

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

O. Perdereau



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

Ecole IN2P3 "De la physique au détecteur" - Fréjus 2010

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
 - Lentilles gravitationnelles (EUCLID)
 - Recherches de WIMPS (Edelweiss, Antares,...)
 - Microlentilles gravitationnelles (EROS)
- 4 Supernovæ de type Ia
 - Introduction
 - Intérêt cosmologique
 - Energie noire
 - Projets :SN factory, CFHLS, SNAP/JDEM/ WFIRST
- 5 Le rayonnement de fond cosmologique (ou CMB) et les grandes structures
 - Pourquoi des anisotropies?
 - Planck (HFI)
 - CMB et grandes structures
- 6 Conclusions
- 7 Sources
- 8 Annexes

Qu'est-ce que la cosmologie ?

La cosmologie

d'après www.francophonie.hachette-livre.fr

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

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

infiniment
petit



Modèle du
"Big-Bang"



infiniment
grand

Qu'est-ce que la cosmologie ?

La cosmologie

d'après www.francophonie.hachette-livre.fr

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

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

infiniment
petit



Modèle du
"Big-Bang"

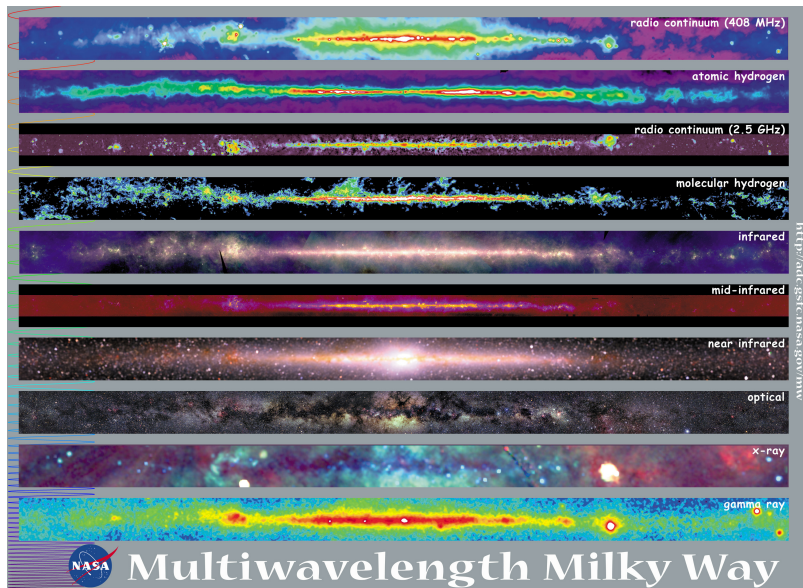


infiniment
grand

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

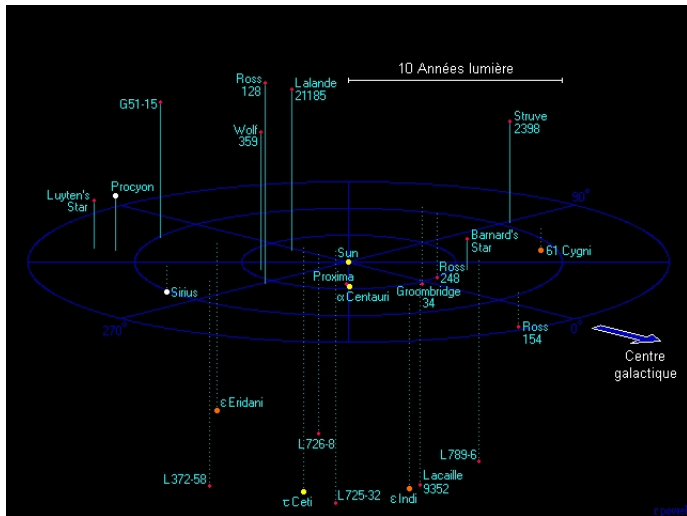
~ 10 a.l.

~ 40000 a.l.

~ 80 M a.l.

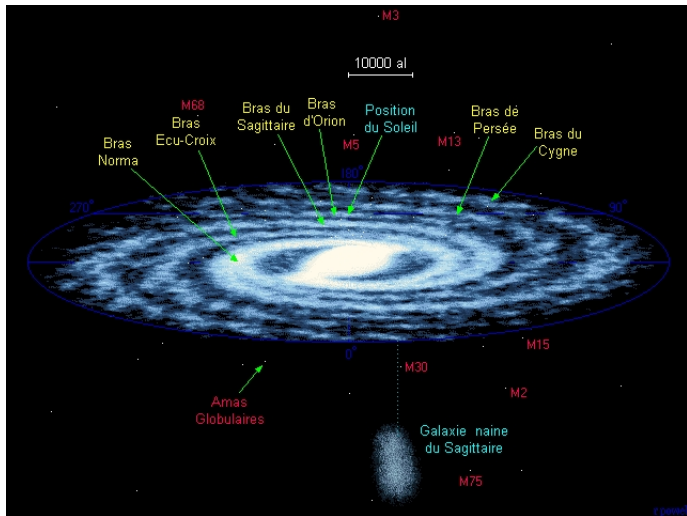
~ 1000 M a.l.

~ 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.

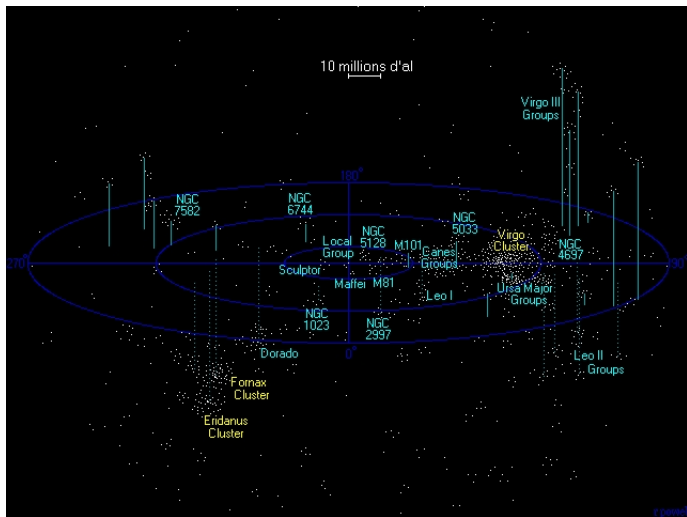
~ 14000 M a.l.

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

Cartes de l'univers

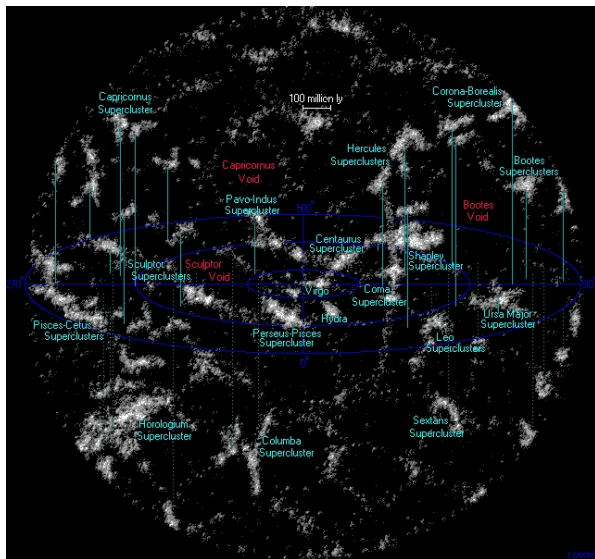
Echelle

- ~ 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

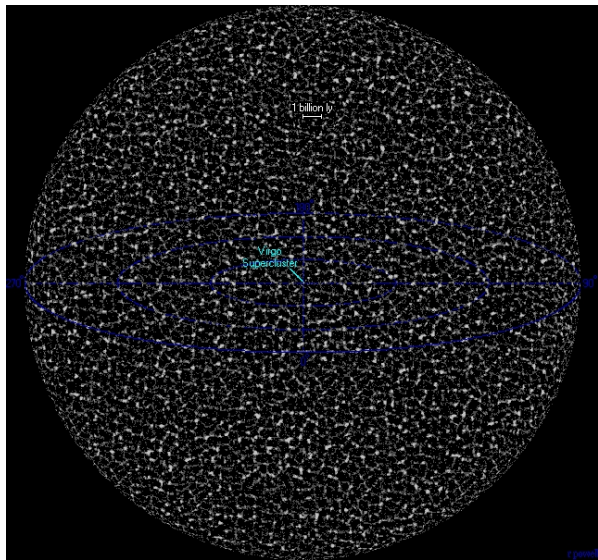
~ 10 a.l.

~ 40000 a.l.

~ 80 M a.l.

~ 1000 M a.l.

~ **14000 M a.l.**

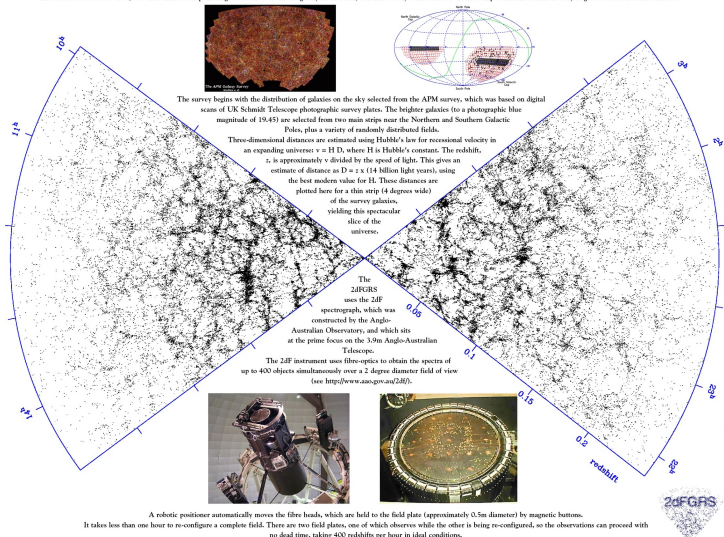


cf <http://atunivers.free.fr/>

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.



Si l'univers avait un an

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

1er janvier à 0h 00'



Big Bang

9 septembre



Naissance du système solaire

29 septembre



Premières cellules vivantes

19 décembre



Apparition des plantes

20 décembre



Apparition des poissons

21 décembre



Apparition des insectes

24 décembre



Apparition des dinosaures

26 décembre



Apparition des mammifères

27 décembre



Apparition des oiseaux

28 décembre



Extinction des dinosaures

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

22h 30'



Premiers hommes

23h 59'



Lascaux

23h 59' 50"



Début de la civilisation égyptienne

23h 59' 56"



Naissance du Christ

minuit



Début du XX^{ème} siècle

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
 - ▶ ⇒ dilatation globale de l'Univers
- 2 Abondances primordiales des éléments légers
 - ▶ Helium, Deuterium (...) présents dans les objets les plus vieux ($\approx 20-25\%$ d'Helium)
 - ▶ comment se sont-ils formés ?
 - ▶ ⇒ fusion thermonucléaire de l'Hydrogène dans une phase primordiale dense et chaude

Les "trois piliers" du Big-Bang

Trois observations :

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

Les "trois piliers" du Big-Bang

Trois observations :

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

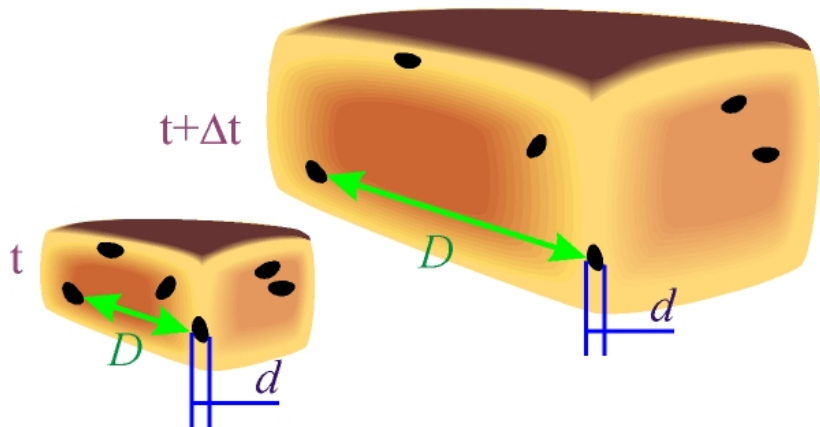
⇒ Il y a eu une "explosion" ? ...

Le Big Bang



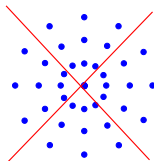
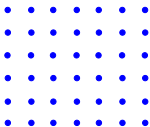
Quoi, c'est ça le Big-Bang? (S. Harris)

Une dilatation d'échelle



Principes de base

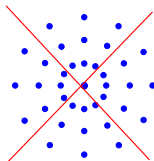
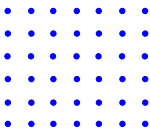
1 L'univers est homogène



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

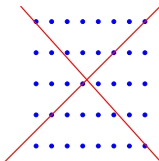
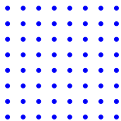
Principes de base

1 L'univers est homogène



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

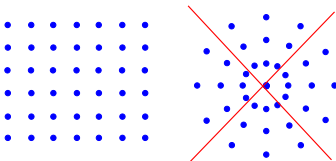
2 L'univers est isotrope



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

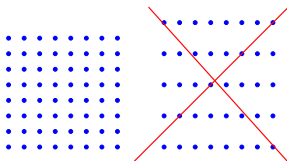
Principes de base

1 L'univers est homogène



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

2 L'univers est isotrope



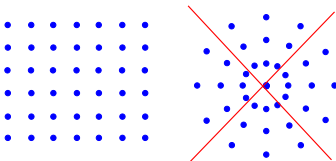
Même "aspect" dans toutes les directions
Ex.: sources distantes, température du CMB

3 L'univers est en expansion

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

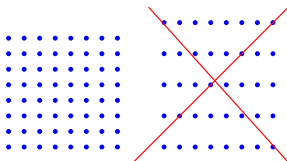
Principes de base

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

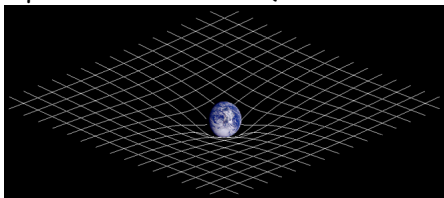
4 (nous sommes là \Rightarrow "principe" anthropique)

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

Cadre général

Recette pour un bon univers :

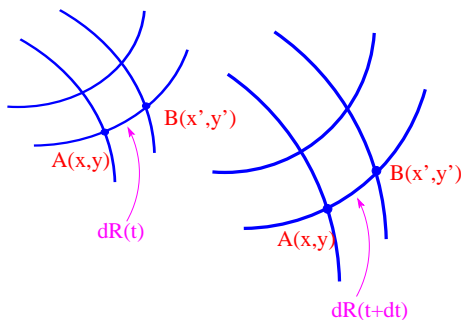
- 1 **Relativité générale** (Einstein ~ 1917) :
 - ▶ description **géométrique** de l'univers ("métrique")
 - ▶ équations d'évolution (dites "d'Einstein")



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

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

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

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

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

Conséquence(2) : "redshift" cosmologique

La distance comobile (d) reste constante \Rightarrow

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

Conséquence :

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

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

On appelle **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 !

Géométries possibles de l'univers

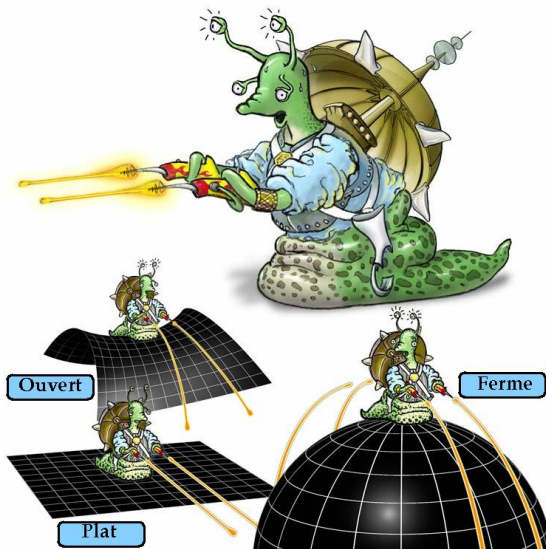
3 familles d'espaces homogènes & isotropes (indexées par k)
A 2 dimensions spatiales (+ le temps) :

- **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

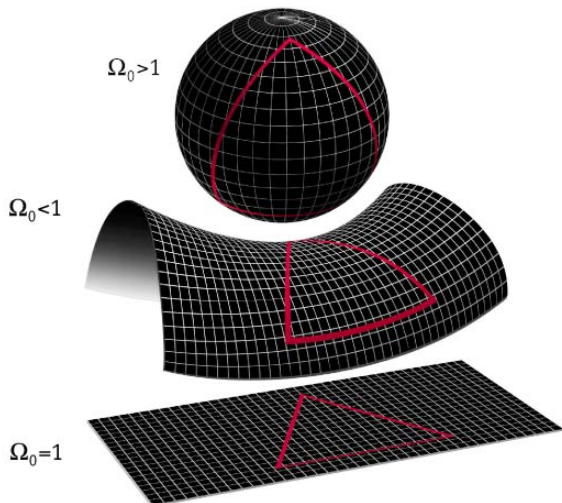
- **géométrie (et son évolution) (macroscopique)**
- **densité(s) d'énergie(s) (microscopique)**

Un paramètre cosmo important (parmi ~ 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 :

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



tenseur d'Einstein
fonction de la métrique
 $g_{\mu\nu}$ distance : $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$
généralisation de $d^2 = x^2 + y^2 + z^2$



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 $R(t)$ (non linéaire)

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

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

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

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

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

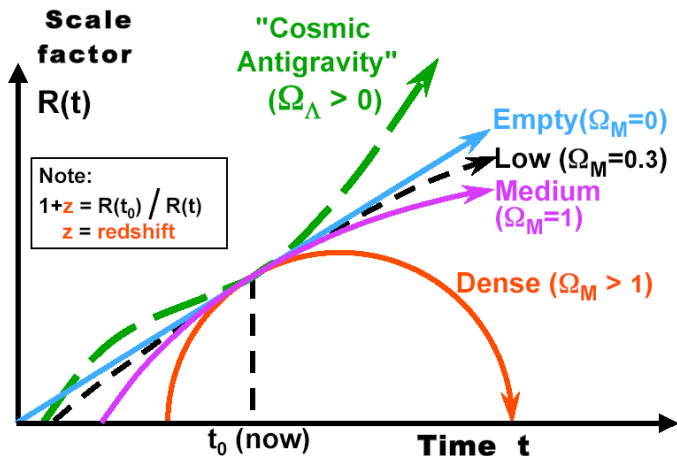
- **"Rayonnement"** (photons, particules de haute énergie / température) : "dilution" par l'expansion + **redshift**

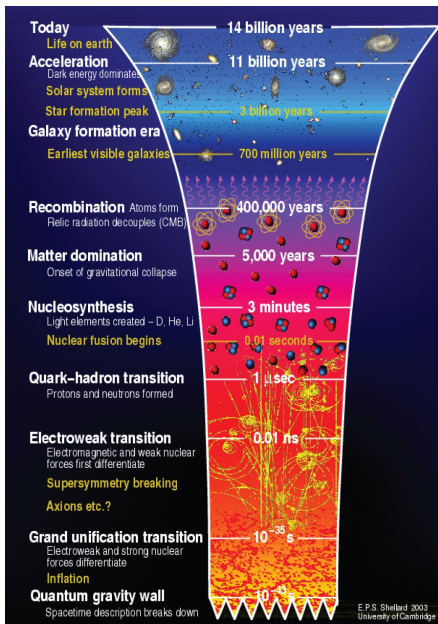
$$\rho_r \propto R^{-4}$$

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

$$\rho_{vac} = cste$$

Facteur d'échelle





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

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

(3) Nucléosynthèse
(BBN, de 3 à 30 mn)
→ 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 ρ (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
- Lentilles gravitationnelles
- 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
- ...

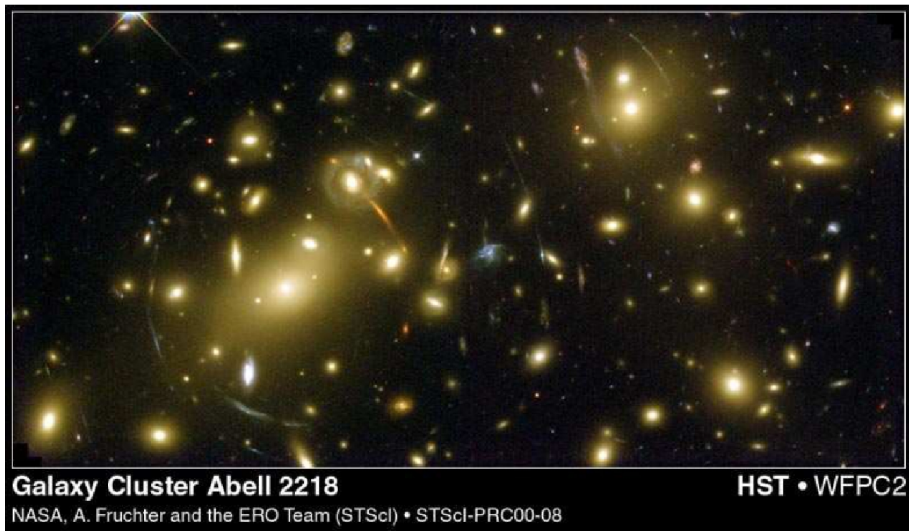
⇒ $\Omega_b \sim 0.05$ (densité baryonique cad p, n)

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

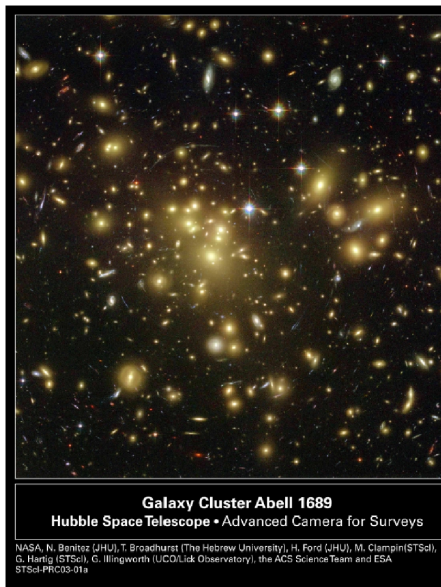
Deux problèmes de "masse cachée" !?

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

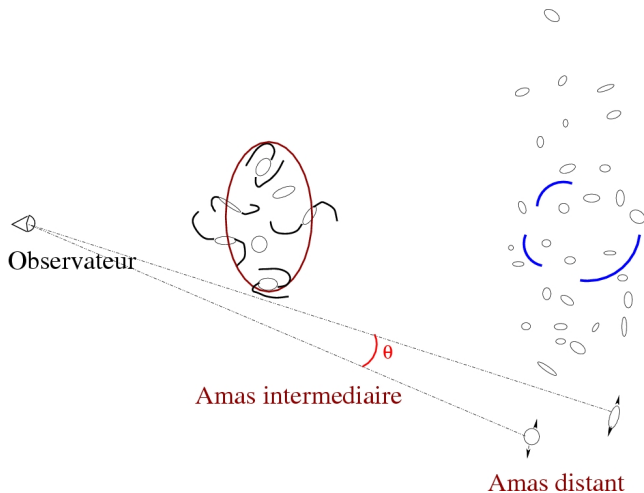
Lentilles gravitationnelles (1)



Lentilles gravitationnelles (2)



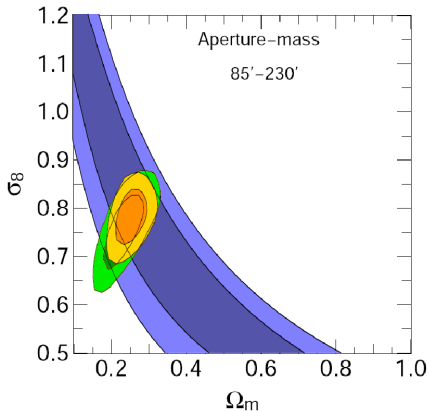
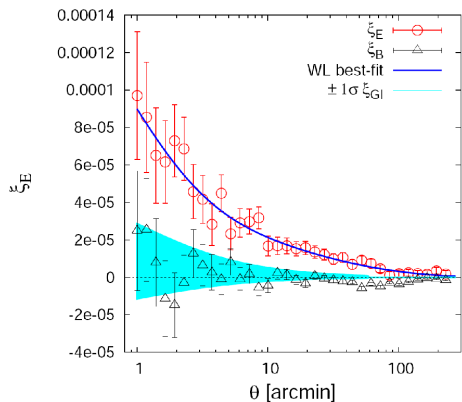
Weak lensing



Statistique des allongements (formes) \leftrightarrow répartition de masse \Rightarrow contrainte sur σ_8, Ω_m

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

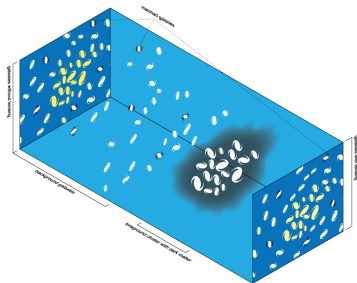
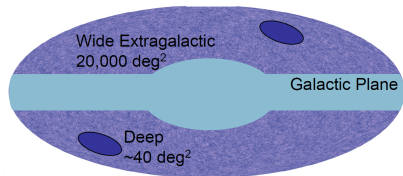
Contraintes extraites du WL



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

σ_8 : paramètre de la distribution de la matière (rms de $\delta\rho/\rho$ ds cube de 8Mpc)

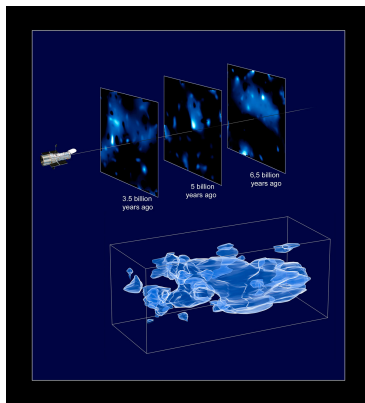
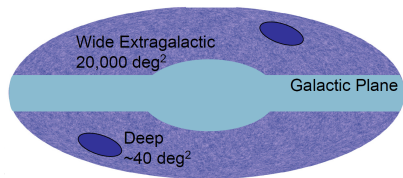
(un) futur pour le WL : EUCLID



Mission ESA (+NASA?) de classe M du pgme 'Cosmic Vision' - horizon 2015-2025

Telescope (1.2m) + imagerie visible+IR ($\sim 0.5 \text{ deg}^2$ chaque) + spectro IR (TBC) + observatoires au sol (600Mpix visible, 100Mpix IR, 850 Gb / j)

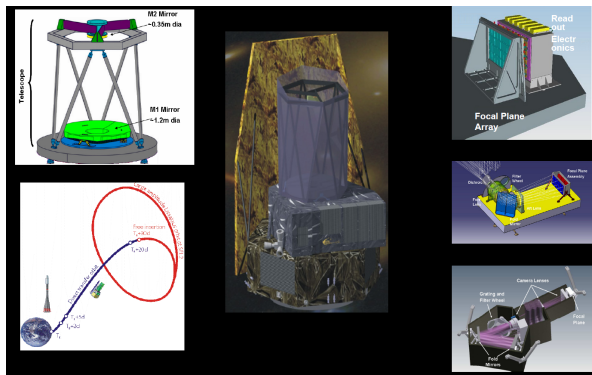
(un) futur pour le WL : EUCLID



Mission ESA (+NASA?) de classe M du pgme 'Cosmic Vision' - horizon 2015-2025

Telescope (1.2m) + imagerie visible+IR ($\sim 0.5 \text{ deg}^2$ chaque) + spectro IR (TBC) + observatoires au sol (600Mpix visible, 100Mpix IR, 850 Gb / j)

(un) futur pour le WL : EUCLID

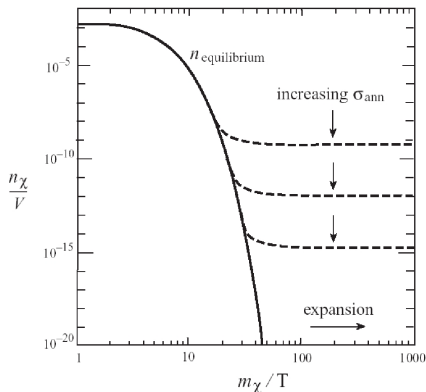


Mission ESA (+NASA?) de classe M du pgme 'Cosmic Vision' - horizon 2015-2025

Telescope (1.2m) + imagerie visible+IR ($\sim 0.5 \text{deg}^2$ chaque) + spectro IR (TBC) + observatoires au sol (600Mpix visible, 100Mpix IR, 850 Gb / j)

Le miracle des WIMPS

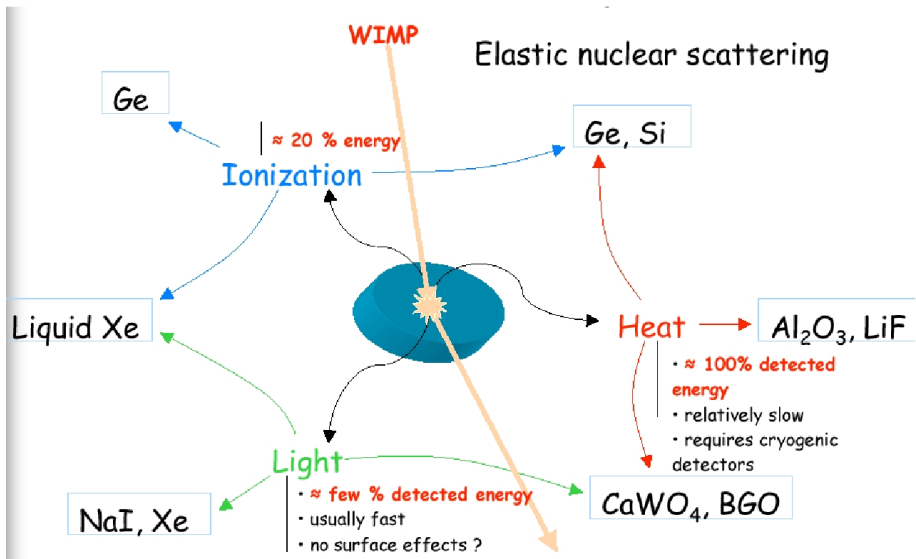
- univers primordial : équilibre thermique $X\bar{X} \leftrightarrow Y\bar{Y}$
- nombre de particules : solution eq. Boltzman
- lors de l'expansion : $T \searrow \Rightarrow$ libre parcours moyen \nearrow
- quand libre parcours moyen \geq taille de l'univers \Rightarrow "gel" : abondance figée
- pour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



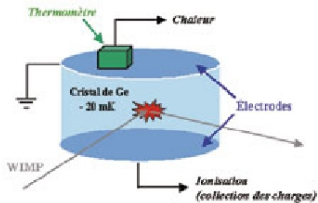
Detections?

- $\Omega_{DM} \sim 0.2 \Rightarrow \rho_{local} \sim 0.3 - 0.5 \text{ GeV/cm}^3$
- **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 !

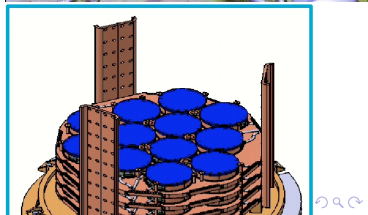
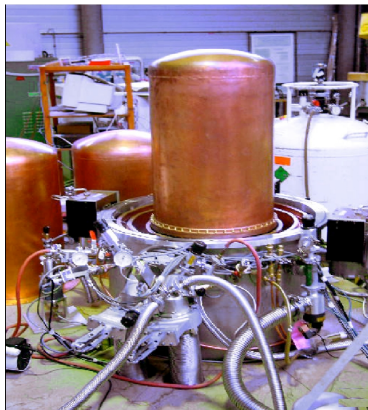
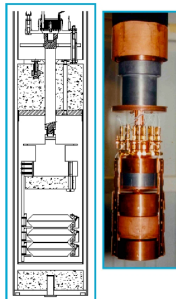
Signaux des WIMPs



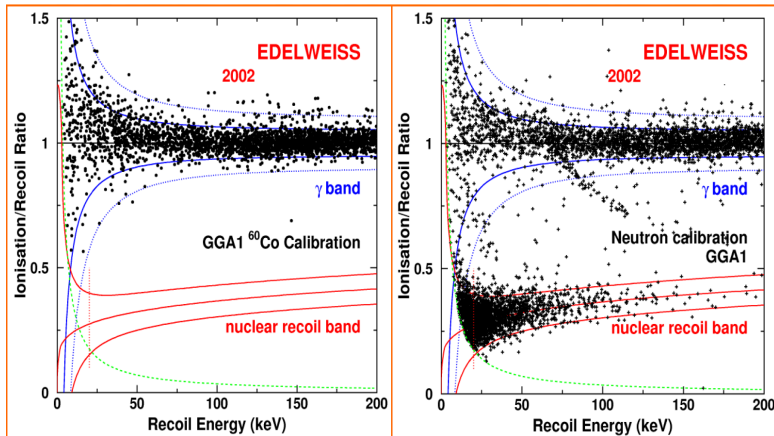
Edelweiss I et II



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



Edelweiss : Calibrations

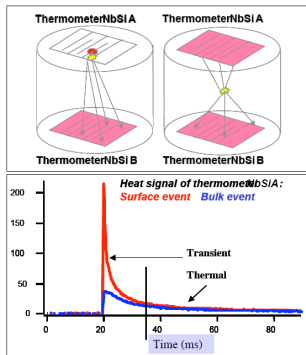
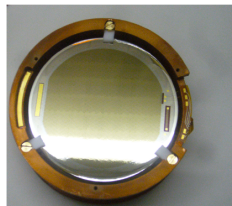


A. Juillard (CSNSM) - IAP 2008

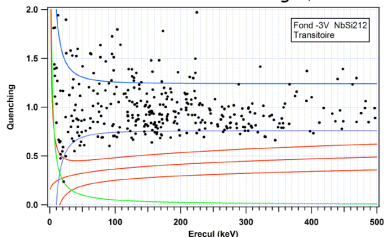
Nouveaux détecteurs (1)

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



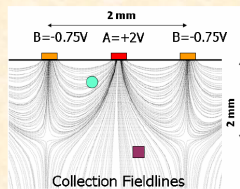
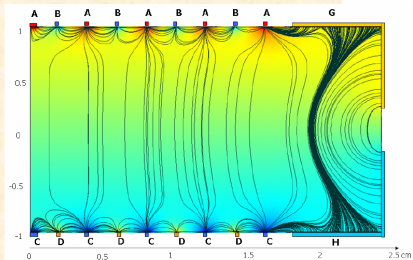
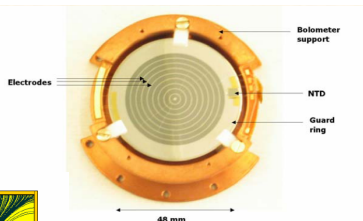
1.5 fiducial kg.d, 2007



Nouveaux détecteurs (2)

1^{er} Proto ID201 (juin 2007):

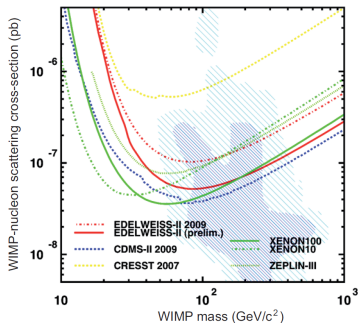
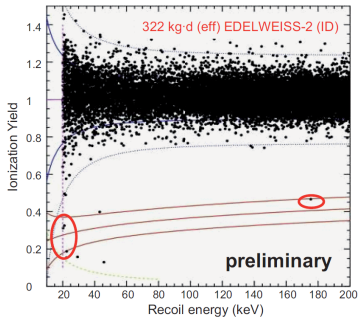
- 193g crystal
- Germanium amorphous underlayer
- 6 ionisation channels
- 1 heat channel (NTD thermometer)



- 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)



Kozlov et al - arXiv 1010.5947

Détection indirecte

Par collisions élastiques \rightarrow WIMPS freinés

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

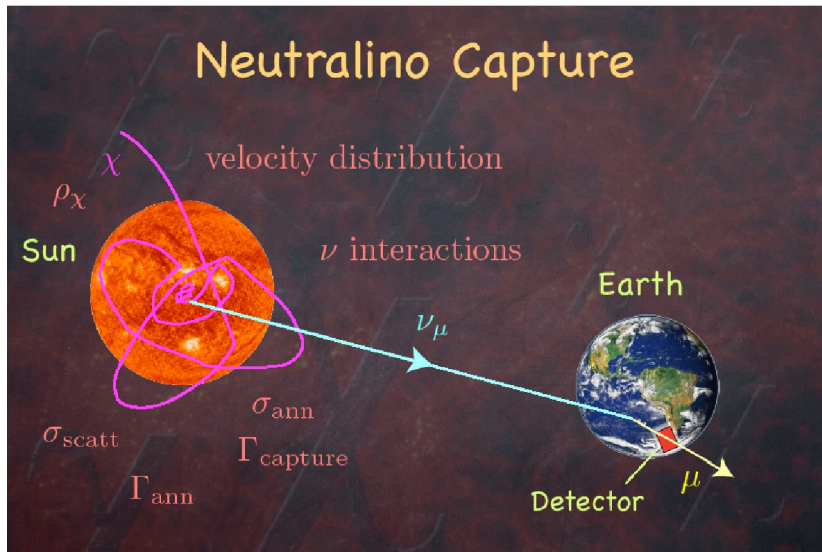
WIMP Majorana \Rightarrow annihilations $\chi\chi \rightarrow p\bar{p}/q\bar{q}/e\bar{e}/\gamma\gamma/...$

Signatures :

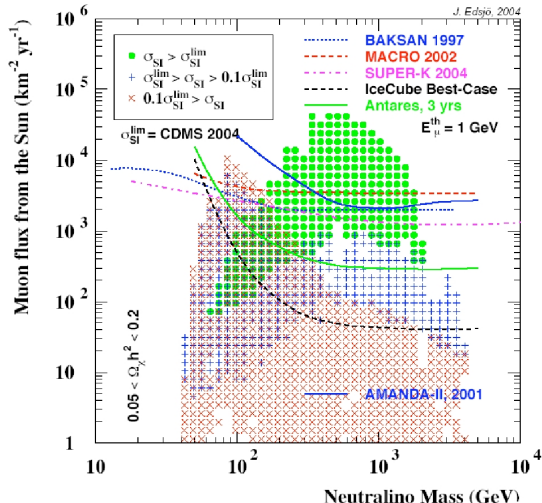
- ν_μ : (Terre, Soleil, galaxie?) \rightarrow Antares
- γ : raie ou flux en excès / sources (compliqué!) \rightarrow HESS, GLAST, ...
- antiparticules cosmiques : (distinction primaire/secondaire ?)
 \rightarrow AMS

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 !

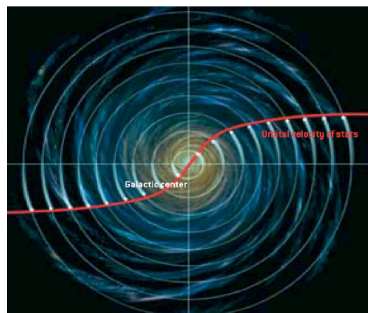
Matière (noire) baryonique

Existence : BBN, CMB, ...

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

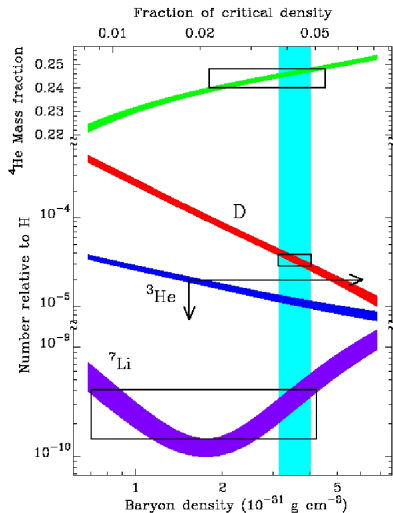
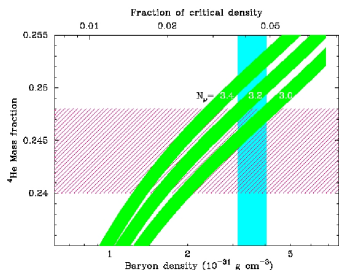
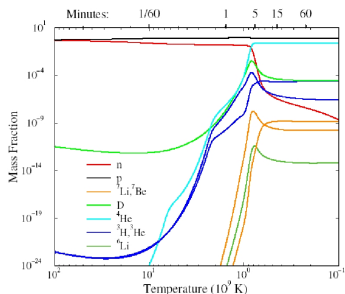


$$\text{Gravitation} \rightarrow v_{\text{rot}}^2(r) = \frac{GM(\leq r)}{r}$$

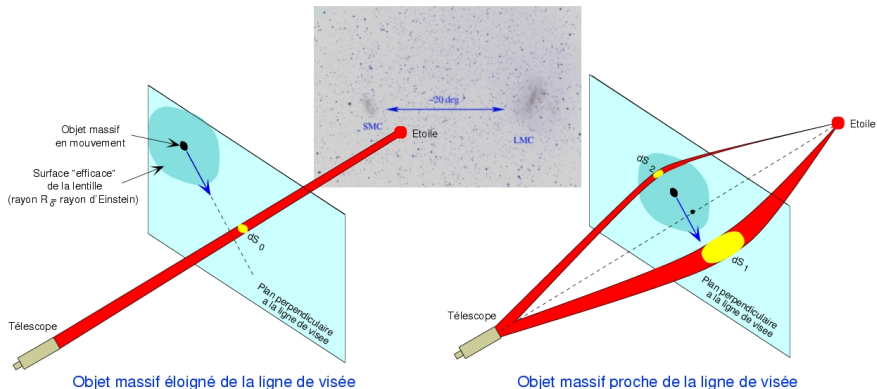
$$v(r) = \text{cste} \Rightarrow M(\leq r) = \frac{rv^2}{G} \propto r$$

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

Nucléosynthèse primordiale

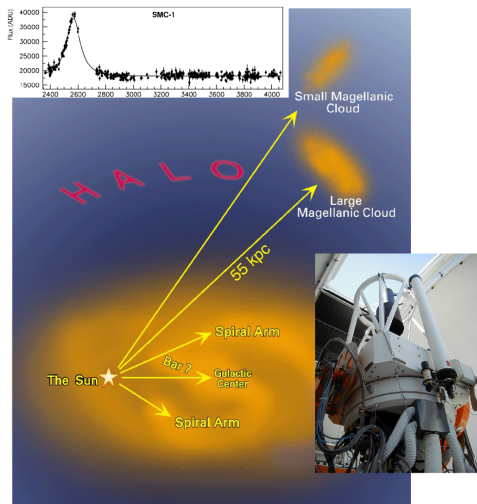


L'effet de microlentille



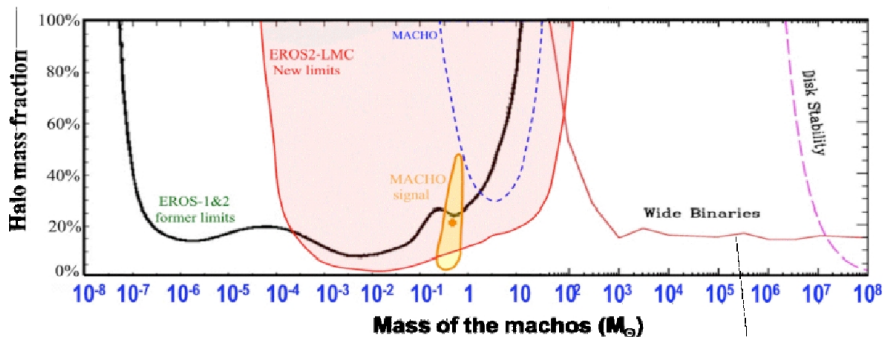
image(s) non résolue (séparation $\lesssim 3 \cdot 10^{-6}$ deg) mais lentille mobile
 \Rightarrow variation temporelle de flux
* dans le LMC ; lentille ds halo : Proba $\sim 10^{-6} \text{an}^{-1}$

EROS-II



- IN2P3 - Dapnia - INSU
- Tel. de 1m dédié & automatisé à La Silla (ESO)
- 06/1996 → 02/2003
- Deux caméras 2×4 CCD (1 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 !

Supernovæ de type Ia

- Intérêt cosmologique
- Modèle d'explosion
- Projets : SNLS, SNIFS, WFIRST (ex SNAP/JDEM)

Cosmologie "classique"

Si on mesure H_0 , Ω_0 et $\Omega_\Lambda \Rightarrow$ géométrie (courbure) et dynamique de l'univers "déterminés"

\rightarrow tests cosmologiques "classiques" :

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

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

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

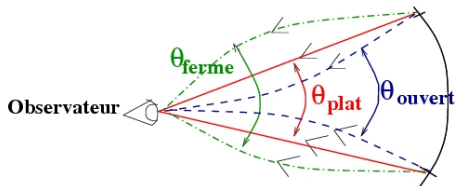
$$\text{Distance de luminosité } d_L^2 = \frac{\mathcal{L}}{4\pi\Phi}$$

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

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

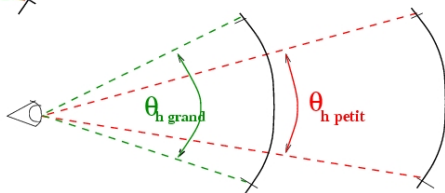
Géométrie et tailles angulaire

Geometrie de l'Univers et taille angulaire



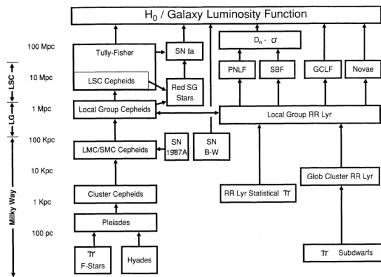
$$\theta_{\text{ferme}} > \theta_{\text{plat}} > \theta_{\text{ouvert}}$$

Effet de l'expansion

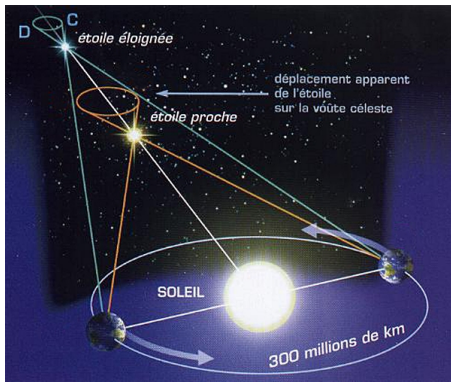


D'après C. Lineweaver

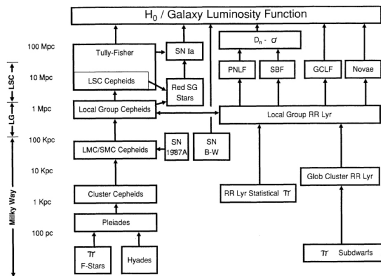
Mesures de distance astronomiques



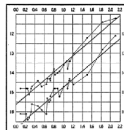
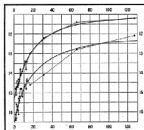
(π == parallaxe)



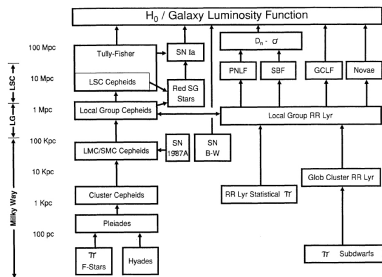
Mesures de distance astronomiques



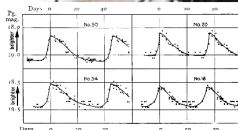
(π == parallaxe)



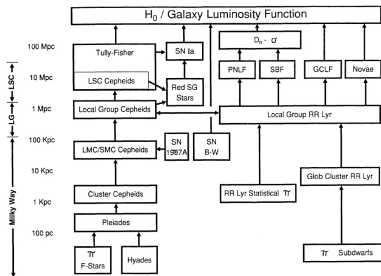
Mesures de distance astronomiques



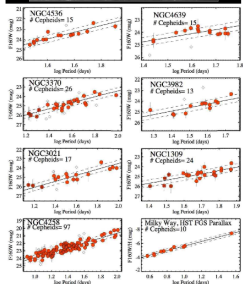
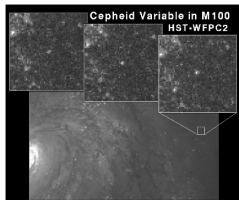
(π == parallaxe)



Mesures de distance astronomiques

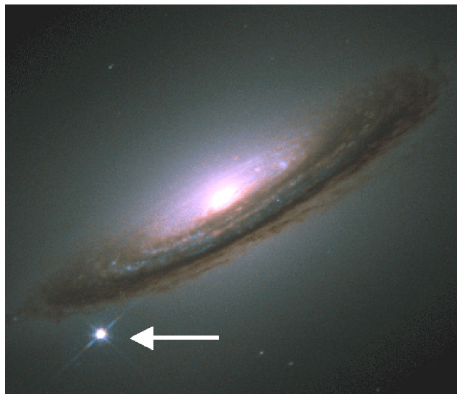


(π == parallaxe)

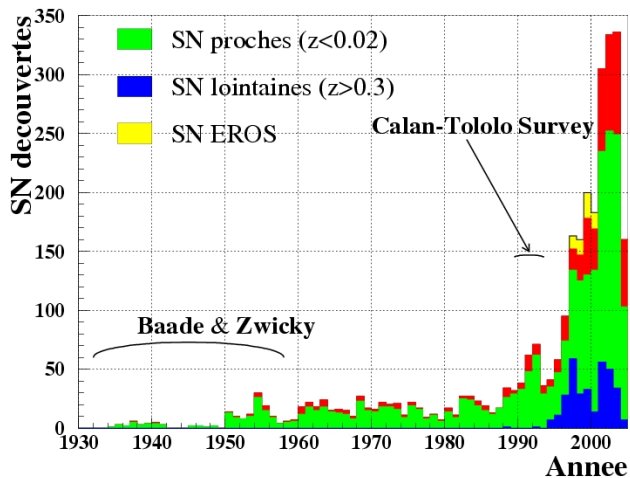


Supernovæ

- Explosion d'étoiles
- $L \sim 10^{10} - 10^{11} L_{\odot}$ (SNIa)
(détectables jusqu'à des redshift ≈ 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

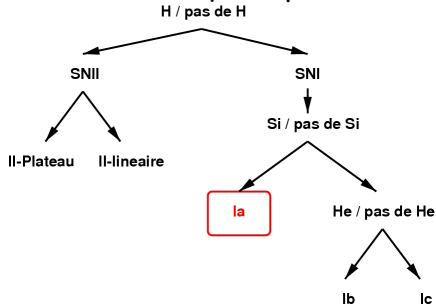




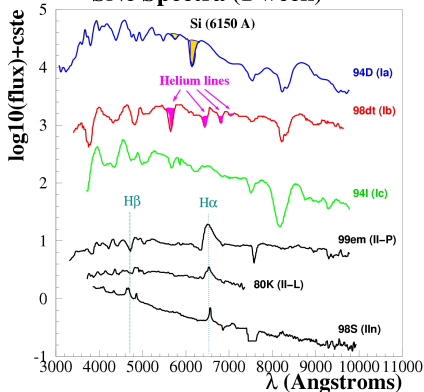
- un physicien chez les astronomes !
- obtient la construction d'un instrument "grand champ" (tel. de Schmidt)
- → pour chercher des phénomènes rares !
- avec Baade 1934 : "hypothèse triple" :
 - 1 SN = explosions d'étoiles , utiles pour mesurer les distances
 - 2 transitions vers des étoiles à neutrons
 - 3 sources de rayons cosmiques
- vitesses des amas de galaxies de Coma, notes inexplicables sans matière "noire"
- ~ 1937 discussions autour de l'effet de lentille gravitationnelle entre étoiles → remarque que ça serait + facile à détecter entre galaxies/amas de galaxies (... ce qui sera découvert en 1974)

Classification des SN

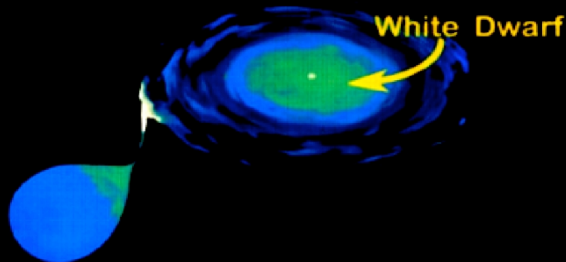
Caractéristiques spectrales



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

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



'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)

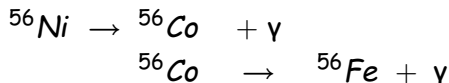
Système progéniteur = naine blanche (C/O) + géante rouge

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

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

Combustion totale (masse cste de combustible !)

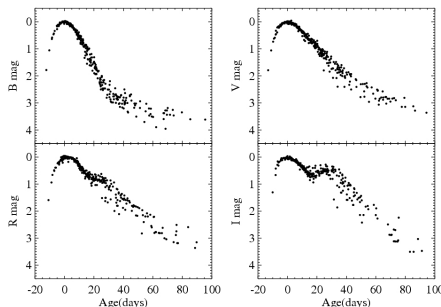
C/O \rightarrow éléments plus lourds - $0.5M_{\odot}$ de ^{56}Ni



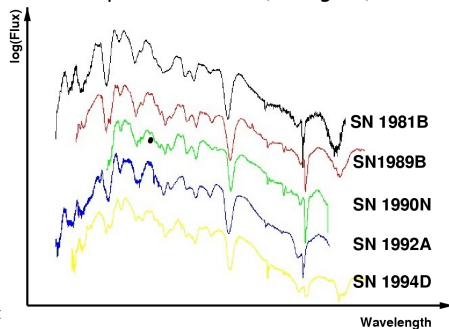
\rightarrow forme de la "courbe de lumière"

Homogénéité des SNIa

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



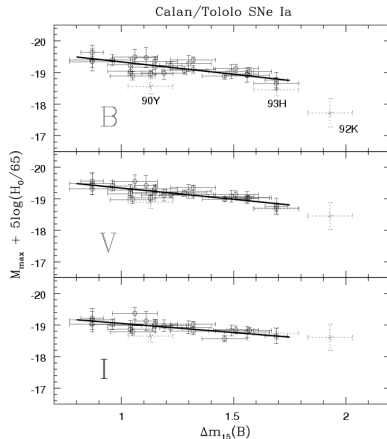
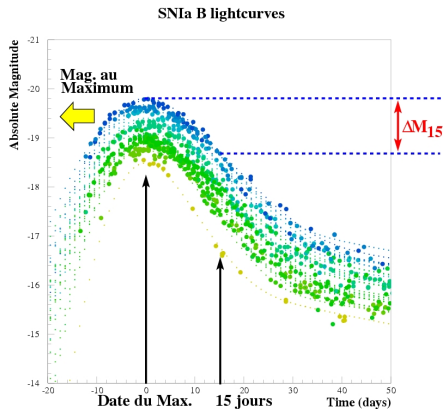
Spectres @ max (P. Nugent)



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

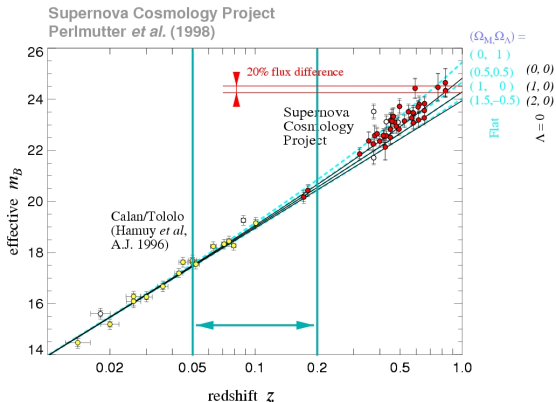
Mais qq SNIa : bleues & "surlumineuses" (91T, 99ac)
rouges & souslumineuses (86G, 91bg)

Standardisation des SNIa



Hamuy et al 1996

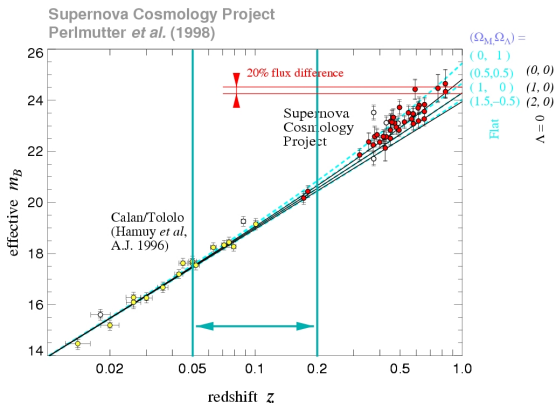
Relation magnitude \leftrightarrow redshift



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

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
(+ 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 : ρ_{vac} est constant $\Rightarrow P = -\rho c^2$
(csq du 1er principe)

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

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

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

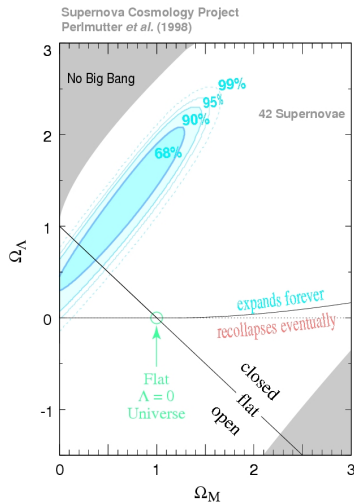
Equation d'état paramétrée : $\rho \sim V^{-(1+w)}$

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

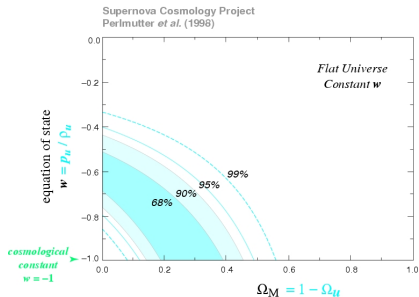
"Signature" de w : évolution avec z ($m(z)$)

Dégénérescences

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



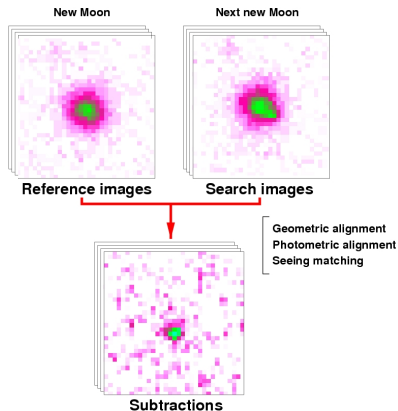
$$(\Omega_x, w_x)$$



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

Découvertes et suivi

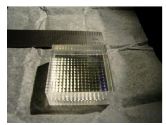
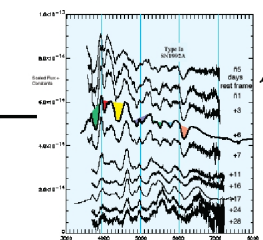
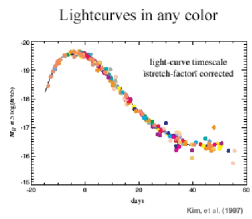
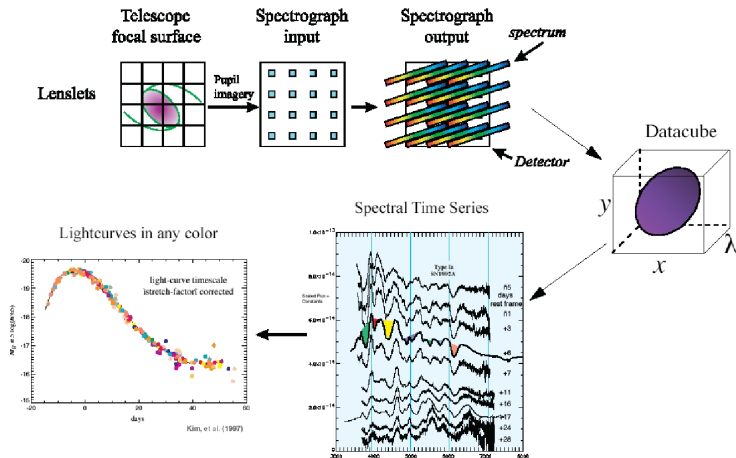
- Découvertes "automatiques"
 - ⇒ programmables
 - télescope grand champ
 - quelques nuits
 - ex. EROS-II : 1 SNIa / 2h
- Suivi plus demandeur : plusieurs télescopes ou tel. dédié
 - ⇒ instrument SNIFS, SNAP/JDEM/WFIRST
 - ⇒ mode "suivi" (découverte et suivi simultanés) → CFHLS, ESSENCE



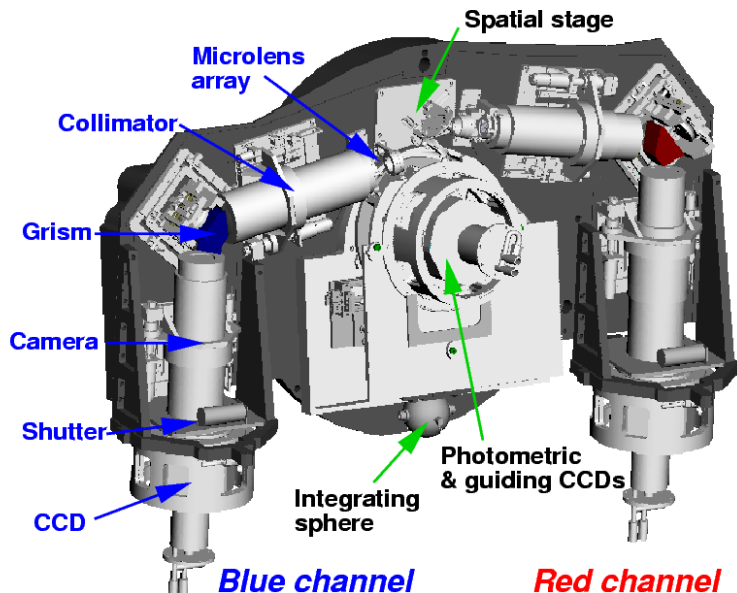
SN Factory ("usine à SN")

- But : $\sim 100 - 200$ SNIa proches ($z \leq 0.1$)
- Découvertes faites en "parasite" avec les images de NEAT (recherche automatique d'astéroïdes, 2 telescopes @ 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)
- ~ 20 SNe découvertes en 2003 ; SNIF livré mi-2004; tests sur le ciel en cours
- Fonctionnement "routinier" depuis 2005

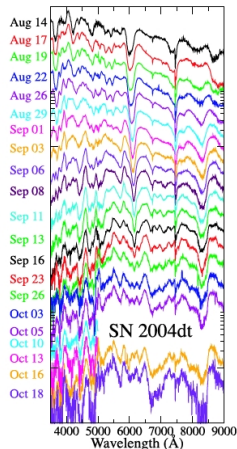
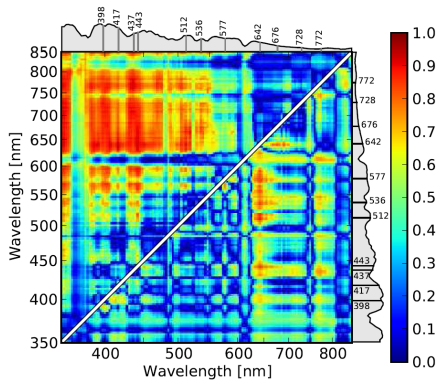
Principe du SNIFS



Le SNIFS (2)



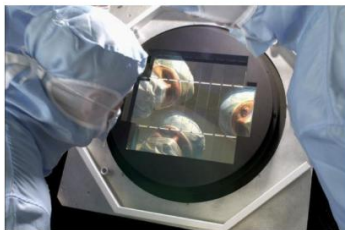
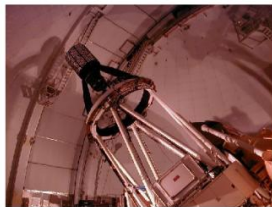
Produits SN Factory



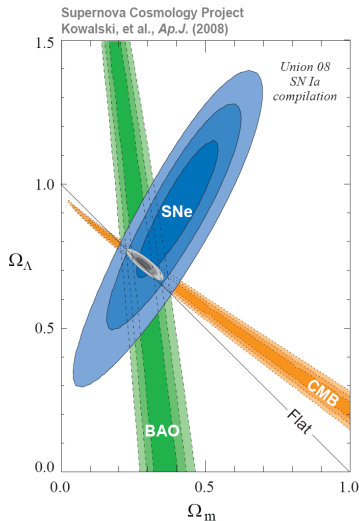
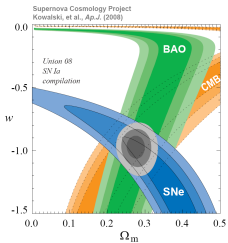
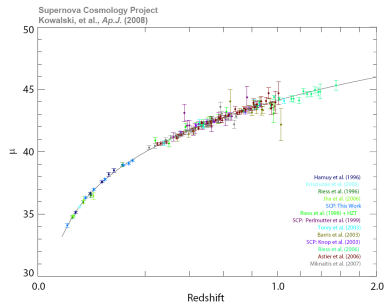
Vers une meilleure standardisation des SNIa : Δm_{15} \rightarrow rapports d'intensités ?

- Cadre : Legacy Survey au CFHT (avant fermeture définitive)
- Observations "régulières" (mode survey) découvertes et suivi photométrique combinés
- temps complémentaire au CFH et sur des tel. de 10m (spectro)
- ~ 40 nuits / an (recherche) pendant 5 ans (2003-2008)
- ~ 450 SNIa "bien suivies" - cosmo avec ~ 250

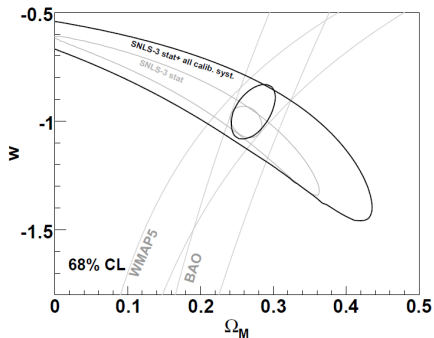
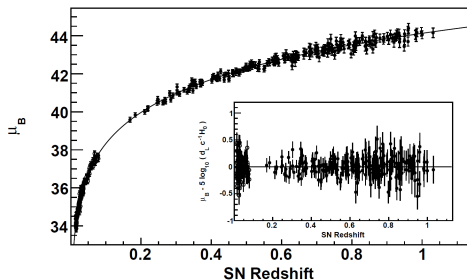
Megacam



Resultats de SNLS

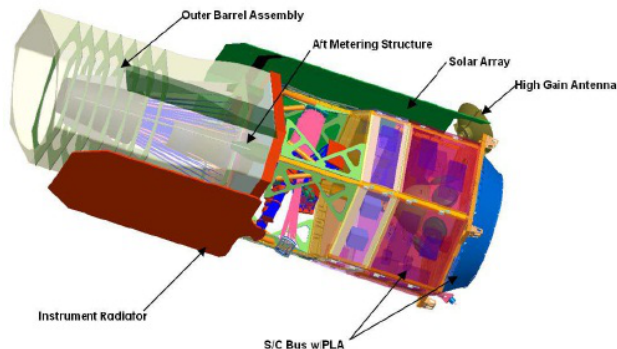


Resultats de SNLS(2)



(J. Guy 2009)

SNAP/JDEM/W-FIRST



Horizon ~ 2020 - Priorité US (Decadal Survey) - 1.6 G\$
Telescope 1.5m - imager 144 Mpix (IR proche) + spectro
programme : de l'énergie noire (SN, WL, BAO,...) aux exoplanètes
collaboration avec EUCLID encouragée ...

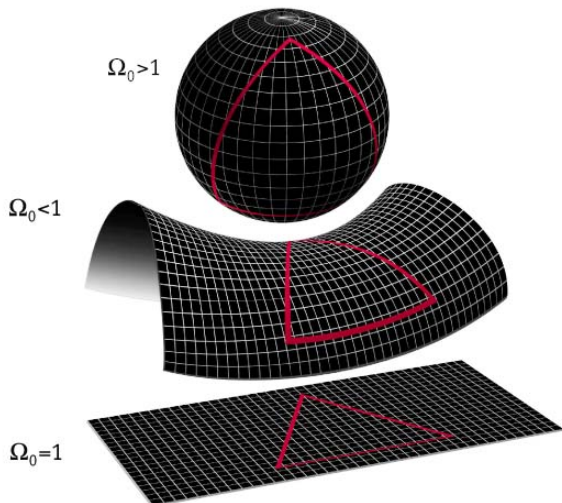
Anisotropies du CMB

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

... vers les grandes structures

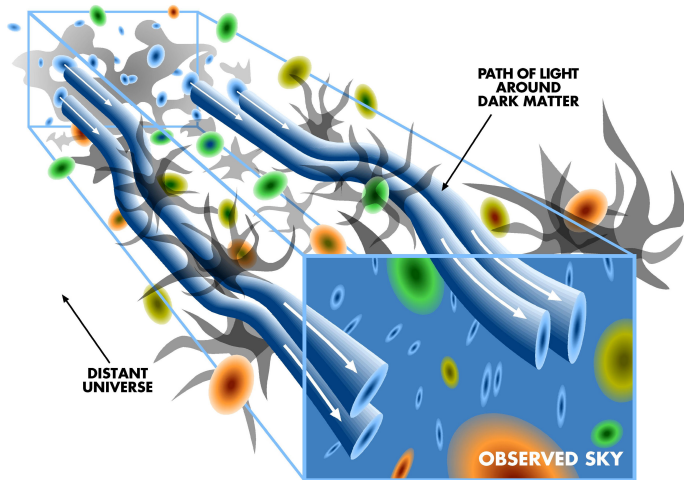
- analyse des structures
- CMB lensing
- BAO

Géométrie(s) de l'univers (rappel)

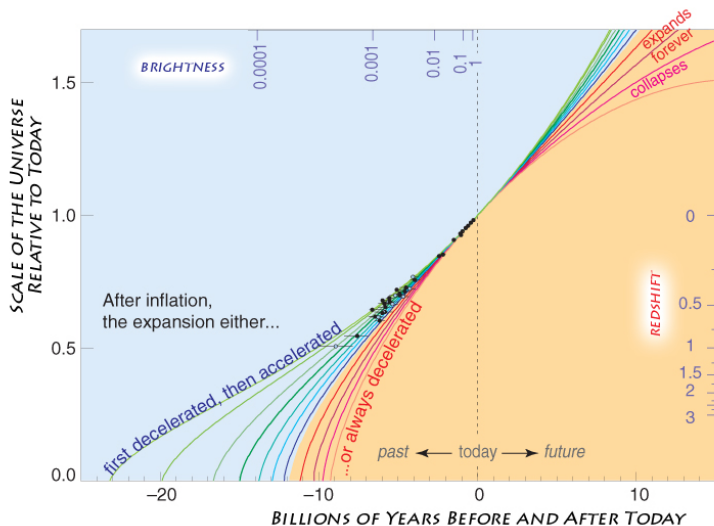


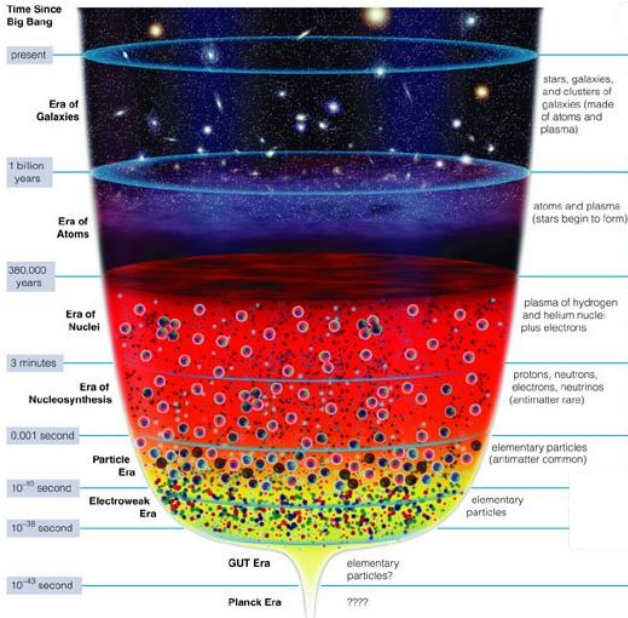
MAP990006

Composition de l'univers - WL (rappel)



Dynamique de l'univers - SNIa (rappel)





- (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

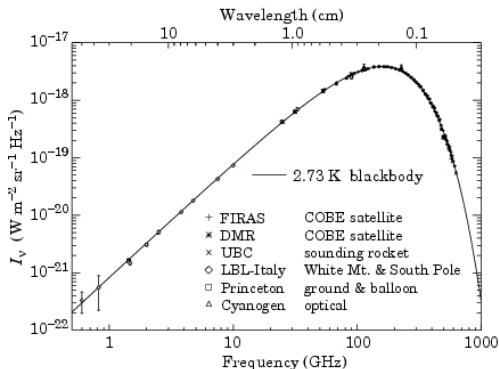
Robert Wilson



Arno Penzias

Le CMB

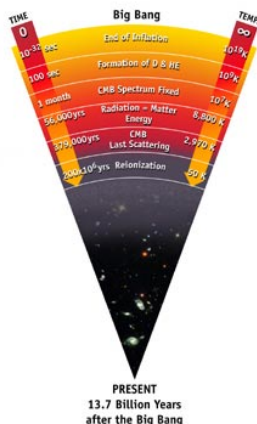
- Prédiction : **G. Gamow (1948)**
- Découverte fortuite en 1965 (**Penzias & Wilson**)
- Rayonnement quasi-**isotrope**



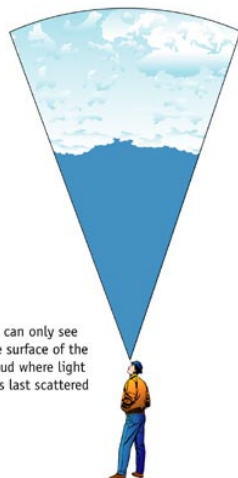
- Spectre = "**corps noir**"
- pic à 100GHz
TV sat $\sim 10\text{GHz}$
portable $\sim 2.5\text{GHz}$
- 400 photons/cm³
- ... qq % du bruit d'une TV

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_{CMB} apparente $\rightarrow 2.7^\circ\text{K} \Rightarrow$ CMB dans l'infra-rouge lointain

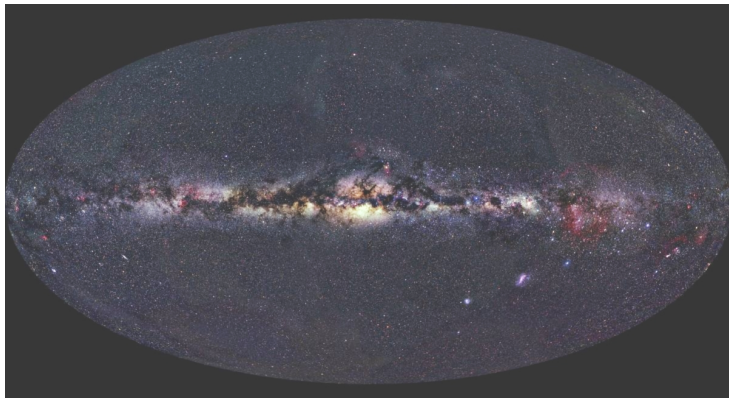


The cosmic microwave background Radiation's "surface of last scatter" is analogous to the light coming through the clouds to our eye on a cloudy day.



Des anisotropies dans le CMB !

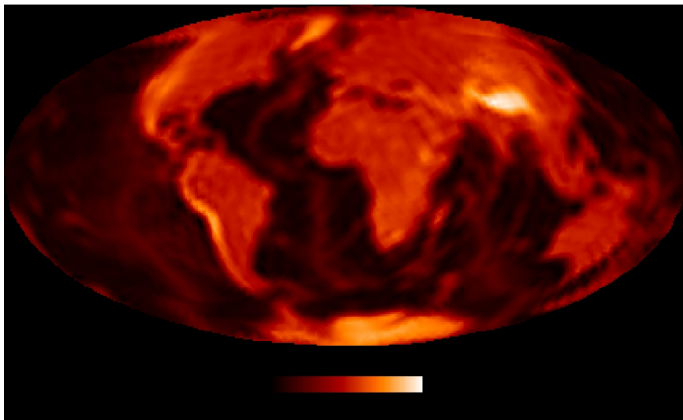
T_{CMB} dans chaque direction \rightarrow carte du "ciel" (couleur \leftrightarrow T)



Le ciel nocturne (visible)

Des anisotropies dans le CMB !

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

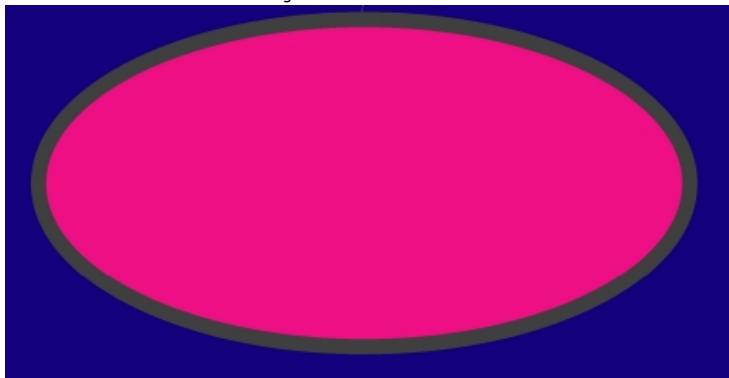


Représentation d'une sphère connue

Des anisotropies dans le CMB !

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

rouge \leftrightarrow chaud ; bleu \leftrightarrow froid

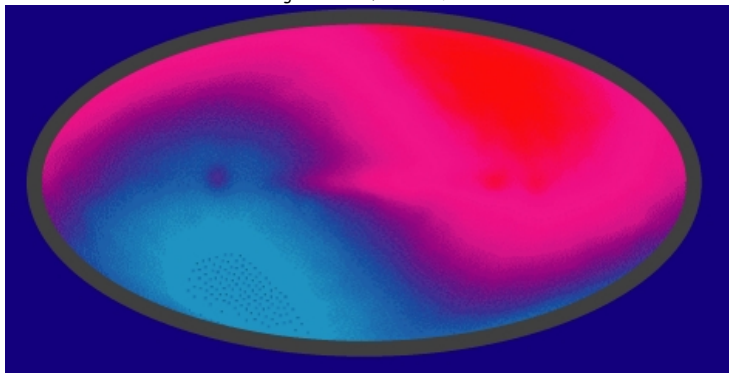


CMB très uniforme (à 1/1000 près)

Des anisotropies dans le CMB !

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

rouge \leftrightarrow chaud ; bleu \leftrightarrow froid



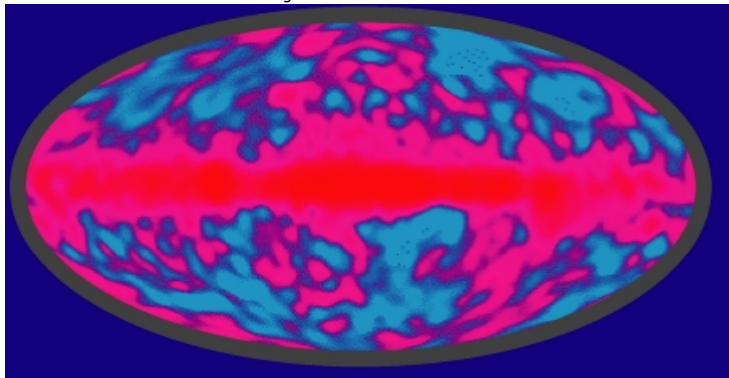
$$(\delta T/T \sim 10^{-3})$$

mvt de la Terre \Rightarrow effet Doppler
 ~ 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

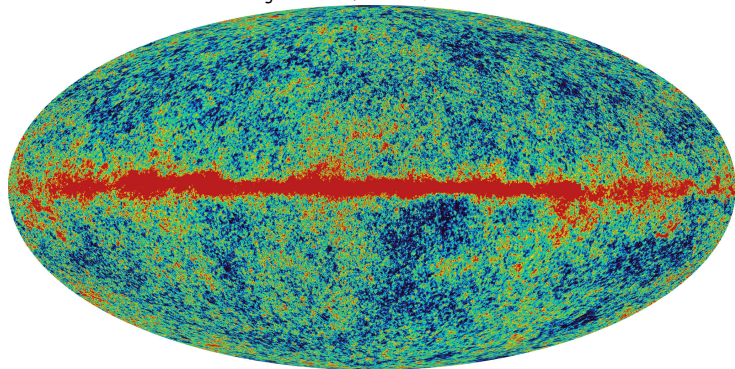


Fluctuations primordiales ($\delta T/T \sim 10^{-5}$) + Galaxie (1/100000 près)
COBE (1992)

Des anisotropies dans le CMB !

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

rouge \leftrightarrow chaud ; bleu \leftrightarrow froid

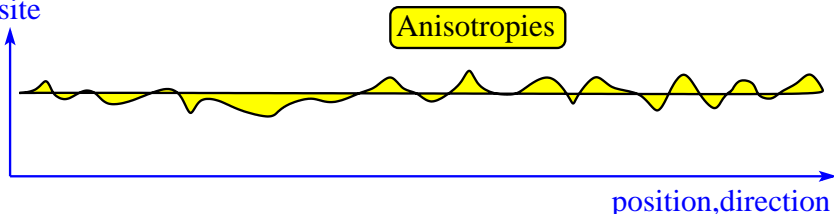


Fluctuations primordiales ($\delta T/T \sim 10^{-5}$) + Galaxie (1/100000 près)
WMAP (2003)

Le plasma primordial (le tambour)

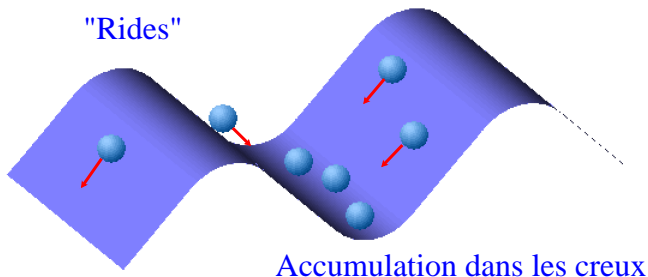
- milieu composé de protons (+ qq noyaux He,...), d'électrons ("libres") et de photons
- composante dominante = les photons
- interaction (e.m.) entre photons et électrons/protons
- les photons résistent à une compression
- milieu "presque" isotrope

température,
densité



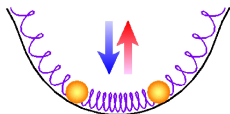
Des fluctuations aux anisotropies

- 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



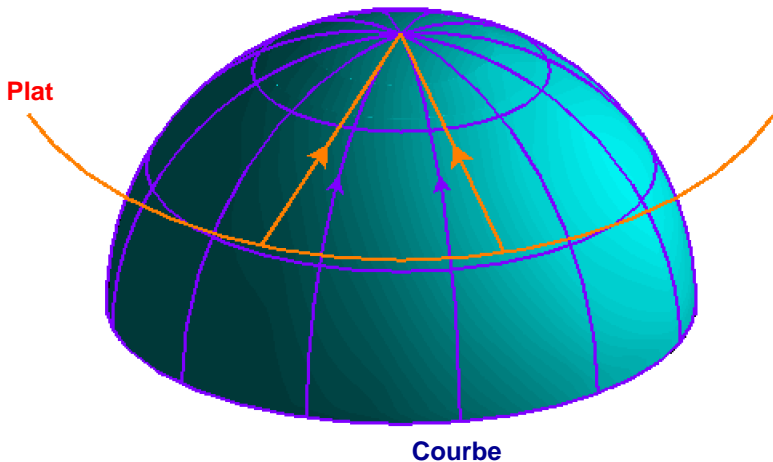
⇒ apparition d'oscillations (ondes acoustiques) ds le plasma primordial

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

anisotropies de densité \Leftrightarrow régions + ou - chaudes

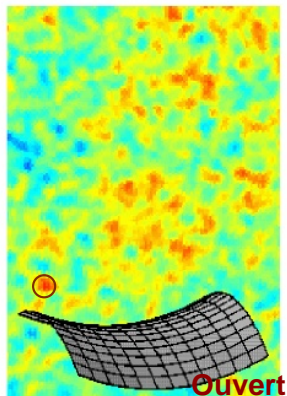
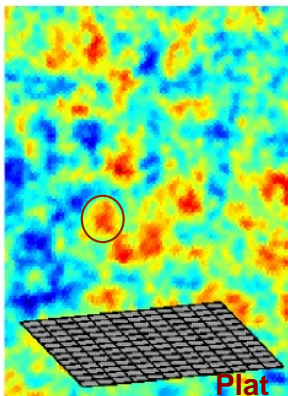
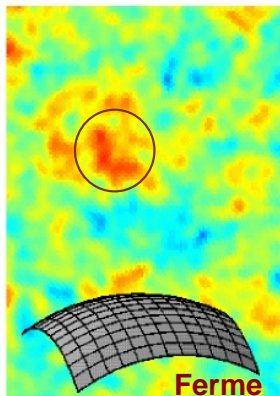
⇒ **anisotropies de température**

Propagation du CMB



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

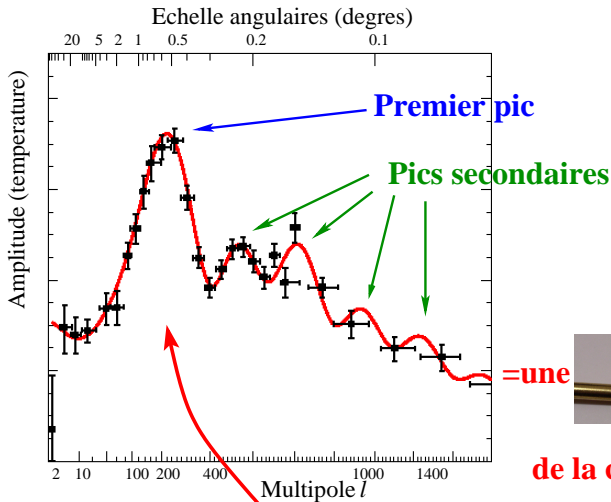
Géométries et anisotropies



Pb : extraire des infos quantitatives des cartes

Principe : estimer parmi les fluctuations la fréquence de chaque taille

La courbe des C_ℓ

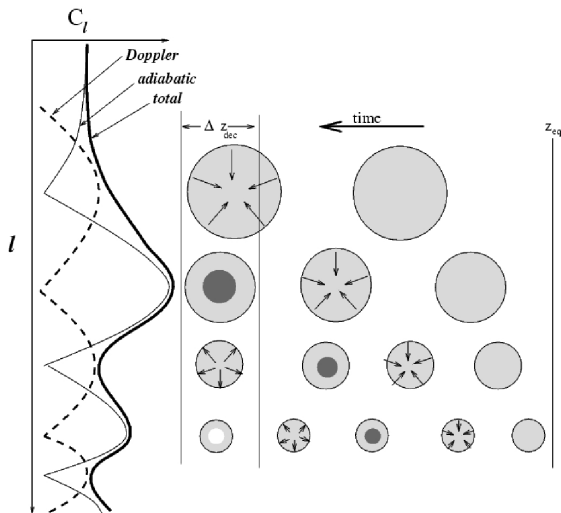


Beaucoup de structures de cette taille

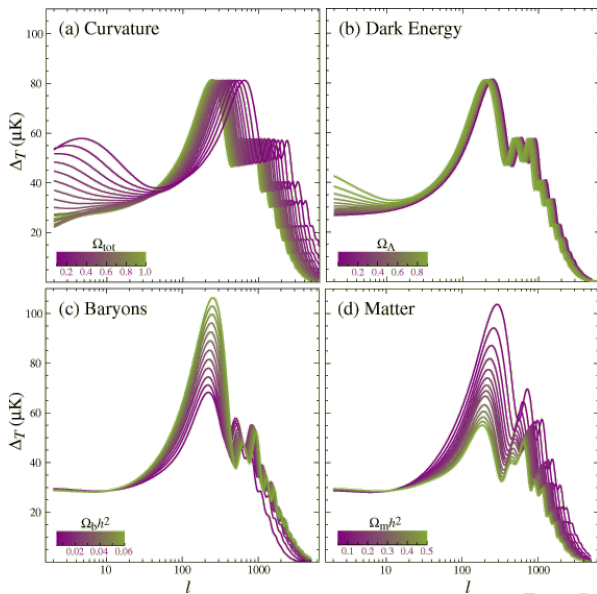
=une
de la cosmologie !

Pourquoi des pics ?

A grande échelle (petit ℓ) : pas encore d'oscillations



Un outil sensible !



Une mesure de ... tout !?

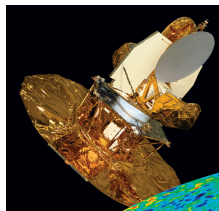
Les anisotropies du CMB combinent :

- 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 !)

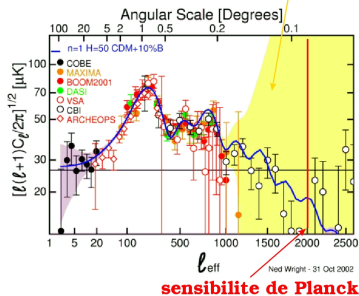
Aperçu expérimental

- 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 ℓ
- futur à tous les etages : sol (BRAIN/QUBIC, CLOVER, POLARBEAR,...), ballon (OLYMPO, EBEX, ...), espace (BPOL/CORE?)

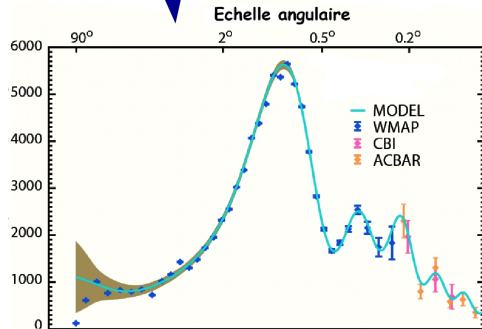


Les C_l hier et aujourd'hui

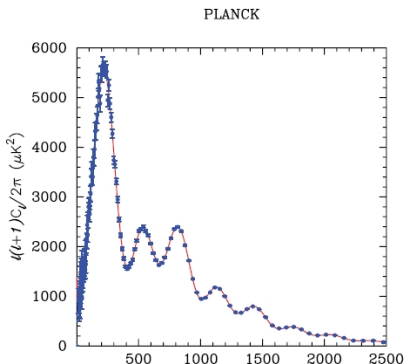
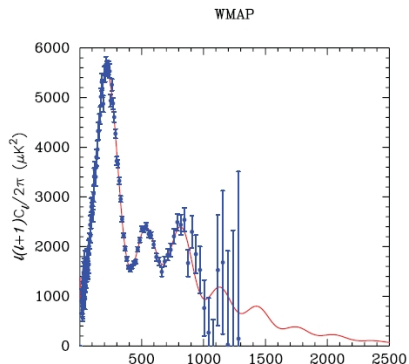
sensibilite (prevue) de WMAP



Resultats de WMAP



Planck vs WMAP (température)



Planck : la mission

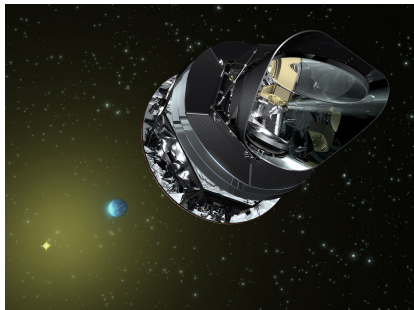
Mission de l'ESA

Lancement 15 Mai 2009

(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 🇫🇷)

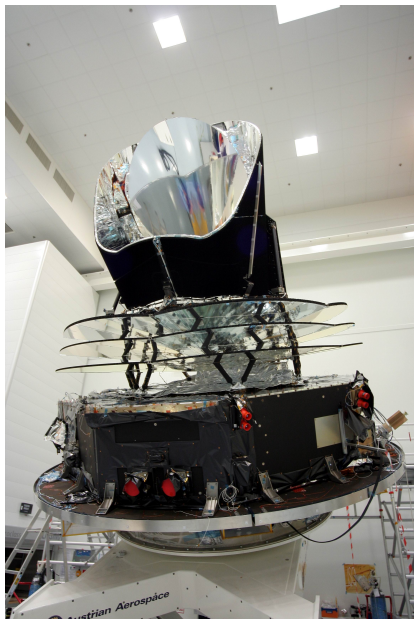


Planck : la mission

Mission de l'ESA
Lancement 15 Mai 2009
(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

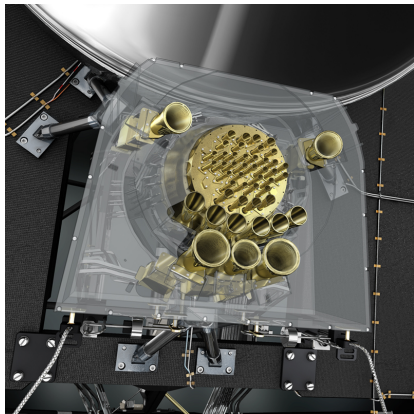
Mission de l'ESA

Lancement 15 Mai 2009

(avec Herschell)

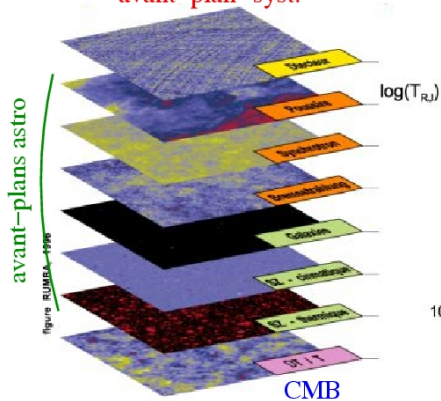
Durée garantie : 14 mois @ L2
(1.5Mkm)

- 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 🇫🇷)



Avant-plans

"avant-plan" syst.



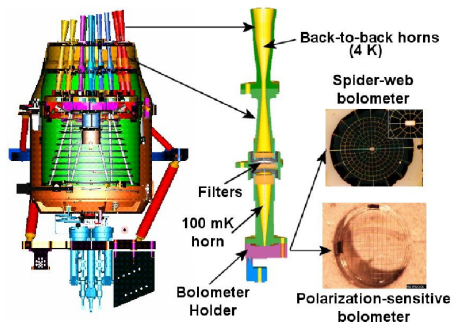
Canaux de Planck (approx)

LFI

HFI

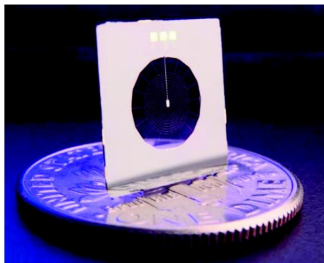
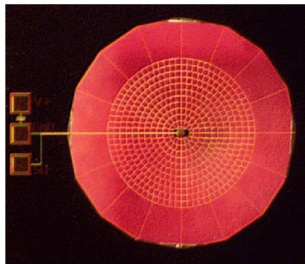
143 217 353 450 GHz



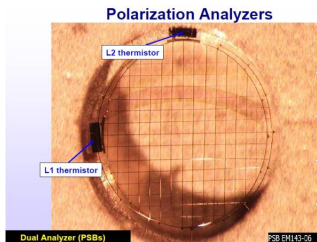


- Au foyer du télescope ("dans LFI")
- Refroidissement à plusieurs étages
- Dernier étage (dilution $^3\text{He}/^4\text{He}$) $T \sim 0.1 \text{ K}$
- Détecteurs : bolomètres (52 voies)
- "prototype" = Archéops

Les bolomètres



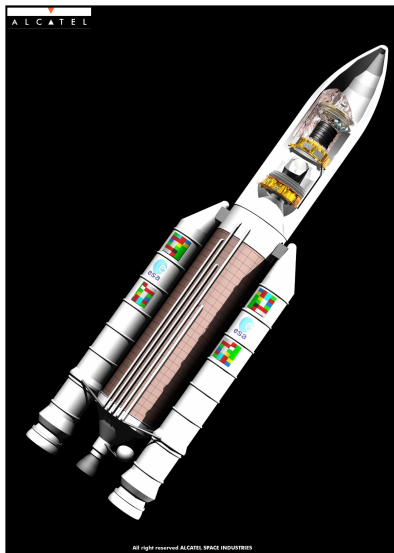
- mesurent la chaleur déposée par les γ
- grille \rightarrow cosmiques
- taille 2.6mm
- "fils" $4 \times 1 \mu\text{m}$
- $T \sim 100\text{mK}$ (sensibilité)

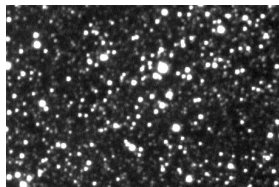
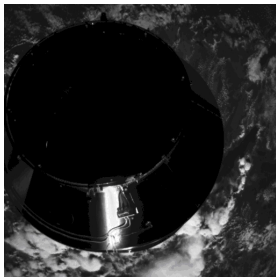


Planck : le vol

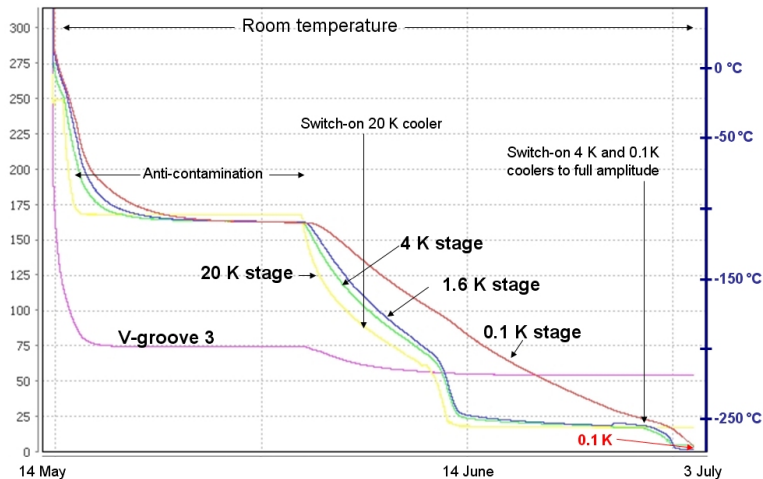


Planck : le vol

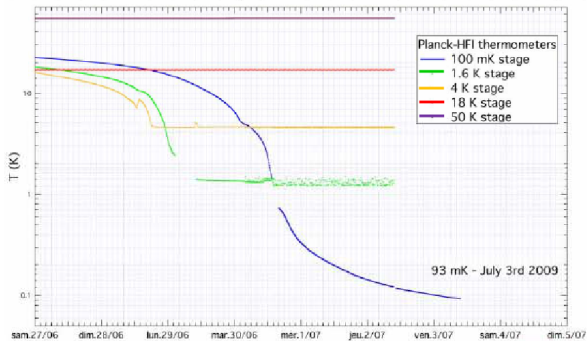




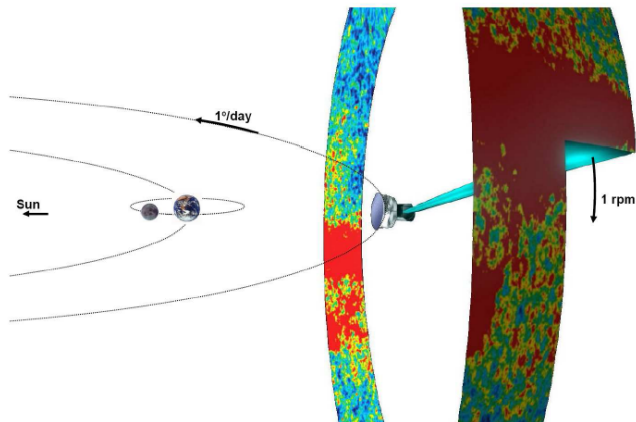
Mise en froid @ L2



Mise en froid @ L2

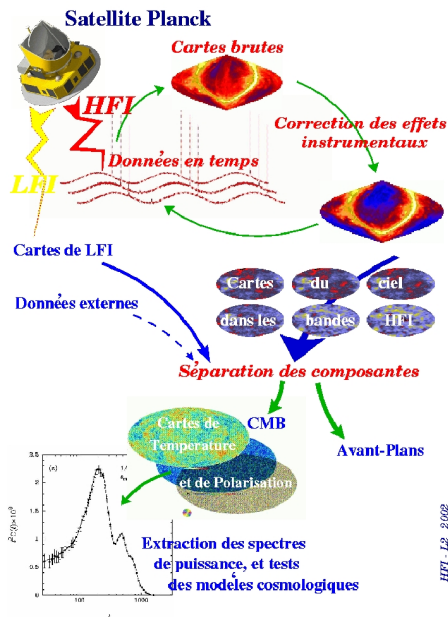


Planck à L2



Observations en continu (7 mois → tout le ciel)
Redondances des époques différentes (systématiques)

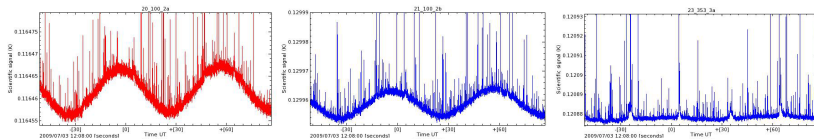
Traitement de données



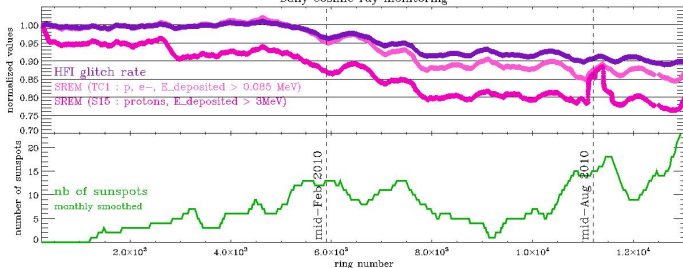
- plusieurs niveaux
- C'EST COMPLIQUE !
- collaboration multi-instituts
- calculs massivement parallèles (bcp de mémoire et d'I/O) i.e. reconstruction de cartes ($\sim 6.5 \cdot 10^6$ pixels S_p) données d'un an (tout le ciel) $\sim 6 \cdot 10^9$ échantillons M_i (25 Go) problème matriciel $M_i = A_{ip}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

HFI - L2 - 2002

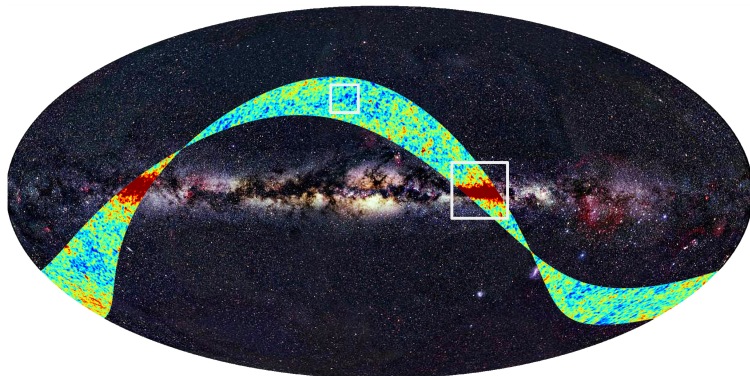
Un détecteur de rayons cosmiques!



Daily cosmic ray monitoring

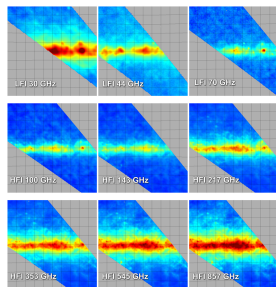
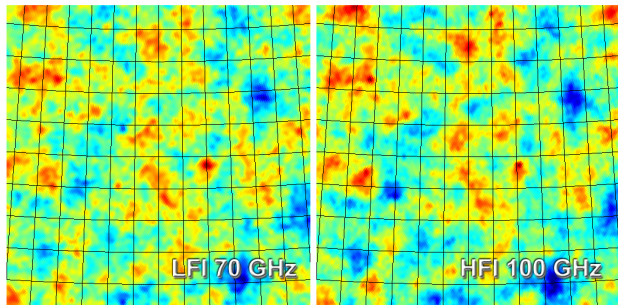


Premières images (Sept. 2009)

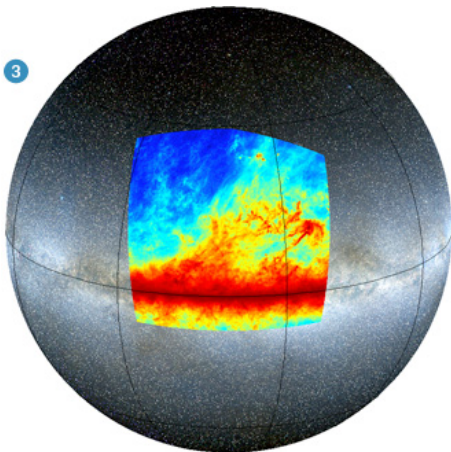
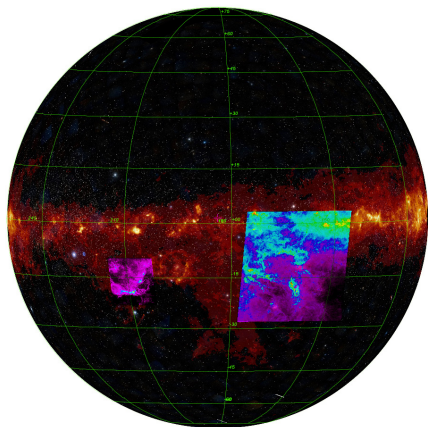


Après ~ 15 j d'observations !

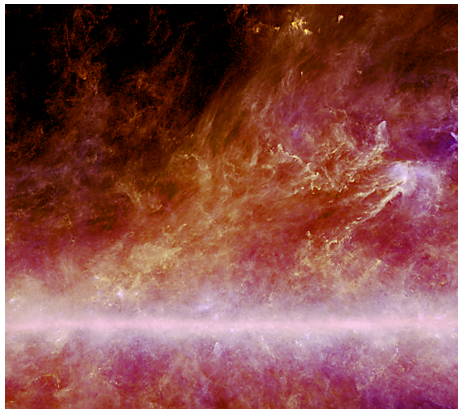
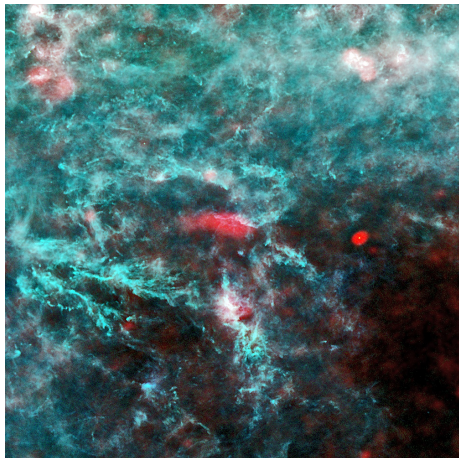
Premières images (Sept. 2009)



Au cœur de la Galaxie (Mars 2010)

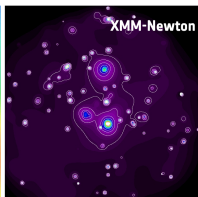
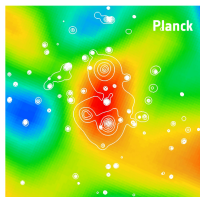
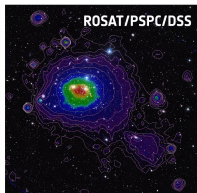
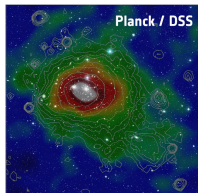
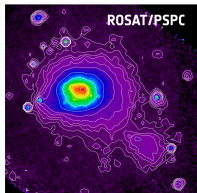
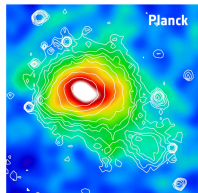
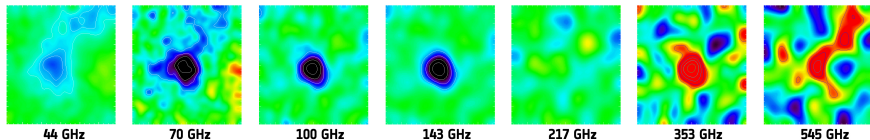


Au cœur de la Galaxie (Mars 2010)

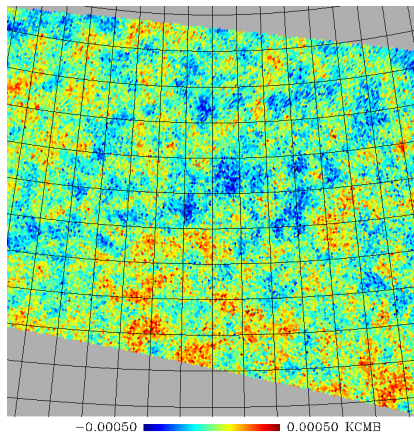


Amas de galaxies avec Planck

Effet différentiel vs CMB :

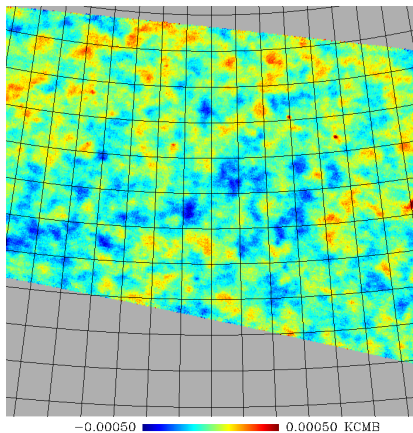


Et le CMB?



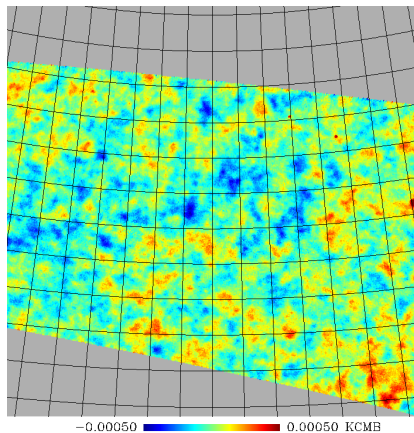
Et le CMB?

100GHz



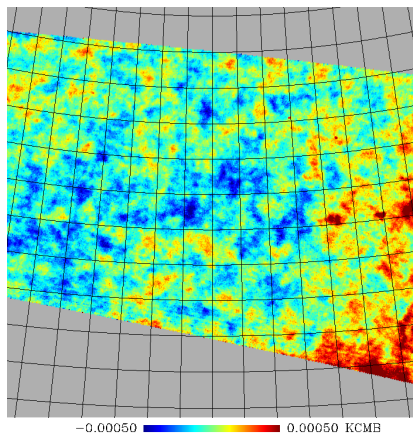
Et le CMB?

143GHz

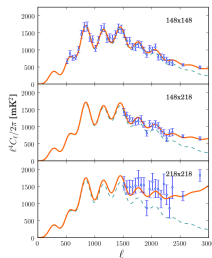
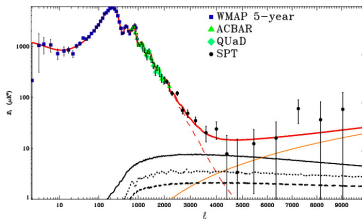
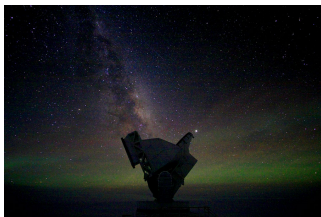


Et le CMB?

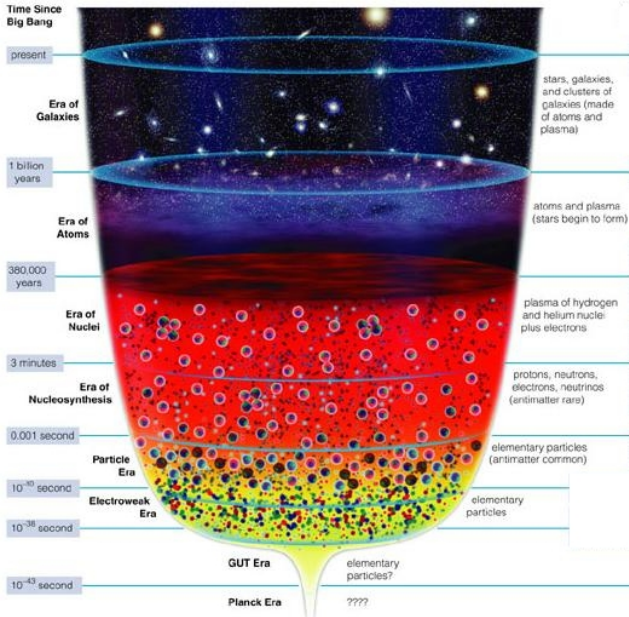
217GHz



Et à part Planck ?



Programme observationnel au sol/en ballon en cours de préparation (QUBIC, EBEX) ; projets spatiaux (modes B) a.o. ESA (Core) et US (CMBpol)



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

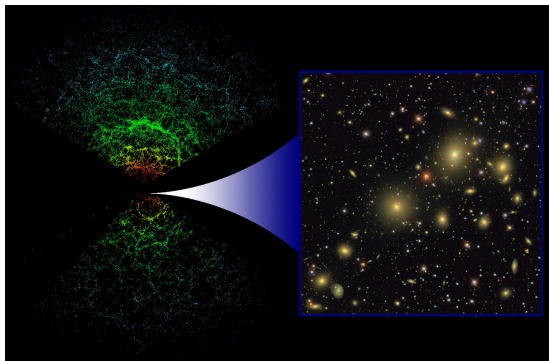
(4) "Libération" des photons = découplage (à 300000 ans) → émission du CMB

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

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

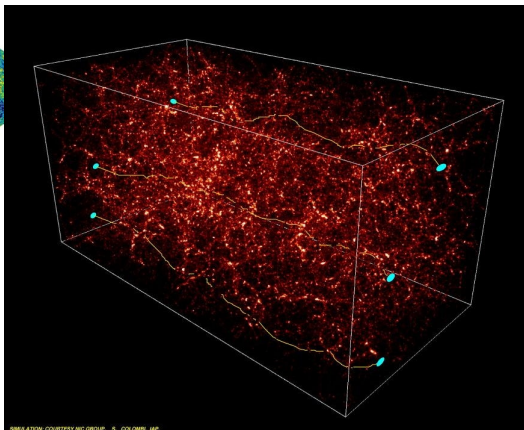
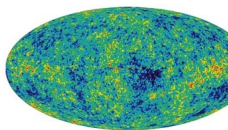
(1) inflation

(0) état initial (??)



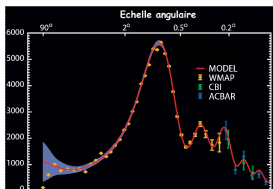
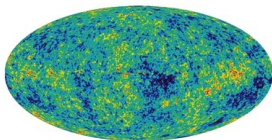
Distribution spatiale des galaxies (2D \rightarrow 3D) \rightarrow analyse "spectrale"
/ fonction de corrélation
+ étude de l'évolution de ces distributions
+ Confrontation simulation(s) vs observation(s)
approche(s) : couvrir un grand champ + trouver les galaxies +
mesure de z : "exacte" (spectro) ou approximative (photométrie
multi-bande)

Lensing du CMB



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

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



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

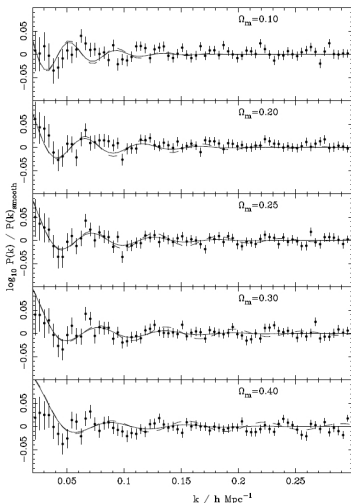
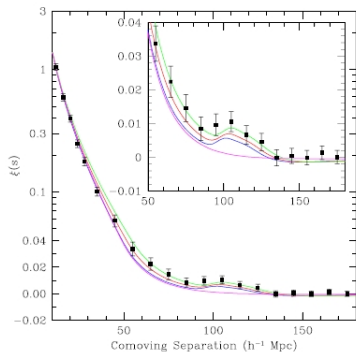
Evolution des structures ultérieure : gravitation (newtonnienne)

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

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

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

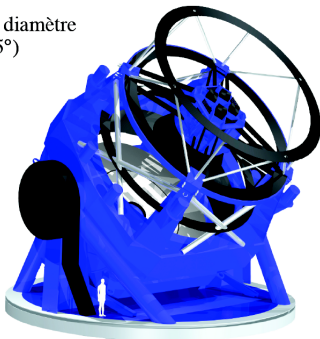
Pic(s) acoustique(s) ds la distri des galaxies





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



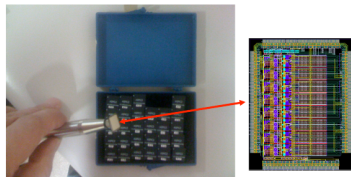
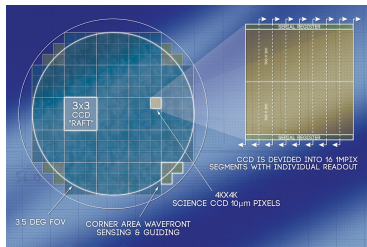
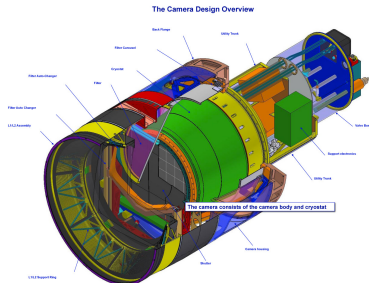
<http://www.lsst.org/>

NB Priorité au sol dans le "decadal survey"

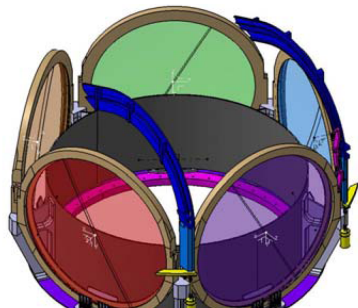
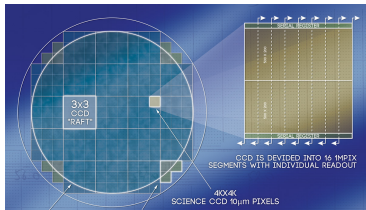
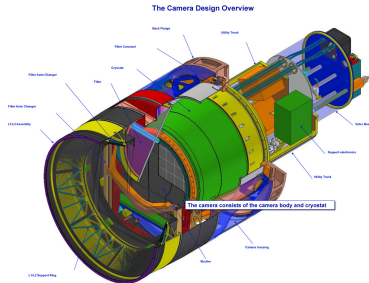
LSST (2)



LSST (3)

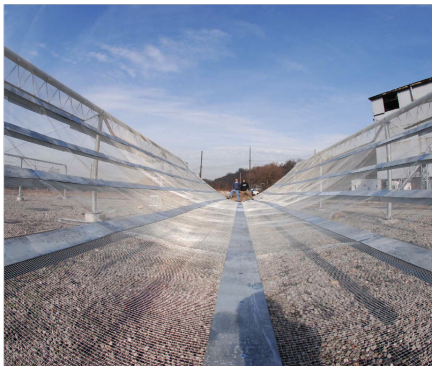


LSST (3)



Projet BAO radio

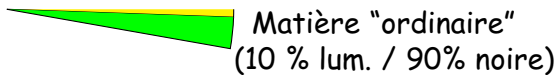
- collab. IRFU, LAL, CMU, CITA, Fermilab + Obs. de Paris (Nancay), SAAO, ...
- carte 3D de la distribution de l'hydrogène atomique (HI) par son émission 21cm
- technique : interféromètre grand champ (10-100 deg²)
- récepteurs large bande
- technologie **numérique**
- antennes de grande surface à bas coût (cylindres?) $\sim 10000\text{m}^2$
- test a Nancay (élect.) puis Pittsburgh (électronique + antenne, 2009)
- deux pistes : Canada, Maroc (univ. Al Akhawayn, Ifrance)
- cout ~ 12 Meuros ?? ; planning : 2010 R&D 2011-13 construction ? 2014 opérations ?



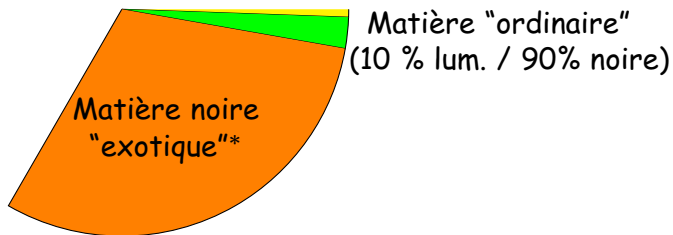
Conclusion(s)

- "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

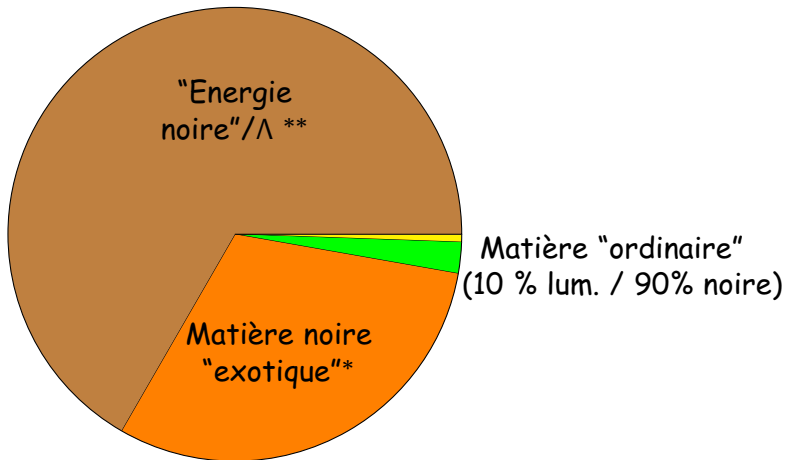


Composition de l'univers



*non identifiée

Composition de l'univers



* non identifiée

** encore plus mystérieuse



Dans la nuit des temps



Sources

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

Distances élémentaires

Dans le plan (x, y)

- longueur infinitésimale : $ds^2 = dx^2 + dy^2 := \text{métrique}$
- en coord. polaires (r, θ) : $ds^2 = dr^2 + r^2 d\theta^2$
- 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, θ) 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 :

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

distance² = facteur d'échelle² longueur immobile²

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 :

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

distance² = facteur d'échelle² longueur immobile²

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))

Conséquence(3) : dilatation des temps

Soit deux pulses lumineux séparés par Δt (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!

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 $dv = 4\pi V p^2 dp / h^3$

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

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

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

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

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

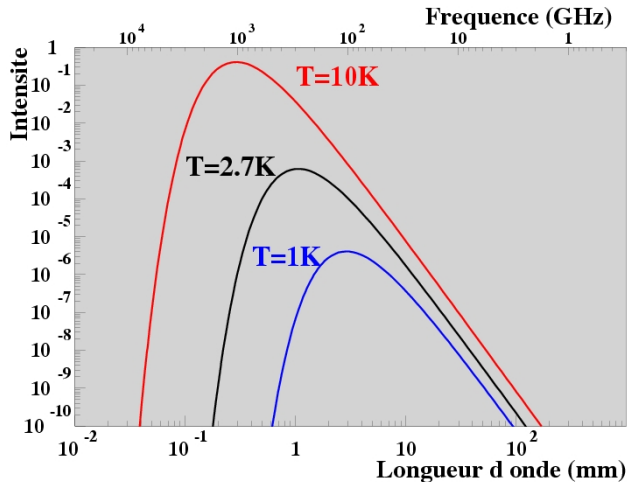
R s'élimine !!

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

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

ref L. Valentin 'Champs et particules'

Spectre de corps noirs



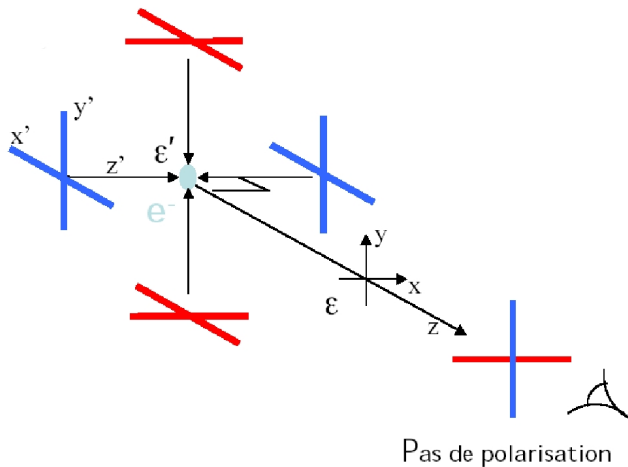
M. Planck 1900

spectre à un seul param. : T

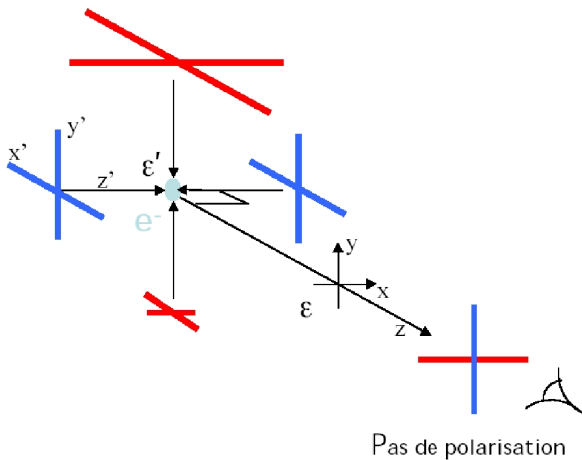
pdT l'expansion :

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

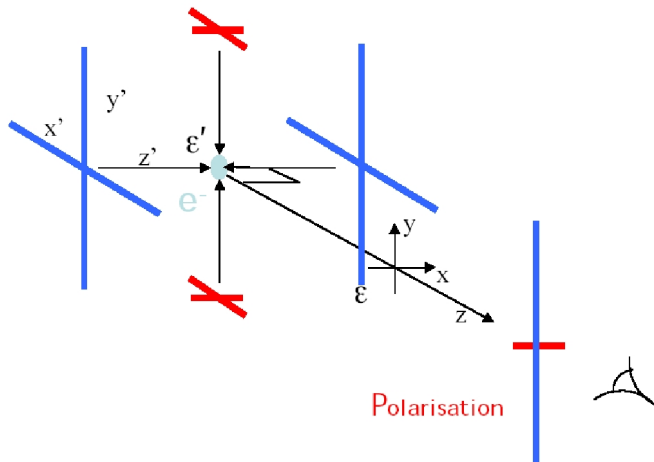
Polarisation du CMB



Polarisation du CMB

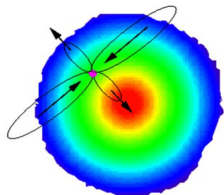


Polarisation du CMB

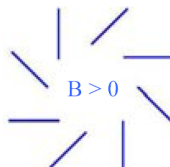
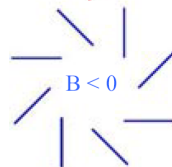
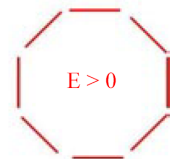
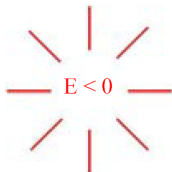


Modes de polarisation (E et B)

Density Anisotropies

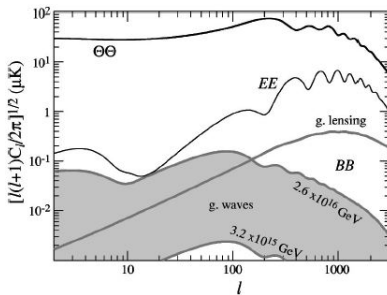
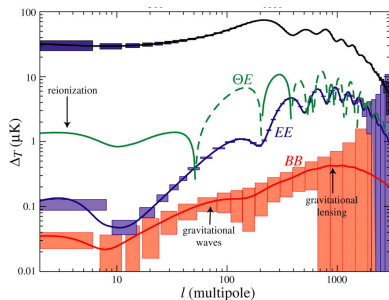


Primordial
Gravitational Waves



Ces origines sont séparables

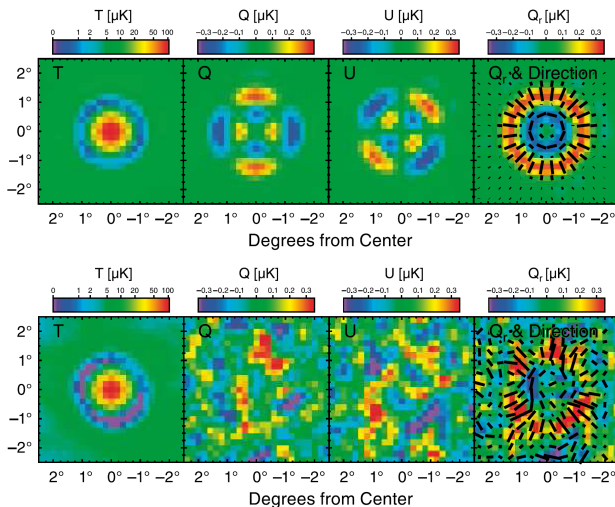
Spectres de Polarisation



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

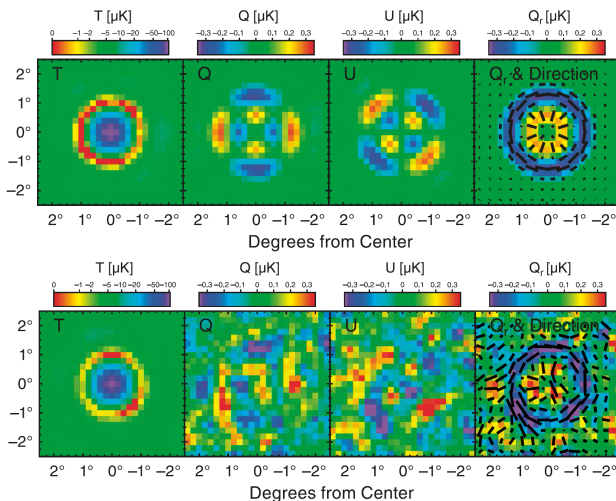
Anisotropies du CMB : WMAP7y

coaddition des anisotropies positives (chaudes) (Komatsu et al 2010 - arXiv 1001.44538) - simu (haut) et data (bas)



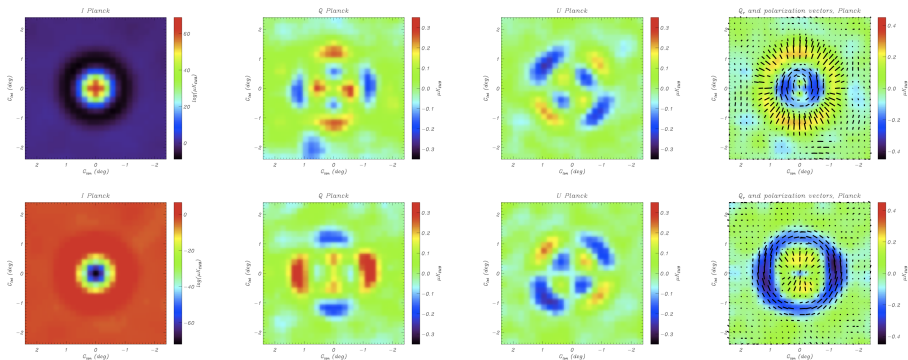
Anisotropies du CMB : WMAP7y

coaddition des anisotropies négatives (froides) (Komatsu et al 2010 - arXiv 1001.44538) - simu (haut) et data (bas)

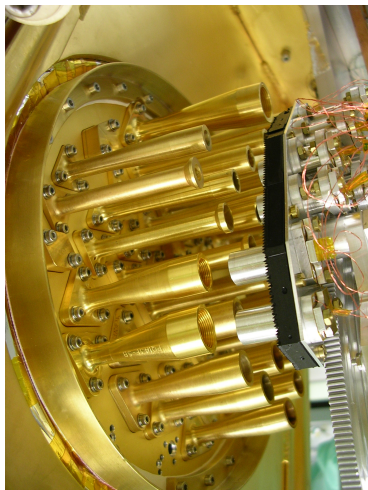
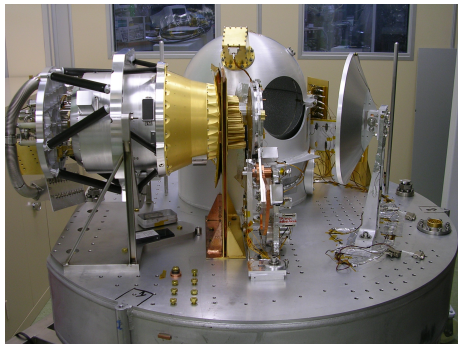


Anisotropies du CMB : HFI

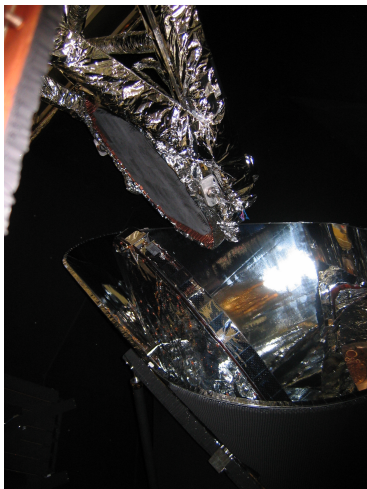
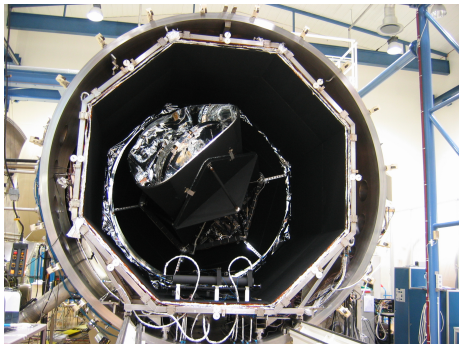
coaddition des structures chaudes (haut) et froides (bas)

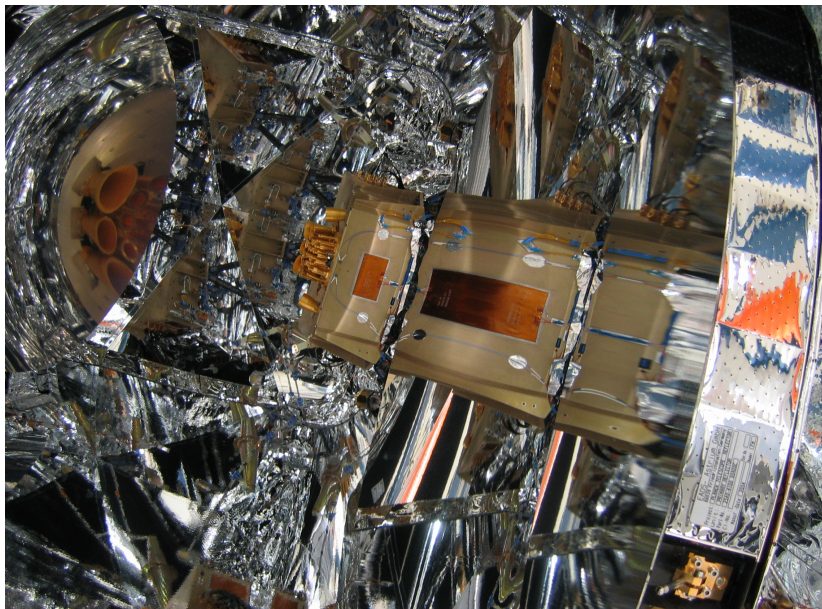


Etalonnage de HFI (2006)

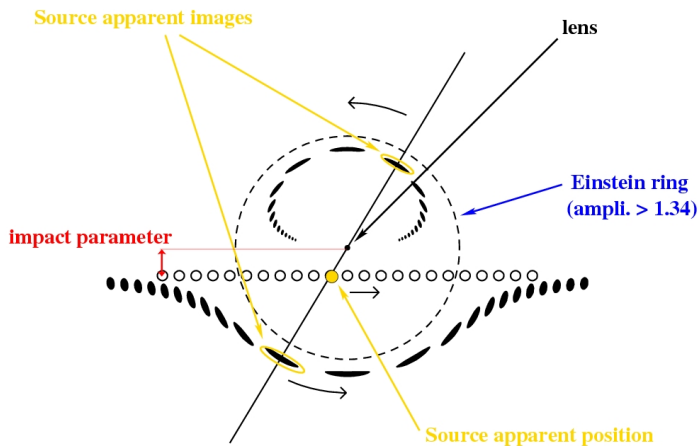


Etalonnage de Planck (2008)





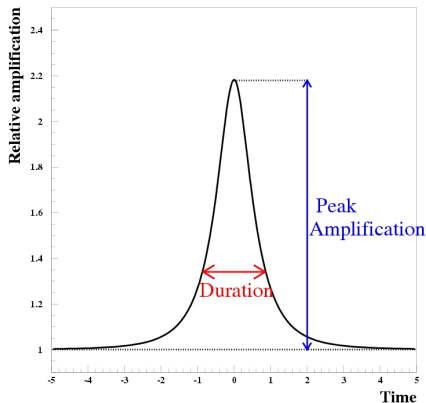
Geometrie transverse



adapted from Paczynski (1996)

Extraction de physique

source & lentille ponctuelles, mvt
linéaire



2 observables, 1 seule "physique"

► Amplification au pic

⇔ géométrie transverse

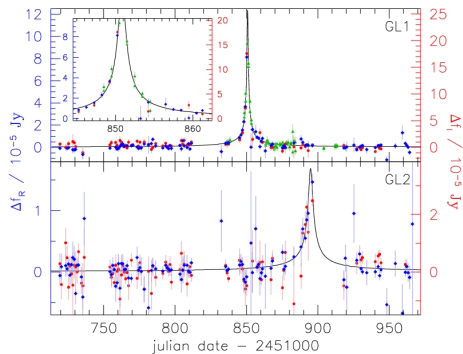
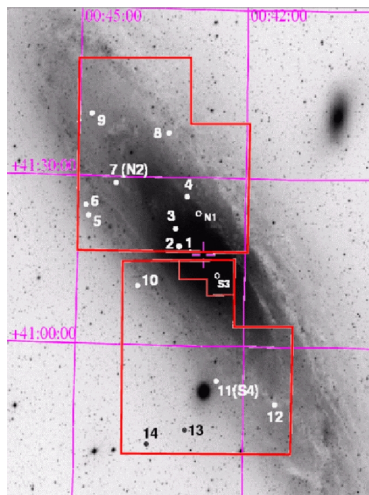
► Durée

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

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

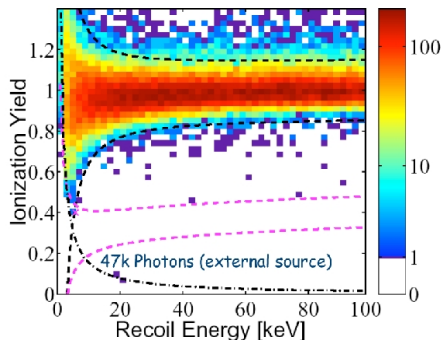
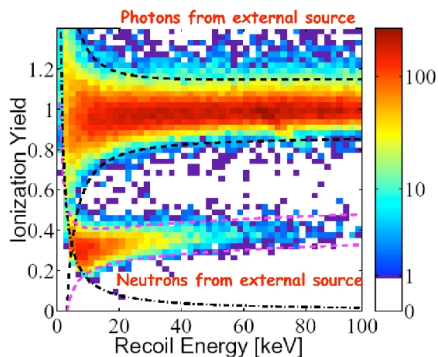
⇒ information dégénérée

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

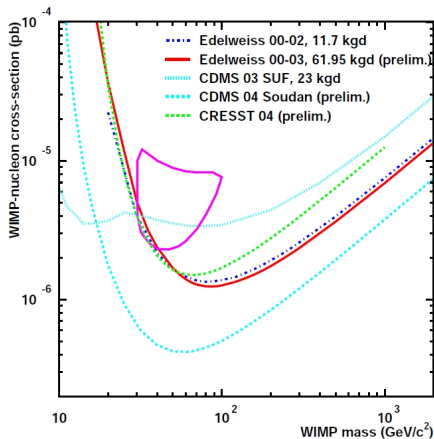
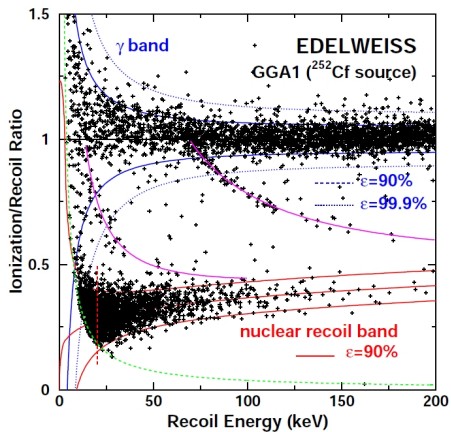


Plusieurs groupes actifs
 Quelques événements observés
 ... prometteur (structure galactique?)

Calibrations (CDMS)








Résultats





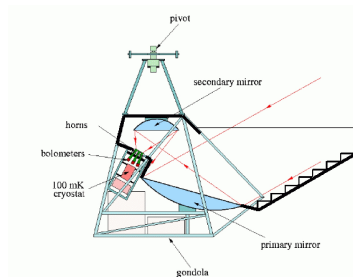
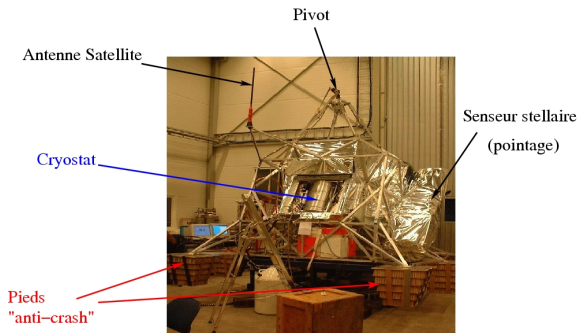
PI : A. Benoît (CRTBT Grenoble)

-  / 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!



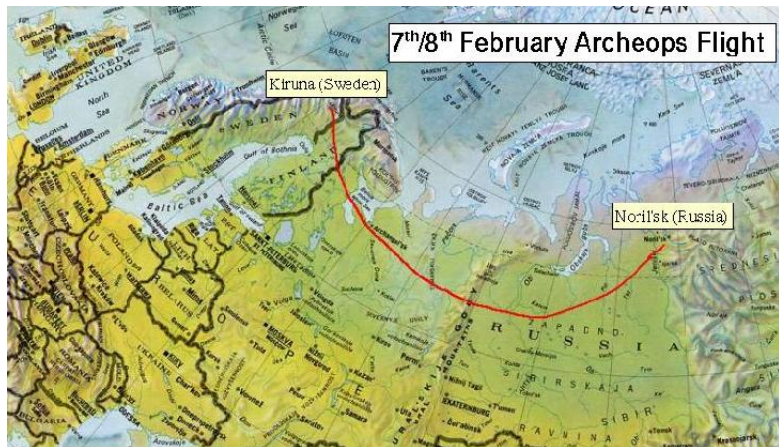
Quand tout est prêt ...



Le vol dépend :

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

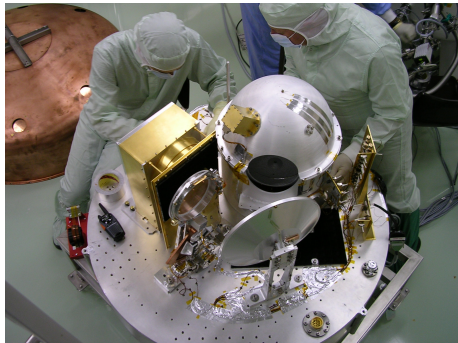
Vol du 7 février 2001



Récupérations



Etalonnage de Planck (EN COURS)



Etalonnage de Planck (EN COURS)

