

cosmologie avec Planck-HFI

O. Perdereau



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

conf. pour le Lycée St Sigisbert
LAL 18/04/2013

- 1 Introduction : la cosmologie
 - Généralités
 - Relativité Générale & Cosmologie (qq bases)
- 2 Le CMB
 - Anisotropies du CMB
 - Pourquoi des anisotropies ?
- 3 Planck-HFI
 - L'instrument haute fréquence (HFI)
- 4 Conclusions

LE DIFFICILE COMBAT DE JOHANNES KEPLER



Cosmologie ?

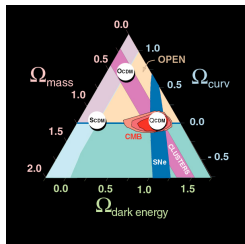
La cosmologie d'après www.francophonie.hachette-livre.fr

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."

Questions :

- Quel est l'age de l'univers ?
- Son passé ? son avenir ?
- De quoi est-il rempli ?
- Qu'est-ce qui fait la matière noire ? l'énergie noire ?
- \Rightarrow *modèle de concordance* dit "modèle du Big-Bang"

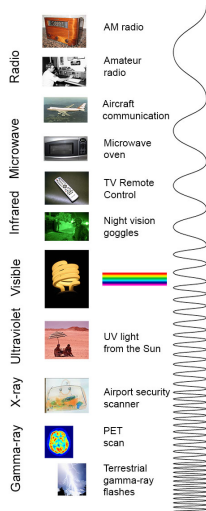
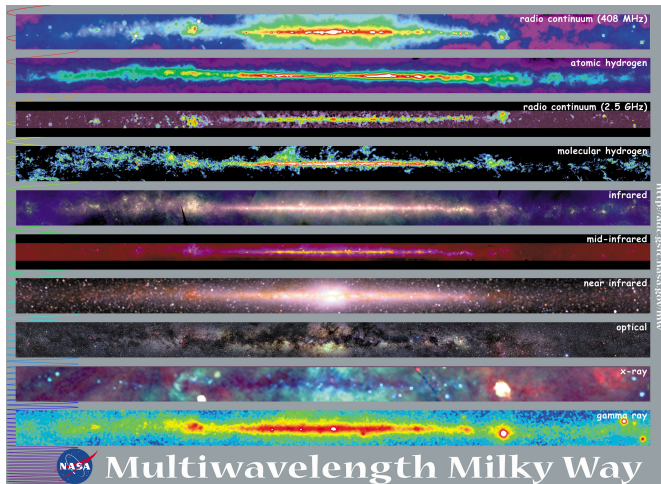


\sim 10 "paramètres cosmologiques" étudiés par des **techniques/observables complémentaires**

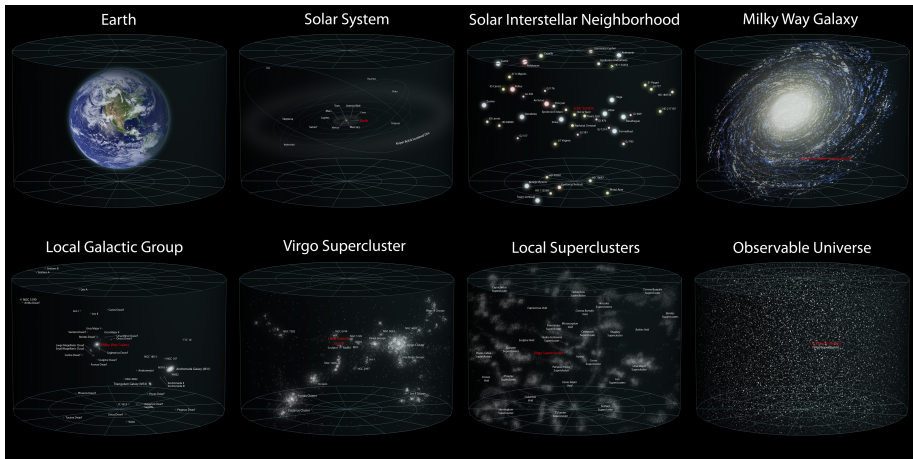
Notre messagère : la lumière

- Différentes longueurs d'onde \Rightarrow différentes sources (à des distances différentes)
- 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-al i.e. en 10^9 al
- 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

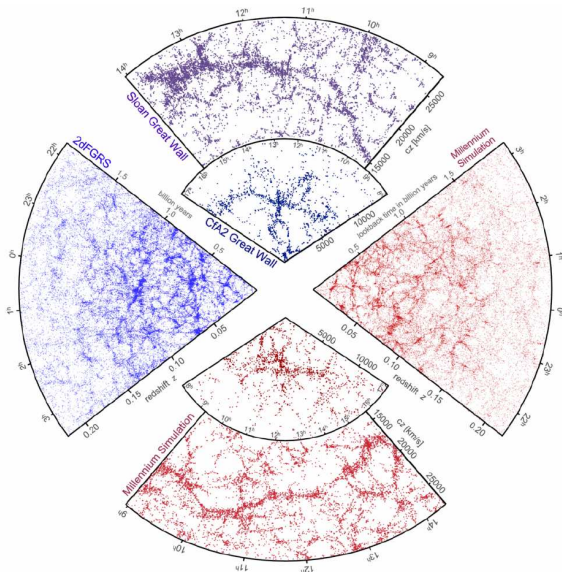


Univers à grande échelle



⇒ à grande échelle, l'uniformité et l'homogénéité semblent apparaître

Carte de l'univers (observation vs simulation)



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 (*vitesse* \propto *distance*)
 \Rightarrow *dilatation globale (d'échelle) de l'Univers*
- 2 Abondances primordiales des éléments légers
 - ▶ Helium, Deuterium (...) présents dans les objets les plus vieux ($\approx 20-25\%$ d'Helium)
 - ▶ \Rightarrow *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*

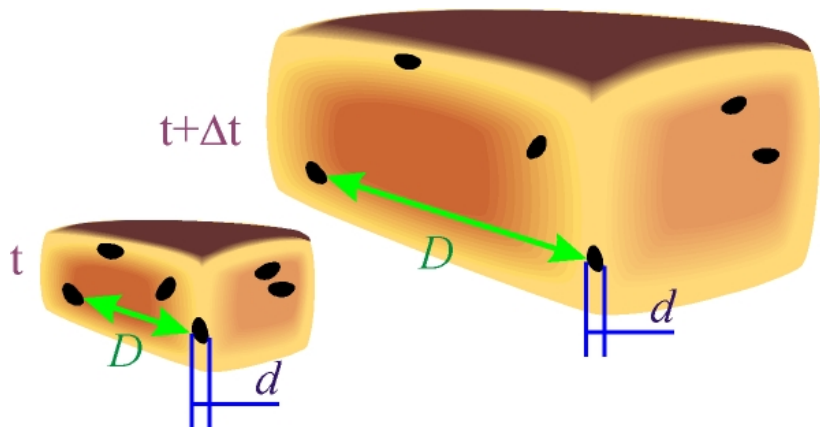
\Rightarrow Il y a eu une "explosion" ? ...

Le Big Bang

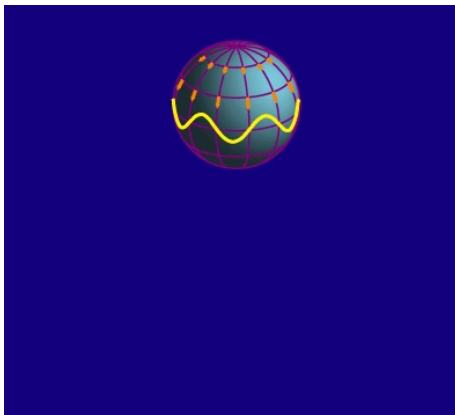


Quoi, c'est ça le Big-Bang? (S. Harris)

Une dilatation d'échelle



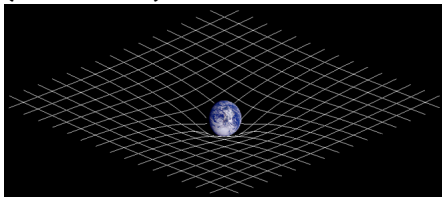
Une dilatation d'échelle (2D)



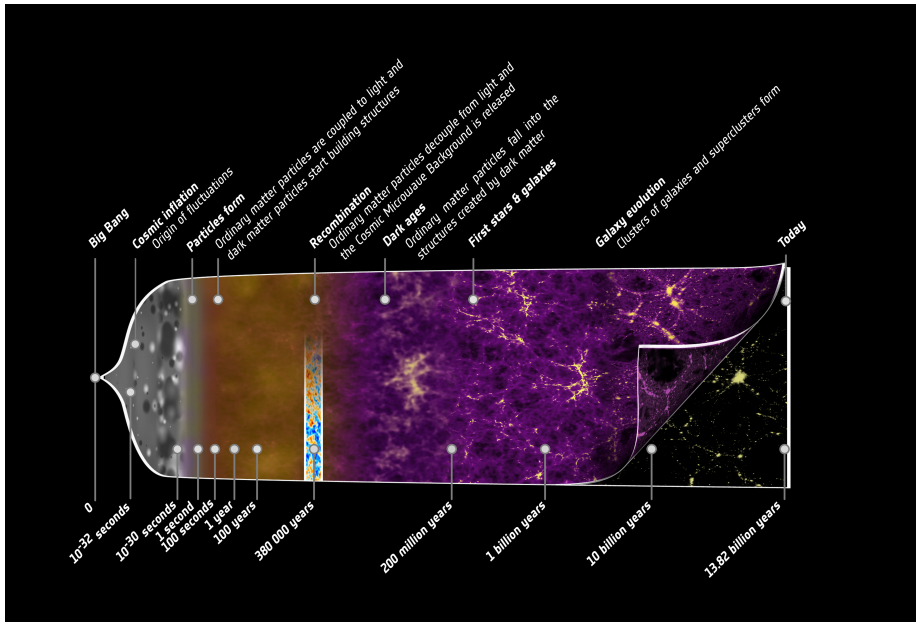
Cadre général

Eléments du modèle :

- 1 Univers homogène et isotrope
- 2 **Relativité générale** (Einstein ~ 1917) :
 - ▶ description **géométrique** de l'univers ("métrique")
 - ▶ équations (dites "d'Einstein") → structure+évolution (**Gravitation**)



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



Densité critique

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

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

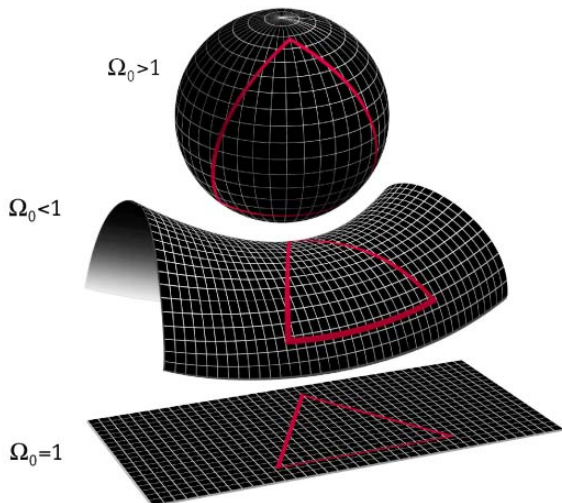
Un paramètre important (parmi ~ 10) : **densité totale** d'énergie

$$\Omega_0 = \frac{\rho_0}{\rho_{critique}}$$

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

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

Géométrie(s) de l'univers



MAP990006

- Prédiction : *G. Gamow* (1948)



- Découverte fortuite en 1965 (*Penzias & Wilson*)
manip "dédiée" en construction!

DISCOVERY OF COSMIC BACKGROUND



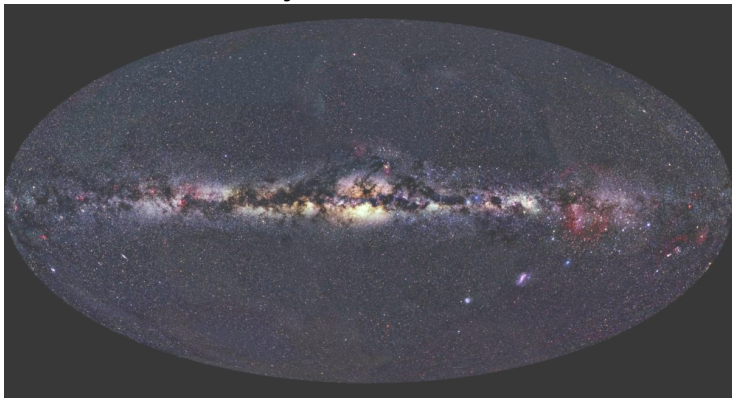
Microwave Receiver



Des anisotropies dans le CMB!

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

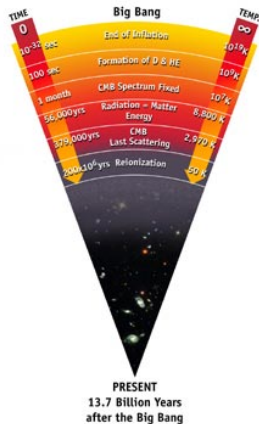
rouge \leftrightarrow chaud; bleu \leftrightarrow froid



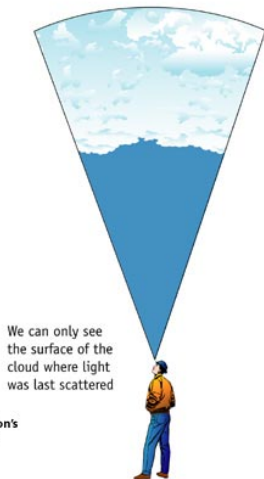
Le ciel nocturne (visible)

Emission du CMB

- 1 Univers primordial
($t < 300000$ ans,
 $T > 3000$ °K/2700° C)
électrons, protons (noyaux) et photons/rayonnement
 - ▶ T élevée \Rightarrow pas d'atomes
 - ▶ photons réfléchis ou absorbés : **Univers opaque**
- 2 Quand $T \approx 3000$ °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 $\rightarrow 2.7$ °K \Rightarrow CMB
dans l'infra-rouge lointain



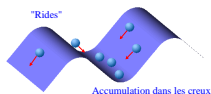
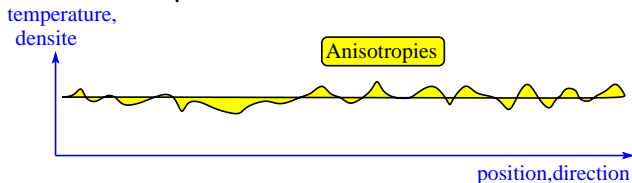
The cosmic microwave background Radiation's "surface of last scatter" is analogous to the light coming through the clouds to our eye on a cloudy day.



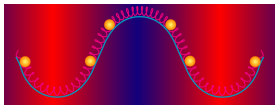
Le fond cosmologique = un fossile vivant!?

Des fluctuations aux anisotropies

- **Inflation** \Rightarrow anisotropies de densité

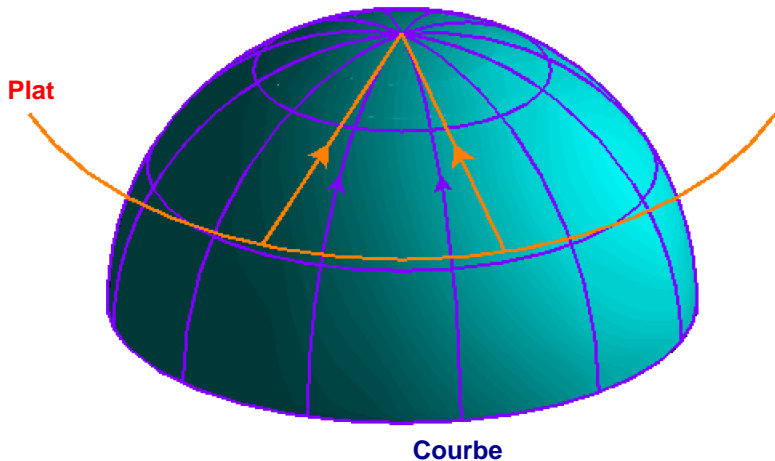


- "croissance" avec la gravitation \mapsto galaxies,...
- mais pendant ~ 300000 ans univers = plasma : protons (+ qq noyaux He,...), d'électrons ("libres") et de photons (rayonnement) \Rightarrow pression \Rightarrow oscillations (ondes acoustiques)



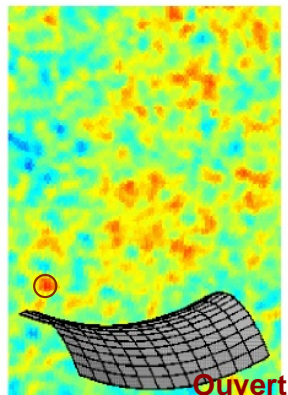
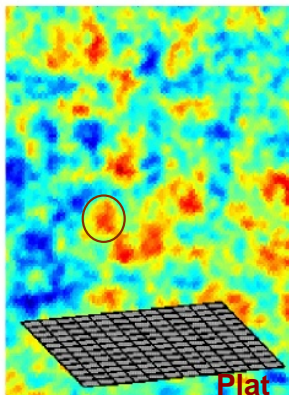
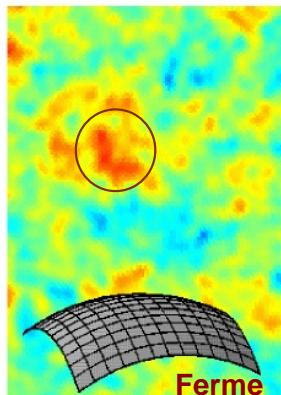
\Rightarrow **empreinte** dans la température du CMB

Propagation du CMB



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

Géométries et anisotropies



Cartes simulées : même surface du ciel ($\sim 100 \text{ deg}^2$) observée dans 3 géométries différentes

Une mesure de ... tout!?

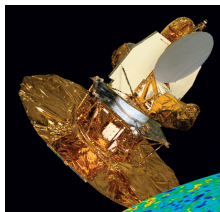
Les anisotropies du CMB combinent :

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

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

Aperçu expérimental

- COBE-DMR (1992) anisotropies (radio, espace)
- Boomerang, Maxima (1998, ballon + bolomètres) : 1eres mesures de Ω_0 avec le CMB
- Archéops (2002) (ballon + bolomètres)
- CBI, VSA, DASI (interférométrie radio, sol, 2000-2) : petites échelles
- WMAP 2003(-10) (radio, espace) Mesures de $\delta T/T$ jusqu'à 0.4-0.3 deg (0.2 ultimement)
- Boomerang-pol/B2k, MAXI-Pol (2000-3, bolomètres + ballon) : mesures des anisotropies de polarisation
- Planck 2007(-8) $\delta T/T \rightarrow \sim .1deg$
COBE $\times 1000$, WMAP $\times 10$, "cosmologie au pourcent"



Planck

Mission de l'ESA

Lancement : 15/04/2009

(avec Hershell)

Début du mode "survey"

13/08/2009

@ L2 (1.5Mkm de la Terre)

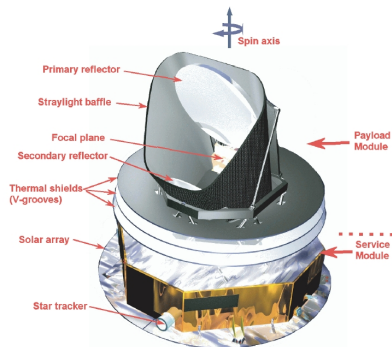
fin des observations (HFI) :

15/01/2012

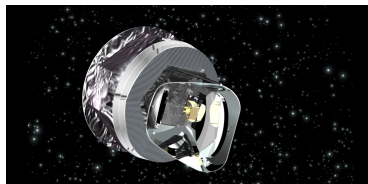
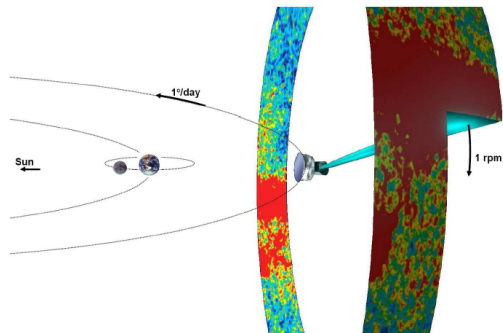
- 1 Telescope (1.5m) - consortium danois
- 2 LFI (HEMTs 30-70GHz, beam 10-25 arcmin) - consortium coordonné par U. Bologna
- 3 HFI (bolomètres 100-857 GHz, beam 10-5 arcmin) - consortium dirigé par l'IAS (PI J.L. Puget, IAS); instituts Ca, CH, Ge, Fr, Irl, It, NL, Sp, US, UK
concepts testé par Archéops

Coût : ~ 600Meuros

(HFI ~ 150Meuros)



Planck à L2

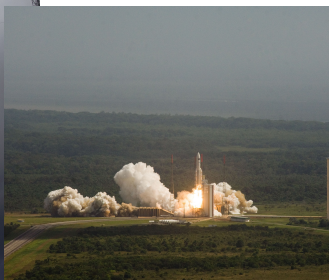


Observations en continu (7 mois → ciel complet)
Redondances à différentes époques (systématiques)

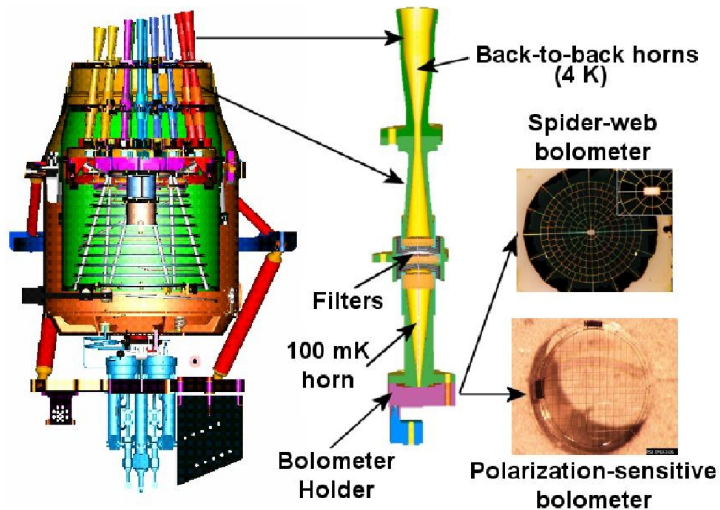
Calendrier de HFI

- 1992 : premières études (projet Samba)
- 1996 : selection de Cobra(LFI)/Samba(HFI) par l'ESA (mission M3)
- 1997 : Announcement for Opportunity par l'ESA pour les instruments de Planck
- 1999 : acceptation de LFI et HFI par l'ESA
- 11-2004 calibration du CQM de HFI à l'IAS
- 2005 tests cryo. du CQM de Planck au CSL (Liège, Bel.)
- 03/07-2006 calibrations du PFM à IAS
- 07/2008 : tests finaux de Planck (FM) au CSL (Liège, Bel.)
- 14 mai 2009 Lancement par une Ariane 5 (avec Herschell)
- 01/2012 : fin des observations (HFI), ~ 5 couvertures du ciel
- 21/03/2013 → premiers résultats cosmo!

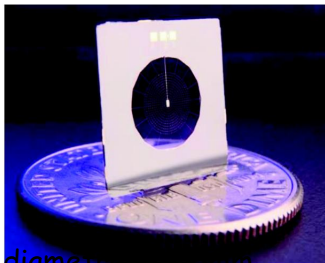
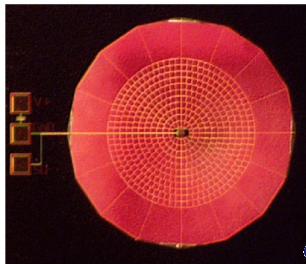
Jour J : le 14 Mai 2009 à Kourou



L'instrument haute fréquence (HFI)



Bolomètres



- diamètre $\sim 2.0\text{mm}$

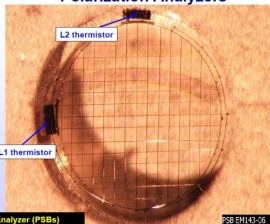
- "fils" $4 \times 1\mu\text{m}$ (Au)

- $T \sim 100\text{mK}$ (bon S/N) par un système à dilution $^3\text{He}/^4\text{He}$ (Institut Neel, Grenoble)

- fabrication : JPL/Caltech (USA)

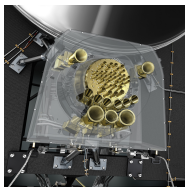
- existe aussi sous forme sensible à la polarisation (PSB)

Polarization Analyzers



Structure et tailles des données

- ~ 200 mesures du ciel par seconde et par détecteur, en continu pendant 30 mois
- un tour sur le ciel par minute (répété ~ 50 fois au même endroit)
- ~ 15 milliards "d'échantillons"
- Données brutes d'un détecteur (TOI)
 - ~ 50 Go ~ 10 DVD
 - (NB on a 52 détecteurs)
 - (NB2 souvent plusieurs versions !)
- A cela s'ajoutent des données "auxiliaires" : pointage, thermométrie,...
- Cartes du ciel ~ 50 Millions de pixels (\times 6 fréquences pour HFI + 3 LFI)
- (CMB) Spectres de puissance ~ 1000 valeurs
- ~ 10 Paramètres cosmologiques



Le problème de la reconstruction des cartes

Planck scanning (Survey 3)
2010-10-27

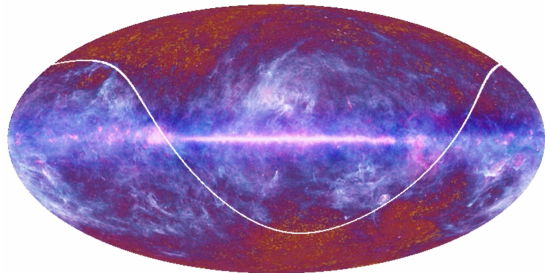


Image credit: ESA/Planck/C.North



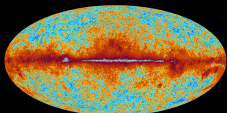
Les données de plusieurs détecteurs ($\sim 100\text{To}$) sont utilisées **simultanément** pour reconstruire les cartes
 \Rightarrow **calculateurs spécialisés** (massivement parallèles + disques rapides)

Les ciels de Planck

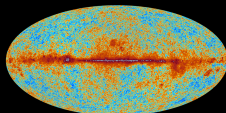


planck

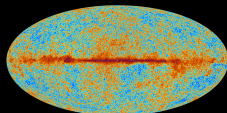
The sky as seen by Planck



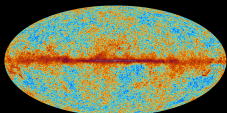
30 GHz



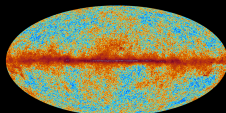
44 GHz



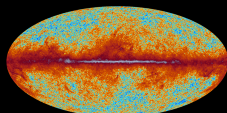
70 GHz



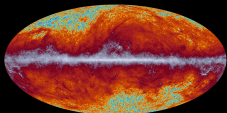
100 GHz



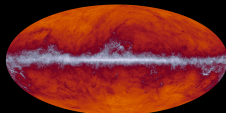
143 GHz



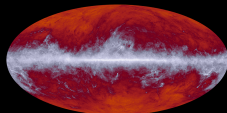
217 GHz



353 GHz

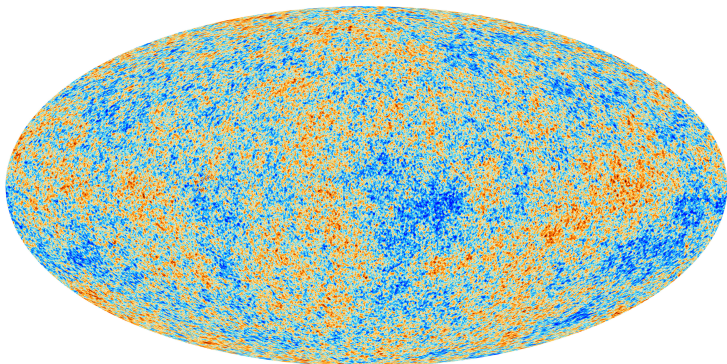


545 GHz

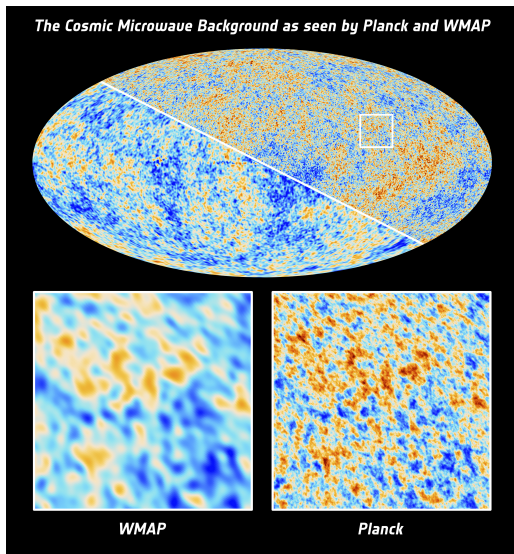


857 GHz

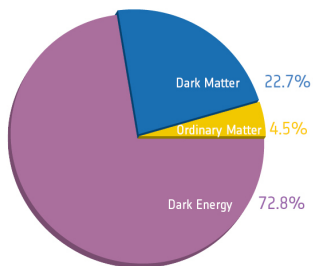
Extraction du CMB



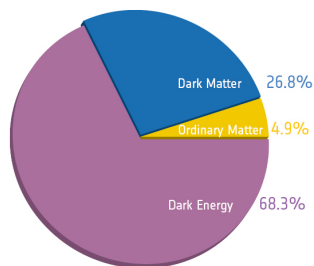
Un net progrès!



Composition(s) de l'Univers ...



Before Planck

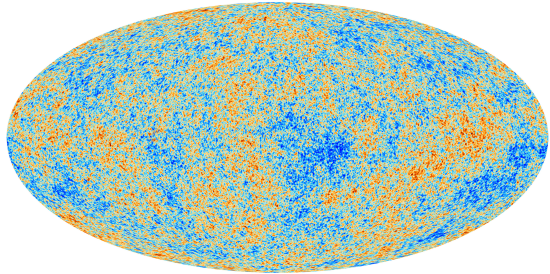
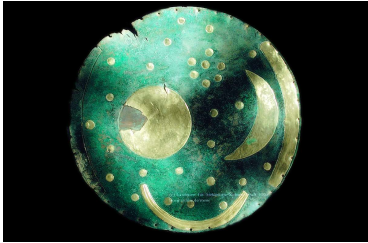


After Planck

beaucoup de noir : matière noire, énergie noire

Conclusions

- CMB : source d'informations **très riche** sur l'univers primordial (et + si affinités!)
- Planck apporte des **mesures "ultimes"** des spectres des anisotropies de températures et des modes E (polarisation)
- Lancement réussi!
- Opérations : très peu de surprises (cependant beaucoup de cosmiques)
- Premiers résultats "cosmo" en mars 2013 : **"le modèle est presque parfait!"**
- ... seconde fournée en cours de préparation pour 2014
- en savoir plus : www.planck.fr
- Mais encore beaucoup à comprendre (**matière noire? énergie noire?!**)



COSMOLOGY MARCHES ON

