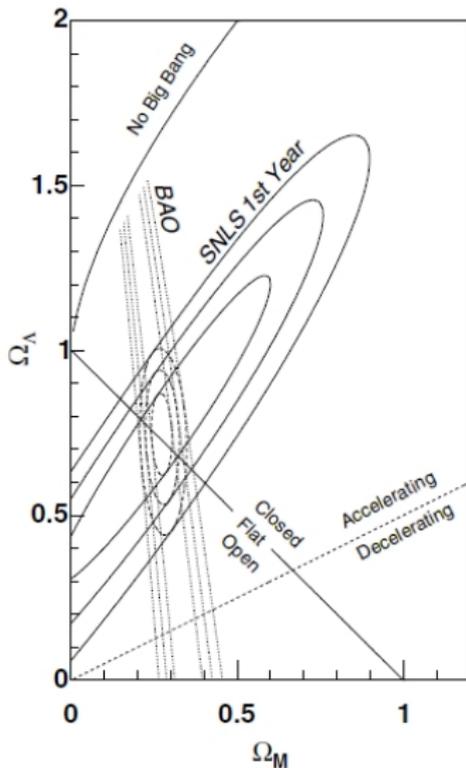
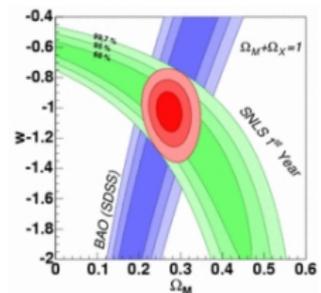
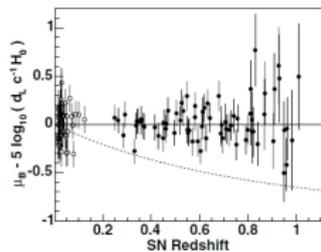
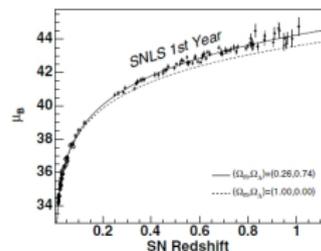


- Cadre : Legacy Survey au CFHT (avant fermeture définitive)
- But :  $\sim 2000$  SNIa distantes ( $z \sim 0.5 - 1.$ )
- Observations "régulières" (mode survey) découvertes et suivi photométrique combinés
- temps complémentaire au CFH et sur des tel. de 10m (spectro)
- 2003-4 (mauvais temps)  $\sim 80$  SNe
- survey continue pendant  $\sim 3 - 4$  ans
- premiers résultats en 2006 !

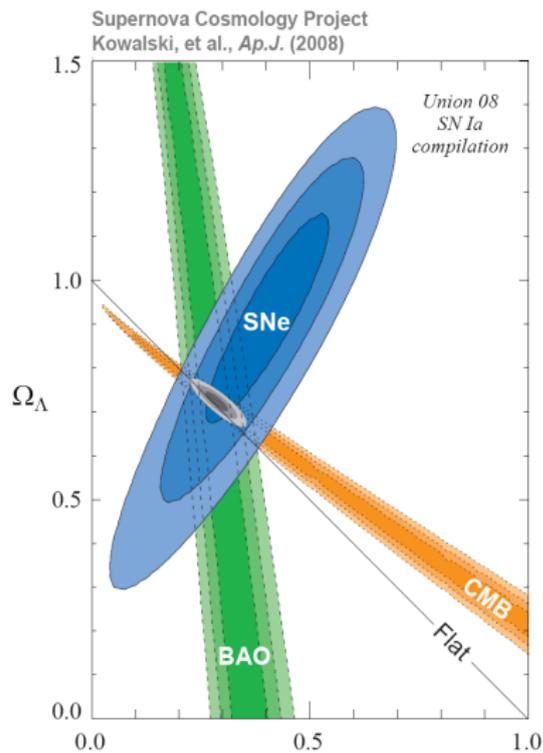
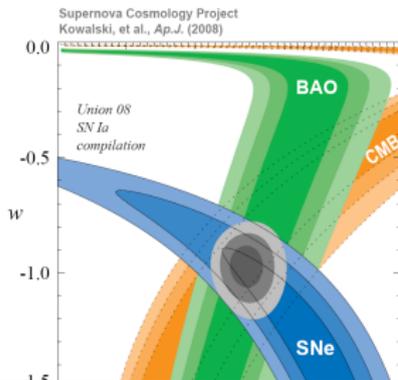
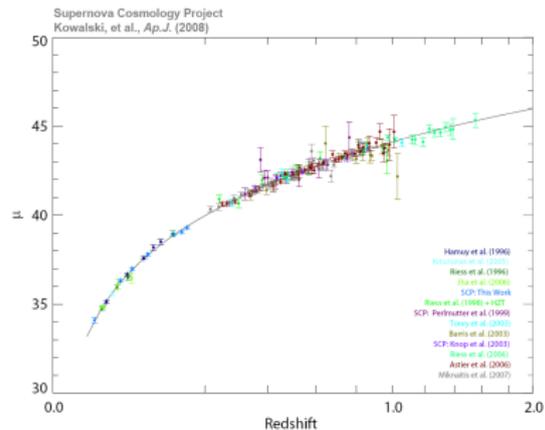
# Megacam



# Resultats de SNLS

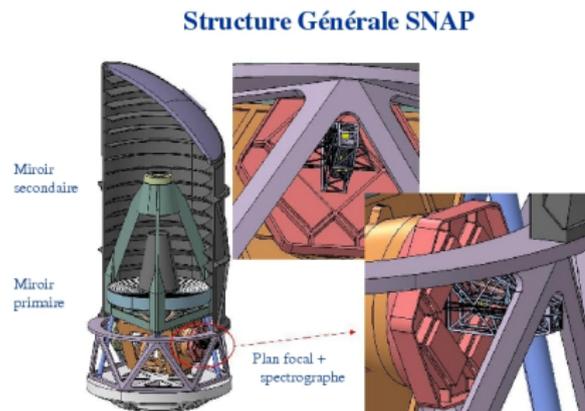


# Resultats de SNLS

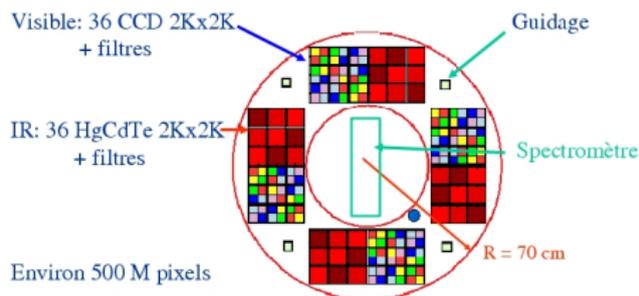


# SNAP/JDEM

Horizon ~ 201x ; Etudes préparatoires et R& D en cours (IPNL,LPNHE,CPPM,DAPNIA,LAL)



## Le plan focal (Champ de ~1 degré ■ )



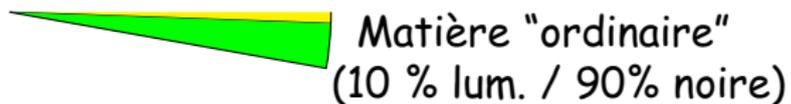
- Mesure des lentilles gravitationnelles
- Détection des supernovae
- Photométrie

cf G. Smadja CS IPNL 2004

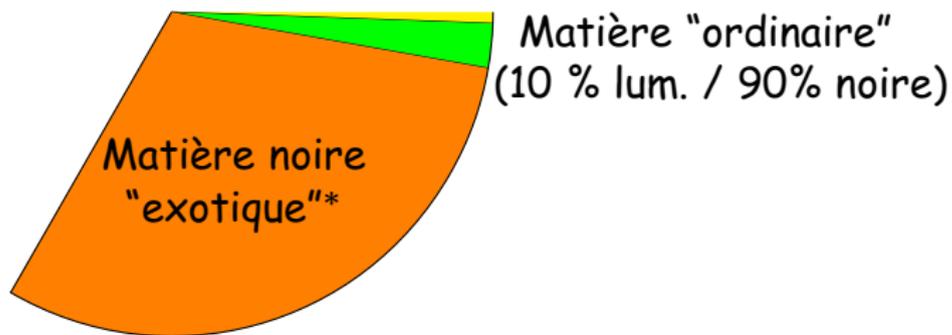
# Conclusion(s)

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

# Composition de l'univers

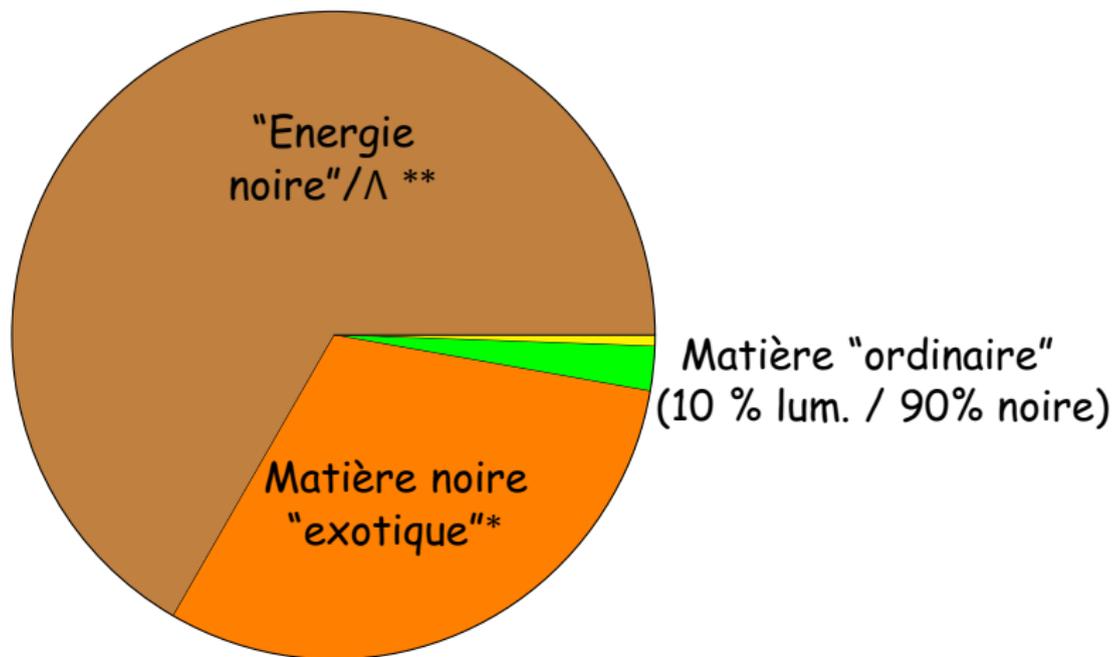


# Composition de l'univers



\*non identifiée

# Composition de l'univers



\* non identifiée

\*\* encore plus mystérieuse



© Peter Dyrynda

# 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)
- ...

# Distances élémentaires

Dans le plan  $(x, y)$

- longueur infinitésimale :  $ds^2 = dx^2 + dy^2 :=$  **métrique**
- en coord. polaires  $(r, \theta)$  :  $ds^2 = dr^2 + r^2 d\theta^2$
- facteur d'échelle  $R$  t.q.  $r \rightarrow Rr$  :

$$ds^2 = R^2(dr^2 + r^2 d\theta^2)$$

# Distances élémentaires (II)

Pour la 2D-sphère :

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2 \Rightarrow z = \sqrt{R^2 - x^2 - y^2} \Rightarrow dz = -\frac{xdx + ydy}{\sqrt{R^2 - x^2 - y^2}}$$

- longueur infinitésimale:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 = dx^2 + dy^2 + \frac{(xdx + ydy)^2}{R^2 - x^2 - y^2}$$

- avec les coordonnées polaires  $(r, \theta)$  t.q.  $x = r \cos \theta, y = r \sin \theta$

$$ds^2 = R^2 \left( \frac{dr^2}{1 - r^2} + r^2 d\theta^2 \right)$$

# Distances élémentaires (III)

- "selle de cheval"

$$x^2 + y^2 - z^2 = R^2 \Rightarrow ds^2 = R^2 \left( \frac{dr^2}{1+r^2} + r^2 d\theta^2 \right)$$

- formulation unifiée :

$$ds^2 = \left( \frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 d\theta^2 \right) \quad (k = 0, -1, +1)$$

distance<sup>2</sup> = facteur d'échelle<sup>2</sup> longueur immobile<sup>2</sup>

## Distances élémentaires (III)

- "selle de cheval"

$$x^2 + y^2 - z^2 = R^2 \Rightarrow ds^2 = R^2 \left( \frac{dr^2}{1+r^2} + r^2 d\theta^2 \right)$$

- formulation unifiée :

$$ds^2 = \left( \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 \right) \quad (k = 0, -1, +1)$$

distance<sup>2</sup> = facteur d'échelle<sup>2</sup> longueur immobile<sup>2</sup>

# Métrie

- Principe d'équivalence (p. cosmologique + expansion)  $\Rightarrow$  métrique ( $ds^2 = g_{\mu\nu}x^\mu x^\nu$ ) à 2 termes : **temporel + spatial**
- homogénéité + isotropie  $\Rightarrow$  partie spatiale à symétrie sphérique :  **$d\psi^2 = d\theta^2 + \sin\theta^2 d\varphi^2$**
- expansion  $\Rightarrow$  facteur d'échelle  $R(t)$

$\Rightarrow$  Forme générale pour la métrique

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2(t) \left( f^2(r) dr^2 + g^2(r) d\psi^2 \right)$$

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2 \left( \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 \right) \quad (k = 0, -1, +1)$$

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2(t) \left( \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin\theta^2 d\varphi^2) \right)$$

(Friedman (URSS) Lemaître (Belgique) Robertson (US) Walker (US))

# Masse de Chandrasekhar

$N_e$   $e$  ultra-relativistes ( $E \approx pc$ ) ds volume  $V = 4/3\pi R^3$   
statistique de Fermi pour les  $e$  + principe d'incertitude  
élément d'espace de phase  $dv = 4\pi V p^2 dp / h^3$

$$\text{Nbre de particules dans } V: N = \int_0^{p_{\max}} 2V 4\pi p^2 / h^3 dp$$

$$\Rightarrow p_{\max} \equiv p_{\text{Fermi}} = h \left( \frac{3N}{8\pi V} \right)^{1/3}$$

$$\text{Energie (cinétique) totale: } E = \int_0^{p_F} pc \frac{4\pi p^2 V dp}{h^3} = \frac{3}{4} N_e p_{FC}$$

$$\text{condition de stabilité: } E_{\text{cin}} \geq E_{\text{pot}}^{\text{grav}} = \frac{3}{5} G \frac{M^2}{R} \text{ avec } M = (N_p + N_n) m_p$$

$$\Rightarrow \frac{3}{4} N_e p_{FC} \geq \frac{3}{5} G \frac{M^2}{R} \Rightarrow \frac{3}{4} N_e c h \left( \frac{3N}{8\pi \frac{4}{3}\pi R^3} \right)^{1/3} \geq \frac{3}{5} G \frac{M^2}{R}$$

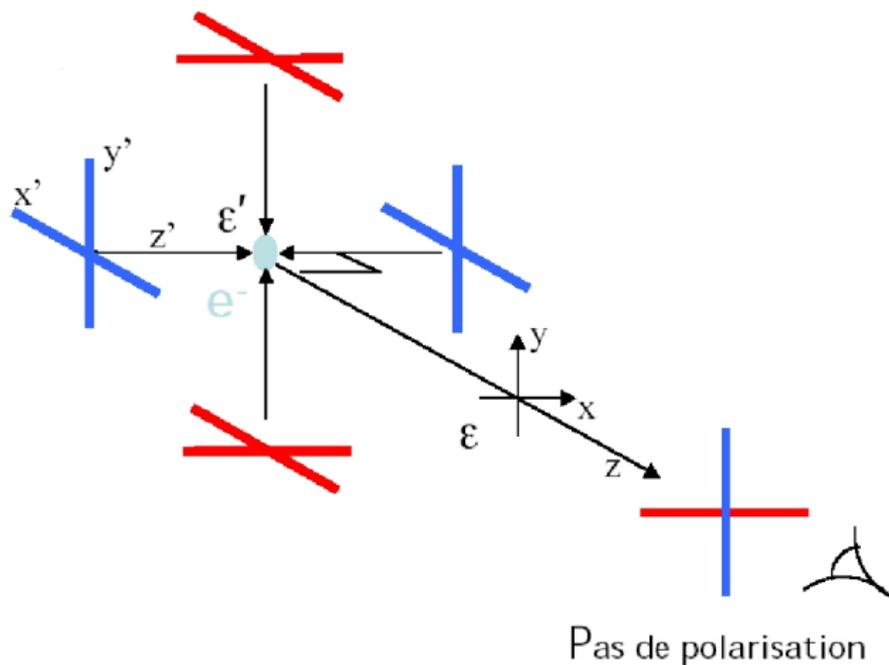
R s'élimine !!

$$\Rightarrow \text{Limite sur } N_e \rightarrow \text{sur } M_* \left( \mu = \frac{N_p}{N_e} \right):$$

$$M_* \leq \left( \frac{hc}{3G} \right)^{3/2} \left( \frac{1}{\mu m_p} \right)^2$$

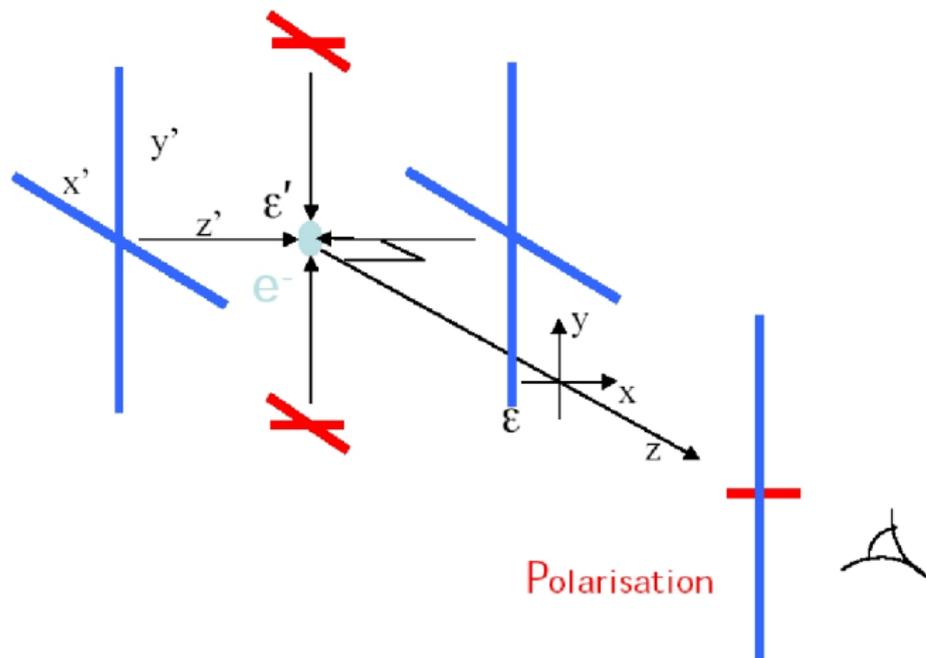
ref L. Valentin 'Champs et particules'

# Polarisation du CMB



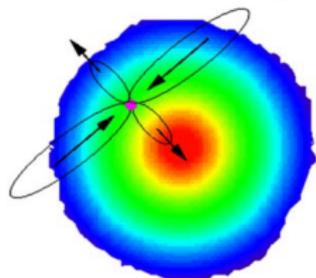


# Polarisation du CMB

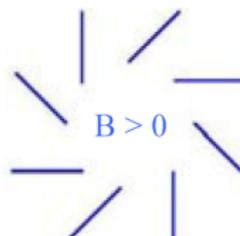
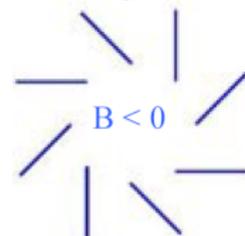
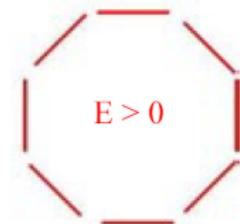
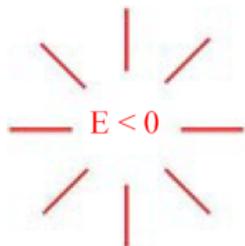


# Modes de polarisation (E et B)

Density Anisotropies

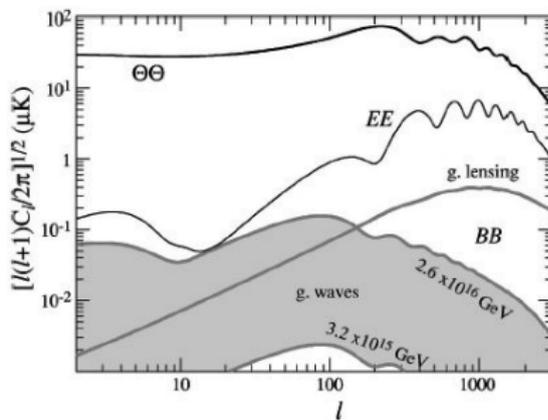
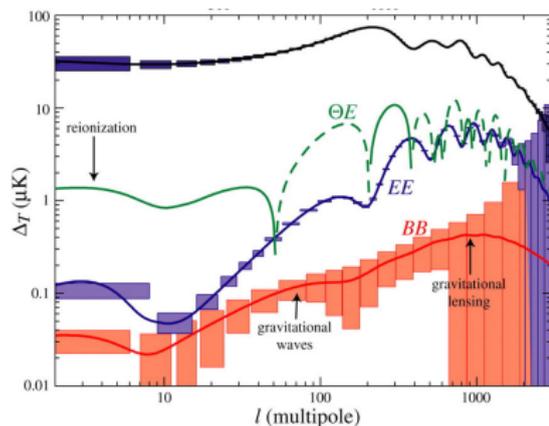


Primordial  
Gravitational Waves



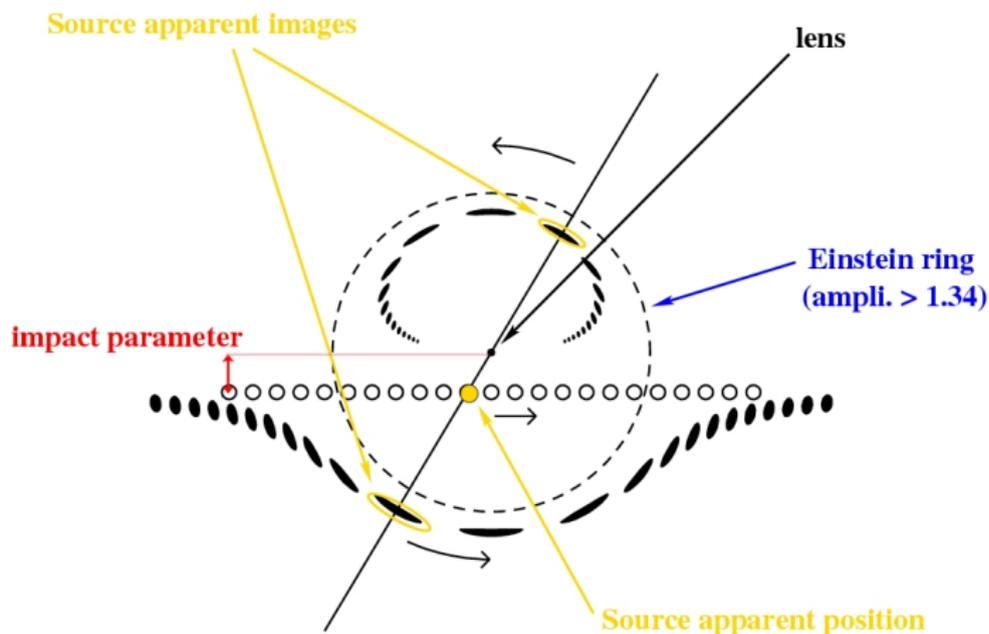
Ces origines sont séparables

# Spectres de Polarisation



... une étroite fenêtre sur l'inflation (ondes gravitationnelles primordiales)

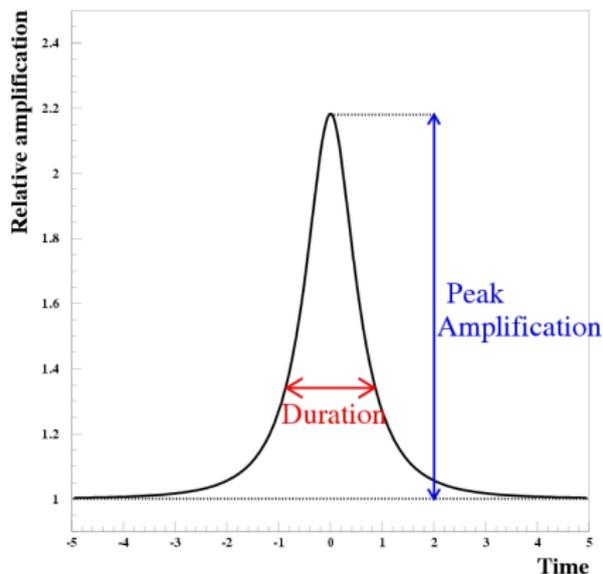
# Geometrie transverse



adapted from Paczynski (1996)

# Extraction de physique

source & lentille ponctuelles, mvt  
linéaire



2 observables, 1 seule "physique"

► Amplification au pic

⇔ géométrie transverse

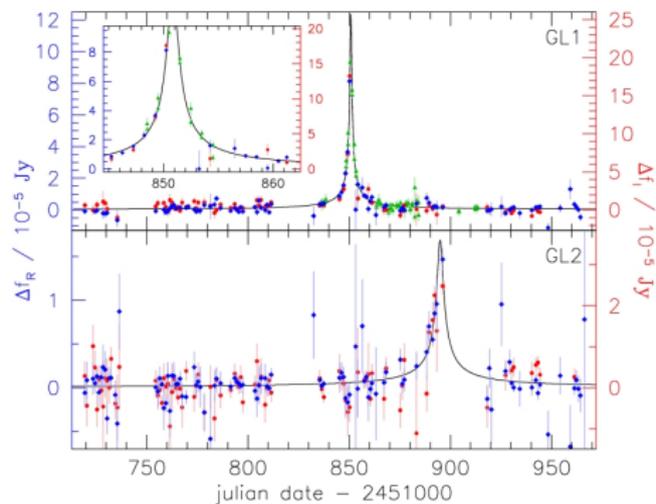
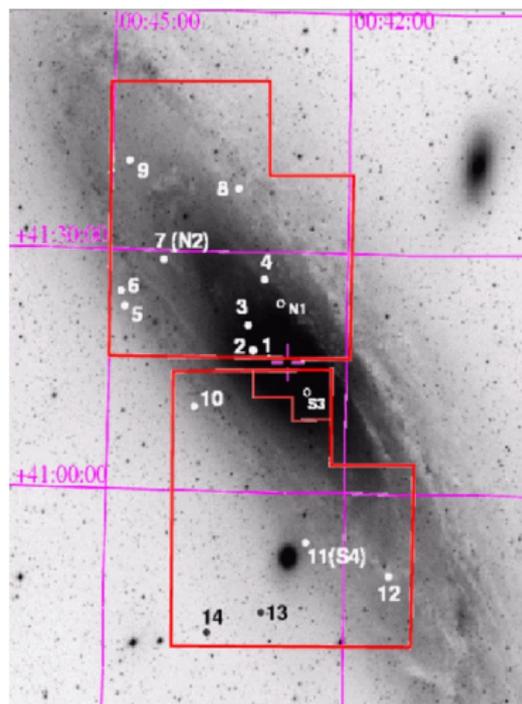
► Durée

⇔ Masse du déflecteur, vitesse ( $v$ ), distance relative

$$\propto M_{lens}^{1/2} ((D_{OL} \times D_{LS}) / D_{OS})^{1/2} v^{-1}$$

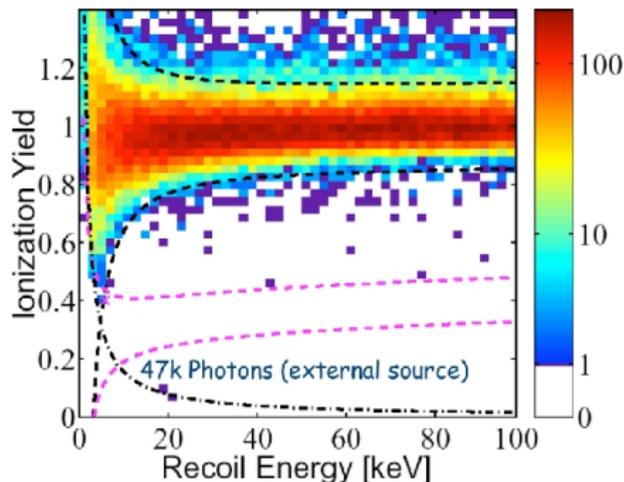
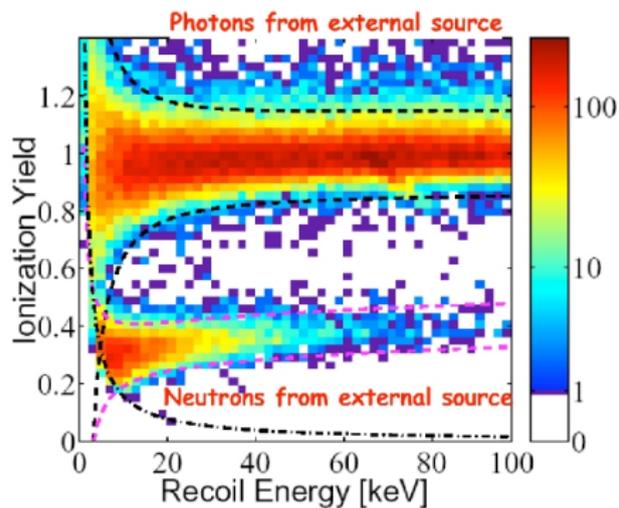
⇒ information dégénérée

{ mesure de quantités intégrales  
( $\sim$  taux d'évts) + comparer  
aux modèles  
Chercher des distorsions  
+ d'info evt/evt

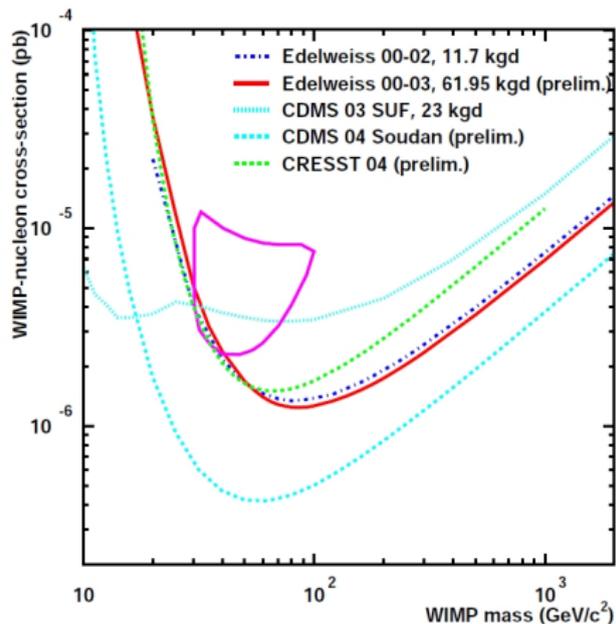
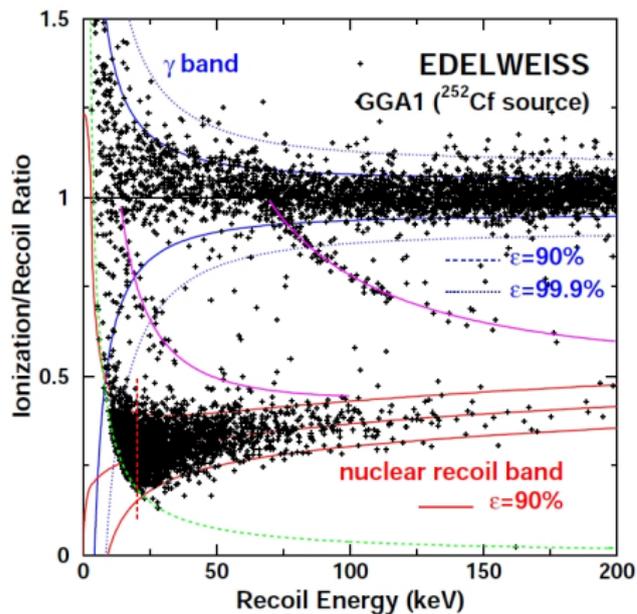


Plusieurs groupes actifs  
 Quelques événements observés  
 ... prometteur (structure galactique?)

# Calibrations (CDMS)



# Résultats





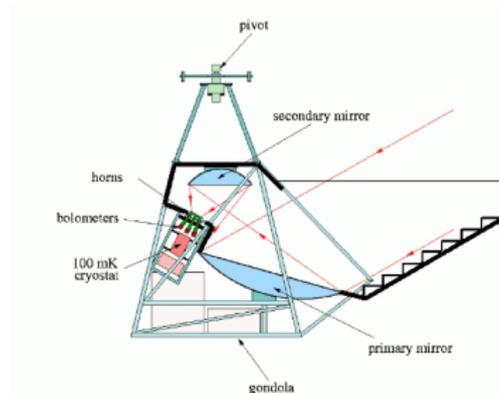
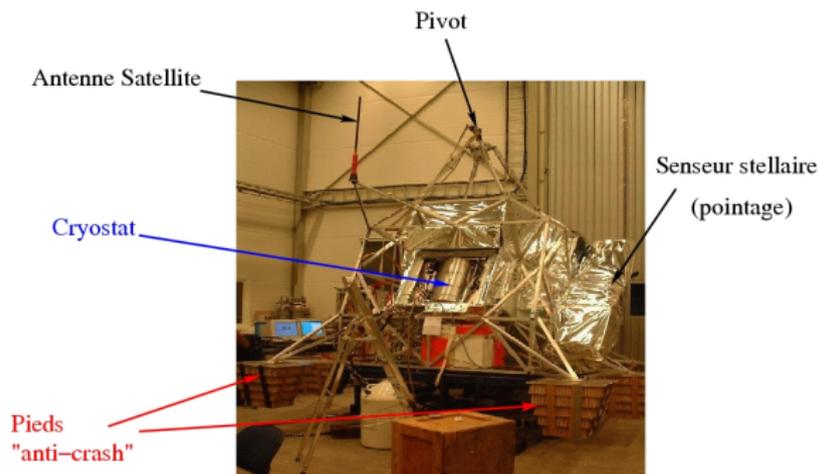
PI : A. Benoît (CRTBT Grenoble)

-  / 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)

# Un montage délicat!



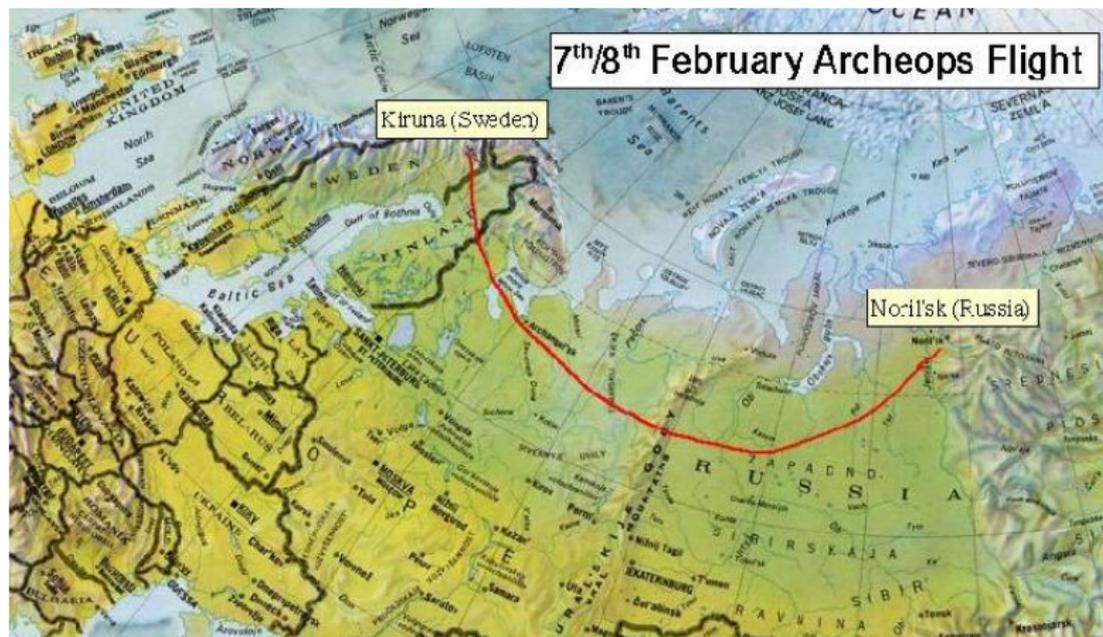
# Quand tout est prêt ...



Le vol dépend :

- des conditions météo locales (lancement)
- des vents à haute altitude (altitude, durée du vol)
- des conditions de récupération de la nacelle

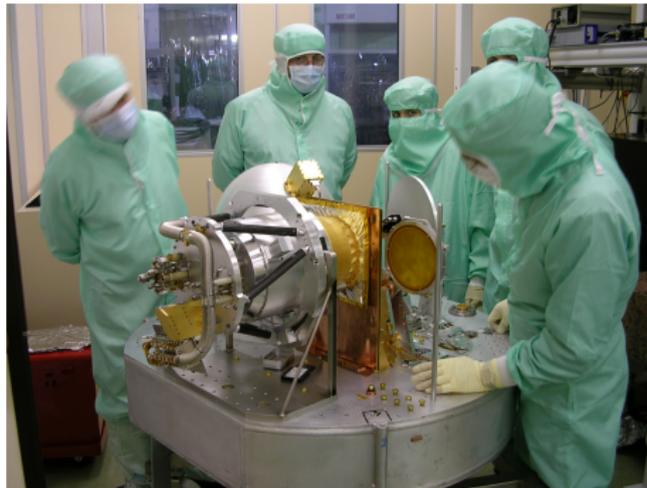
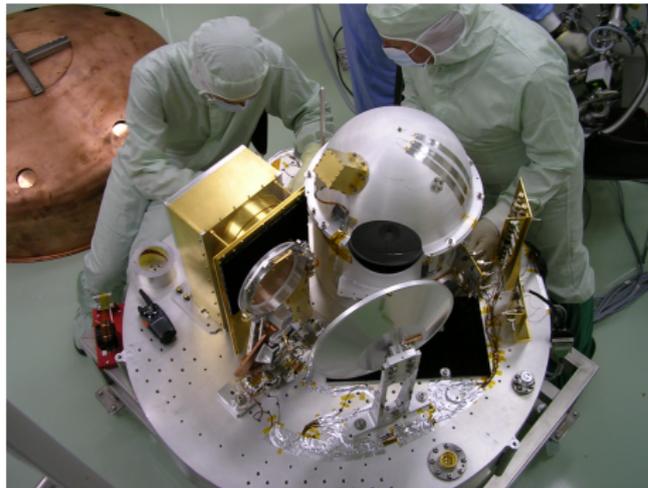
# Vol du 7 février 2001



# Récupérations



# Etalonnage de Planck (EN COURS)



# Etalonnage de Planck (EN COURS)

