

Neutrinos en cosmologie aujourd'hui et demain: impact de Planck

Stéphane Plaszczyński, LAL

5 mai 2009

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

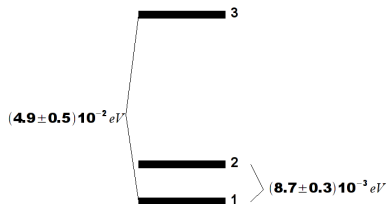
Fit global (*Maltoni, 2008*) :

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

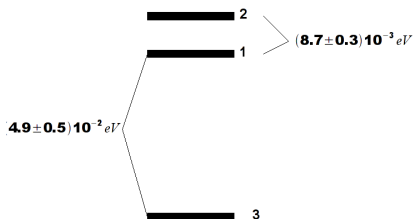


Mesures directes

Hierarchie Normale



Hierarchie Inverse



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

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



Cosmologie

Cosmologie : existe-t-il un Modèle Standard ?

1. Base : **principe cosmologique** : homogénéité+ isotropie

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

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) :

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

équation d'état : $p = w\rho$

⇒ Friedman-Lemaitre

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

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



Quelle énergie dans l'univers ?

1. **radiation** : $w = \frac{1}{3}$
2. **matière** : $w = 0$
3. **"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
 $T(t) = T_0 \frac{a_0}{a(t)} \Rightarrow$ 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.

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

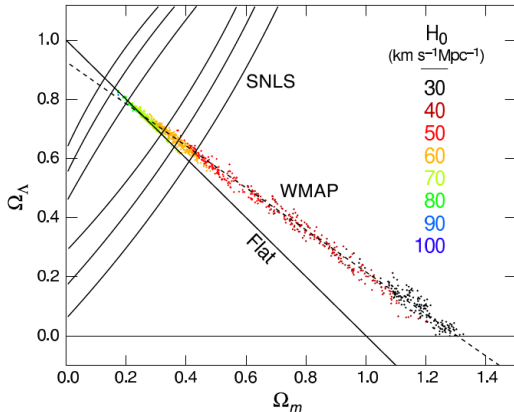
2. Grandes structures

$$\rightarrow \Omega_m \simeq 0.30$$

3. SN1a :

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

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

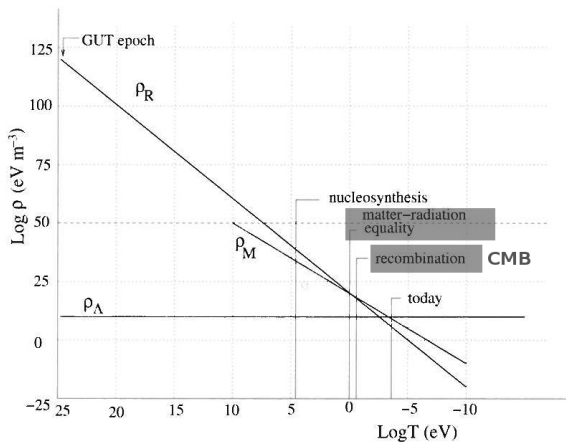


dégénérescence géométrique

$$\Omega_\gamma \simeq 10^{-5}, \Omega_M \simeq 24\% (\Omega_b \simeq 4\%), \Omega_\Lambda \simeq 77\%$$



Evolution du fond cosmologique

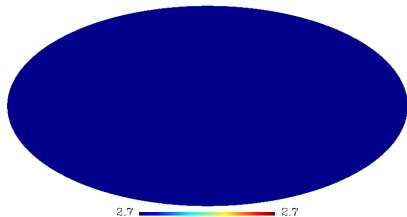


problème cosmologique...

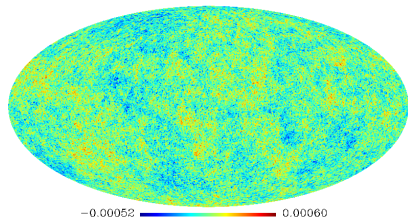
quintessence ? anti-gravité ? inhomogénéité locale ? MOND ?



CMB (de loin)



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



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

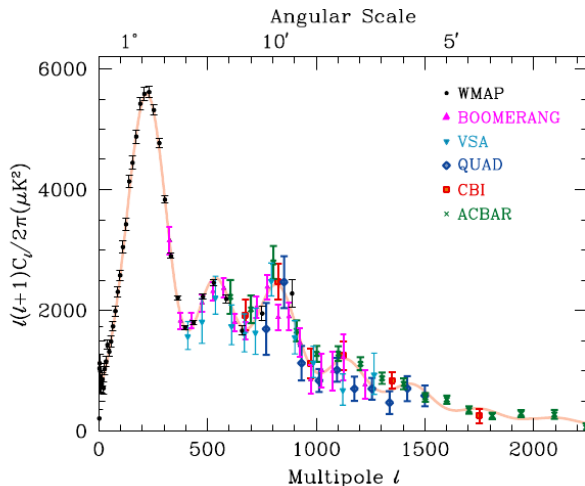
$\theta \geq \theta_H$: pas de physique causale : les γ tracent la matière.

Spectre *auto-similaire*

$(P(k) \simeq 1/k) \rightarrow$ pas d'échelle.



CMB (de près) : les fameux C_l



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

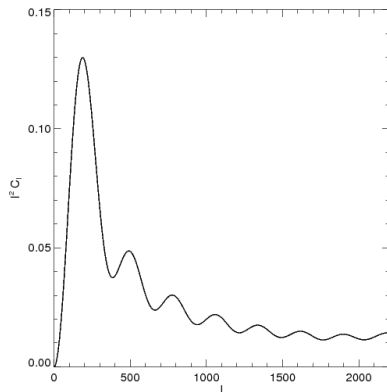


Quelle information dans les C_l ?

- ▶ lisse : projection 3D \rightarrow 2D
- ▶ au 1er ordre : une échelle angulaire

intéressant :

- ▶ 3e pic ! (Ω_b, n_s)
- ▶ atténuation exp à grand ℓ (durée de la recombinaison)



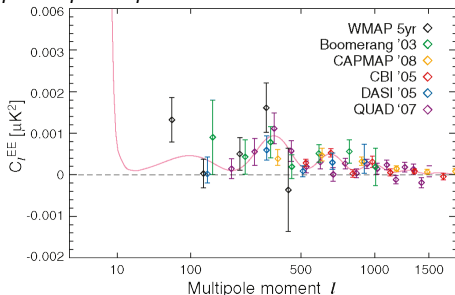
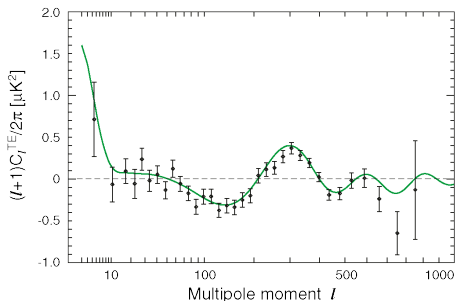
$$c(\theta) = \begin{cases} (\theta - \theta_H)^2 & \theta \leq \theta_H \\ 0 & \theta \geq \theta_H \end{cases}$$



Polarisation du CMB

qq % attendus

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



mode B = ondes gravitationnelles primordiales : extrêmement difficile...



Un Modèle Standard Cosmologique ?

1. contenu : $[\Omega_k, \Omega_m, \Omega_b, \Omega_\nu, \Omega_\Lambda]$
2. perturbations : $[A_s, n_s, \frac{dn_s}{lnk}, r = \frac{A_t}{A_s}, n_t]$
3. "nuisances" : $\tau, b/Q_{nl} \dots$
 - ▶ τ : réionisation abrupte, b cte...
 - ▶ perturbations **adiabatiques**. modes isocourbes ?
 - ▶ $w = -1$? $w(a)$?

Pas assez de données pour tout fitter

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

un modèle en construction



Peux ton croire un fit cosmologique ?

- ▶ approche (essentiellement) *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, P(k), BAO, BBN, $Ly\alpha$...
- ▶ systématiques...
- ▶ individus (pas de groupe d'experts à la PDG).



neutrinos en cosmologie



Fond diffus de neutrino

γ	ν
$T_{\text{dec}} \simeq 0.3 \text{ eV}$	$T_{\text{dec}} \simeq 1 \text{ MeV}$
$T_0 = 2.7 \text{ K}$	$T_0 = 1.9 \text{ K} (= 1.1 \cdot 10^{-4} \text{ eV})$
$n_0 = 411 \text{ cm}^{-3}$	$n_0 = 112 \text{ cm}^{-3} / \text{espèce}$

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

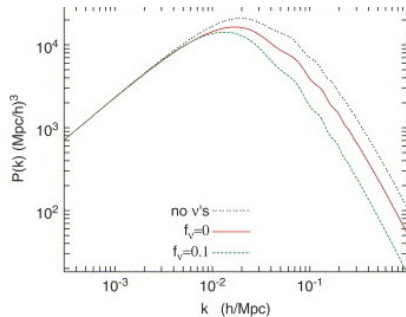
$$\Omega_\nu = \frac{m_\nu n_\nu}{\rho_c} \simeq 0.2 \frac{m_\nu}{10 \text{ eV}}$$

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



Effet des ν sur la matière

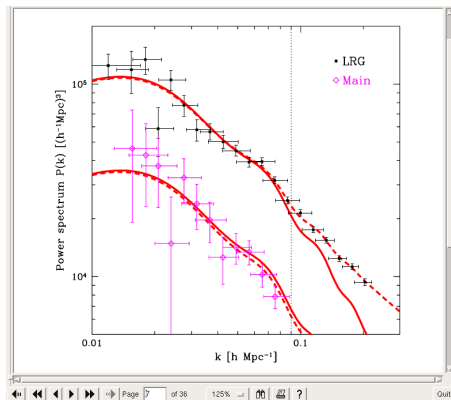
1. $\langle E_\nu \rangle \propto T_\nu(a) \searrow$
transition non-relativiste (m)
2. free streaming : les ν
s'échappent des
sur-densités : leur masse
perturbe la formation des
structures



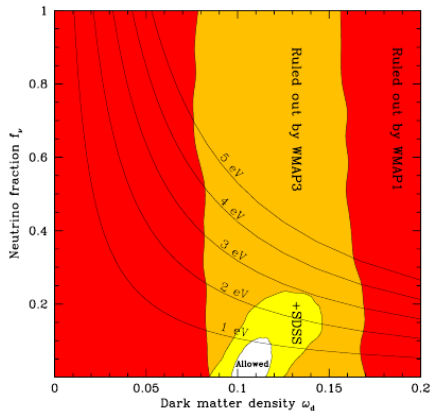
$$\frac{P(k)^{f_\nu}}{P(k)^{f_\nu=0}} \simeq 8f_\nu$$



Spectres mesurés (SDSS)



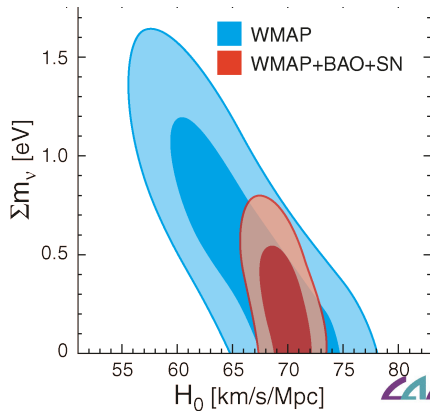
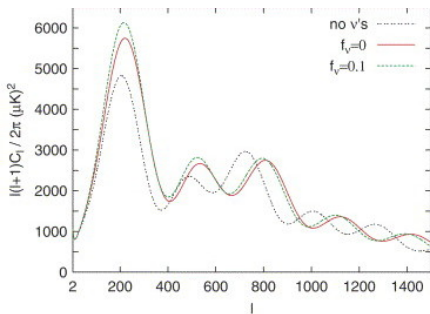
pb du biais (et NL)



Effet des ν sur le CMB

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

(lever la dégénérescence géométrique)



sous Λ CDM :

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

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



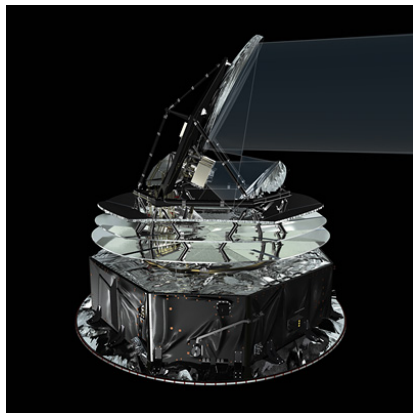
PLANCK

Planck

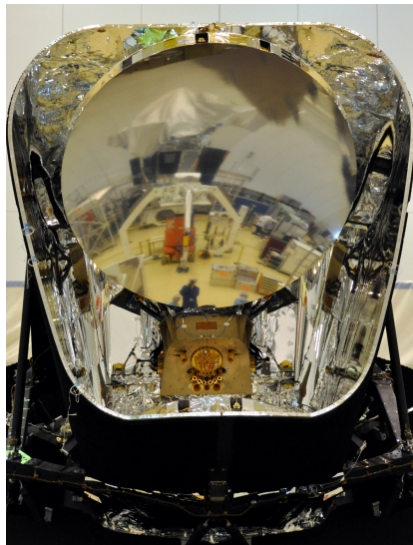
mission "moyenne" de l'ESA : au moins 14 mois (2 surveys) à L2

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

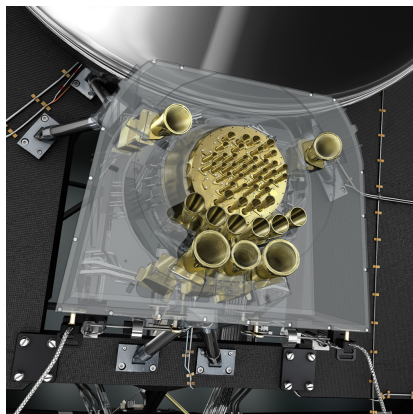
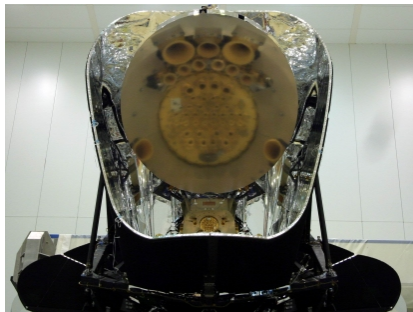
\simeq 300 scientifiques associés.



Planck en vrai !



plan focal



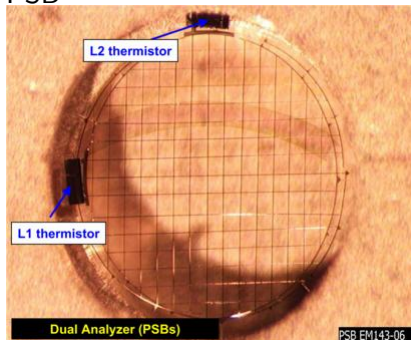
52 bolomètres (32 polarisés), 11 paires radiomètres.

Bolomètres (HFI)

spider web



PSB



Défis technologiques

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

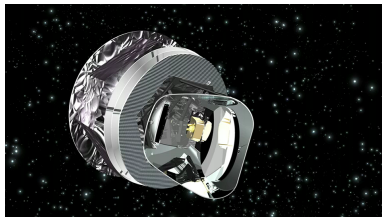
Caractérisation de l'instrument HFI

lors de plusieurs campagnes d'étalonnage : CQM (2004), PFM (2007), CSL(2008)

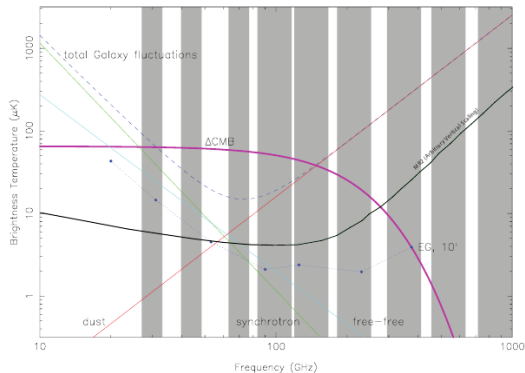
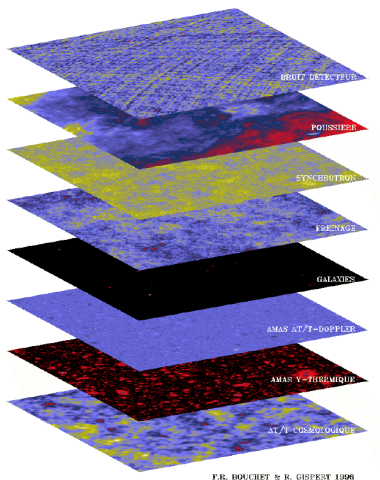
	au sol	en vol
lobe central (PSF)	X	X
lobes lointains		X
résolution temps	X	X
résolution spectrale	X	
sensibilité (T, fond)	X	X
linéarité	X	
bruit	X	X
fuites optiques	X	X
polarisation	X	X



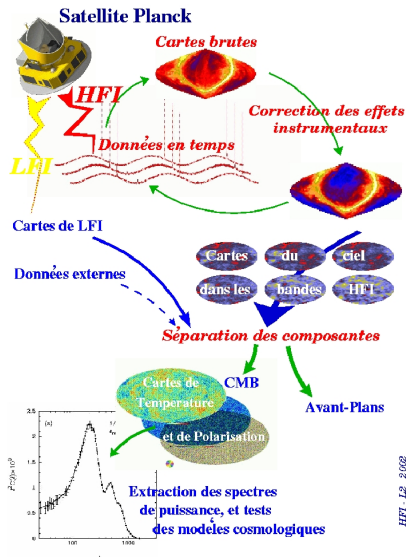
29/avril, 6/mai, 14 mai



Fond diffus et avant plans



Analyse



- ▶ Échantillonnage à 200Hz : 14 (→ 28) mois de données : 1-2 To/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"

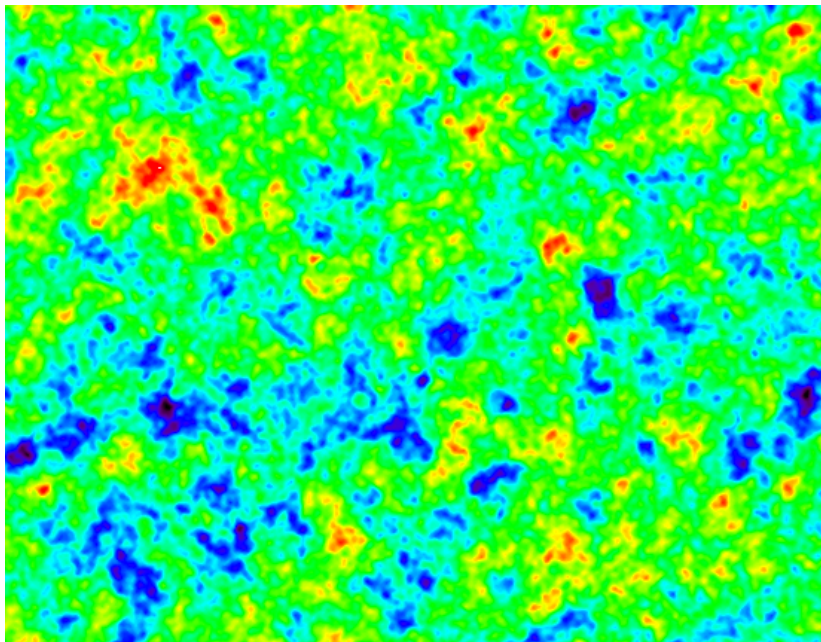
- ▶ CMB + spectre matière $\rightarrow a_{eq} = \frac{\Omega_r}{(1 - f_\nu)\Omega_m}$
- ▶ spectre de matière sans biais (ni NL) : "CMB lensing" : la trajectoire des γ CMB est déviée par le champ de matière jusque nous.

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

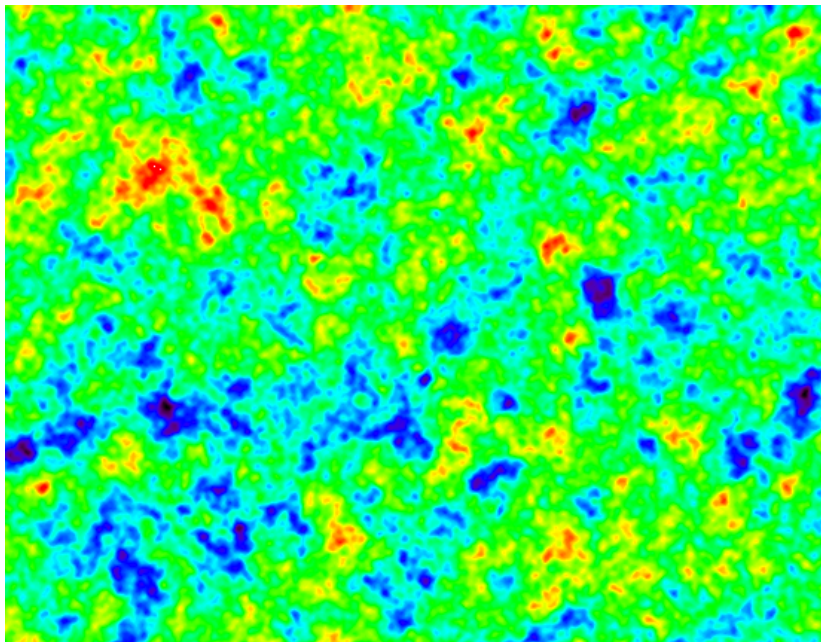
- ▶ jamais mesuré directement
- ▶ déflexion $\simeq 2.5\text{arcmin}$, à la limite de résolution de Planck.
- ▶ mesure du spectre de déflexion \rightarrow gain d'un facteur 2-3 sur m_Σ



CMB

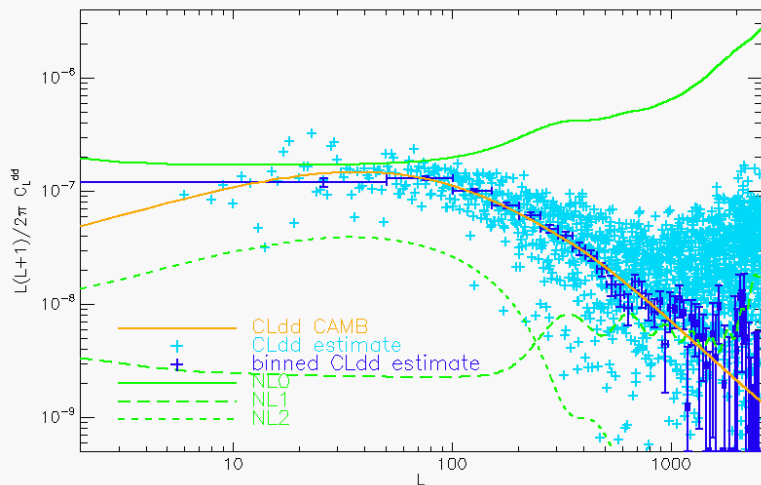


CMB lentillé



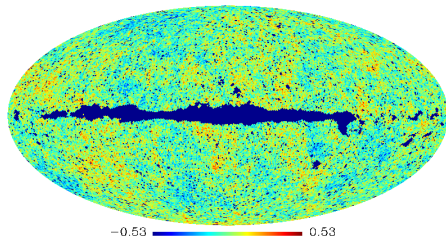
un estimateur statistique (sur tout le ciel)

(Hu-Okamoto 2002) implémentation :



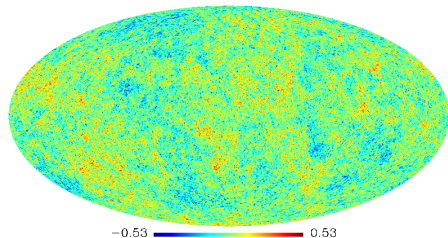
Mais pas tout le ciel ?

CMB masked



sources brillantes, Galaxie ...

CMB inpainted

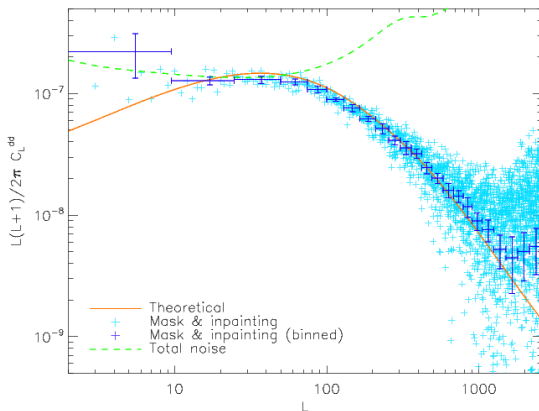


inpainting!
(critère= parcimonie des a_{lm})



un effet de l'inpainting ?

sur 10 cartes :

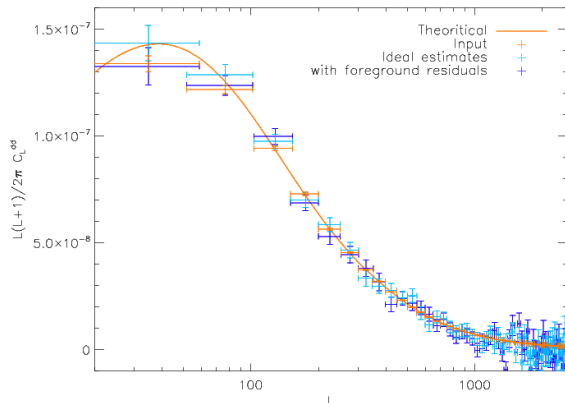


Perotto et al., arXiv :0903.1308



Effet de la séparation de composantes ?

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



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 corréllées (SZ)
- ▶ ...



Avenir des ν

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

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?) $m_\Sigma \lesssim 0.1(?) \text{ eV}$

la mesure de m_ν par la cosmologie passe par :

1. mesures sans biais des spectres de puissance des grandes structure
2. la construction du modèle standard cosmo (CDM ? Λ ?...)
3. travaux theoriques : modèles non Λ CDM, effets NL des spectres de puissance, simulations N corps pour $Ly\alpha$...



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

