

Physique des neutrinos avec le satellite Planck

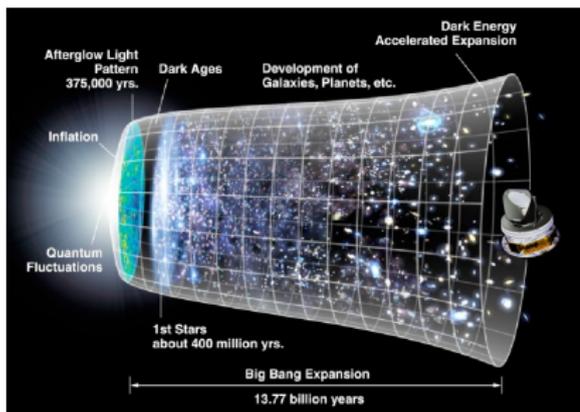
Marta Spinelli

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire
Directeur de thèse: S.Planszczynski

JRJC 1-7 Dec 2013

A chacun son modèle standard..

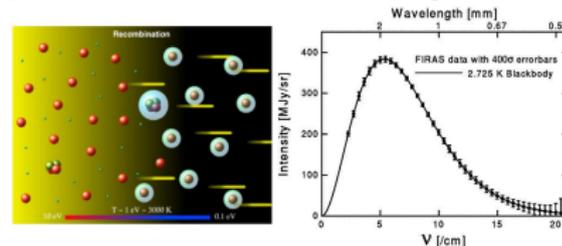
principe cosmologique + relativité générale dans un univers en expansion



Le fond diffus cosmologique:

~ 380.000 ans après le Big Bang

plasma → recombinaison → découplage



un univers isotrope a $T = 2.725 \pm 0.001 K$

avec des anisotropies $\Delta T/T \sim 10^{-5}$

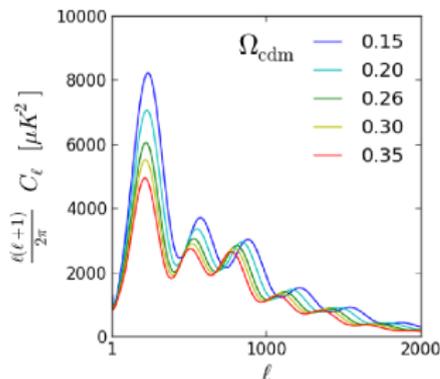
La théorie minimale

Λ CDM: (6 paramètres)

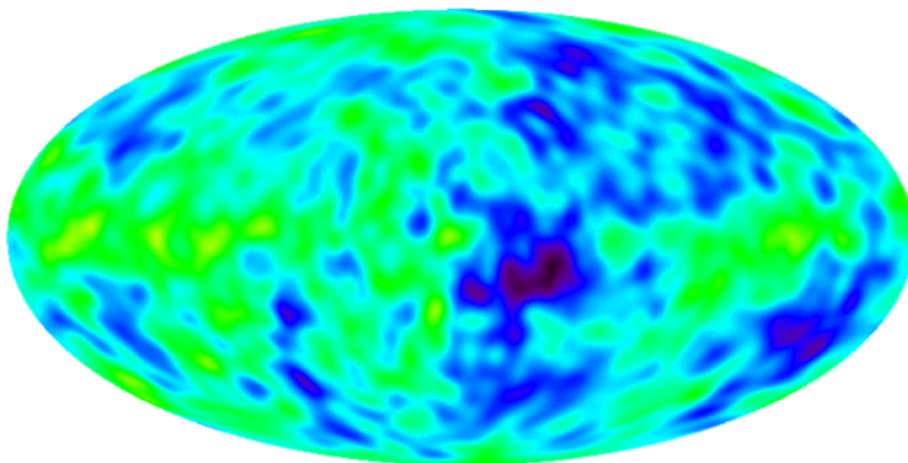
- univers plat ($\Omega_k = 0$)
- taux d'expansion et densité d'énergie actuelles $H_0, \Omega_b, \Omega_{cdm}$
- reionization: τ (ou z_{re})
- conditions initiales
 $P_s(k) = A_s \left(\frac{k}{k_0}\right)^{n_s-1}$

$$\frac{\Delta T}{T}(\hat{n}) = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m}^{TT} Y_{\ell m}(\hat{n})$$

$$C_{\ell}^{TT} = \langle a_{\ell m}^T a_{\ell m}^{T*} \rangle$$

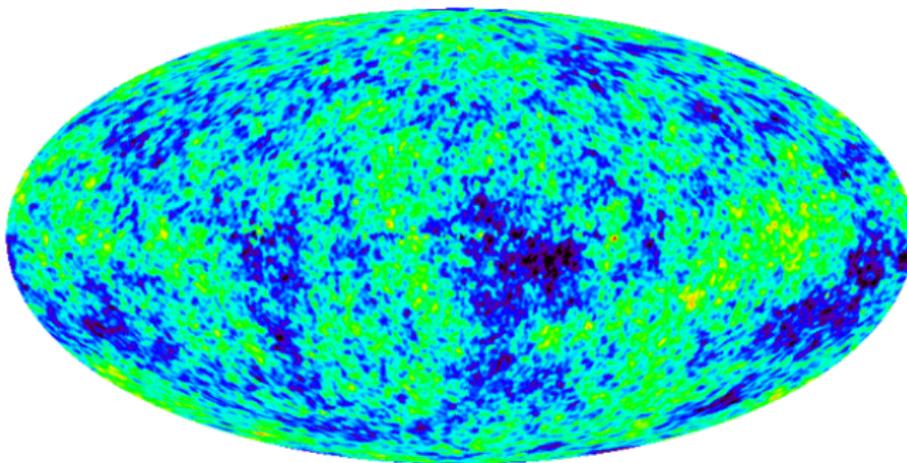


La mesure des anisotropies $\frac{\Delta T}{T}$



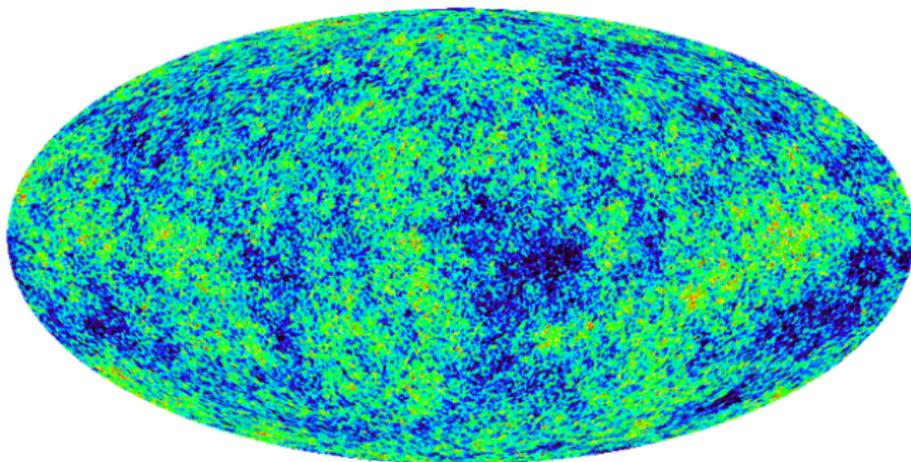
COBE, Smooth et al. 1992

La mesure des anisotropies $\frac{\Delta T}{T}$



WMAP, Bennet et al. 2003

La mesure des anisotropies $\frac{\Delta T}{T}$

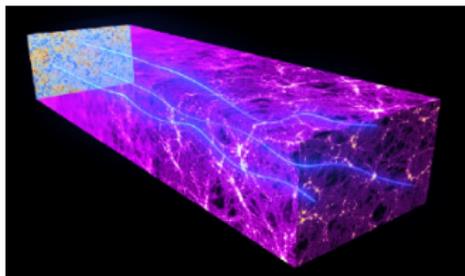


Planck 2013 results, Planck Collaboration

D'autres observables cosmologiques

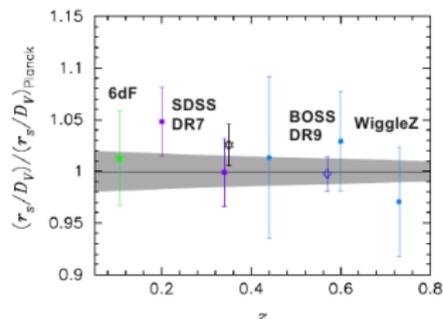
CMB-Lensing

Planck 2013 results. XVII.



- modification des \mathcal{C}_ℓ à grands ℓ
- reconstruction du champ de déflexion

Oscillations Baryoniques acoustiques (BAO)



- relique du couplage matière-photons dans les relevés de galaxies
- mesure de distance à une époque plus récent

Et les neutrinos?

- *CνB*: découplage $T \sim 1MeV$ puis se refroidissent comme le CMB
- à un moment deviennent **non-relativistes** $\langle E_c \rangle \propto T_\nu(z) < m$
→ contribuent à la matière
- aujourd'hui $T_\nu^0 \sim 10^{-4}eV \rightarrow$ **au moins 2 neutrinos non-relativistes**

Le fond diffus cosmologique est sensible à:

- la somme des masses $M_\nu = \sum_i m_\nu$ (dégénérées)
- densité d'énergie ν -like au découplage
 $\rho_\nu \propto N_{\text{eff}} \rho_\gamma$ (si neutrino standard 3.046)

Que dire avec Planck?

M_ν :

1. effet dominant sur le potentiel du **lensing**
2. affecte l'échelle angulaire du premier pic
(dégénérescence géométrique) \Rightarrow *brisée* en ajoutant la **BAO**

N_{eff} :

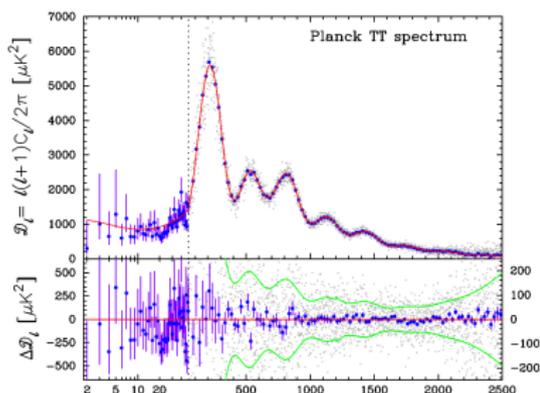
si densité de radiation \uparrow , le taux de expansion \uparrow

1. réduction de \mathcal{C}_ℓ à grand ℓ
2. contraintes peuvent être *améliorées* avec les mesures de distance plus récentes: **BAO**

Des données Planck à l'estimation des paramètres

en résumé, on a:

1. un modèle à tester Λ CDM (+ M_ν , N_{eff})
2. les données Planck +WP (WMAP polar),
+ High- ℓ (ACT, SPT) (+ *Lensing*, *BAO*)



à partir de $\mathcal{L}_{\text{Planck}}(\mathcal{C}_l, \psi)$

on cherche:

les valeurs des paramètres

$\theta = (\Omega \rightarrow \mathcal{C}_l, \psi)$

(*cosmologiques* et
nuisances) [~ 40]

qui s'accordent le mieux à nos
données

Le code de Boltzmann utilisé est CLASS (<http://class-code.net/>)

Des données Planck à l'estimation des paramètres

en résumé, on a:

1. un modèle à tester Λ CDM ($+M_\nu, N_{\text{eff}}$)
2. les données Planck + WP (WMAP polar),
+ High- ℓ (ACT, SPT) ($+ \text{Lensing}, \text{BAO}$)



à partir de $\mathcal{L}_{\text{Planck}}(\mathcal{C}_l, \psi)$

on cherche:

les valeurs des paramètres

$$\theta = (\Omega \rightarrow \mathcal{C}_l, \psi)$$

(cosmologiques et nuisances) [~ 40]

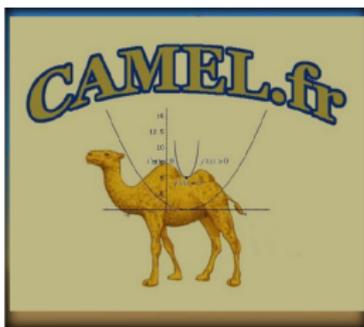
qui s'accordent le mieux à nos données

Le code de Boltzmann utilisé est CLASS (<http://class-code.net/>)

Des données Planck à l'estimation des paramètres

en résumé, on a:

1. un modèle à tester Λ CDM (+ M_ν , N_{eff})
2. les données Planck +WP (WMAP polar),
+ High- ℓ (ACT, SPT) (+ *Lensing*, BAO)



à partir de $\mathcal{L}_{\text{Planck}}(\mathcal{C}_l, \psi)$

on cherche:

les valeurs des paramètres

$$\theta = (\Omega \rightarrow \mathcal{C}_l, \psi)$$

(cosmologiques et nuisances) [~ 40]

qui s'accordent le mieux à nos données

Méthodologie

La manière Bayésienne:

- on effectue un *échantillonnage* de la distribution *a-posteriori* avec des **Markov Chain Monte Carlo**
- on construit les histo 1, 2D à partir des chaînes (marginalisation)
- **omniprésent dans la cosmologie!**

La manière frequentiste:

- **Profile-likelihood** comme dans la physique des particules.
- pas d'a priori ou effet de projection
- **approche complémentaire, il contribue à l'interprétation des résultats**

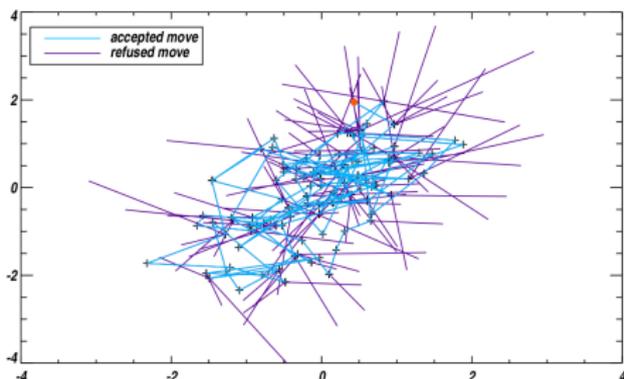
MCMC: algorithme de base

pour effectuer un *échantillonnage* de P

Metropolis-Hasting:

De X_t à X_{t+1} :

- tirer $Y \sim q(\cdot|X_t)$
([proposition](#)).
- accepter candidate avec prob. $\frac{P(Y)q(X_t|Y)}{P(X_t)q(Y|X_t)}$
- si accepte: $X_{t+1} = Y$,
au contraire: $X_{t+1} = X_t$.



Choix classique pour q : $\mathcal{N}(X_t, \sigma)$ (avec σ fixe et à tuner)

avec \mathcal{L}_{Planck} trop lent ($\sim 1-2$ semaine)

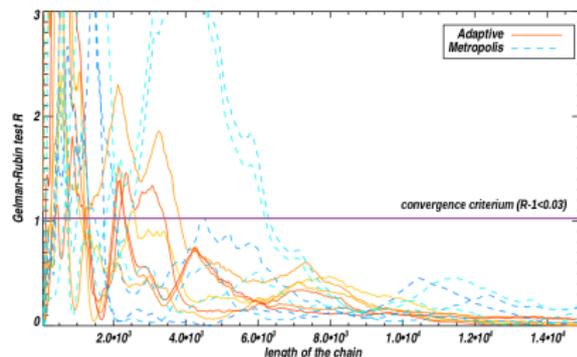
nécessité de méthodes pour [accélérer la convergence](#)

MCMC: algorithme adaptatif

[Haario et al., 2001]: auto-apprentissage de la *proposition*

- $q(\cdot|X_t) = \mathcal{N}(X_t, c\sigma(X_0, \dots, X_t))$
- plus besoin d'une connaissance a priori de σ
- le début rapide de l'adaptation diminue le nombre d'évaluations de fonction nécessaires
- résultats en 2/3 jours

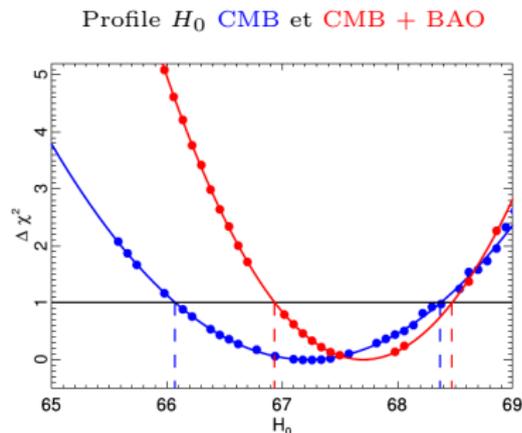
Example: Test de Gelman-Rubin



Un autre moyen pour l'estimation des paramètres

Profile-Likelihood:

- MLE (χ^2_{min}) maximum global de vraisemblance
- $\mathcal{L}_p(\theta) = \mathcal{L}(\theta, \hat{\psi}(\theta))$
avec $\hat{\psi}(\theta)$ le ψ qui maximise \mathcal{L} à θ fixe.
- minimum $\chi^2(\theta) = -2\ln\mathcal{L}_p(\theta)$ coïncide avec χ^2_{min}
- 68% CL intervalles immédiats

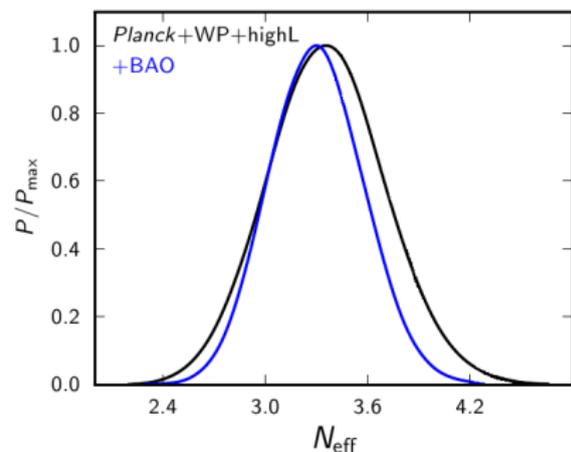


N_{eff}

Resultats sur N_{eff}

- $N_{\text{eff}} = 3.36 \pm 0.34$
(*Planck + WP + HighL*)
- avec des données BAO la
contrainte est resserrée
 $N_{\text{eff}} = 3.30 \pm 0.27$
(+BAO)

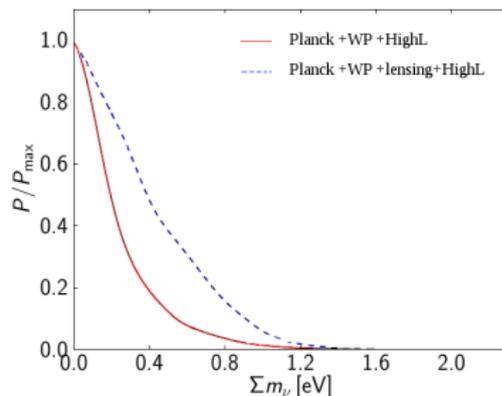
**aucune indication de
nouvelle physique!**



M_ν

Resultats sur M_ν (MCMC)

- $M_\nu < 0.66\text{eV}$
(95%;
Planck + WP + HighL)
- *+lensing*
 $M_\nu < 0.85\text{eV}$ (???)

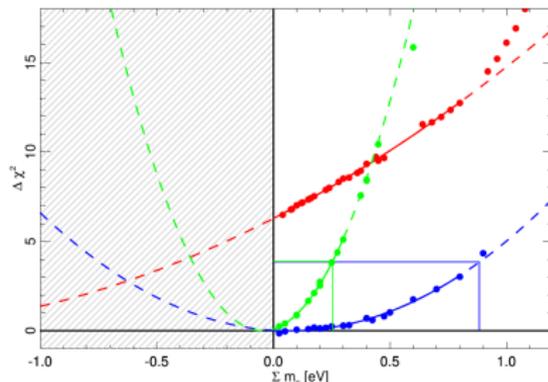


+BAO: $M_\nu < 0.26\text{eV}$

M_ν

Resultats sur M_ν (*prof* - \mathcal{L})

- **analyse fréquentiste:**
Planck seul donne résultat *artificiellement* bas
- mais +lensing $M_\nu < 0.85eV$ (!!!)
- on utilise Feldman-Cousins
- +BAO: $M_\nu < 0.26eV$



Planck+WP + lensing + BAO
Planck intermediate results. XVI. Profile likelihoods for cosmological parameters

arXiv:1311.1657

Développement à venir



- contraintes sur les **neutrinos stériles**
- passage aux *Full Mission Data*
- ajouter la **polarisation**:
 - $\mathcal{L}_{Planck}^{polar}(C_l, \psi)$ à construire
 - re-estimation des paramètres

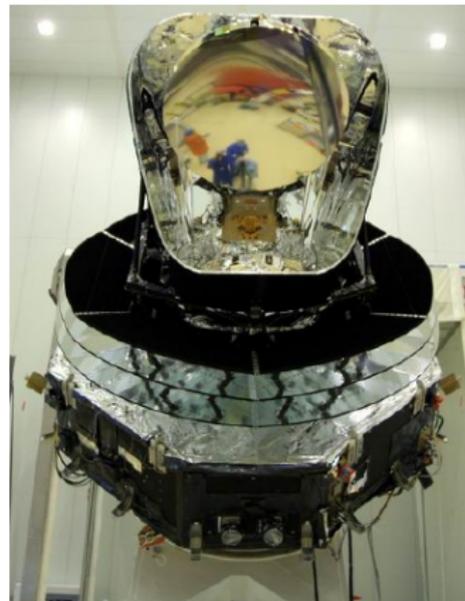


Le satellite Planck

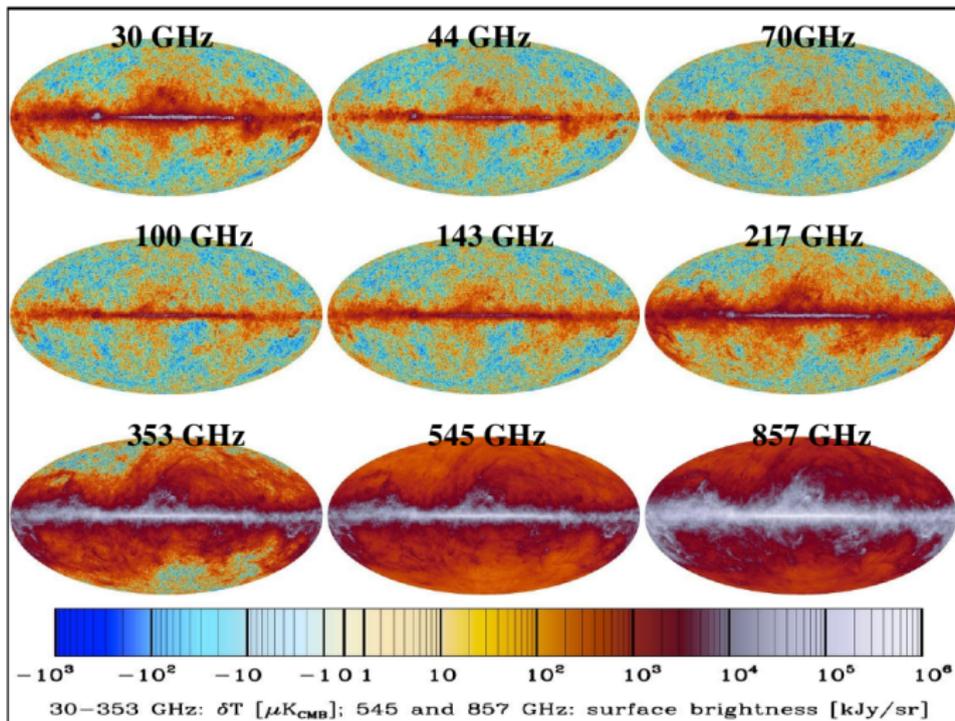
Durée prévue de la mission: 14 mois

En service: 29 mois!

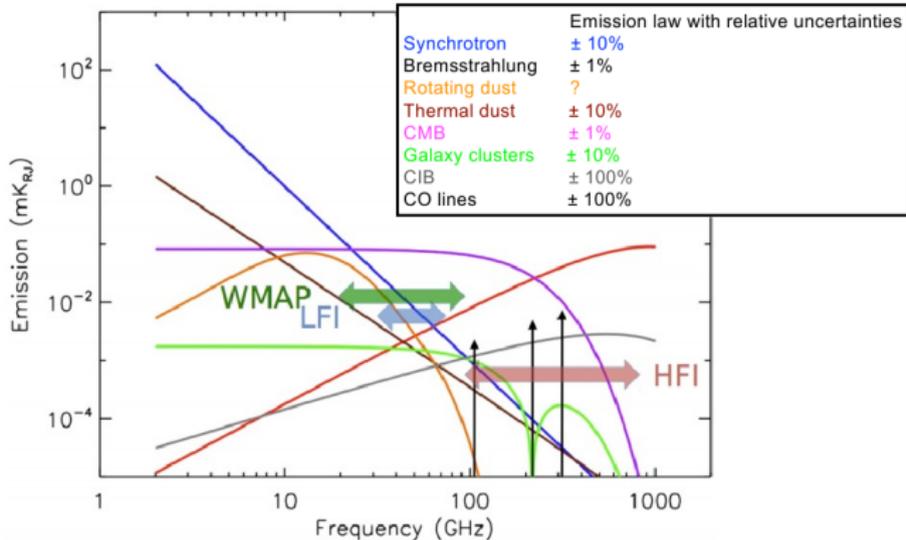
- Telescope: 1.5 m
- **LFI:**
22 radiomètres (30 - 70 GHz)
résolution 10 - 25 arcmin
(\sim WMAP)
- **HFI:**
52 bolomètres (100 - 857 GHz)
refroidi à 100 mK
résolution 5 - 9 arcmin.



9 bandes de fréquences



Les avant-plans



Les paramètres cosmologiques

Λ CDM la paramétrisation minimale concordant avec toutes les observables cosmologiques: (6 paramètres)

- univers plat, métrique Euclidienne ($\Omega_k = 0$)
- taux d'expansion H_0 ($h = \frac{H_0}{100}$), densité d'énergie $\Omega_b h^2$, $\Omega_c h^2$ (or $\Omega_\Lambda h^2$, θ_*)
- perturbations primordiales de la matière (scalaires, adiabatiques)
 $P_s(k) = A_s \left(\frac{k}{k_0}\right)^{n_s-1}$
- reionization: τ (ou z_{re})
- neutrinos standards de faible masse $M_\nu = \sum_{i=1}^3 m_i = 0.06 eV$
(limite des oscillations)
- M_ν et N_{eff} paramètres libres pour étudier les neutrinos

Les paramètres cosmologiques

Λ CDM la paramétrisation minimale concordant avec toutes les observables cosmologiques: (6 paramètres)

- univers plat, métrique Euclidienne ($\Omega_k = 0$)
- taux d'expansion H_0 ($h = \frac{H_0}{100}$), densité d'énergie $\Omega_b h^2$, $\Omega_c h^2$ (or $\Omega_\Lambda h^2$, θ_*)
- perturbations primordiales de la matière (scalaires, adiabatiques)
 $P_s(k) = A_s \left(\frac{k}{k_0}\right)^{n_s-1}$
- reionization: τ (ou z_{re})
- neutrinos standards de faible masse $M_\nu = \sum_{i=1}^3 m_i = 0.06 eV$
(limite des oscillations)
- M_ν et N_{eff} paramètres libres pour étudier les neutrinos

Le spectre de puissance angulaire

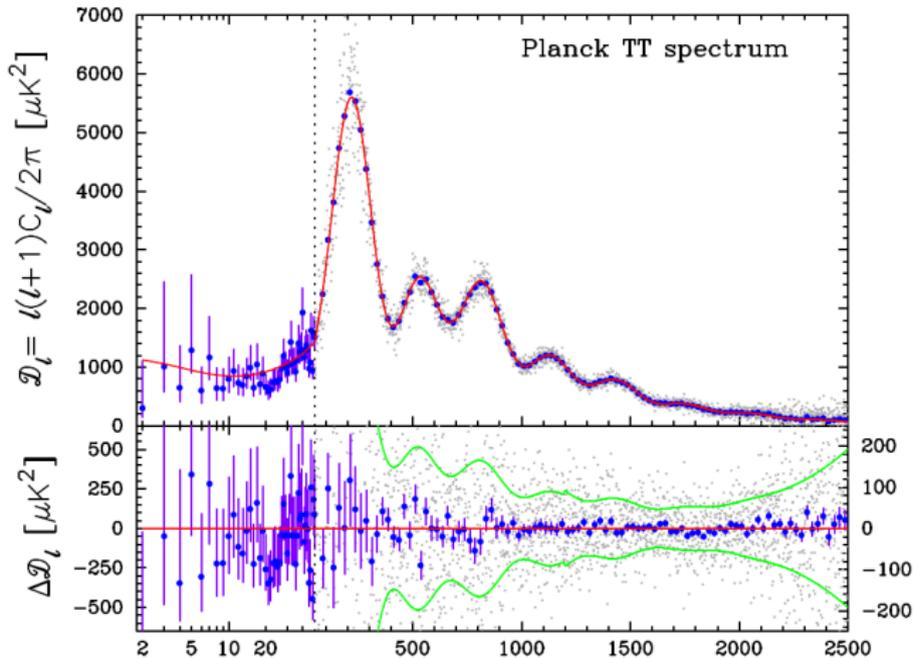
$$\frac{\Delta T}{T} = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_m^{TT} Y_{\ell m} \Rightarrow \mathcal{C}_\ell^T = \langle a_{\ell m}^T a_{\ell m}^{T*} \rangle$$

Les anisotropies sont distribuées de façon gaussienne sur le ciel:
les \mathcal{C}_ℓ^T contiennent toute l'information!

en fait: $a_{\ell m} \sim \mathcal{N}(0, \mathcal{C}_\ell)$ (même variance pour un ℓ donné)

mais: pour un ℓ donné $2\ell + 1$ $a_{\ell m} \rightarrow$ incertitude fondamentale
variance cosmique (plus prononcée a bas- ℓ)

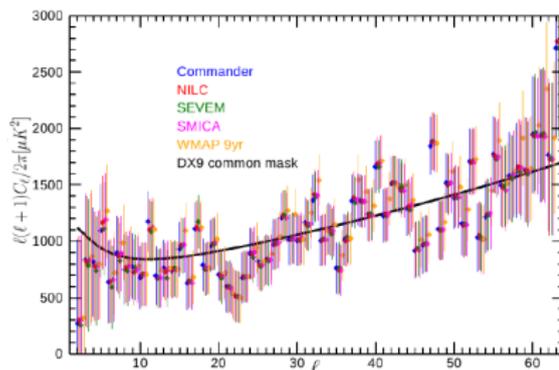
Des données Planck à l'estimation des paramètres



Likelihood pour les grandes échelles

$\ell \in [2, 49]$:

pixel base likelihood

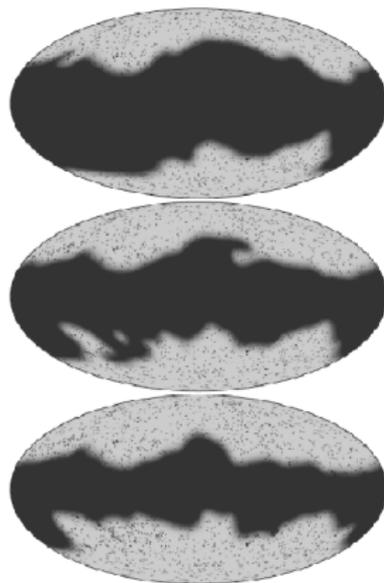


- Séparation des composants sur les cartes basse résolution
- toutes les méthodes de séparation des composants donnent le même résultat
- déjà observe par WMAP
- barres d'erreurs=variance cosmique
- n'influe pas sur les paramètres cosmologiques

Likelihood pour les petites échelles

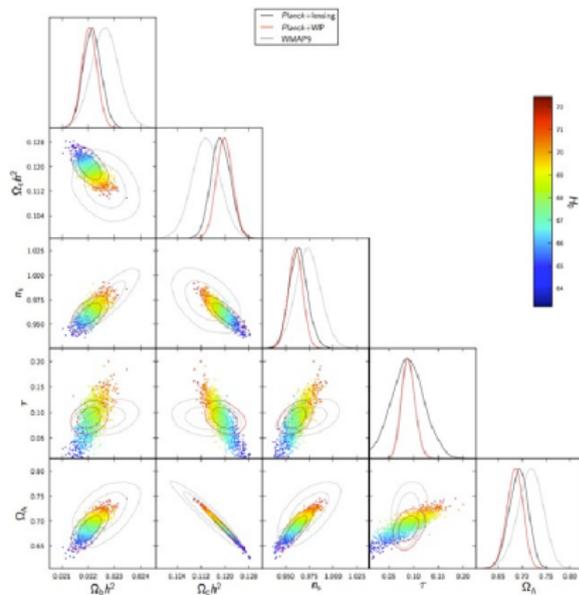
$$\ell \in [50, 2500]$$

- résolution spatiale essentielle
→ HFI: 100, 143, 217 GHz
- fond essentiel: poussière galactique
- stratégie de masquage
- spectres croisés



Premiers résultats de Planck

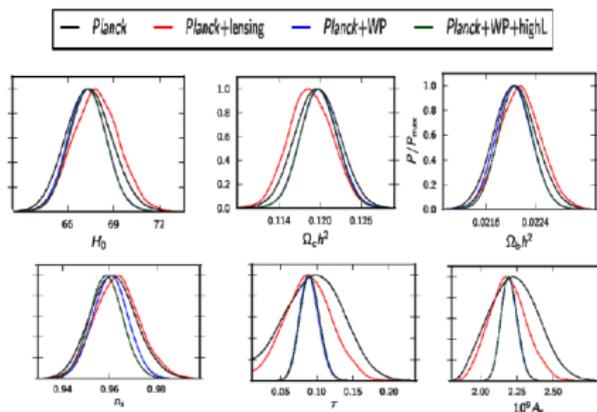
- $\sim 3\%$ désaccord avec WMAP
- Y a-t-il quelque chose a bas ℓ ?
- H_0 plus petite que attendu (Ω_{cdm} plus grand)
- $n_s < 1 \rightarrow$ contraintes sur inflation
- l'univers est plat $< \%$



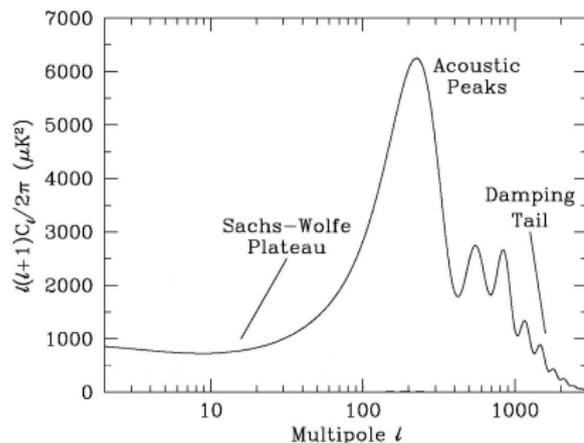
Planck +.. sur Λ CDM

- **WP**:Polarisation de WMAP (TE, EE a bas ℓ) Brise la dégénérescence $\tau - A_s$.
- **HighL**:SPT/ACT pour $\ell \in [2000, 2500]$ avant-plans (CIB, PS, etc)

$$2\theta_* = 1.19345 \pm 0.00076 \text{ (0.1\%)}$$



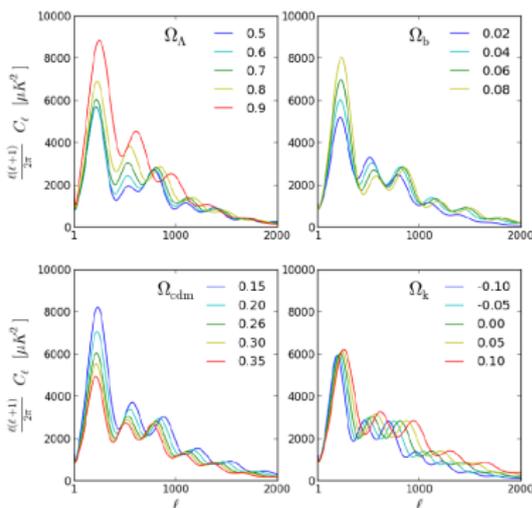
Que se passe-t-il se passait avant le découplage?



- **le plateau Sachs-Wolf** : échelles pas en contact causal avant découplage.
Fluctuations invariantes d'échelle \rightarrow spectre plat
- **les pics acoustiques**: la gravité tire, la radiation pousse
- **amortissement de Silk**: la diffusion résiduelle des photons empêche la formation des structures à petites échelles

Sensible à la cosmologie!

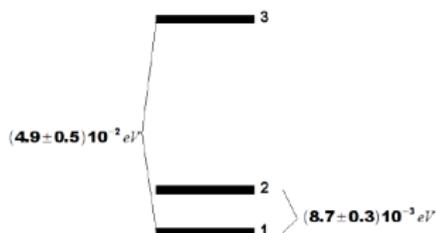
- Ω_Λ et Ω_k changent D_A de la recombinaison décalant la localisation angulaire des pics
- Ω_{cdm} augmente le contenu total en matière (avec Ω_b fixe).
Diminution de l'amplitude des pics car il y a moins des pression de radiation



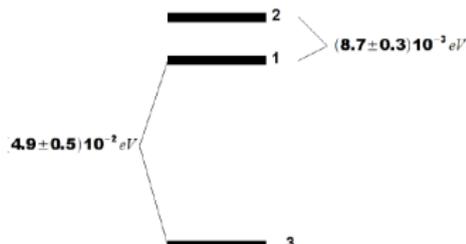
Hierarchie

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

Hierarchie Normale



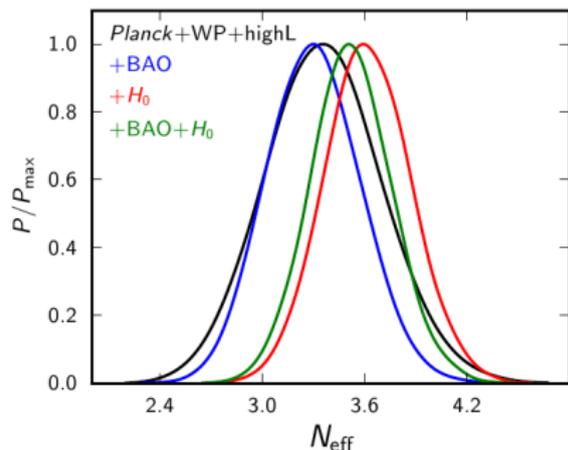
Hierarchie Inverse



1. pas d'échelle absolue, mais limite inférieure : $m_1 = 0 \implies m_\Sigma \gtrsim 0.05 \text{ eV}$
2. différences très faibles : quasi "degeneres" si $m_1 \gg 0.05 \text{ eV}$

Résultats sur N_{eff}

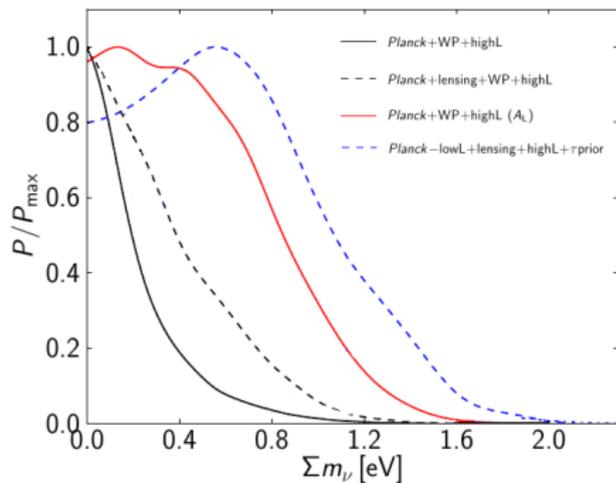
- $N_{eff} = 3.36^{+0.68}_{-0.64}$
(95%;
Planck + WP + Highℓ)
- avec des données BAO la
contrainte est resserré
 $N_{eff} = 3.30^{+0.54}_{-0.51}$
(95%; +BAO)
- tension H_0 vs CMB+BAO
soulagée au prix d'un
supplément de physique des
neutrinos ($N_{eff} = 3.62^{+0.50}_{-0.48}$)
mais **pas de préférence**
marquée



Compatible avec 3 espèces!

Résultats sur M_ν (MCMC)

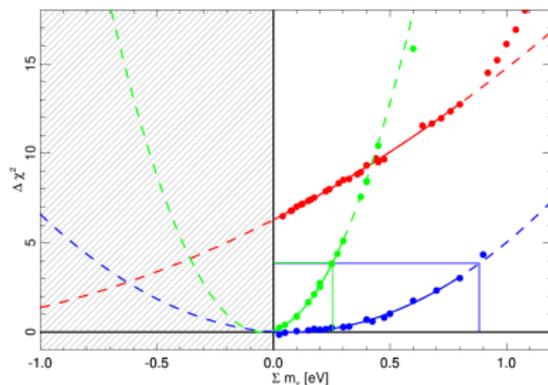
- $M_\nu < 0.66 eV$
(95%;
Planck + WP + High ℓ)
- **sans lensing** (A_L) on
retrouve \sim WMAP
- **+lensing**
 $M_\nu < 0.85 eV$ (???)
- **le lensing tire le best-fit loin
de zero**
- **+BAO**: $M_\nu < 0.23 eV$



Résultats sur M_ν (CAMEL)

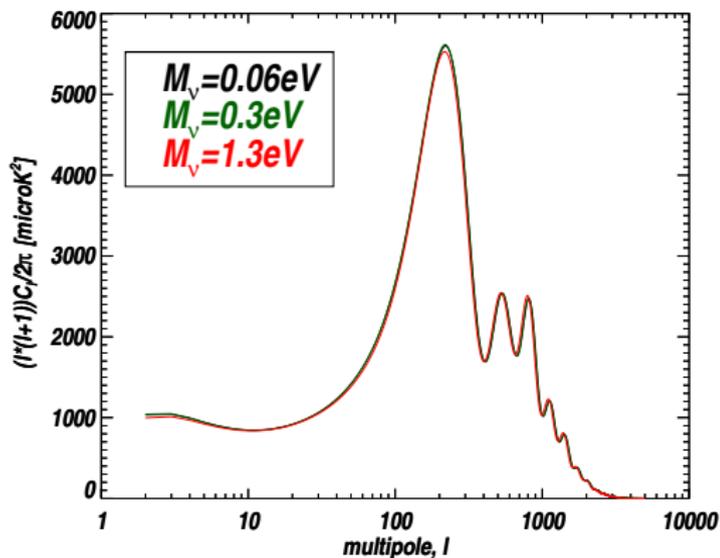
- on utilise **Feldman-Cousins**
- naïvement en ajoutant le lensing on s'attend à ce que la limite diminue
- mais *+lensing* $M_\nu < 0.85\text{eV}$ (!!!)
- résultat associées à la limite physique $M_\nu > 0$
- sans l'aide du lensing on était **tiré vers résultats négatif non physique**

Avec lensing on retrouve un résultat fréquentiste cohérent ↓



Que a dire avec Planck?

effet direct de M_ν dans le CMB:

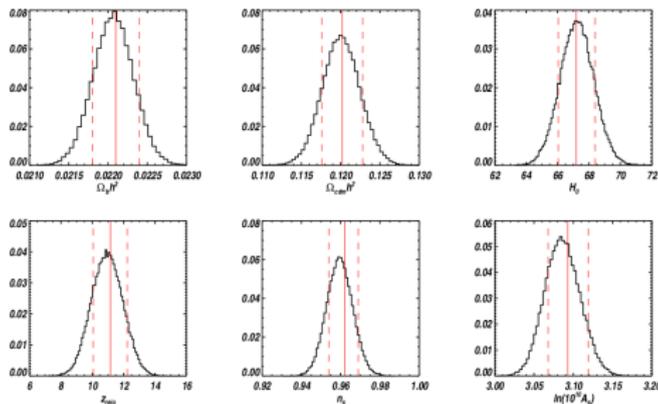


Resultats & Comparaison

	Camel	MCMC
$\Omega_b h^2$	$0.0221^{+0.0003}_{-0.0003}$	$0.0221^{+0.0003}_{-0.0003}$
$\Omega_{\text{cdm}} h^2$	$0.1202^{+0.0026}_{-0.0026}$	$0.1199^{+0.0027}_{-0.0027}$
H_0	$67.19^{+1.19}_{-1.15}$	$67.3^{+1.2}_{-1.2}$
n_s	$0.962^{+0.007}_{-0.008}$	$0.9603^{+0.0073}_{-0.0073}$
z_{reio}	$11.15^{+1.08}_{-1.09}$	$11.11^{+1.1}_{-1.1}$
$\ln(10^{10} A_s)$	$3.093^{+0.026}_{-0.025}$	$3.089^{+0.024}_{-0.027}$

Resultats & Comparaison

Planck+WP: 1D-posterior *vs.* $MLE \pm 1\sigma$



CMB lensing

- les limites sur M_ν dépendent 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 (max $z \sim 5$)

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

- déflexion $\sim 2.5 arcmin$ a la limite de la résolution de Planck.
- on s'intéresse au spectre de puissance de ϕ .

Feldman-Cousins (1998)

- construction d'un intervalle fréquentiste
- prescription basée sur le rapport de Likelihood \rightarrow tabulée pour la gaussienne
- découplage de la probabilité du sample de la construction de l'intervalle
- prend en compte la limite physique

