

Contraindre la masse des neutrinos avec Planck

Stéphane Plaszczynski, LAL

3 avril 2009

Plan

1. les neutrinos aujourd'hui (physique des particules)
2. les neutrinos en cosmologie
3. Planck
4. Mesure de l'effet de lentille gravitationnel du CMB

Les neutrinos aujourd'hui

"Halzen Martin : since neutrinos have no mass..."

Oscillations !

1. solaires : Chlorine (1968), (Super)K, SNO, Borexino...
2. atmosphériques : K, super-K
3. réacteurs : CHOOZ, KamLand
4. accélérateurs : K2K, MINOS, OPERA et LSND, Karmen, Mini-Boone

Fit global (*Maltoni, 2008*) :

$$\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2 = (7.67 \pm 0.22) 10^{-5} \text{ eV}^2$$
$$|\Delta m_{31}^2| = |m_3^2 - m_1^2| = (2.40 \pm 0.15) 10^{-3} \text{ eV}^2$$



Des neutrinos massifs : et alors ?

MS en péril ?

- ▶ Base : **invariance de jauge** $SU(2)_L \times U(1)_Y$.
- ▶ mécanisme de Higgs donne une masse aux bosons + fermions (Yukawa) : quel champs de Higgs ?
brisure : $SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{e.m} \implies m_\gamma = 0$

$$\begin{array}{l}
 \text{quarks :} \\
 \text{leptons :}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \\
 \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 u_R \\
 e_R
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 d_R \\
 \cancel{\nu_R}
 \end{array}$$

NB : on *défini* Y par : $Q = I_3 + Y/2$

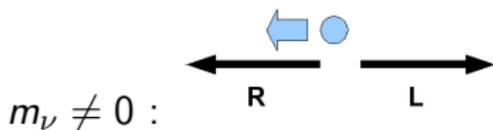


$$m_\nu = 0?$$

Dirac :

ν couplé que par l'interaction faible : ν_L

$$\cancel{\psi_R} \implies m_\nu = 0$$



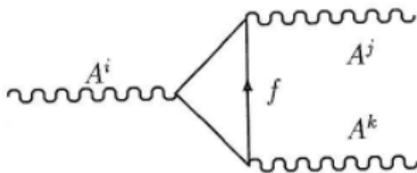
$$\nu_R = \nu_L = (\nu_R)^c ???$$

Majorana :

$$\chi = \frac{1}{\sqrt{2}}(\nu_L + (\nu_L)^c) \rightarrow \chi = \chi^c$$

Plus de conservation du nombre leptonique, mais terme de masse.

$$m_\nu \neq 0$$



Élimination des anomalies triangulaires (non prédites par MS)

$$\implies Q = I_3 + Y/2$$

- ▶ perdu si ν_R (Dirac)
- ▶ restauré si Majorana !

MS facilement extensible (Higgs, leptons) :

MS + Majorana : plus "naturel" qu'avant

(suite à LHC, $2\beta\dots$)



Mesurer la masses des neutrinos

1. oscillations : Δm_i^2 + angles + phases matrice mélange leptonique
2. **direct** β : $m_\beta = \left(\sum_i |U_{ei}|^2 m_i^2 \right)^{1/2} \leq 2.2 \text{ eV}$
3. **indirecte** cosmologie : $m_\Sigma = \sum_i m_i$

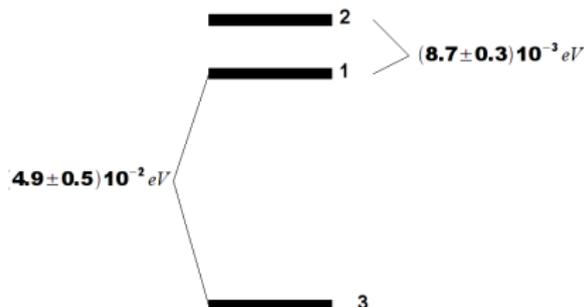


Mesures directes

à partir de $\Delta m_{21}^2 + |\Delta m_{31}^2|$:
Hierarchie Normale



Hierarchie Inverse



1. pas d'échelle absolue
2. différences très faibles

β +oscillations : $0.05 \lesssim m_{\Sigma} \lesssim 6 \text{ eV}$



Neutrinos en cosmologie

Cosmologie : existe-t-il un Modèle Standard ?

1. Base : **principe cosmologique** (max symmétrie 3D)

$$ds^2 = dt^2 - a(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 - \sin^2\theta d\phi^2) \right] \quad k = 0, +1, -1$$

2. Évolution (GR) :

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

3. Tenseur énergie-impulsion (fluide) :

$$T_{\mu\nu} = -p g_{\mu\nu} + (p + \rho) u_\mu u_\nu$$

$$\text{équation d'état : } p = w\rho$$

⇒ Friedman-Lemaitre

$$\frac{k}{a_0^2} = H_0^2 \underbrace{(\Omega_{tot} - 1)}_{\Omega_k}$$

$$\Omega = \frac{\rho_{tot}}{\rho_c} + \frac{\Lambda}{3H_0^2}$$



Quelle énergie dans l'univers ?

1. **radiation** : $w = \frac{1}{3}$
2. **matière** : $w = 0$
3. **"énergie du vide"** : $w \leq 0$ ($w_\Lambda = -1$)

Observations directes :

- ▶ expansion : $H_0 = 72 \pm 8(?) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
- ▶ photons (CMB) : $T_0 = 2.725 \text{ K} \implies \Omega_\gamma \simeq 5 \cdot 10^{-5}$ corps noir
 $T(t) = T_0 \frac{a_0}{a(t)} \implies$ univers chaud dans le passé.
- ▶ matière visible $\Omega_{vis} \simeq 0.003$

si il n'y avait que ça $\Omega_{tot} \ll 1$



Concordance...

1. Nucléosynthèse prim.

$$\eta = \frac{n_b}{n_\gamma} \rightarrow \Omega_b \simeq 10\Omega_{vis}$$

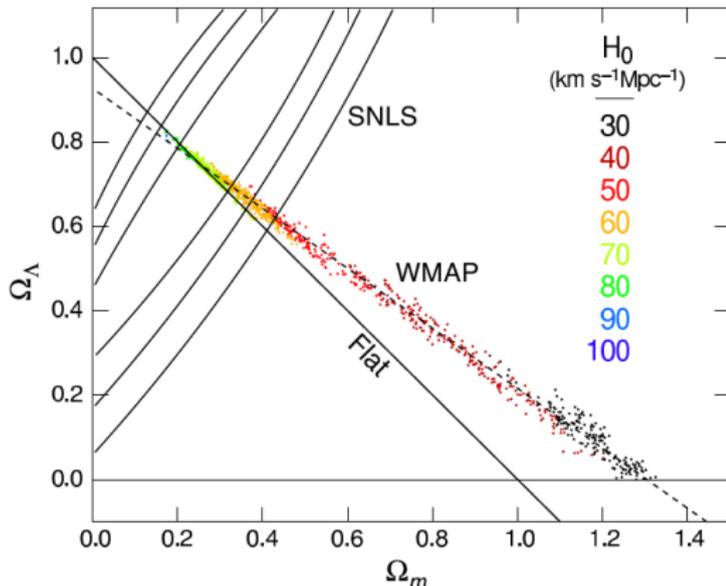
2. Grandes structures

$$\rightarrow \Omega_m \simeq 0.30$$

3. SN1a :

$$q_0 \propto \Omega_m + (1 + 3w_\Lambda)\Omega_\Lambda$$

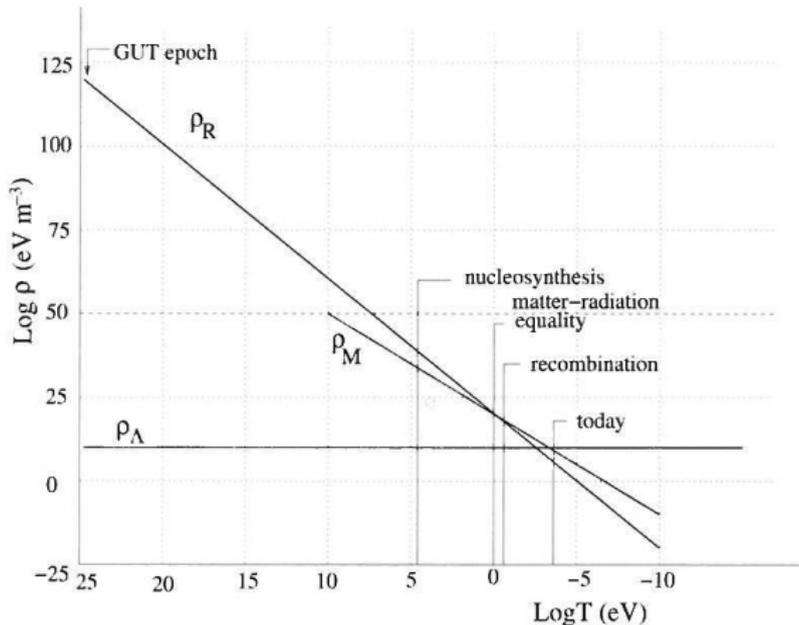
4. CMB : $\Omega_m + \Omega_\Lambda$



$$\Omega_\gamma \simeq 10^{-5}, \Omega_b \simeq 4\%, \Omega_M \simeq 26\%, \Omega_\Lambda \simeq 70\%$$



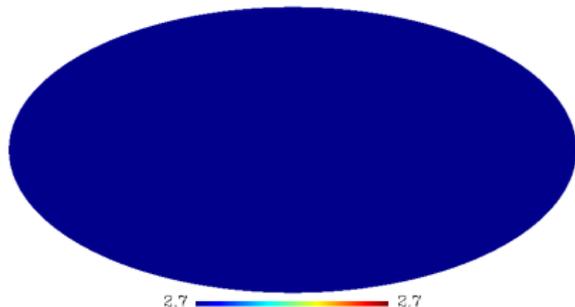
Evolution du fond cosmologique



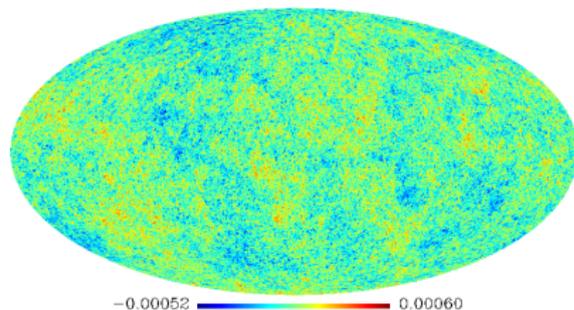
problème cosmologique...

quintessence ? anti-gravité ? abandonner p.c ? MOND ?

CMB (de loin)



horizon causal $\theta_H \simeq 1^\circ$

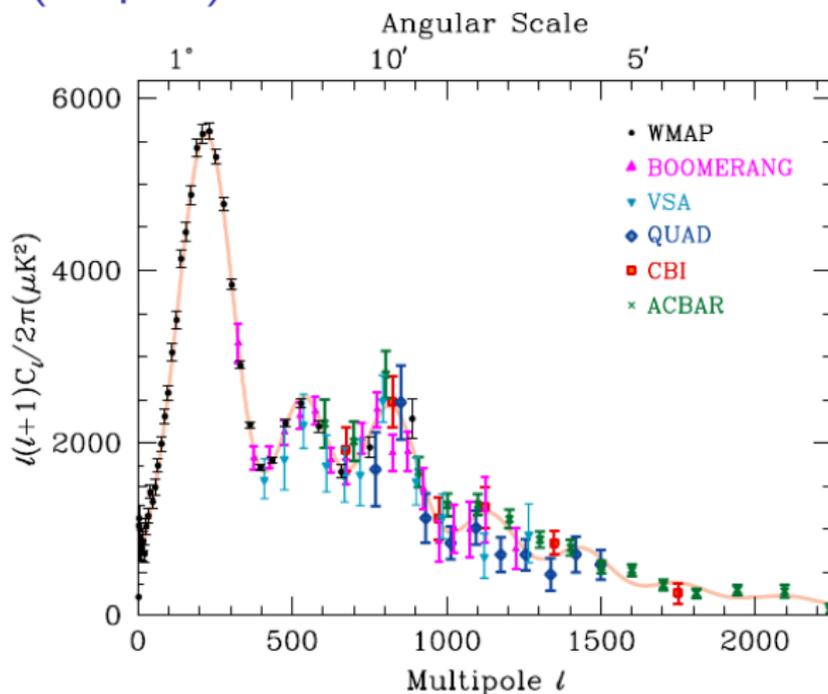


paradigme : anisotropies de température dues à la *matière* primordiale.

$\theta \geq \theta_H$: pas de physique causale : les γ tracent la matière.

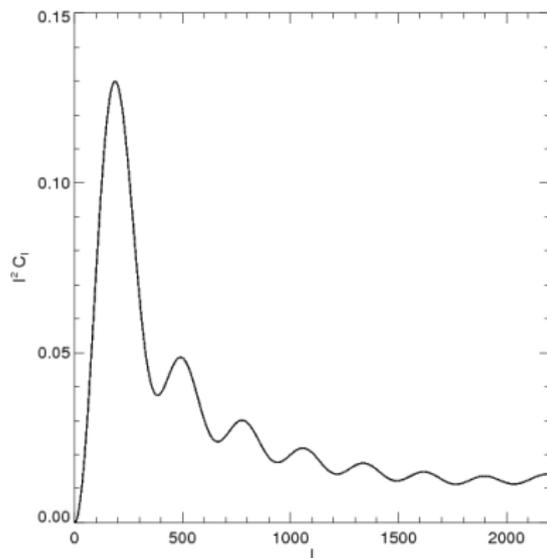
Spectre auto-similaire
($P(k) \simeq 1/k$) \rightarrow pas d'échelle.

CMB (de près)



$$\langle T_1 T_2 \rangle = c(\theta_{12}) = \sum_l C_l (2l + 1) P_l(\cos \theta_{12})$$

Quelle information dans C_l ?



(lisse : projection 3D \rightarrow 2D)

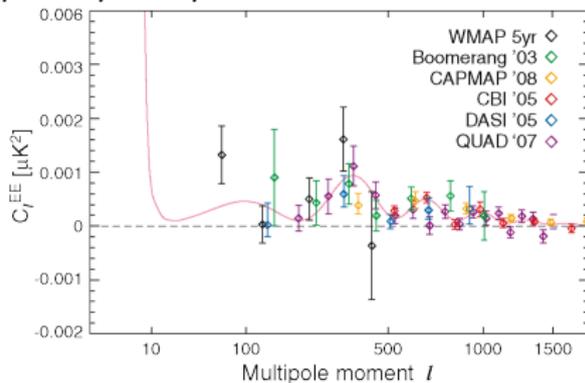
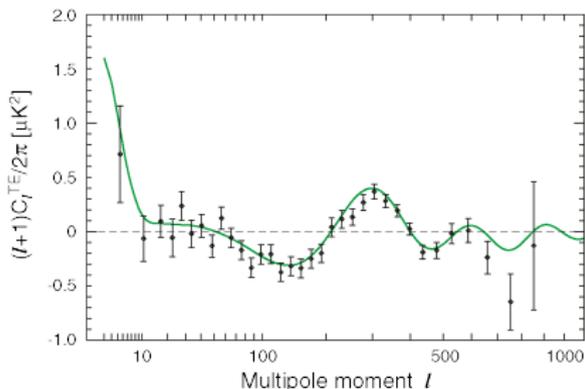
- ▶ au 1er ordre : une échelle angulaire
- ▶ 3e pic! (Ω_b, n_s)
- ▶ atténuation exp à grand ℓ (durée de la recombinaison)

$$c(\theta) = \begin{cases} (\theta - \theta_H)^2 & \text{si } \theta \leq \theta_H \\ 0 & \theta \geq \theta_H \end{cases}$$

Polarisation du CMB

qq % attendus

décomposition en modes E/B $\rightarrow C_l^{TE}, C_l^{EE}, C_l^{BB}$



mode B = signature d'ondes gravitationnelles primordiales
(inflation) : extrêmement difficile



Paramètres du modèle standard cosmologique

1. contenu : $[\Omega_k, \Omega_m, \Omega_b, \Omega_\nu, \Omega_\Lambda]$
 2. perturbations : $[A_s(\sigma_8), n_s, dn_s/d \ln k, r, n_t]$
 3. "nuisances" : $\tau, b/Q_{nl} \dots$
- ▶ CDM ? Λ ?
 - ▶ $w_\Lambda(a)$?
 - ▶ $P(k) = 1/k^{n_s}$?
 - ▶ réionisation abrupte
 - ▶ modes isocourbes

minimal= Λ CDM modèle *suffisant* (aujourd'hui) mais non *nécessaire*

un modèle en construction



Retour aux neutrinos

fond diffus de neutrinos (découplage $\simeq 1$ MeV) :

$$T_\gamma = 2.7 \text{ K} \quad T_\nu = 1.9 \text{ K} = 1.1 \cdot 10^{-4} \text{ eV}$$
$$n_\gamma = \frac{2\xi(3)}{\pi^2} T_\gamma^3 = 411 \text{ cm}^{-3} \quad n_\nu = \frac{3}{11} n_\gamma = 112 \text{ cm}^{-3} / \text{espèce}$$

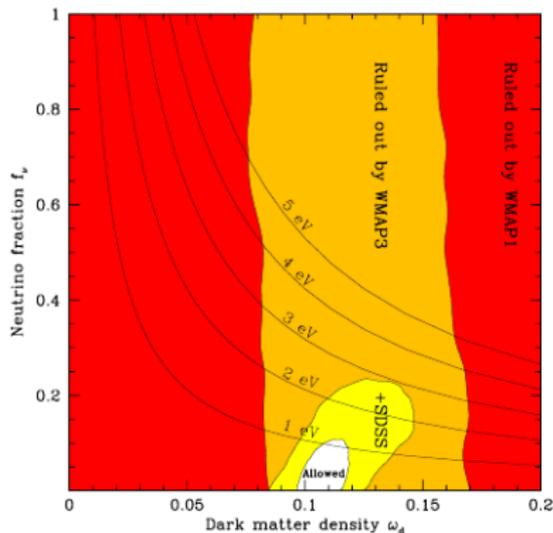
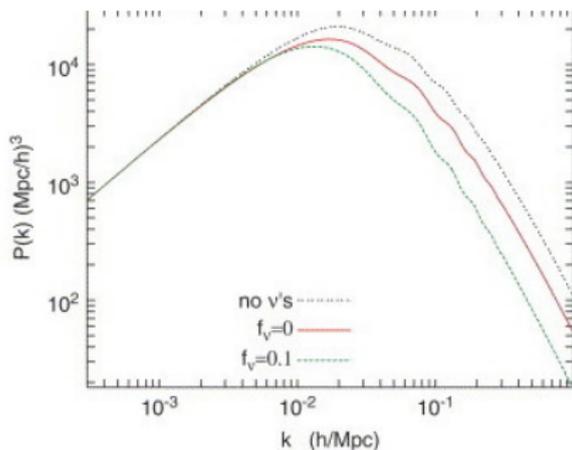
$m_\nu \gg 10^{-4} \text{ eV}$ contribution à la matière :

$$\Omega_\nu = \frac{m_\nu n_\nu}{\rho_c} \simeq 0.2 \frac{m_\nu}{10 \text{ eV}}$$

avec $m_\nu \simeq 5 \text{ eV}$ matière noire !
mais matière noire "chaude" ;-)



Effet des ν sur les grandes structures

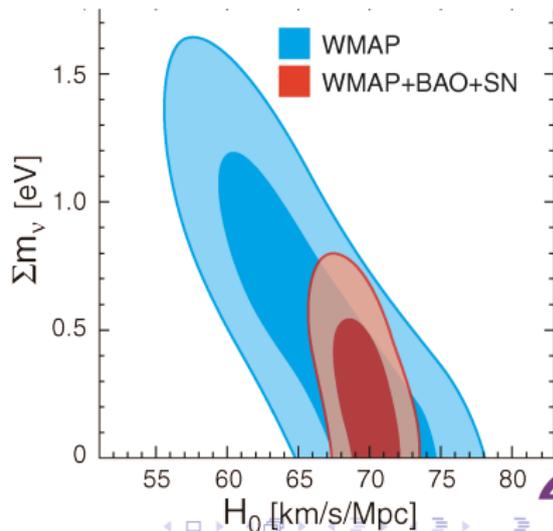
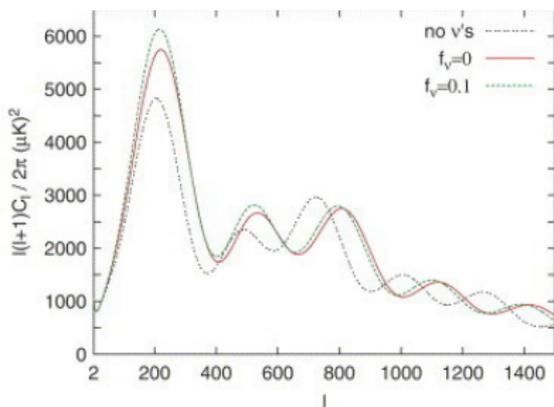


effacement des petites structures au delà de la transition

relativiste ("free streaming") : $\frac{P(k)^{f_\nu}}{P(k)^{f_\nu=0}} \simeq 8f_\nu$

Effet des ν sur le CMB

1. effet direct : si transition NR avant la recombinaison ($m_\Sigma \gtrsim 1.5\text{eV}$) \rightarrow effacement des oscillations
2. effet indirect sur le fond $a_{eq} = \frac{\Omega_r}{\Omega_m} = \frac{\Omega_r}{(1 - f_\nu)\Omega_m}$



m_ν cosmologie

sous Λ CDM :

1. CMB : $m_\Sigma \leq 1.5 \text{ eV} (95\% CL)$
2. WMAP5+BAO+SN $m_\Sigma \leq 0.7 \text{ eV} (95\% CL)$
3. WMAP3+SDSS $m_\Sigma \leq 0.9 \text{ eV} (95\% CL)$

$$m_\Sigma \lesssim 1 \text{ eV}$$



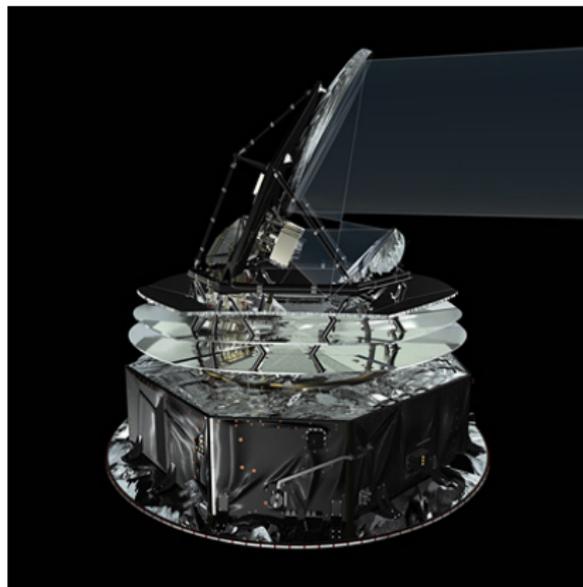
PLANCK

Planck

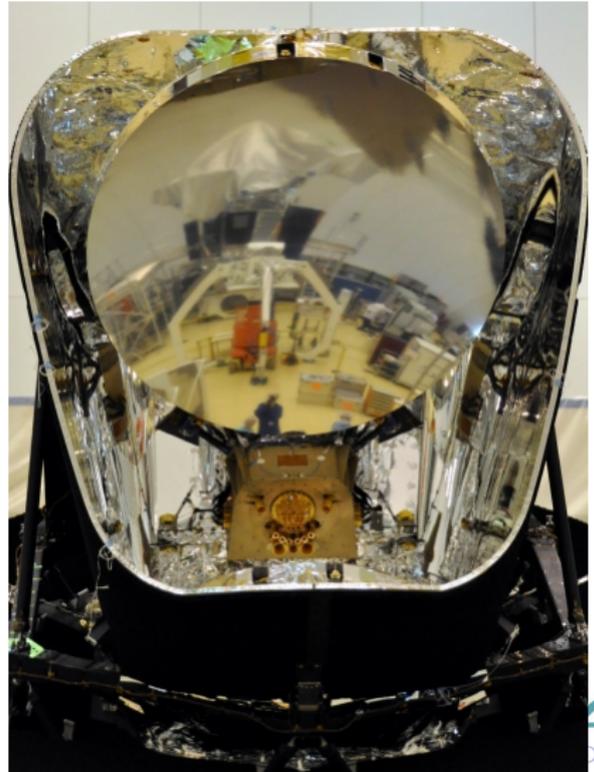
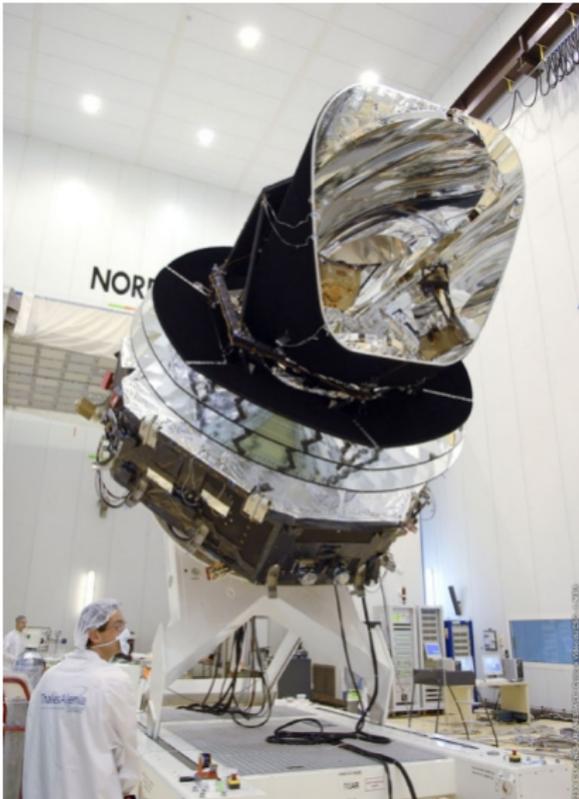
mission "moyenne" de l'ESA : au moins 14 mois (2 surveys) à L2

1. télescope (1.5m)
2. LFI : radiomètres 30-70 GHz, résolution 10-25 arcmin (\simeq WMAP)
3. HFI : bolomètres 100-857 GHz refroidis à 100 mK, résolution 5-9 arcmin : testé sur ARCHEOPS

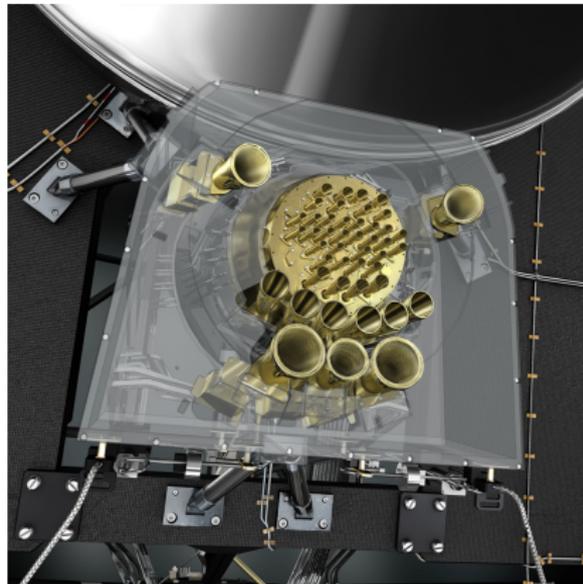
\simeq 300 scientifiques associés.



Planck en vrai !

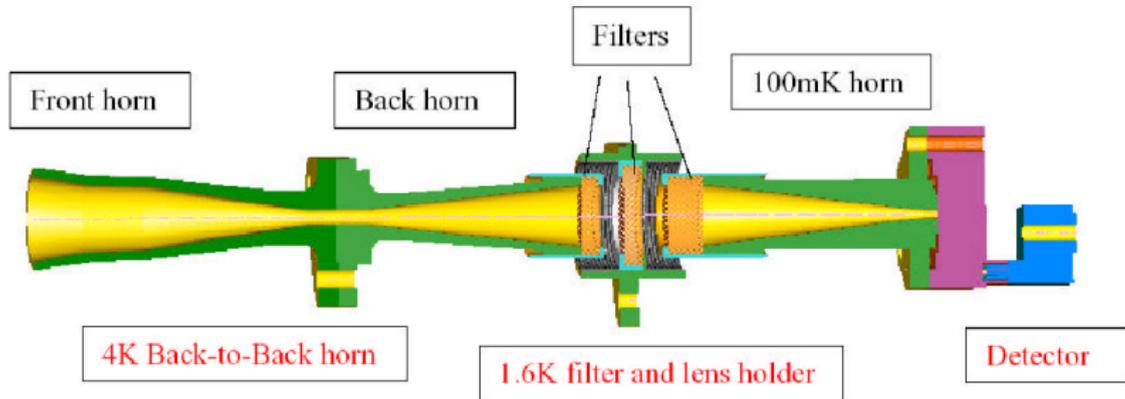


plan focal



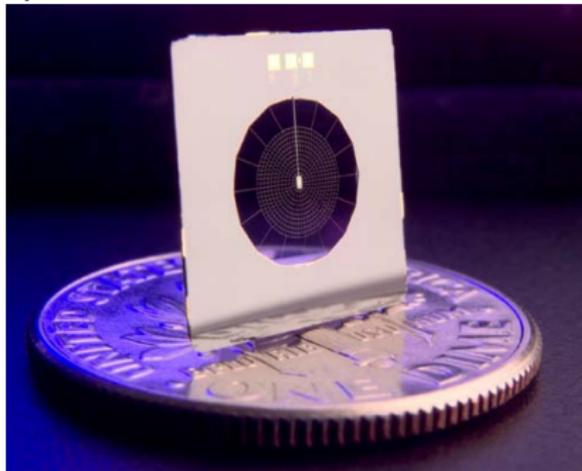
52 bolomètres, 11 paires radiomètres.

Optique HFI

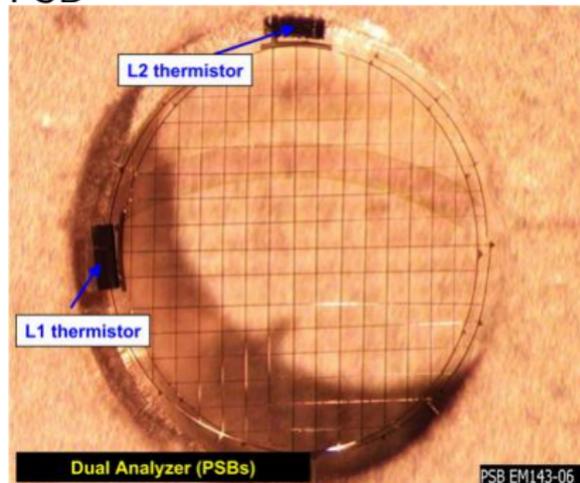


Bolomètres

spider web

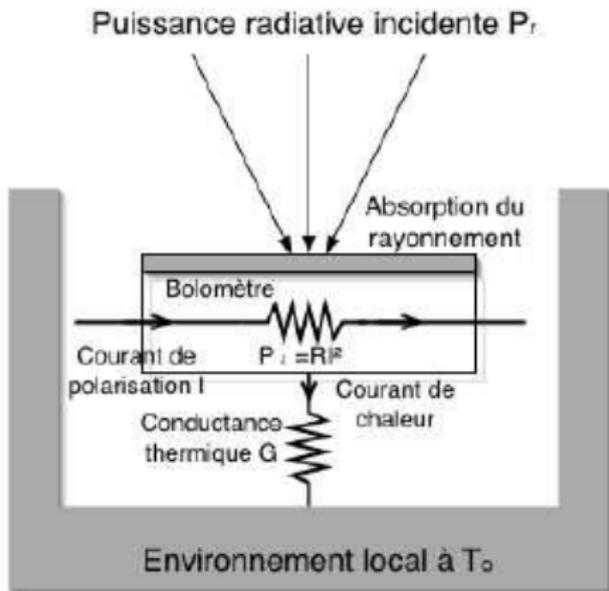


PSB



Principe

très bas bruit

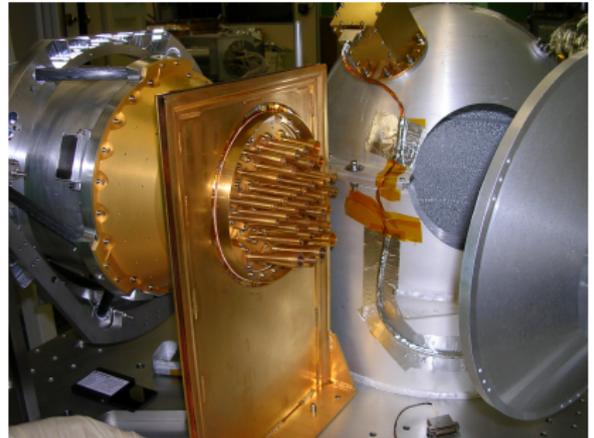


Défis technologiques

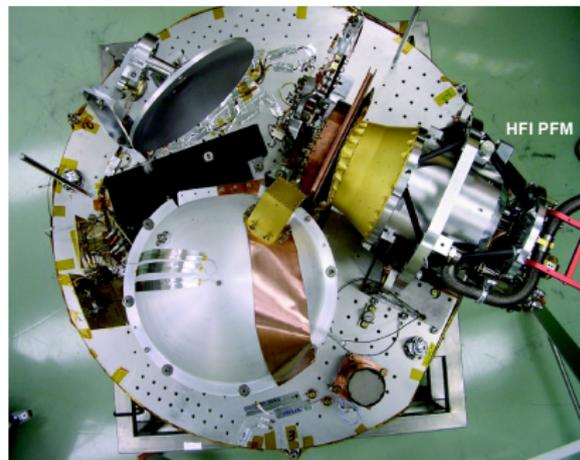
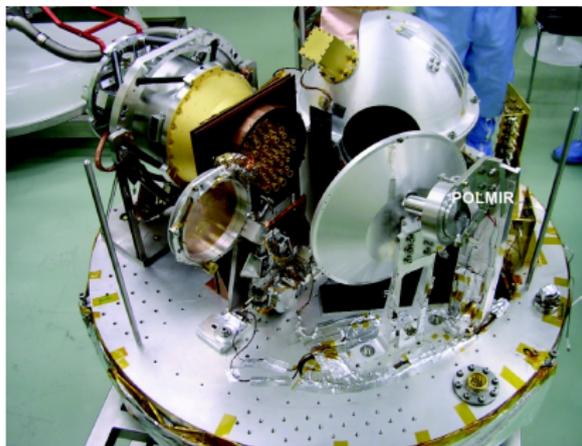
- ▶ refroidissement : 3 réfrigérateurs (18K, 4 K, 1.6K) + dilution $He^3 - He^4 \rightarrow 100 \text{ mK}$: stabilité au μK
- ▶ électronique très bas bruit (limite= bruit de photons)



CQM novembre 2004 Orsay



PFM juillet 2007 Orsay



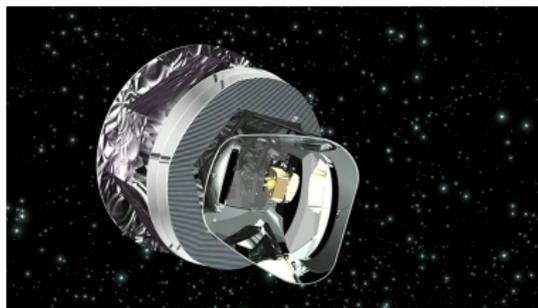
Centre Spatial de Liège : juin 2008



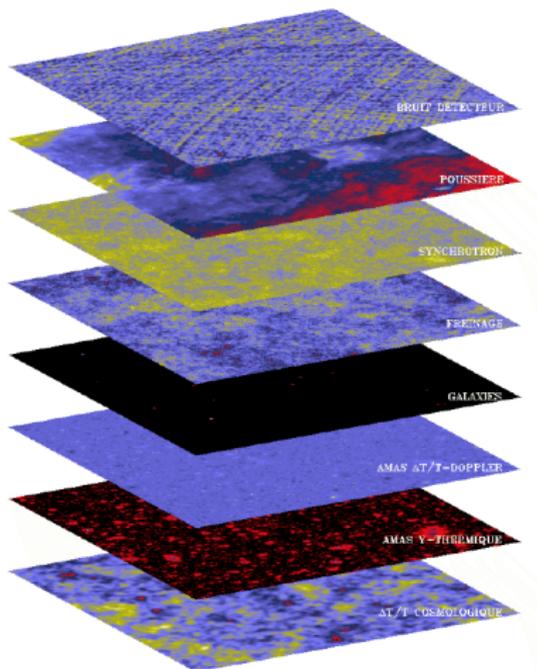
Février/Mars 2009



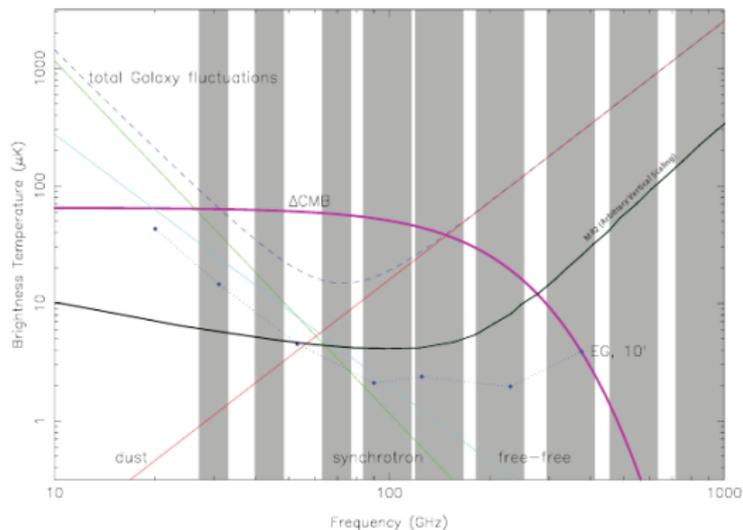
29 Avril 2009 (?)



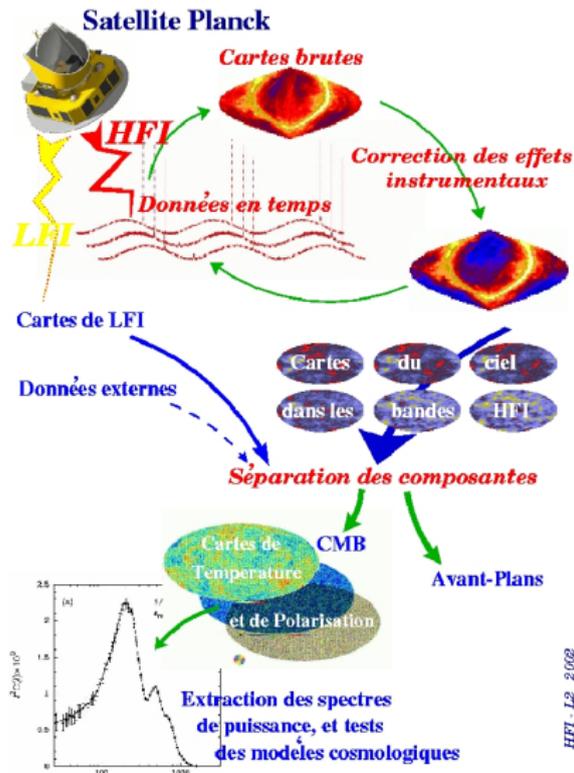
Fond diffus et avant plans



F.R. DOUCHET & R. GISPERT 1996



Analyse



- ▶ Échantillonnage à 200Hz : 14 mois de données (28 ?) : 1-2 To1/canal
- ▶ Niveau 1 : mise en forme des données en temps
- ▶ Niveau 2 : correction effets systématiques : création de cartes / fréquence + catalogue des sources
- ▶ Niveau 3 : séparation des composantes, spectres de puissance, contraintes cosmologiques ...
- ▶ données publiques : 2012



Au delà du spectre de puissance

"CMB lensing"

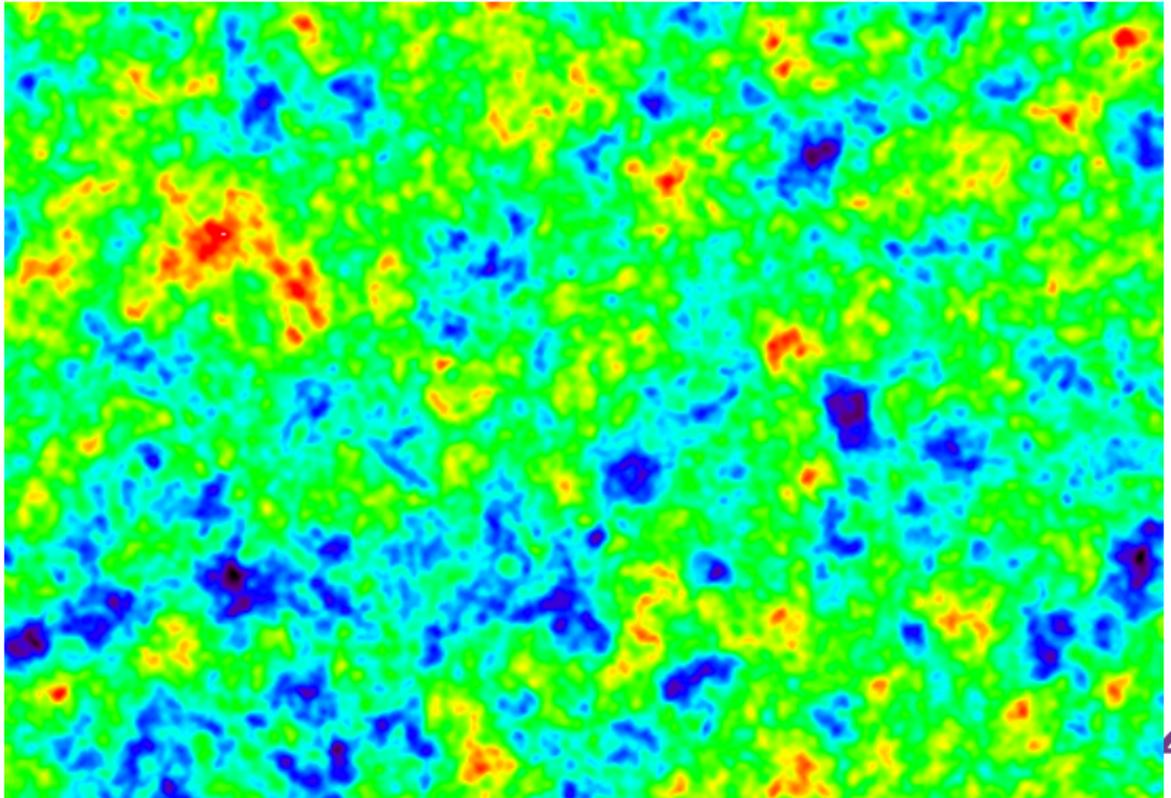
- ▶ l'avenir de m_Σ dépend de notre connaissance des spectres de matière (free streaming)
- ▶ CMB lensing : la trajectoire des γ CMB est déviée par le champ de matière jusque nous.

$$T_{\text{obs}}(\vec{n}) = T_{\text{CMB}}(\vec{n} + \vec{\nabla}\Phi(\vec{n}))$$

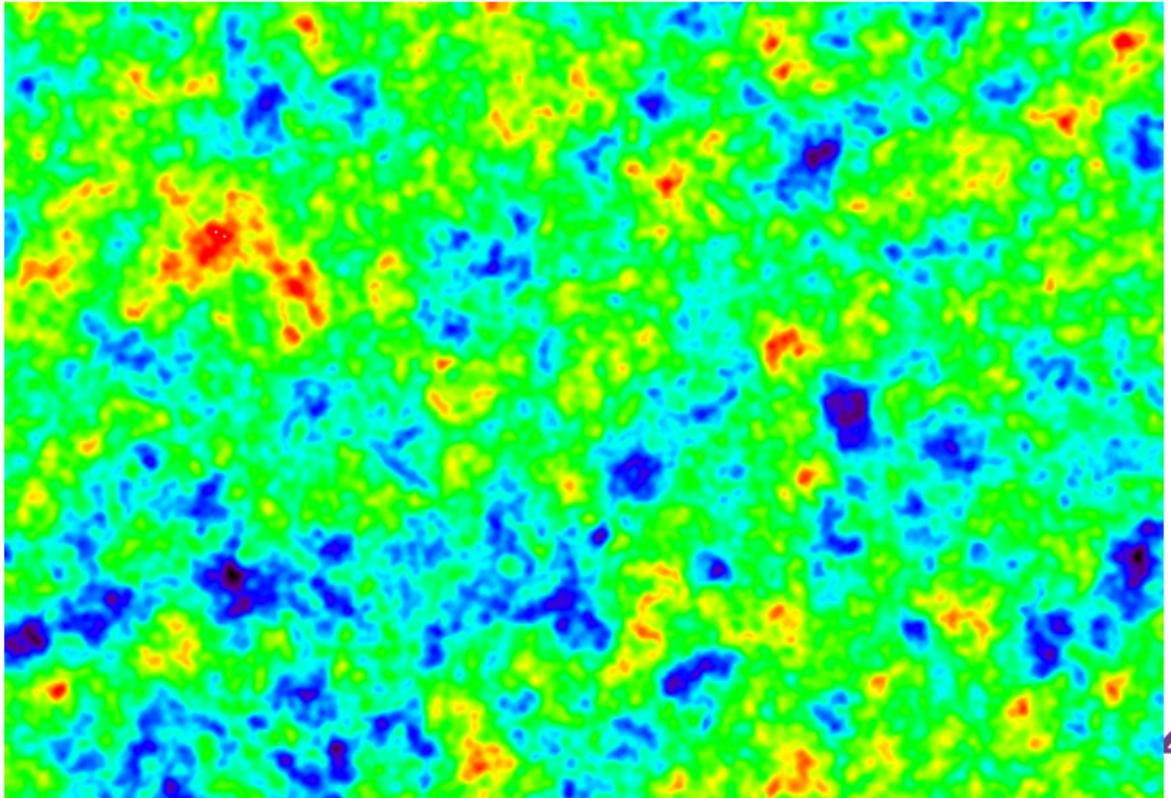
- ▶ jamais mesuré directement
- ▶ déflexion $\simeq 2.5$ arcmin, à la limite de résolution de Planck.
- ▶ mesure du spectre de déflexion \rightarrow gain d'un facteur 2-3 sur m_Σ



CMB

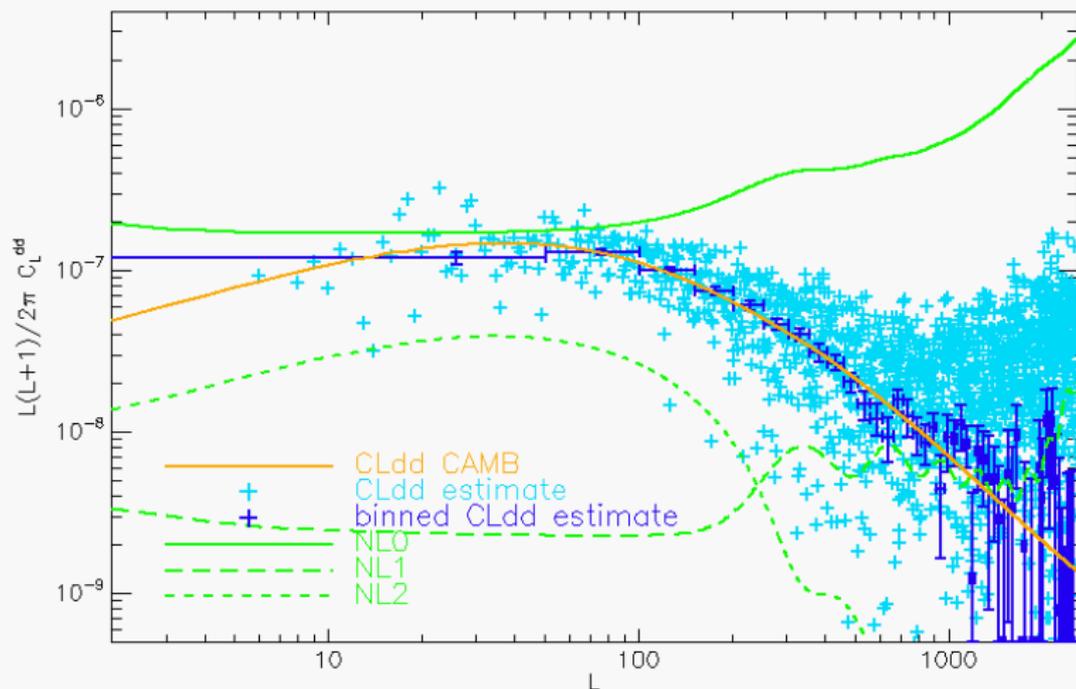


CMB lentillé



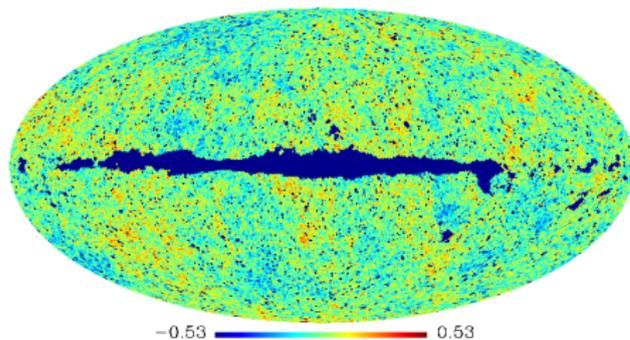
un estimateur statistique (sur tout le ciel)

(Hu-Okamoto 2002)



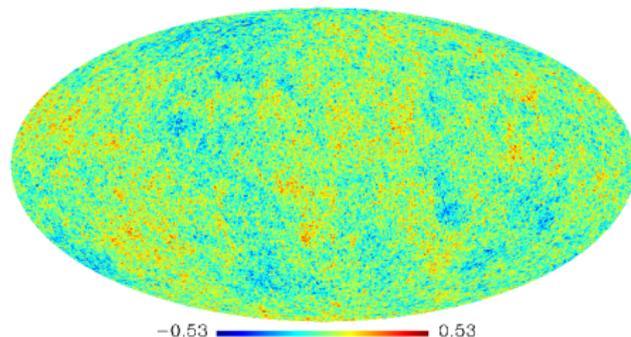
Mais pas tout le ciel ?

CMB masked



sources brillantes, Galaxie ...

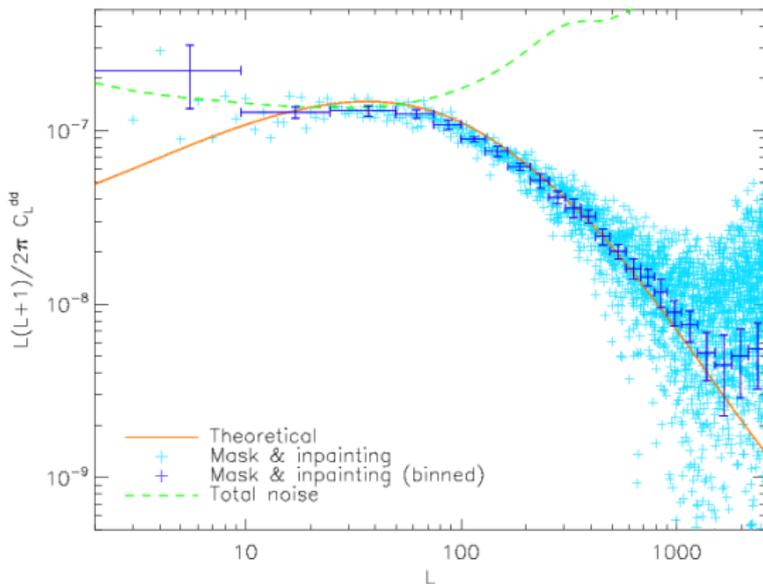
CMB inpainted



inpainting !
(critère= parcimonie des a_{lm})

un effet de l'inpainting ?

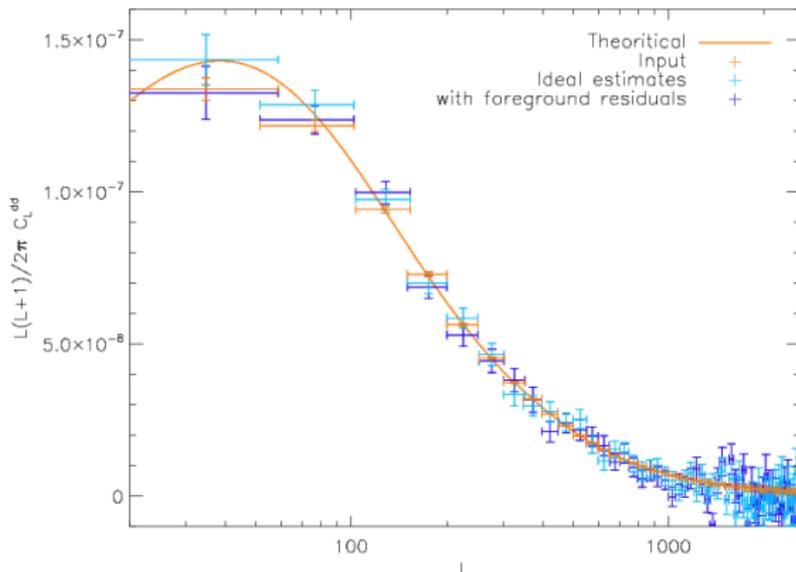
sur 10 cartes :



Perotto et al., arXiv :0903.1308

Nettoyage des avants-plans ?

MC : $\tilde{C}\hat{M}B + Dust + SZ + bruit \xrightarrow{sep.comp.} C\hat{M}B + \dots$



Cette méthode de séparation (morphologique) préserve le lensing

Systematiques...

- ▶ constantes de temps
- ▶ PSF asymetrique
- ▶ pointage
- ▶ etapes de "pre-processing", "mapmaking/calibration"
- ▶ bruit inhomogène
- ▶ résidu de sources corrélées (SZ)
- ▶ ...



Conclusions

- ▶ $MS + \nu$ massif de Majorana : naturel
- ▶ Modèle Standard Cosmologique en construction ($\Lambda...$)
- ▶ neutrinos massifs : free-streaming \rightarrow affecte les spectres de la matière.
- ▶ aujourd'hui $m_{\Sigma} \lesssim 1 \text{ eV}$
- ▶ demain : CMB-lensing (Planck)
- ▶ après-demain : LSST (BAO, Cosmic Shear)

Décade passionnante s'annonce : Planck, LHC(Higgs, SUSY?),
 $2\beta, \beta$ (KATRIN)



merci à : X. Sarazin, P. Janot, M. Moniez, O. Perdereau, L. Perotto, L. Montier, J. Lesgourgues

Ref :

- ▶ M.C Gonzales-Garcia, M. Maltoni *Phenomenology with massive neutrinos*, Physics Report 460 (2008)
- ▶ R.N Mohapatra *Massive neutrinos in Physics and Astrophysics*
- ▶ revues du PDG
- ▶ J. Rich, *Fundamentals of cosmology*
- ▶ Planck Blue Book
- ▶ WMAP (Lambda)
- ▶ J. Lesgourgues and S. Pastor, *Massive neutrinos and cosmology*, Physics Report 429, 6
- ▶ A Lewis and A. Challinor, *Weak gravitational Lensing of the CMB*, Physics Report 429,1



$$m_\nu \neq 0$$

Extension du MS minimal

1. Higgs \rightarrow Majorana

2. leptons :

- ▶ ν_R Dirac (sterile)
- ▶ mélange Dirac + Majorana :

$$\text{si } D \simeq m_u \text{ et } M \simeq \Lambda_{GUT} \implies m_{\nu L} \simeq D^2/M, m_{\nu R} \simeq M$$

MS avec Majorana naturel

(la suite : LHC, $2\beta\dots$)



Avenir des ν

- ▶ matrice de mélange leptonique ($+\nu$ steriles) : oscillations
- ▶ nature du neutrino : $2\beta \simeq$ (2015)
- ▶ mesure directe KATRIN (2013) $m_{\nu_e} \lesssim 0.2 - 0.3 \text{ eV}$

cosmologie :

- ▶ WMAP : CMB +GS (2008) $m_\Sigma \lesssim 1 \text{ eV}$
- ▶ Planck : CMB +CMB-lensing +GS (2012) $m_\Sigma \lesssim 0.3 \text{ eV}$
- ▶ LSST : BAO, Cosmic Shear (2018) $m_\Sigma \lesssim 0.05 \text{ eV}$

la mesure de m_ν par la cosmologie passe par :

1. mesure fine des spectres de puissance des grandes structure
2. la construction d'un modèle standard cosmo (CDM, Λ ...)
3. compréhension du Higgs, supersymetrie? (LHC)
4. travaux theoriques : quitessence, effets NL des spectres de puissance, simulations N corps pour $Ly\alpha$...



Inflation

Il n'y pas 1 modèle d'inflation ($\simeq 100$ actuellement).

Sortir du pb des CI...

un état $p < 0 \equiv$ gravité répulsive \rightarrow croissance exp mais

- ▶ inflaton
- ▶ fine tuning (slow roll)
- ▶ pb transplanckien...

prédiction :

- ▶ fluctuation scalaires (?)
- ▶ gaussiennes (Théorème Central limite)
- ▶ $n_s \simeq 1$ (invariant d'échelle)
- ▶ platitude si $\Omega_{tot} \simeq 1$ (pas de pb si $k=0$)
- ▶ horizon (pourquoi pas avant M_{PL} ?)
- ▶ suppression des monopoles (GUT ?)



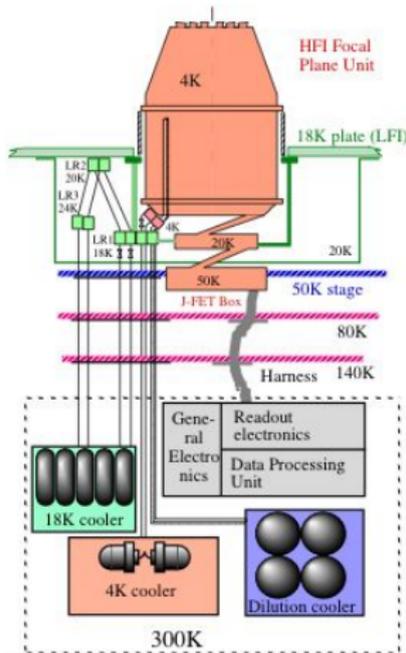
Peux ton croire un fit cosmologique ?

- ▶ approche (généralement) *Bayesienne* : $L(\vec{\theta}) \propto p(\vec{\theta})$ puis marginalisation
“si le modèle est correcte le paramètre vaut ...”
- ▶ pas de **test** complet du modèle (χ^2) : trop de parametres pour tout fitter : choix subjectif des **paramètres**
- ▶ choix subjectif des **sondes** cosmologiques : CMB, SN, GS ,BAO, BBN, $Ly\alpha$...
- ▶ systématiques...
- ▶ individus (pas de groupe d'experts à la PDG).



Refroidissement

extrêmement stable ($\lesssim \mu K$)

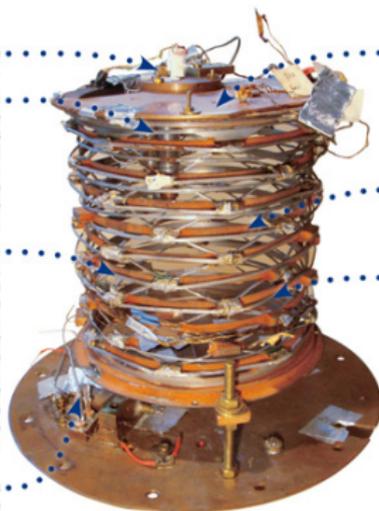


Ce bloc de cuivre cache un thermomètre lithographié.

3 tuyaux soudés :
le mélange circule au milieu des gaz purs (hélium 3 et hélium 4) afin de les pré-refroidir. À ces pressions, l'hélium passe à l'état de liquide superfluide entre 1 et 4 K.

« Petits » tuyaux : pour contraindre la diffusion, la vitesse de circulation doit être plus grande que la vitesse critique : un petit diamètre conduit à une vitesse plus grande pour un débit donné. Le refroidissement produit par la dilution est plus efficace que le réchauffement lié à la viscosité à cette température.

Arrivée des gaz purs et retour du mélange



La structure est faite d'un seul bloc de niobium-titane taillé dans la masse, un alliage supraconducteur à la résistance thermique très grande : il ne « voit pas » les parties chaudes de l'instrument.

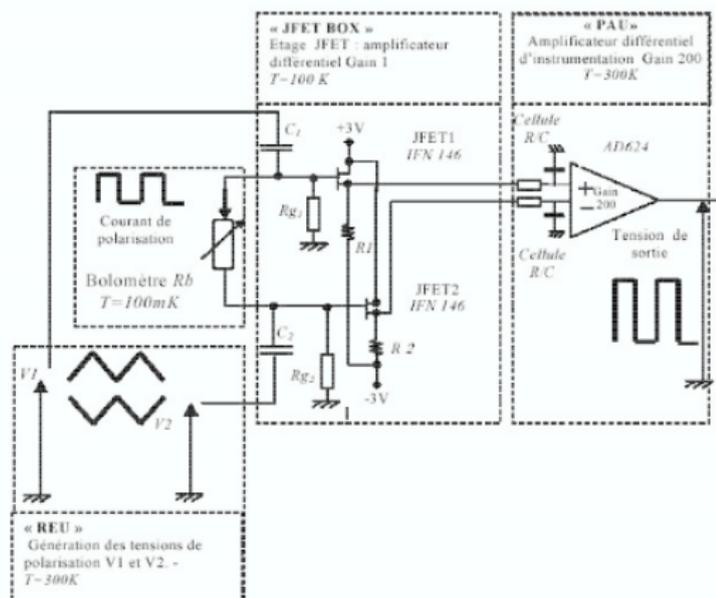
La structure est cuivrée afin d'améliorer la conduction thermique de l'échangeur de froid.

« Gros » tuyaux : on limite le chauffage par viscosité sur les parois du tube, la circulation de bulles évite la diffusion des liquides.

A. Benoit (CRTBC) testé sur Archeops

40 K passif + 3 réfrigérateurs

Électronique (très) bas bruit



limitée par le "bruit de photons"



Caractérisation de l'instrument HFI

lors de plusieurs campagnes d'étalonnage : CQM, PFM, CSL

	au sol	en vol
lobe central (PSF)	X	X
lobes lointains		X
résolution temps	X	X
résolution spectrale	X	
sensibilité (T, fond)	X	X
linéarité	X	
bruit	X	X
fuites optiques	X	X
polarisation	X	X



Effet de la mesure du lensing sur m_Σ



Perotto et al., JCAP10(2006)013