

Les premiers résultats cosmologiques de Planck-HFI

O. Perdereau



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

conférence d'intérêt général
LAL 01/07/2013

- 1 Introduction : la cosmologie
 - Généralités
 - Modèle du Big-Bang (qq bases)
- 2 Le CMB
 - Anisotropies du CMB
- 3 Planck-HFI
 - L'instrument haute fréquence (HFI)
 - Planck-HFI au LAL
 - Résultats cosmologiques
- 4 Conclusions
 - Pourquoi des anisotropies?

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 :

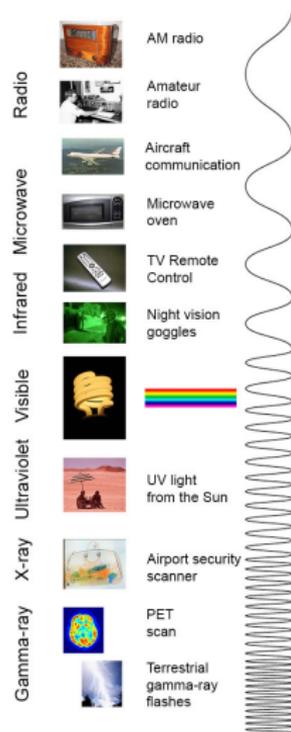
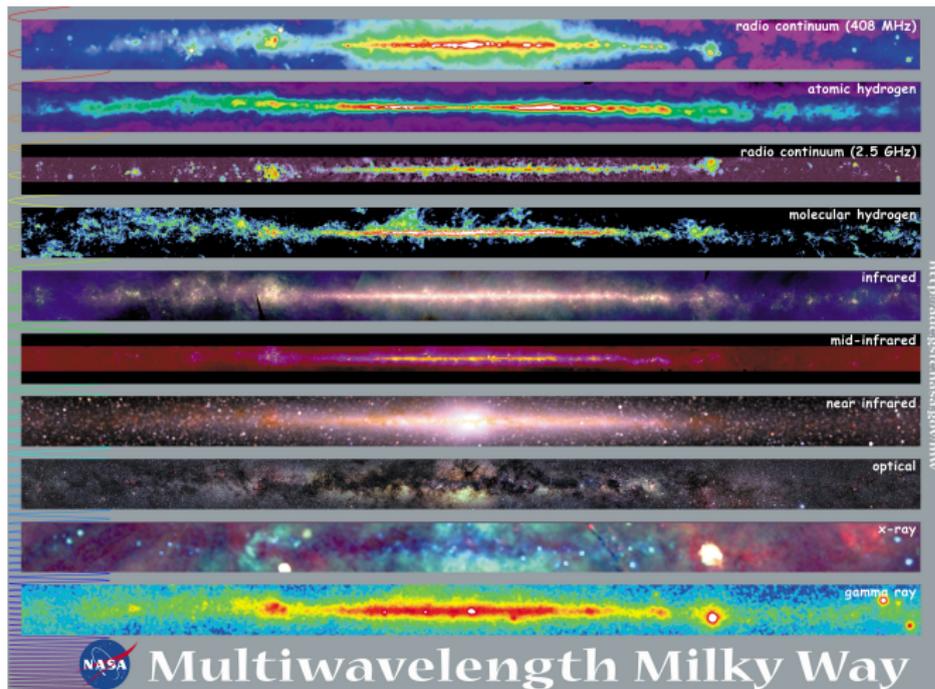
- Quel est l'age de l'univers ?
- Son passé ? son avenir ?
- De quoi est-il rempli ?
- Qu'est-ce qui fait la matière noire ?
l'énergie noire ?
- ⇒ *modèle de concordance* dit "modèle du Big-Bang"

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

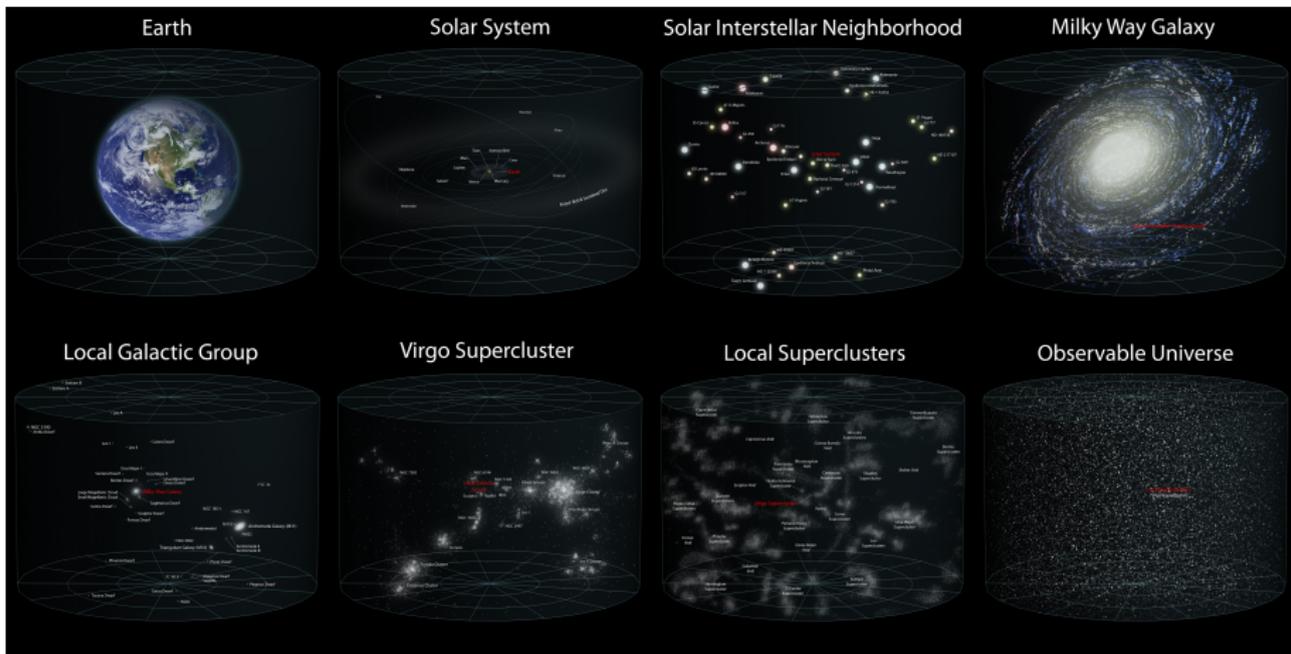
Notre messagère : la lumière

- 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
- si fréquence connue :
fréquence observée \Leftrightarrow vitesse (effet Doppler)

Différents visages de l'Univers



Univers à grande échelle



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

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 ($vitesse \propto distance$)
⇒ dilatation globale (d'échelle) de l'Univers
- 2 Abondances primordiales des éléments légers (p.ex. Helium)
 - ▶ présents dans les objets les plus vieux
 - ▶ ⇒ 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)
 - ▶ image de l'univers "jeune" (300000 ans)
 - ▶ signature d'un état dense, chaud et homogène

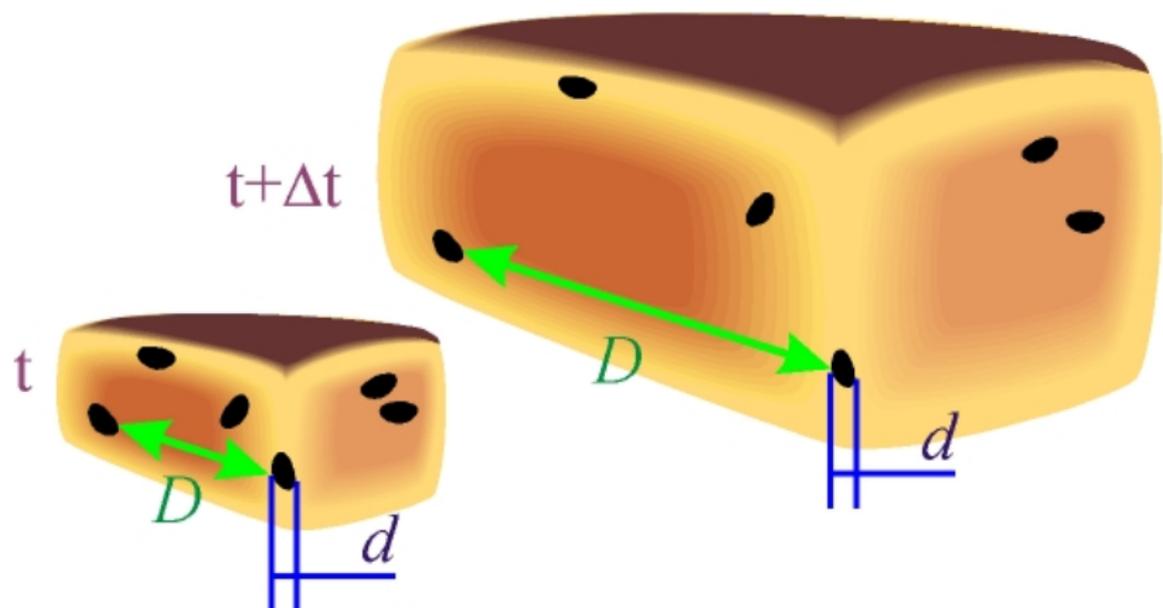
⇒ Il y a eu une "explosion" ? ...

Le Big Bang

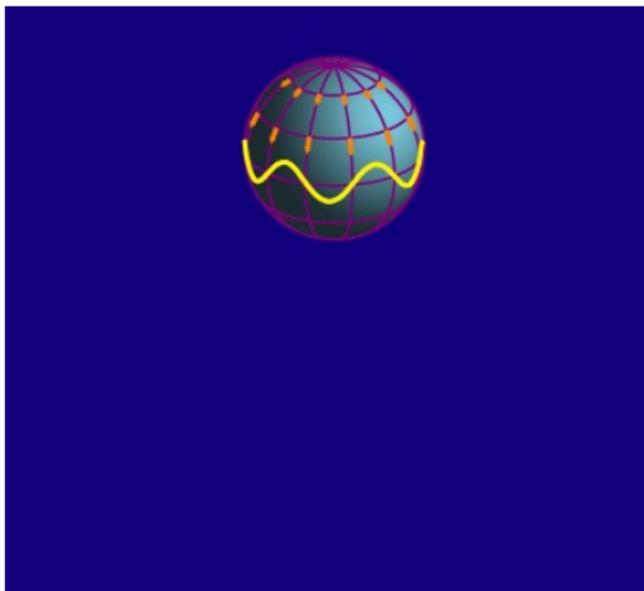


Quoi, c'est ça le Big-Bang? (S. Harris)

Une dilatation d'échelle



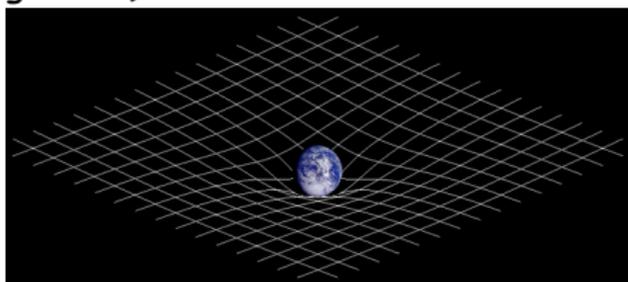
Une dilatation d'échelle (2D)



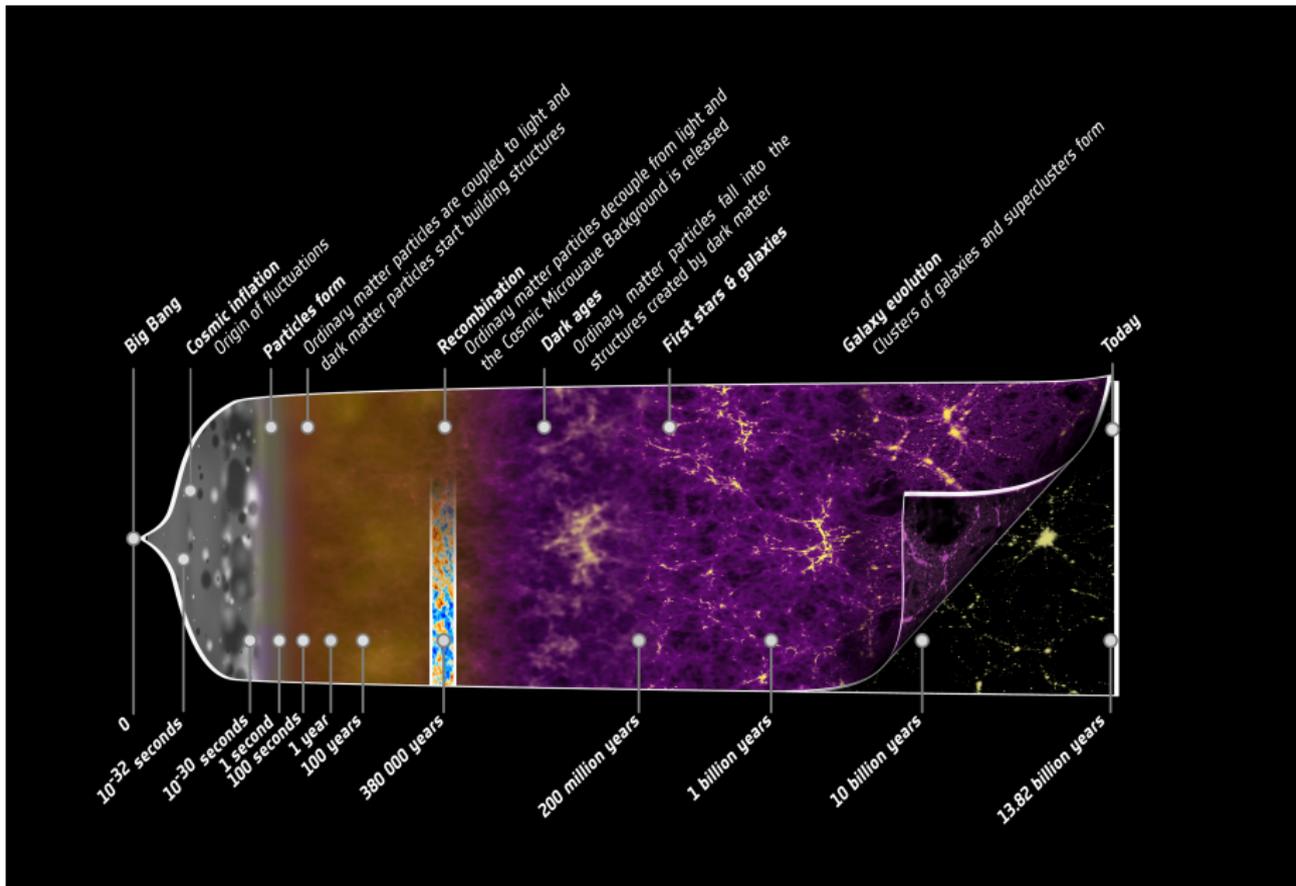
Cadre théorique

Eléments du modèle :

- 1 Univers homogène et isotrope
- 2 **Relativité générale** (Einstein ~ 1917) :
 - ▶ description de la **Gravitation** en termes de **géométrie** (locale ou globale)



- 3 **Thermodynamique & Mécanique quantique** (+Physique des Particules et Noyaux)



- 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!

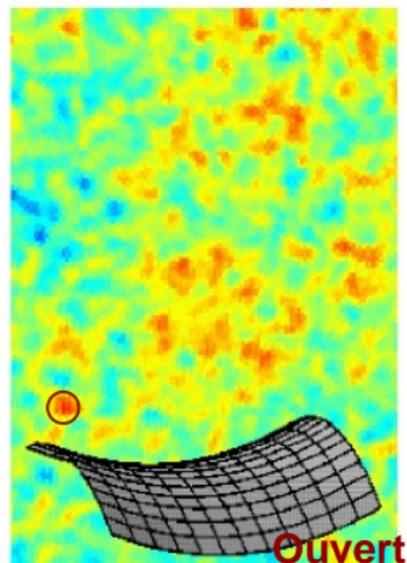
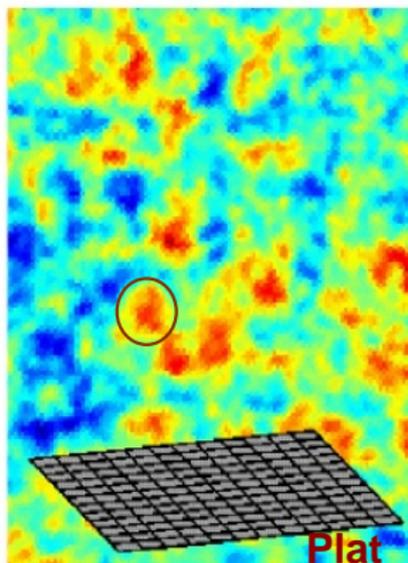
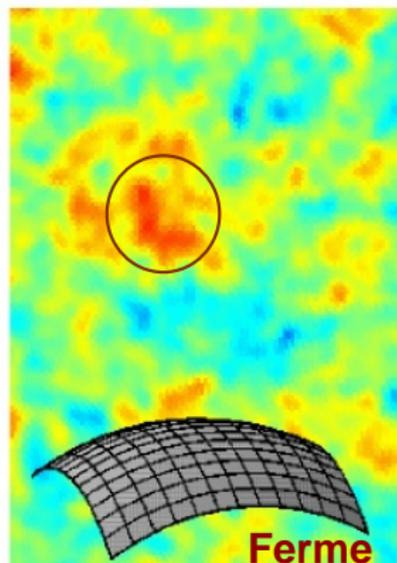
T_{CMB} dans chaque direction \rightarrow carte du "ciel" (couleur \leftrightarrow T)

rouge \leftrightarrow chaud; bleu \leftrightarrow froid



Le ciel nocturne (visible)

Sensibilité aux paramètres



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

Une mesure de ... tout!?

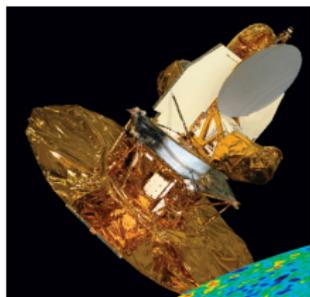
Les anisotropies du CMB combinent :

- 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 ~ 0.2 deg
- ACT/SPT (anisotropies à petites échelles), QUAD, QUIET, BICEP (vers la polarisation)
- **Planck 2013(-15) $\delta T/T \rightarrow \lesssim 0.07$ deg**
COBE $\times 1000$, WMAP $\times 10$, "cosmologie au pourcent"



Mission de l'ESA

Lancement : 15/04/2009

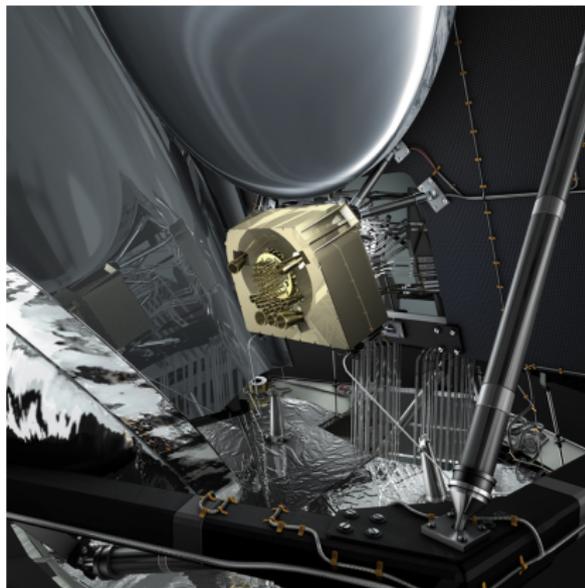
(avec Herschell)

@ L2 (1.5Mkm de la Terre)

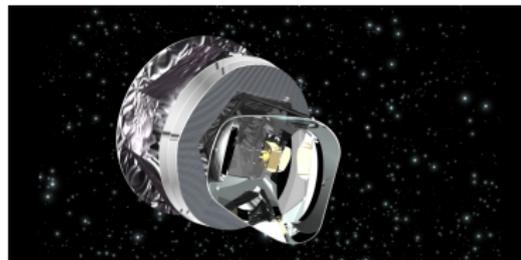
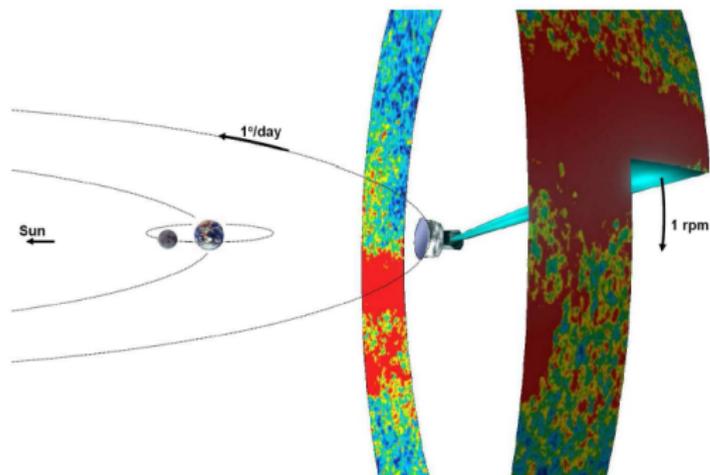
fin des observations (HFI) :
15/01/2012

- 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) 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)

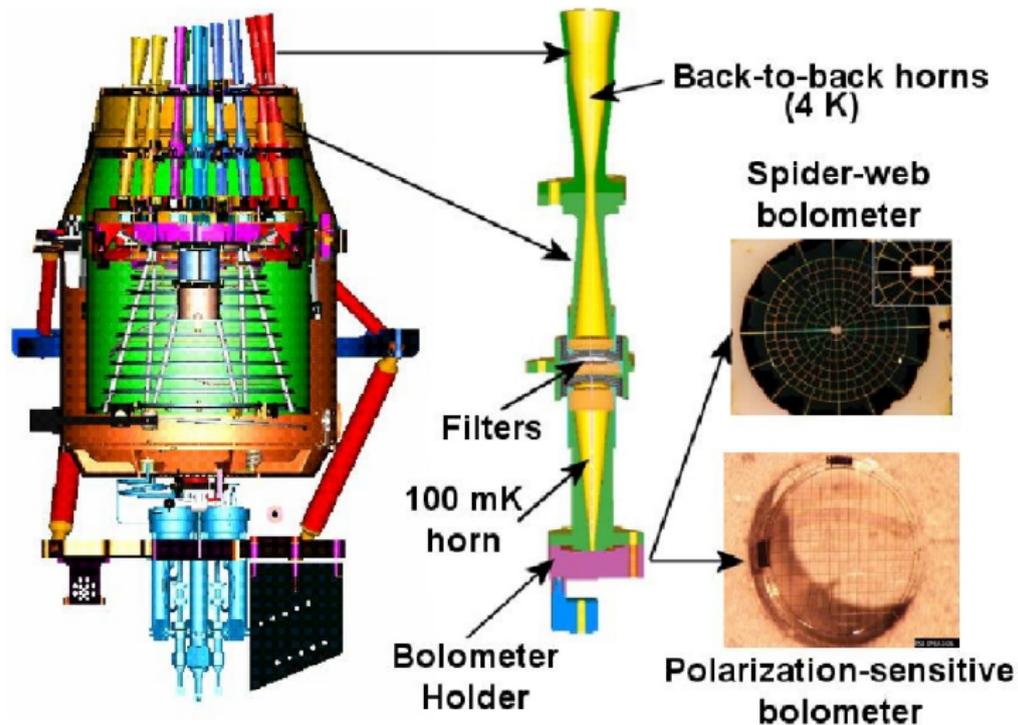


Planck à L2



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

L'instrument haute fréquence (HFI)

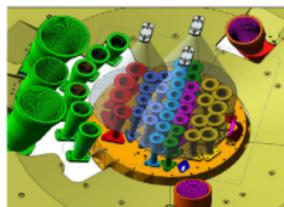
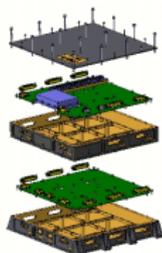


Calendrier de HFI

- 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!

Activités du LAL dans Planck

- Activité(s) commencée(s) en 1997
- Le DPU (contrôleur de bord de HFI) :
 - ▶ conception, construction, tests
 - ▶ suivi pendant les opérations (calibrations et vol)
 - ▶ **fonctionnement parfait**
- Etalonnages au sol (IAS, CSL) :
 - ▶ conception de nouvelles sources IR (fibres de C)
 - ▶ utilisation pour caractériser les bolomètres (temps de réponse, fuites optiques, polarisation, ...)



Activités du LAL dans Planck (suite)

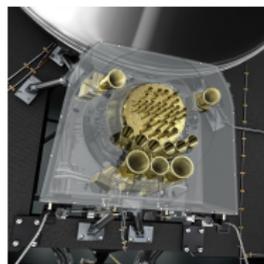
- Fabrication des cartes du ciel à partir des timelines (TOI) :
 - ▶ "entraînement" et développement avant le vol (simus),
 - ▶ adaptation aux données du vol, **fournitures régulières au consortium et à l'ESA (~ 6500 cartes/release)**
 - ▶ co-responsabilité de l'étalonnage photométrique des données
- expertises & responsabilités dans de nombreux **points clés de l'analyses** :
 - ▶ réponse des détecteurs
 - ▶ reconstruction et systématiques de la polarisation
 - ▶ spectres de puissances
- Physique :
 - ▶ **lensing du CMB**
 - ▶ **ajustement de paramètres cosmologiques**, en particulier m_ν et N_ν

Jour J : le 14 Mai 2009 à Kourou

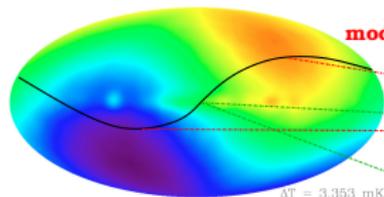


Structure et tailles des données

- ~ 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

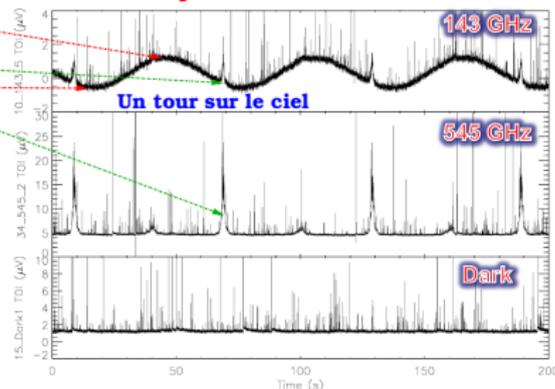


Nettoyage et caractérisation des données



modulation due au dipole du CMB

$\Delta T = 3.353$ mK

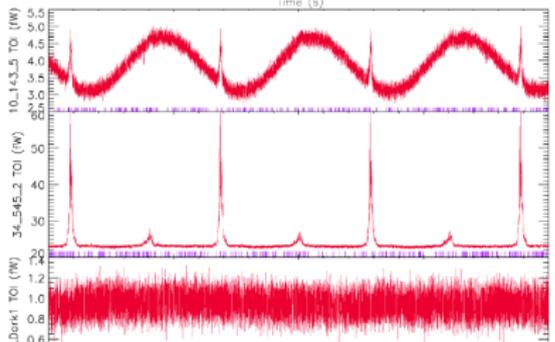


143 GHz

Un tour sur le ciel

545 GHz

Dark



Identification et élimination des parasites (rayons cosmiques)

Le problème de la reconstruction des cartes

Planck scanning (Survey 3)

2010-10-27

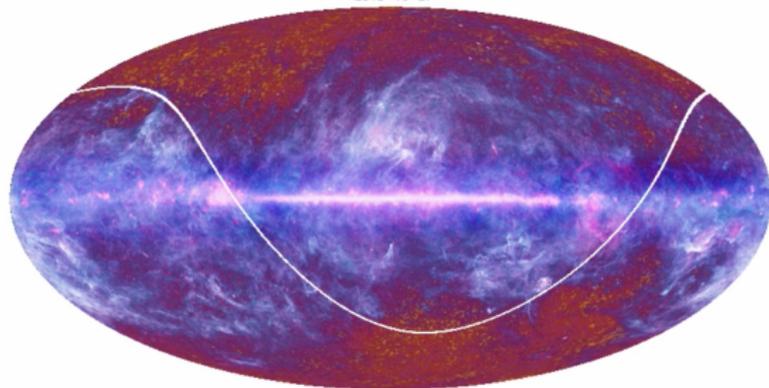


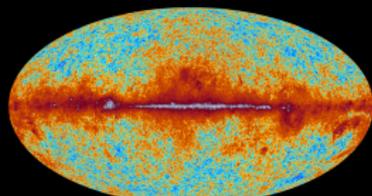
Image credit: ESA/Planck/C.North

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

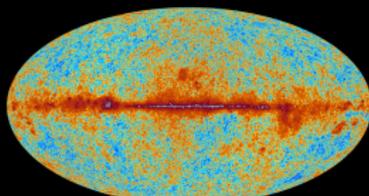


planck

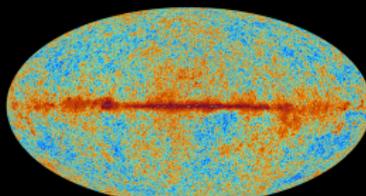
The sky as seen by Planck



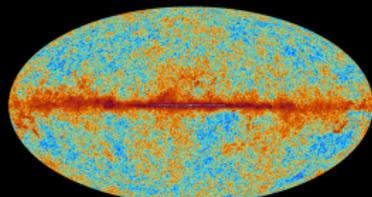
30 GHz



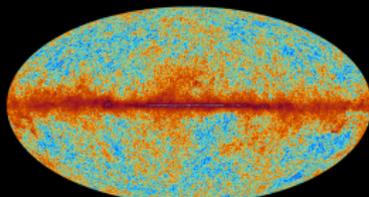
44 GHz



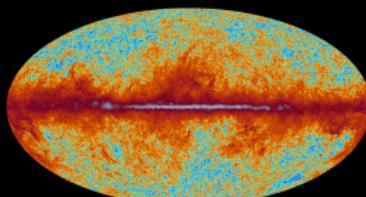
70 GHz



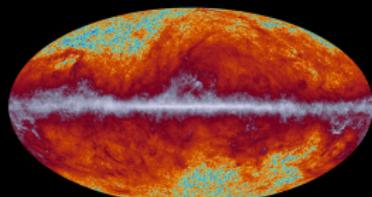
100 GHz



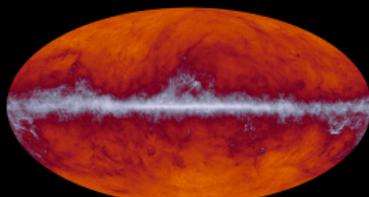
143 GHz



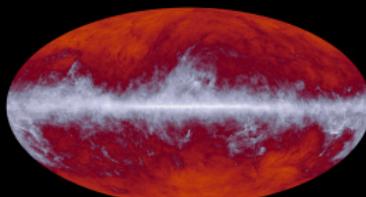
217 GHz



353 GHz



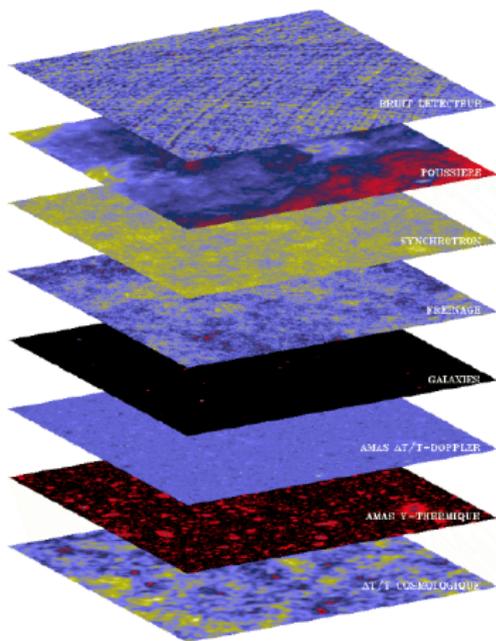
545 GHz



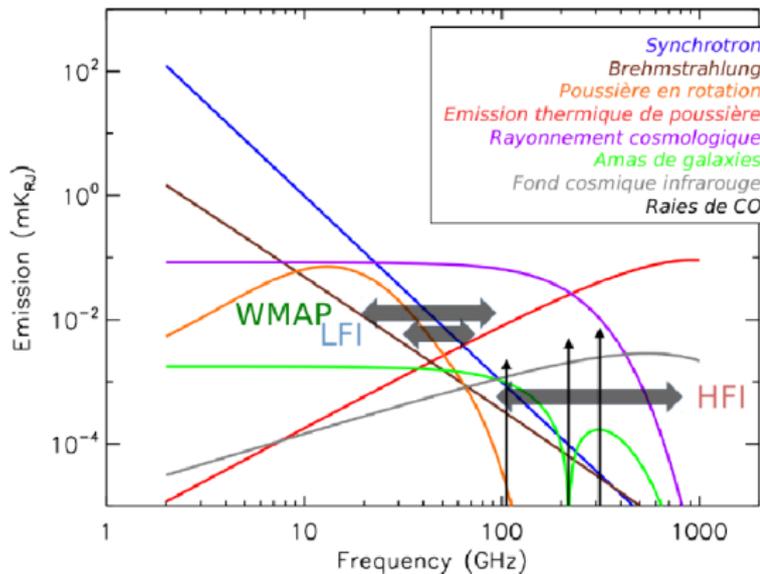
857 GHz



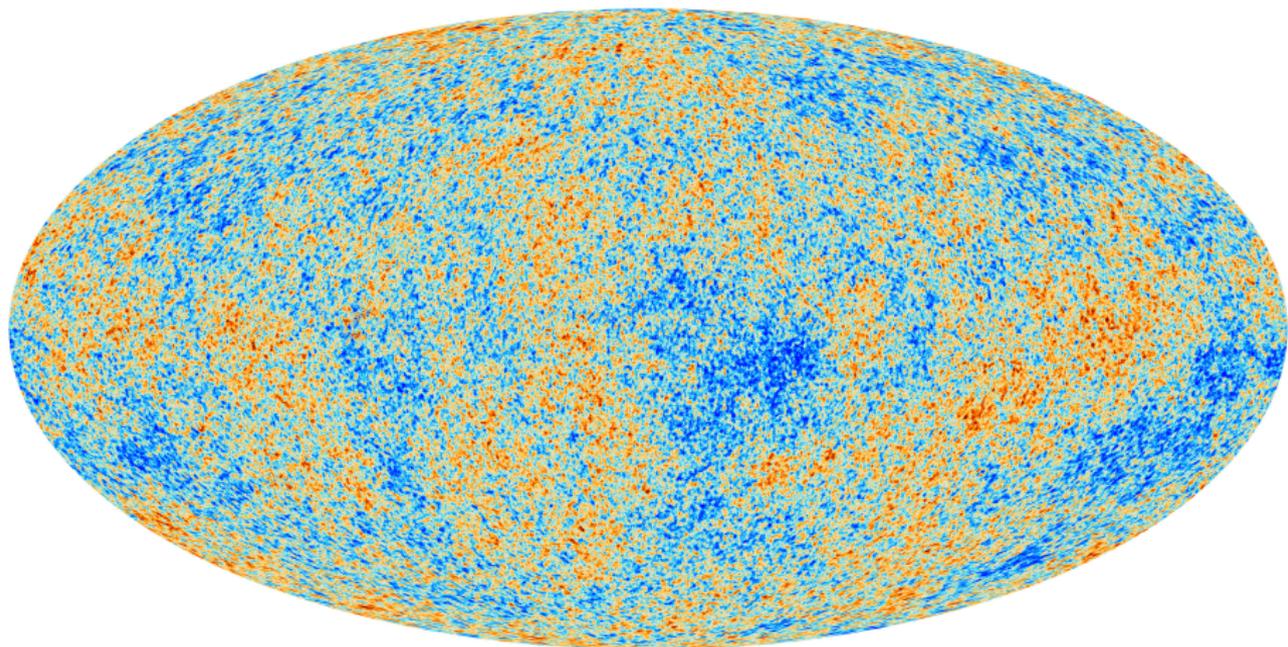
Différentes composantes



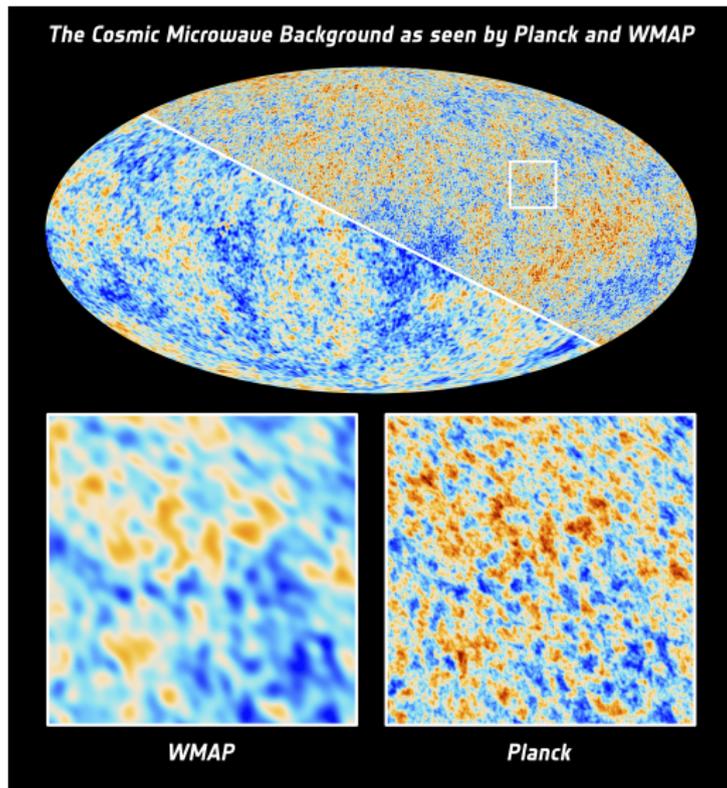
F.R. DOUCET & R. DESPERET 1996



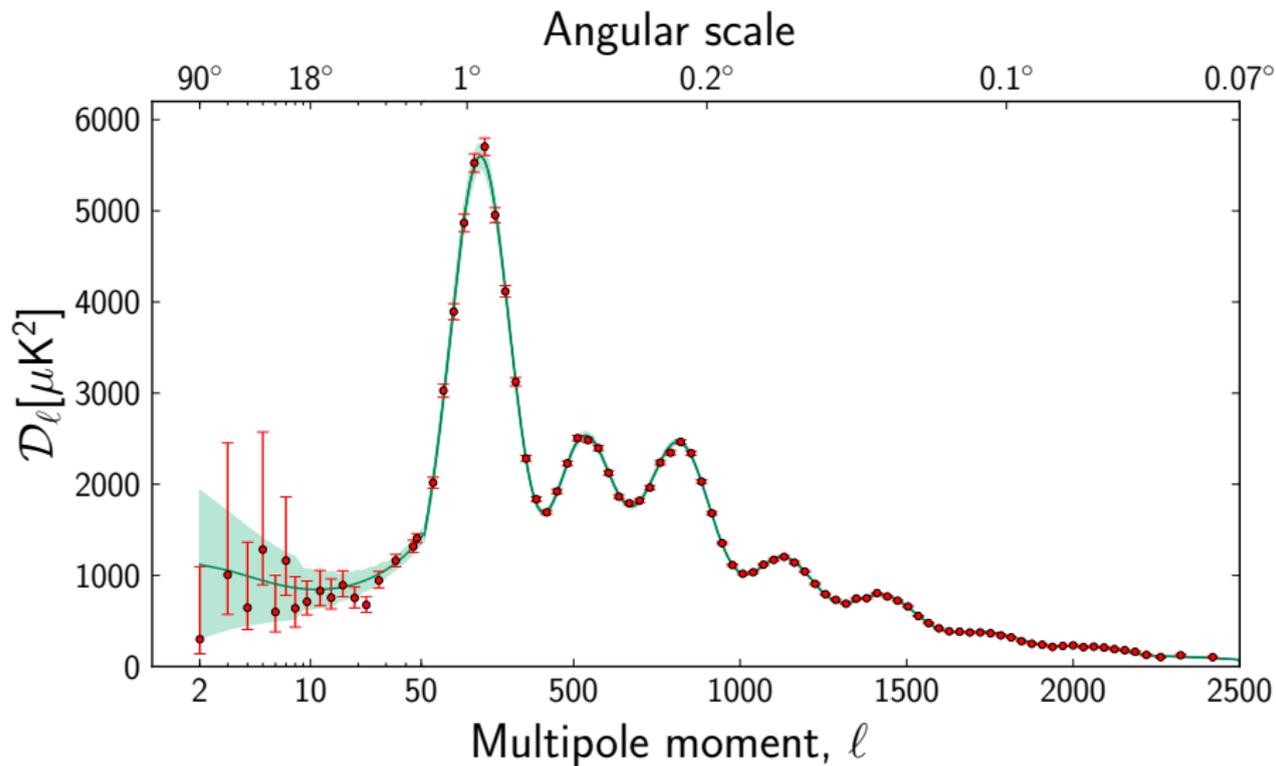
Carte du CMB



Un net progrès!

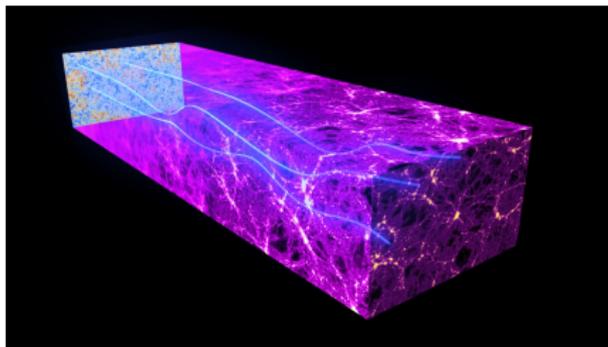


le spectres des C_ℓ

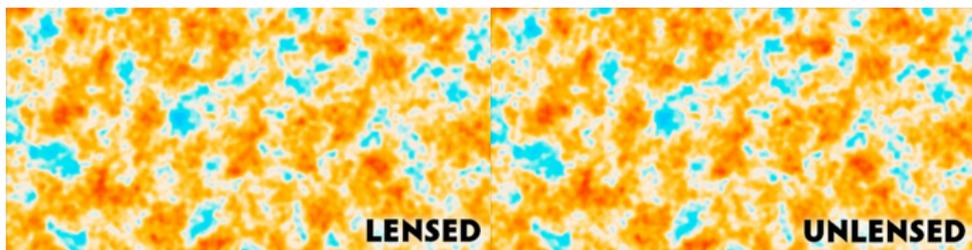


Lensing du CMB par les grandes structures (LSS)

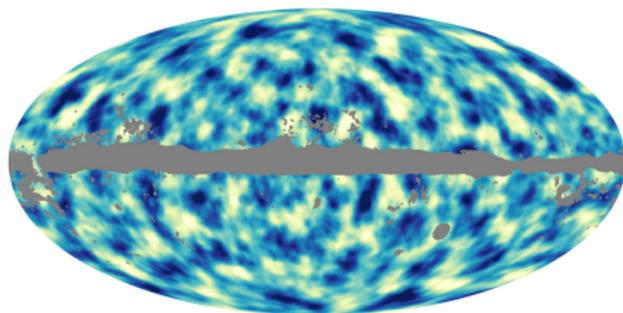
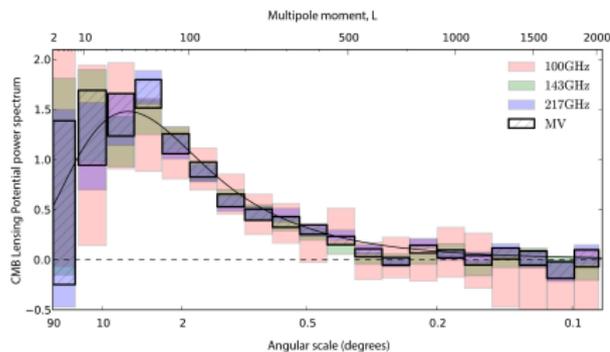
Déviations du parcours des γ par les LSS (RG)



→ small "smearing" of the C_ℓ spectra + distortion of the CMB image



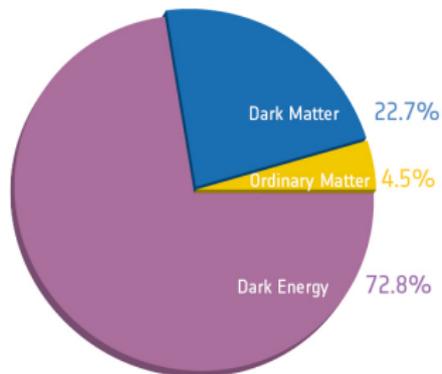
Cartographies des Grandes structures



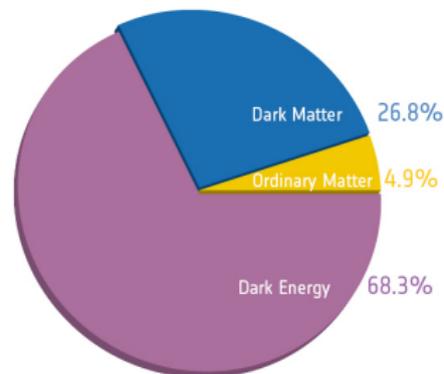
Analyse statistique des anisotropies du CMB \Rightarrow spectre de puissance du "champ de déflexion"

intégré au fit des paramètres cosmologiques avec les C_ℓ

Composition(s) de l'Univers



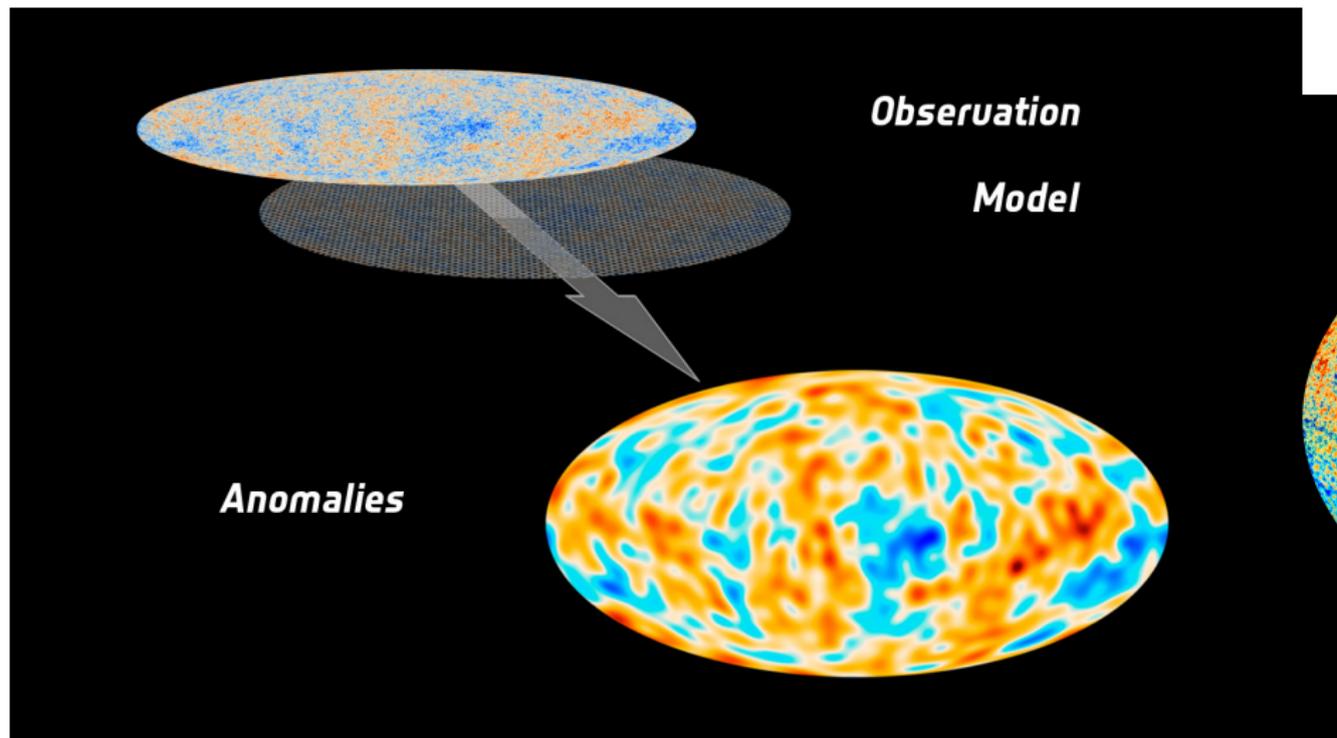
Before Planck



After Planck

mesures (plus) précises mais beaucoup d'inconnu(es) : matière noire, énergie noire

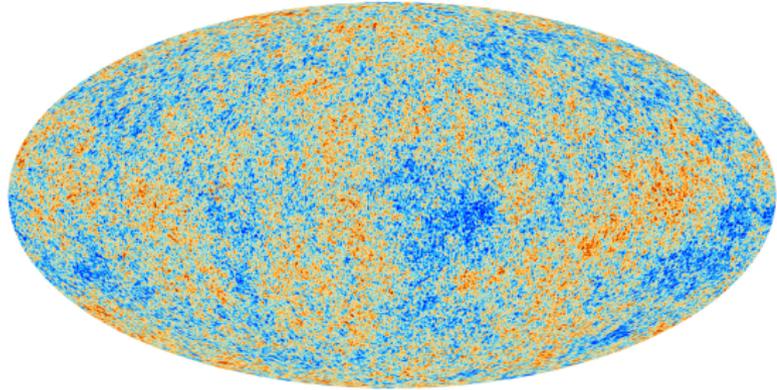
Quelques anomalies ?



NB : Signification statistique limitée & pas de modèle clair

Conclusions

- CMB : source d'informations **très riche** sur l'univers primordial (et +!)
- Planck apporte des **mesures "ultimes"** des spectres des anisotropies de températures
- Premiers résultats "cosmo" en mars 2013 :
 - ▶ **"le modèle est presque parfait!"**
 - ▶ meilleures précisions + qq différences avec les observations précédentes (e.g. WMAP, discussions en cours)
- ... seconde fournée en cours de préparation pour juin 2014 (polarisation)
- en savoir plus : www.planck.fr
- Encore beaucoup à comprendre (**matière noire? énergie noire?!**)



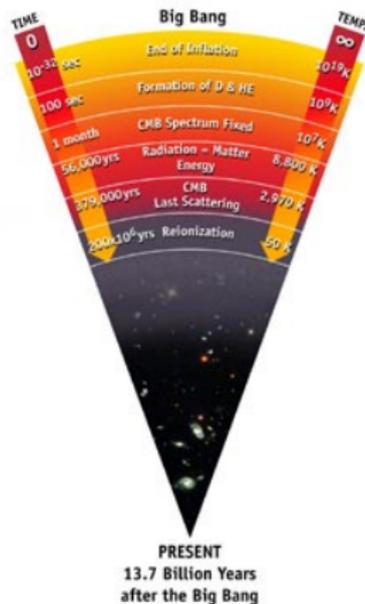
COSMOLOGY MARCHES ON



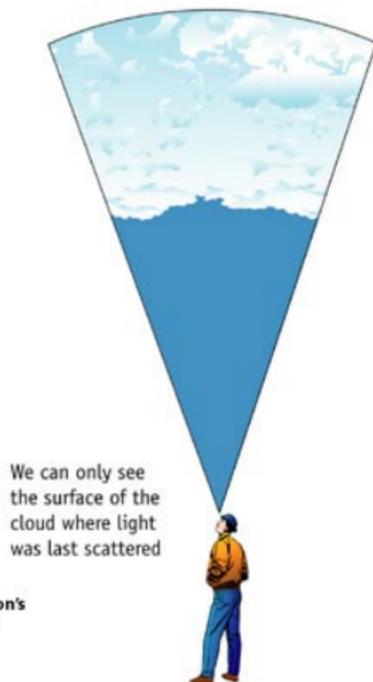
Back-ups

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



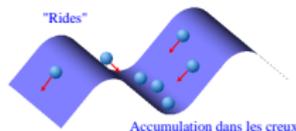
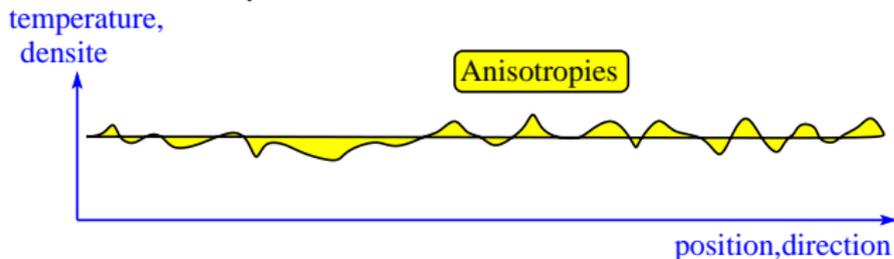
The cosmic microwave background Radiation's "surface of last scatter" is analogous to the light coming through the clouds to our eye on a cloudy day.



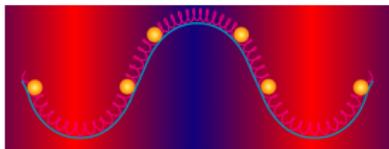
Le fond cosmologique = un fossile vivant!?

Des fluctuations aux anisotropies

- **Inflation** \Rightarrow anisotropies de densité

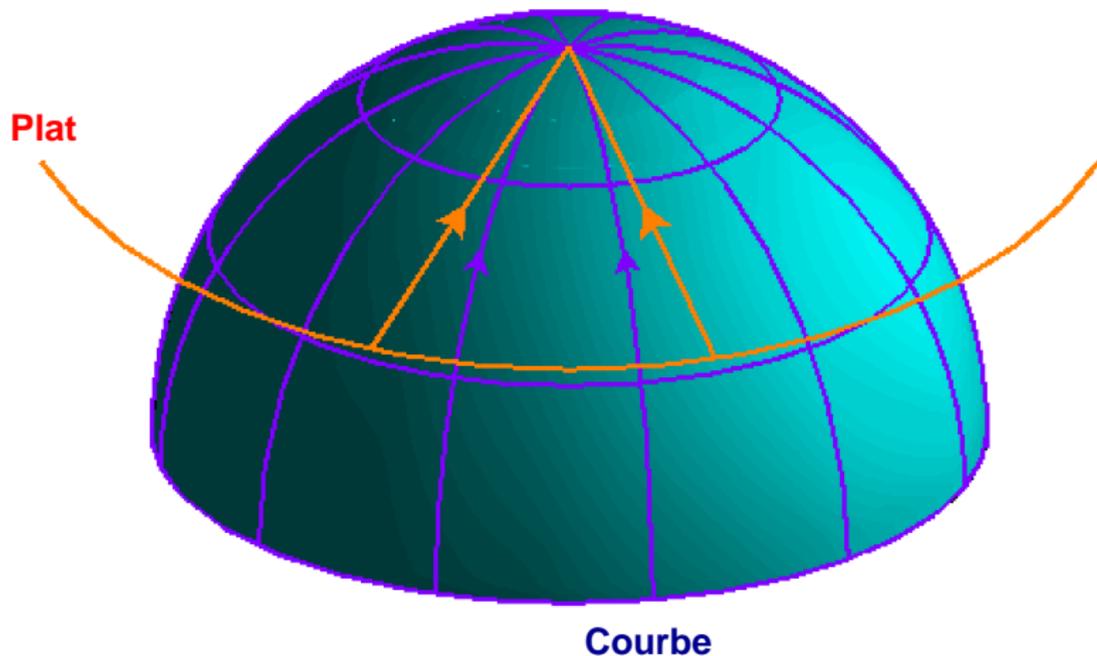


- "croissance" avec la gravitation \mapsto galaxies,...
- mais pendant ~ 300000 ans univers = plasma : protons (+ qq noyaux He,...), d'électrons ("libres") et de photons (rayonnement) \Rightarrow pression \Rightarrow oscillations (ondes acoustiques)



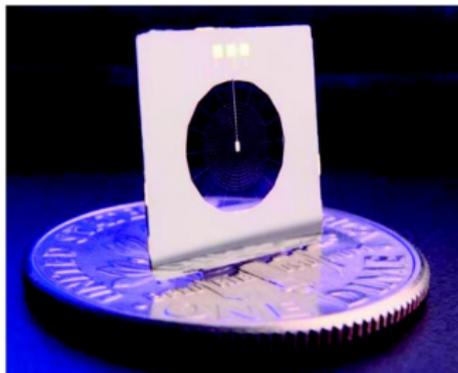
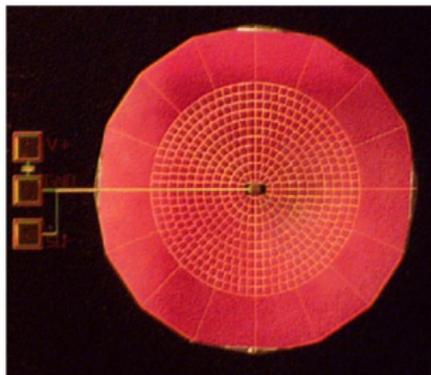
\Rightarrow **empreinte** dans la température du CMB

Propagation du CMB

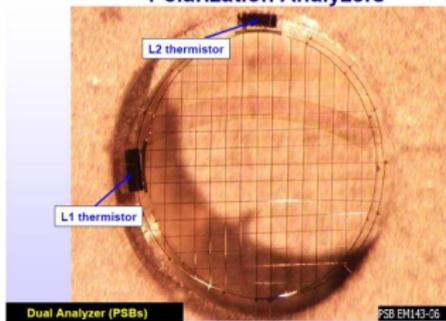


La taille (apparente) angulaire des anisotropies est modulée par la géométrie de l'Univers

Bolomètres



Polarization Analyzers



- diamètre $\sim 2.6\text{mm}$
- "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)

Densité critique

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

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

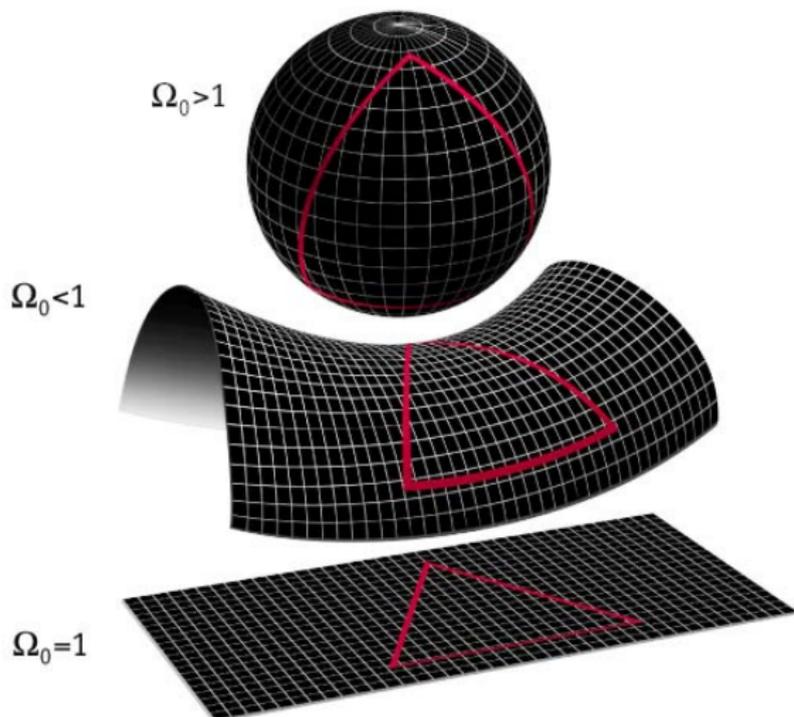
Un paramètre important (parmi ~ 10) : **densité totale** d'énergie

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

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

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

Géométrie(s) de l'univers



MAP990006