

Sonder la masse des neutrinos



avec
l'effet de lentille gravitationnelle sur le CMB

Laurence Perotto
LAL Orsay

Le séminaire interne du LAL

La problématique

- **Expériences d'oscillation** → **au moins 2 espèces massives**

$$\Delta m_{\text{atm}}^2 = \Delta m_{32}^2 = (2.4_{-0.6}^{+0.5}) \times 10^{-3} \text{ eV}^2(2\sigma)$$
$$\Delta m_{\text{sun}}^2 = \Delta m_{21}^2 = (8.0_{-0.6}^{+0.7}) \times 10^{-5} \text{ eV}^2(2\sigma)$$

- **Bonnes contraintes sur la limite inférieure :**

$$\left\{ M_{\nu} = \sum_{\text{espèces}} m_{\nu} \right\} \geq \begin{cases} 0.1 \text{ eV} & (\text{IH}) \\ 0.06 \text{ eV} & (\text{NH}) \end{cases}$$

- **Faibles contraintes sur la limite supérieure**

→ mesurer l'échelle absolue de masse : un domaine de recherche actif

- Contraindre la masse des neutrinos avec la cosmologie :
 - ➔ Pourquoi?
 - ➔ Comment?
 - ➔ Quelles contraintes?

- L'effet de lentille gravitationnelle sur le CMB :
une sonde prometteuse

- Impact de l'extraction des lentilles sur les contraintes sur M_ν :
une étude prospective pour PLANCK et post-PLANCK

Pourquoi sonder la masse des neutrinos avec la Cosmologie?

Pour le physicien des particules :

➔ contraintes compétitives et complémentaires des expériences terrestres

Pourquoi sonder la masse des neutrinos avec la Cosmologie?

Les contraintes actuelles :

<p>Désintégration β du tritium</p> ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$	$\left(\sum_i U_{ei} ^2 m_i^2 \right)^{1/2}$	<p>< 2.2 eV</p> <p>Mainz-Troitsk</p>
<p>Double désintégration β sans neutrinos</p> $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^-$	$\left \sum_i U_{ei}^2 m_i \right $	<p>< 0.3 - 1.2 eV</p> <p>${}^{76}\text{Ge}$</p>
<p>Cosmologie</p>	$\sim \sum_i m_i$	<p>< 0.3 - 2 eV</p> <p>CMB + galaxies</p>

Pourquoi sonder la masse des neutrinos avec la Cosmologie?

Pour le physicien des particules :

➔ contraintes compétitives et complémentaires des expériences terrestres

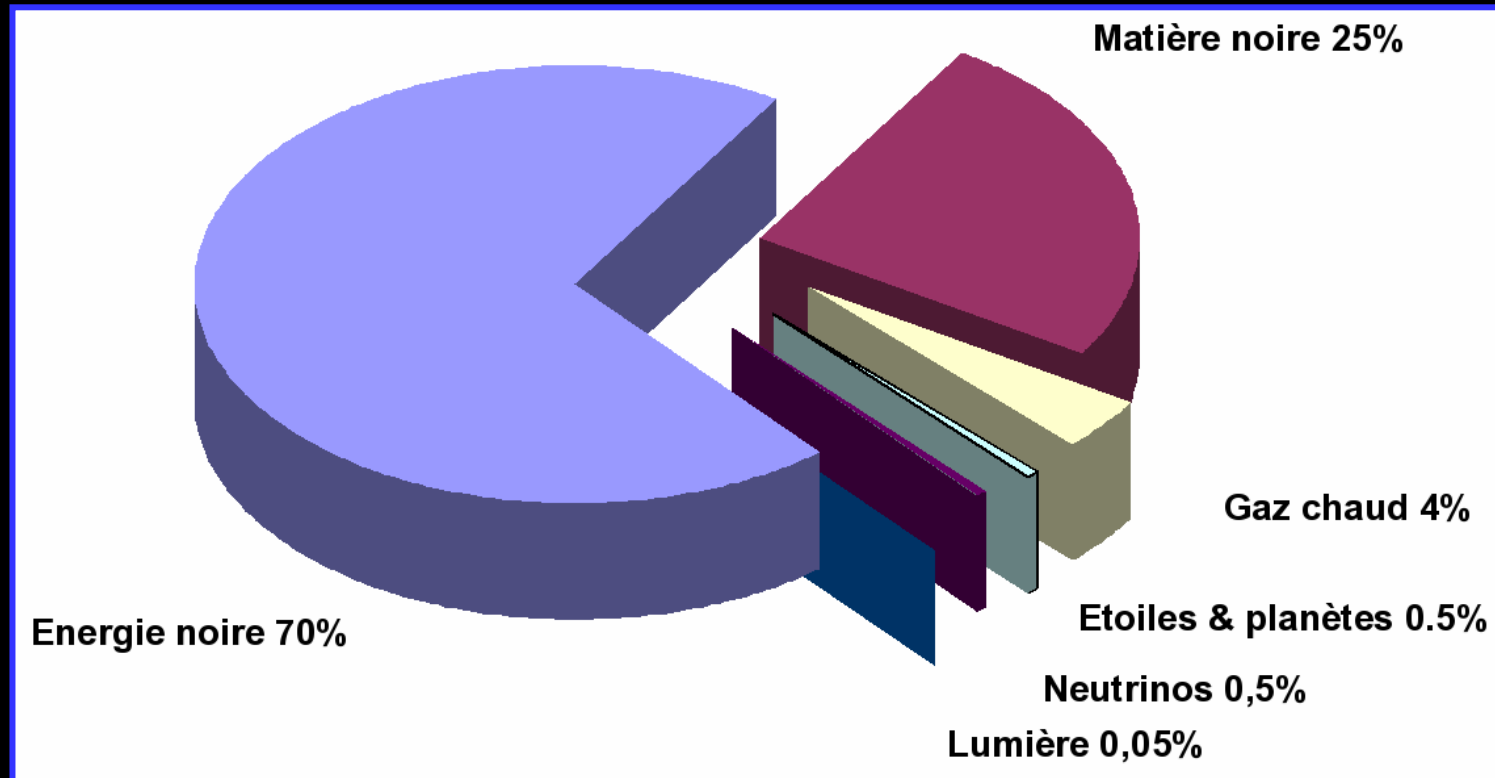
Pour le cosmologue :

➔ M_ν : un paramètre cosmologique à inclure dans le modèle minimal

Avec la prochaine génération de sonde cosmologique, M_ν devient un paramètre incontournable pour une bonne estimation des autres paramètres du modèle.

Les signatures des neutrinos en Cosmologie

I. Le fond diffus de neutrinos



$$\Omega_\nu = \frac{\rho_\nu}{\rho_c} = \frac{M_\nu}{93.14 h^2 \text{ eV}}$$

$$M_\nu = m_1 + m_2 + m_3$$

h : paramètre de Hubble

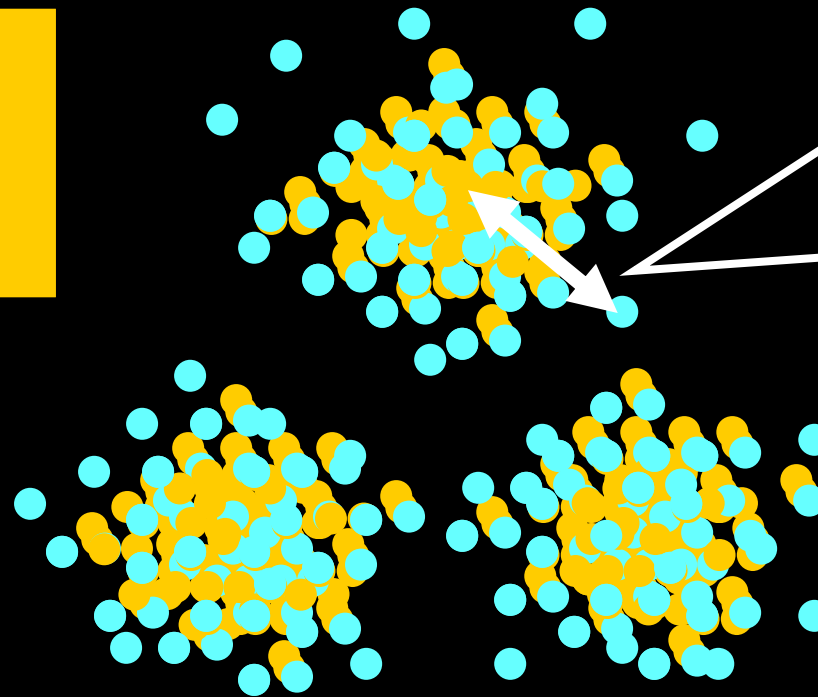
unité : $100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

Les signatures des neutrinos en cosmologie

II. La diffusion libre

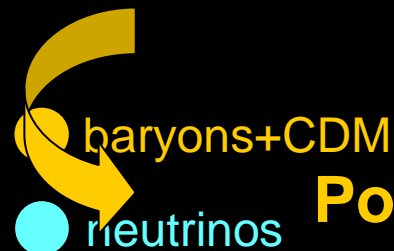
La signature la plus claire : l'effet de diffusion libre des neutrinos (*free-streaming*)

effondrement
gravitationnel
dans un Univers
en expansion



les neutrinos ne
s'effondrent pas sur
les structures plus
petites que leur
« longueur de
diffusion »

$$\lambda = \int v dt$$



baryons+CDM

neutrinos

Pour $(2\pi/k) < \lambda$,

la croissance des structures est supprimée.

Effet sur le spectre de puissance de la matière

Le contraste de densité :

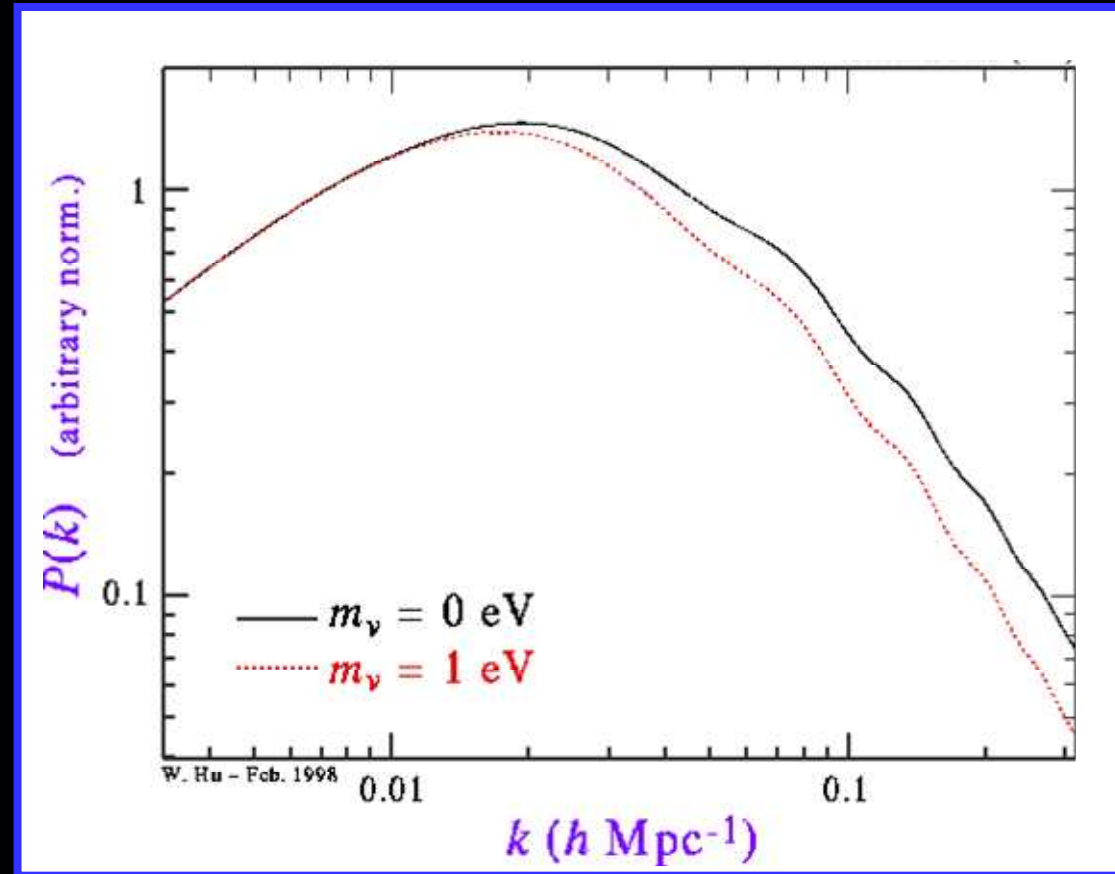
$$\delta(x) = \frac{\delta\rho(x)}{\bar{\rho}}$$

La fonction de corrélation à 2 points :

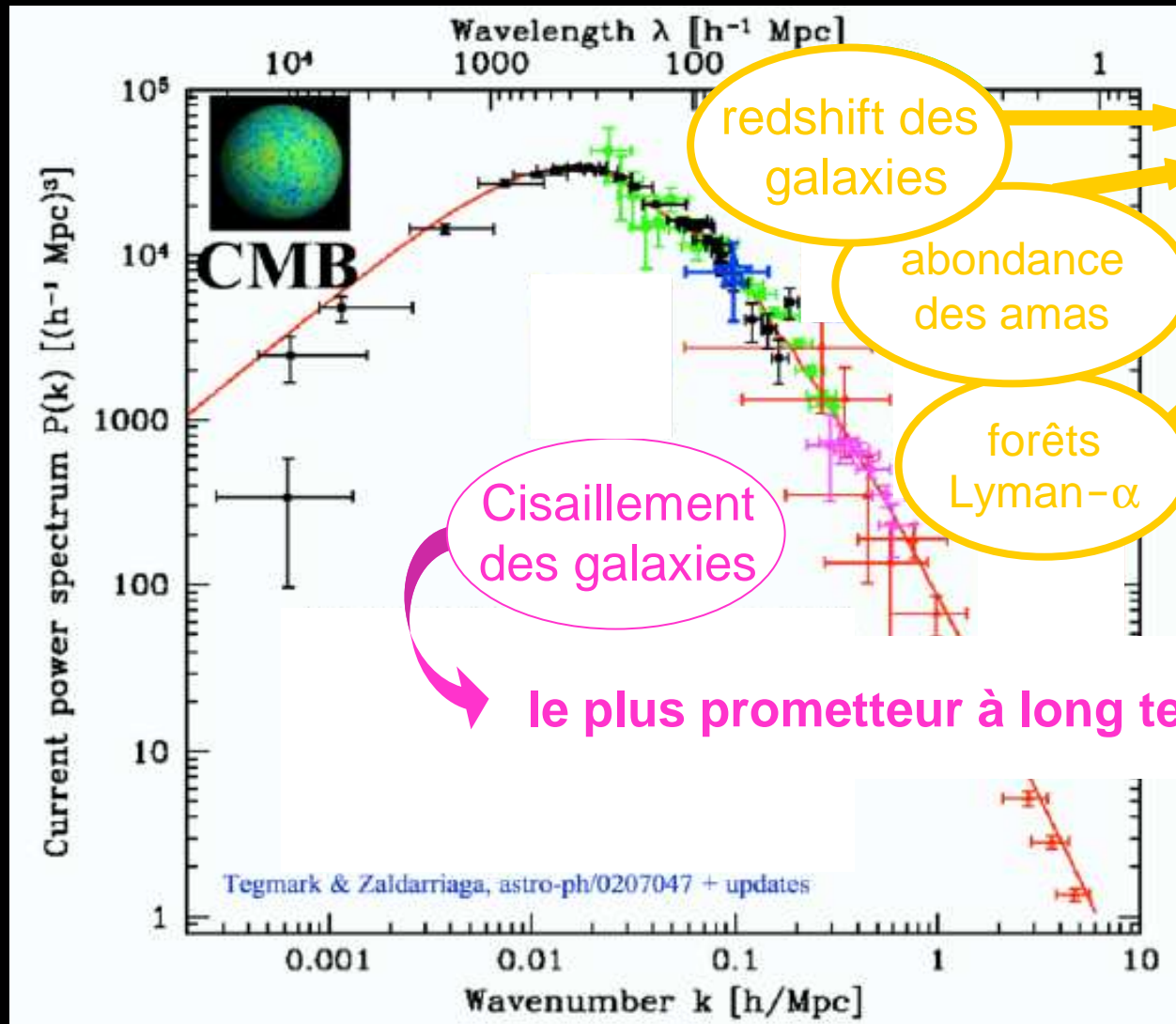
$$\langle \delta(x_1)\delta(x_2) \rangle$$

Le spectre de puissance de la matière :

$$\langle \delta(x_1)\delta(x_2) \rangle = \int \frac{d^3\mathbf{k}}{(2\pi)^3} e^{i\mathbf{k}(x_2-x_1)} P(\mathbf{k})$$



Les sondes actuelles des grandes structures



mesures indirectes de la masse

peuvent souffrir de biais et systématiques

le plus prometteur à long terme

Les contraintes actuelles issues de la cosmologie

Il n'existe pas de contrainte unique !

La contrainte que l'on obtient dépend du détail de l'analyse.

I. Le choix du modèle cosmologique nominal (*fiducial model*) :

Parameter	Meaning	Status
τ	Reionization optical depth	Not optional
ω_b	Baryon density	Not optional
ω_d	Dark matter density	Not optional
f_ν	Dark matter neutrino fraction	Well motivated
Ω_Λ	Dark energy density	Not optional
w	Dark energy equation of state	Worth testing
Ω_k	Spatial curvature	Worth testing
A_s	Scalar fluctuation amplitude	Not optional
n_s	Scalar spectral index	Well motivated
α	Running of spectral index	Worth testing
r	Tensor-to-scalar ratio	Well motivated
n_t	Tensor spectral index	Well motivated
b	Galaxy bias factor	Not optional

SDSS Coll, PRD 69 (2004) 103501

Les contraintes actuelles issues de la cosmologie

Il n'existe pas de contrainte unique !

La contrainte que l'on obtient dépend du détail de l'analyse.

II. Le choix des sondes cosmologiques :

	Σm_ν (eV) [95% CL]	Données
WMAP Coll., astro-ph/0603449 Fukugita et al, astro-ph/0605362 Kristiansen et al, astro-ph/0608017	1.7 – 2.3	WMAP3 autres CMB
WMAP Coll., astro-ph/0603449 Goobar et al, astro-ph/0602155	0.68 – 0.91	WMAP3 autres CMB 2dF/SDSS SNIa
Goobar et al, astro-ph/0602155 Seljak et al, astro-ph/0604335 Kristiansen et al, astro-ph/0608017	0.17 - 0.48	WMAP3 autres CMB 2dF/SDSS BAO Ly- α

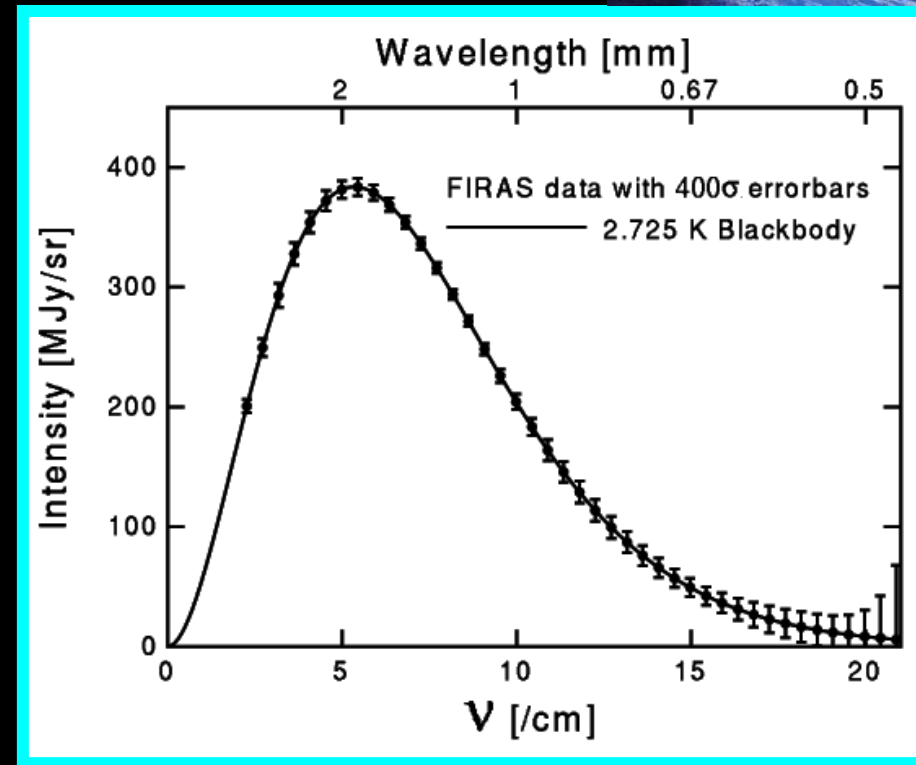
- Contraindre la masse des neutrinos avec la cosmologie :
 - ➔ Pourquoi?
 - ➔ Comment?
 - ➔ Quelles contraintes?
- L'effet de lentille gravitationnelle sur le CMB :
une sonde prometteuse
- Impact de l'extraction des lentilles sur les contraintes sur M_ν :
une étude prospective pour PLANCK et post-PLANCK

Le rayonnement cosmologique micro-onde



Origine : le **découplage**
300 000 ans après le Big Bang

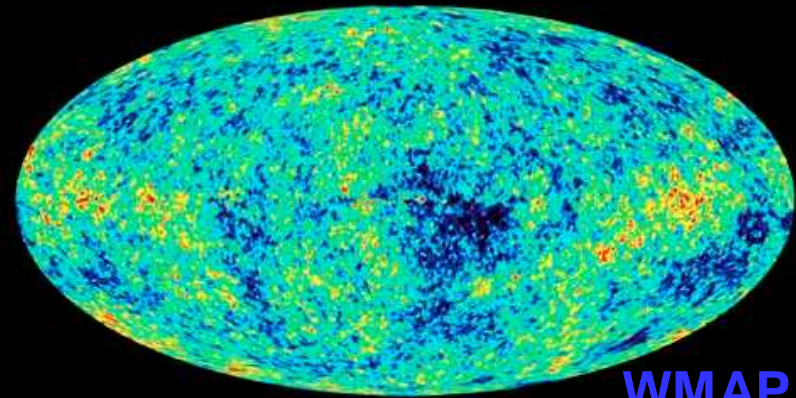
Rayonnement extrêmement
homogène à **2.725 ± 0.002 K**



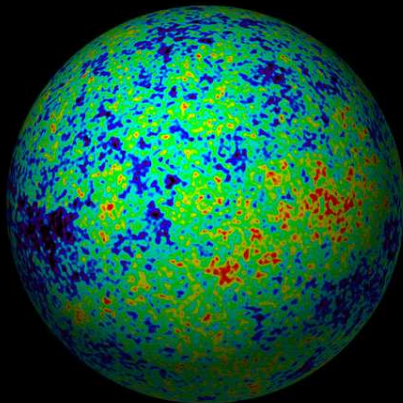
J. C. Mather et al. (1990)

Les anisotropies de température

Faibles anisotropies à 10^{-5}



WMAP
(2003)



Empreintes des **perturbations de la métrique**
au moment du découplage

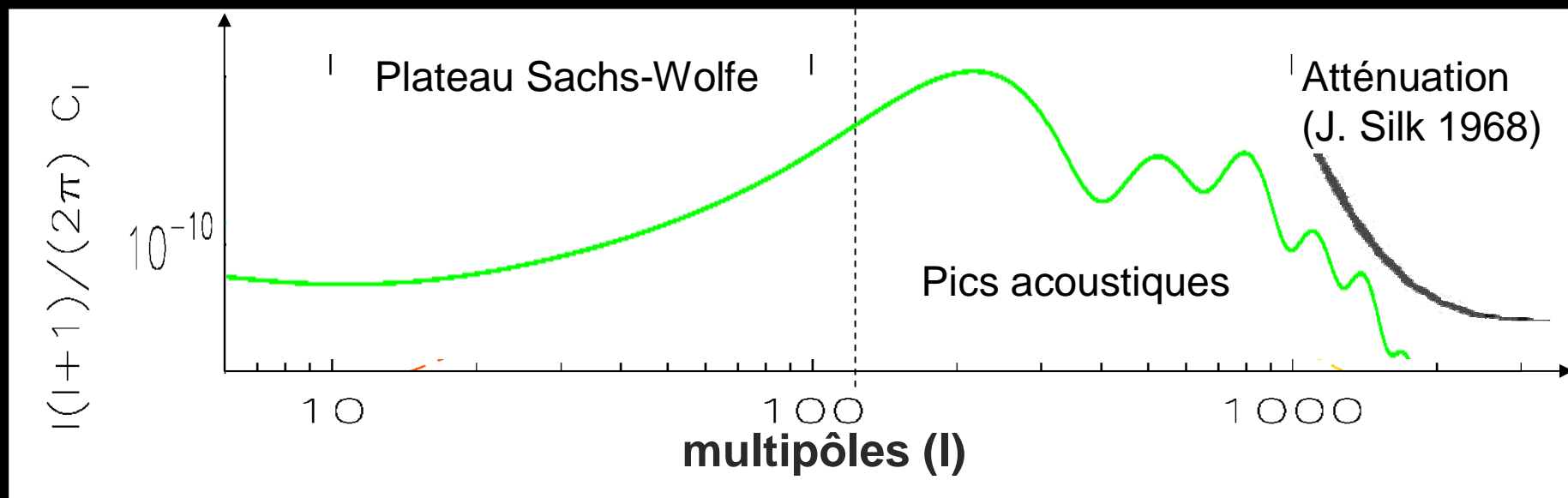
Le spectre angulaire de température

La fonction de corrélation à 2 points :

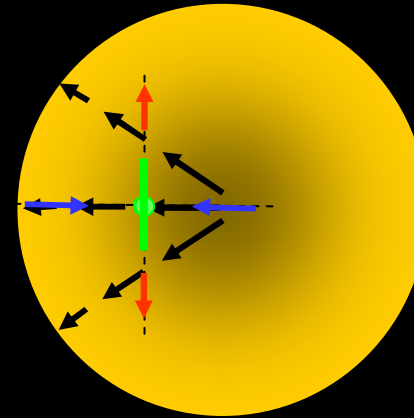
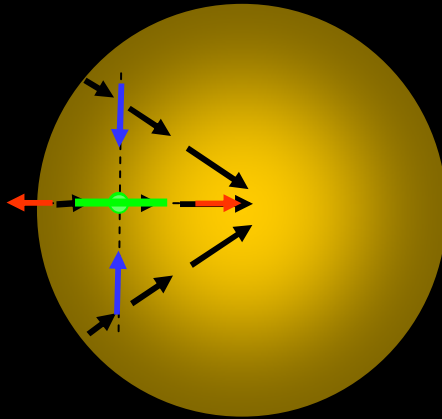
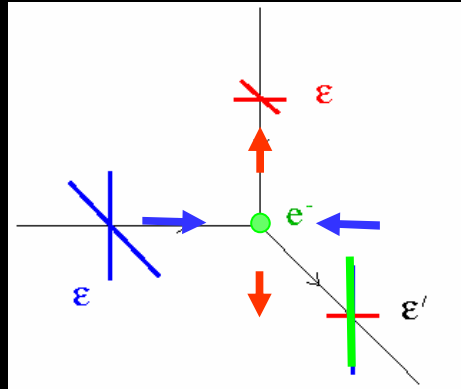
$$C^{\text{TT}}(\theta) \equiv \left\langle \frac{\Delta T}{T}(\hat{n}_1) \frac{\Delta T}{T}(\hat{n}_2) \right\rangle$$

Le spectre de puissance *angulaire* des anisotropies de température :

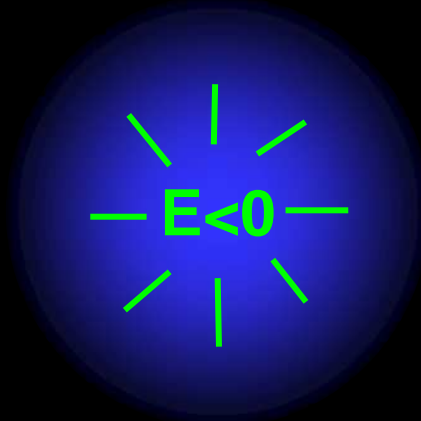
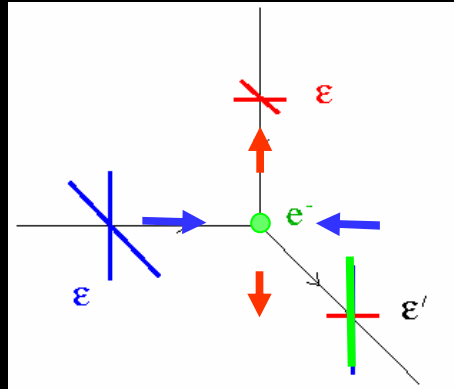
$$C^{\text{TT}}(\theta) = \sum_l \frac{2l+1}{4\pi} C_l^{\text{TT}} P_l(\cos \theta)$$



La polarisation du CMB



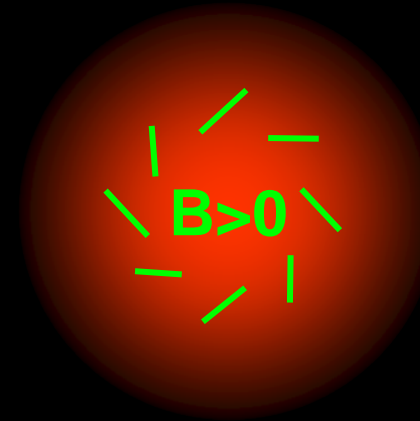
La polarisation du CMB



parité paire

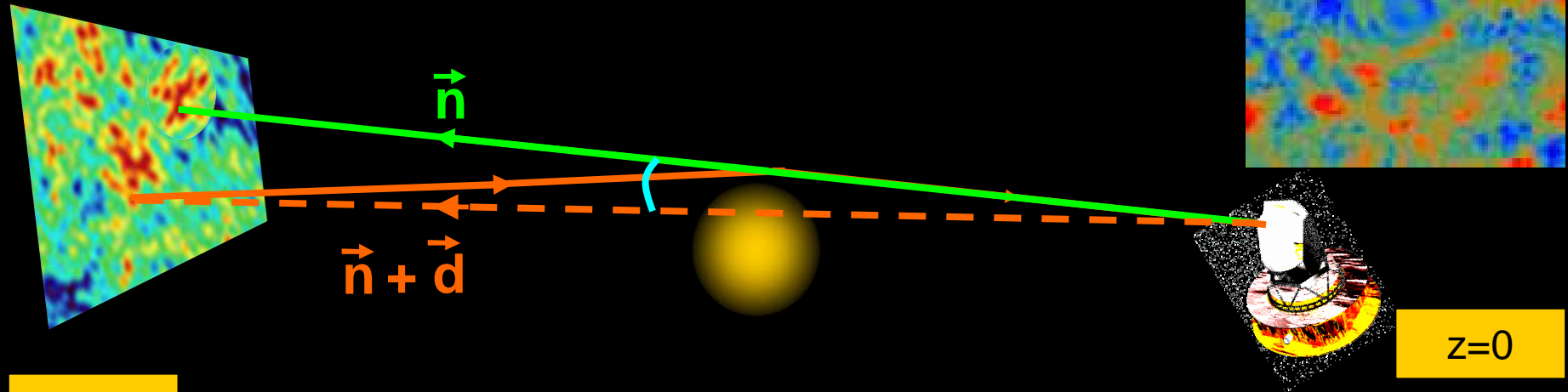


onde gravitationnelle



parité impaire

L'effet de lentille gravitationnelle



$z \sim 1100$

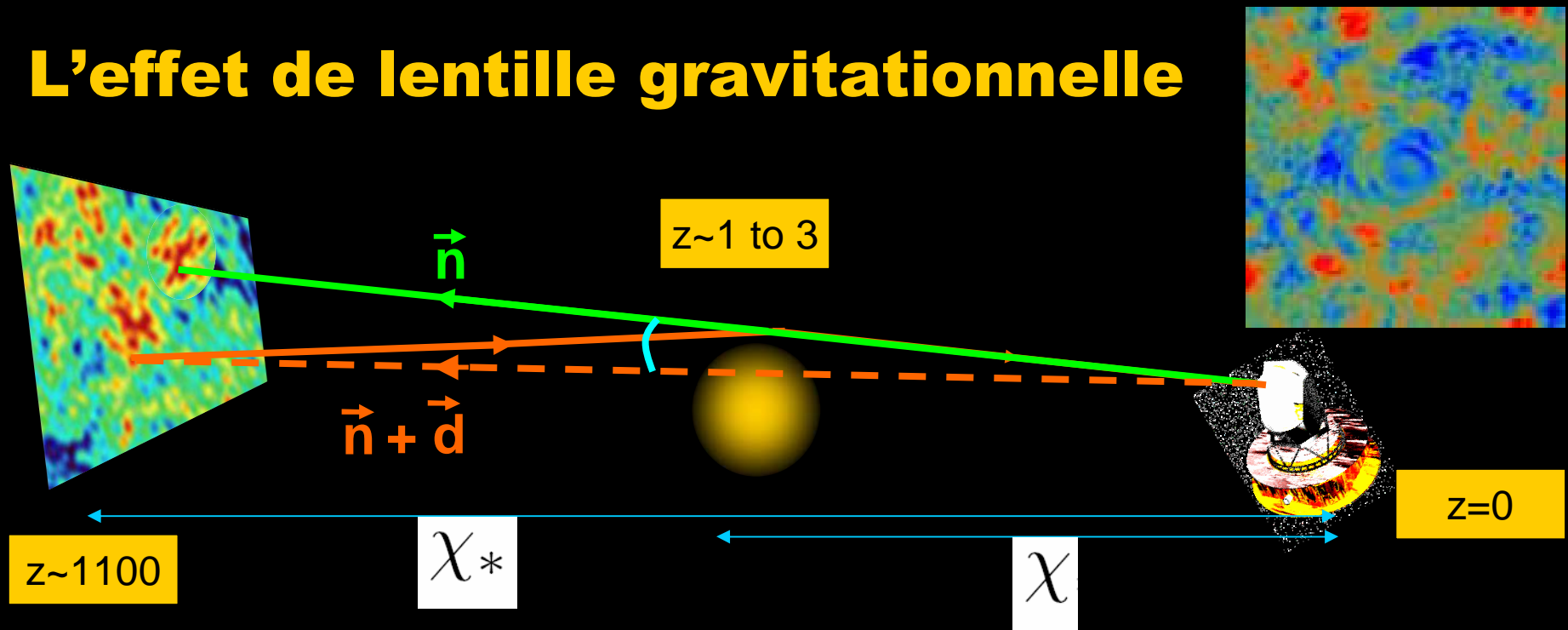
$z=0$

$$X(\vec{n}) = \tilde{X}(\vec{n} + \vec{d})$$

paramètres de Stokes

$$X = \{I, Q, U\}$$

L'effet de lentille gravitationnelle



angle de déflexion $d(\hat{n}) = \nabla_{\hat{n}}\phi(\hat{n})$

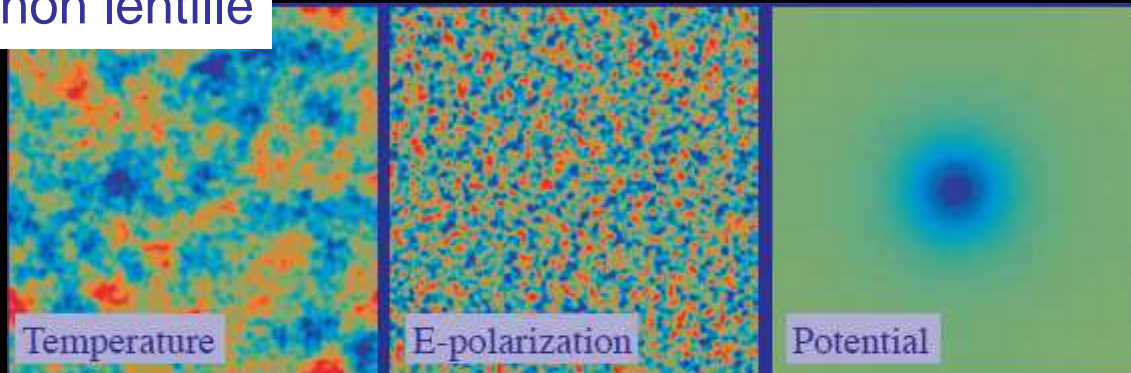
$$\phi(\hat{n}) \equiv -2 \int_0^{\chi_*} d\chi W^\phi(\chi) \Psi(\chi \hat{n}; \eta_0 - \chi), \quad W^\phi(\chi) = \frac{f_K(\chi_* - \chi)}{f_K(\chi_*) f_K(\chi)}$$

distance comobile

distance angulaire

Effet sur les cartes du CMB

non lentillé



lentillé

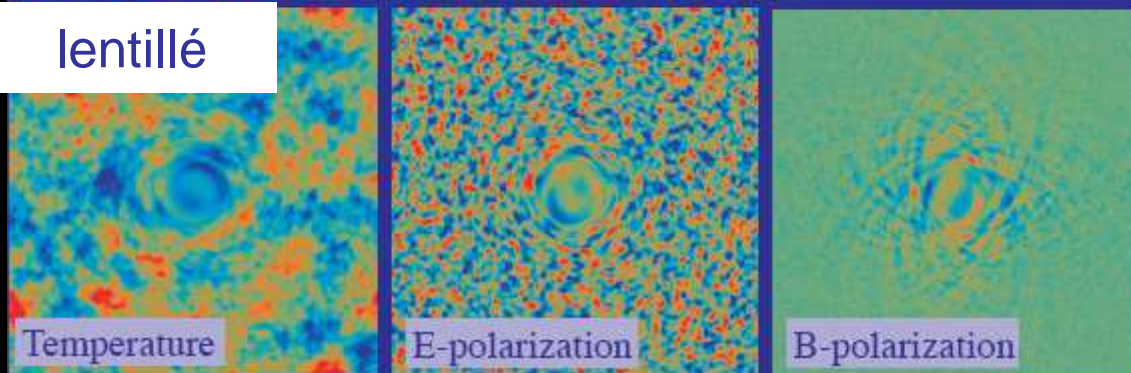


figure de Hu & Okamoto [astroph/0111606]

Corrélations supplémentaires entre :

- observables T, E, B
- modes de Fourier différents d'une même observable



A partir des cartes du CMB, une reconstruction statistique du potentiel gravitationnel est possible

Une méthode alternative avantageuse

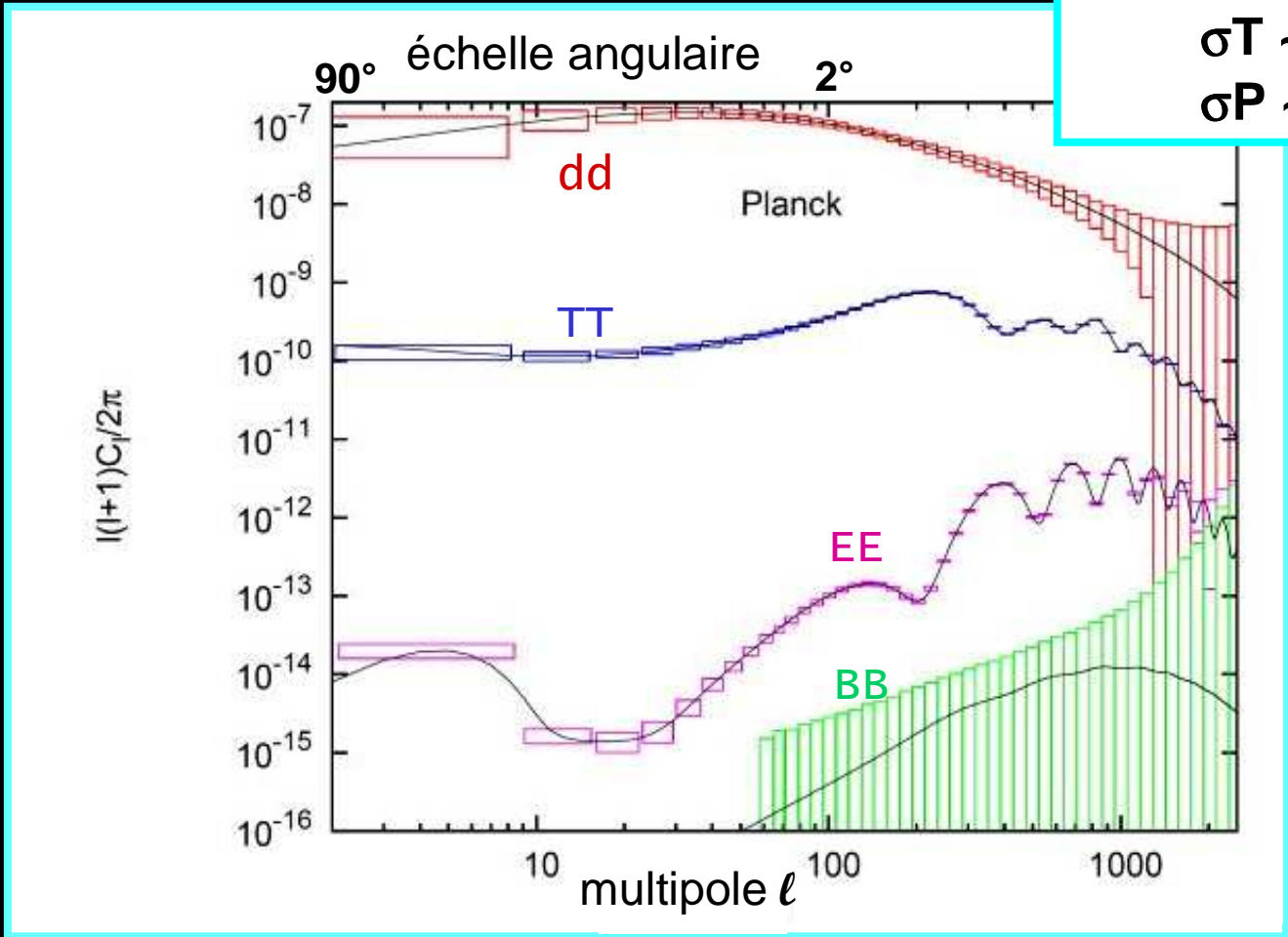
- effet gravitationnel : pas de problème de biais (light-to-mass bias)
- CMB = champ aléatoire : pas de problème de sélection
- structures dans le régime linéaire : bonne modélisation
- ne nécessite pas une expérience dédiée

- Contraindre la masse des neutrinos avec la cosmologie :
 - ➔ Pourquoi?
 - ➔ Comment?
 - ➔ Quelles contraintes?
- L'effet de lentille gravitationnelle sur le CMB :
une sonde prometteuse
- Impact de l'extraction des lentilles sur les contraintes sur M_ν :
une étude prospective pour PLANCK et post-PLANCK

Sonder la matière avec les futures expériences CMB

Prédiction de l'erreur à 1σ
sur la reconstruction des spectres angulaires:

Planck
FWHM ~ 7 arcmin
 $\sigma_T \sim 6 \mu\text{K}$
 $\sigma_P \sim 11 \mu\text{K}$



Déflexion
Temperature
mode E (curl-free)
mode B (gradient-free)

J. Lesgourgues, L. P., S. Pastor, M. Piat [Phys. Rev. D (2006)]

Sonder la matière avec les futures expériences CMB

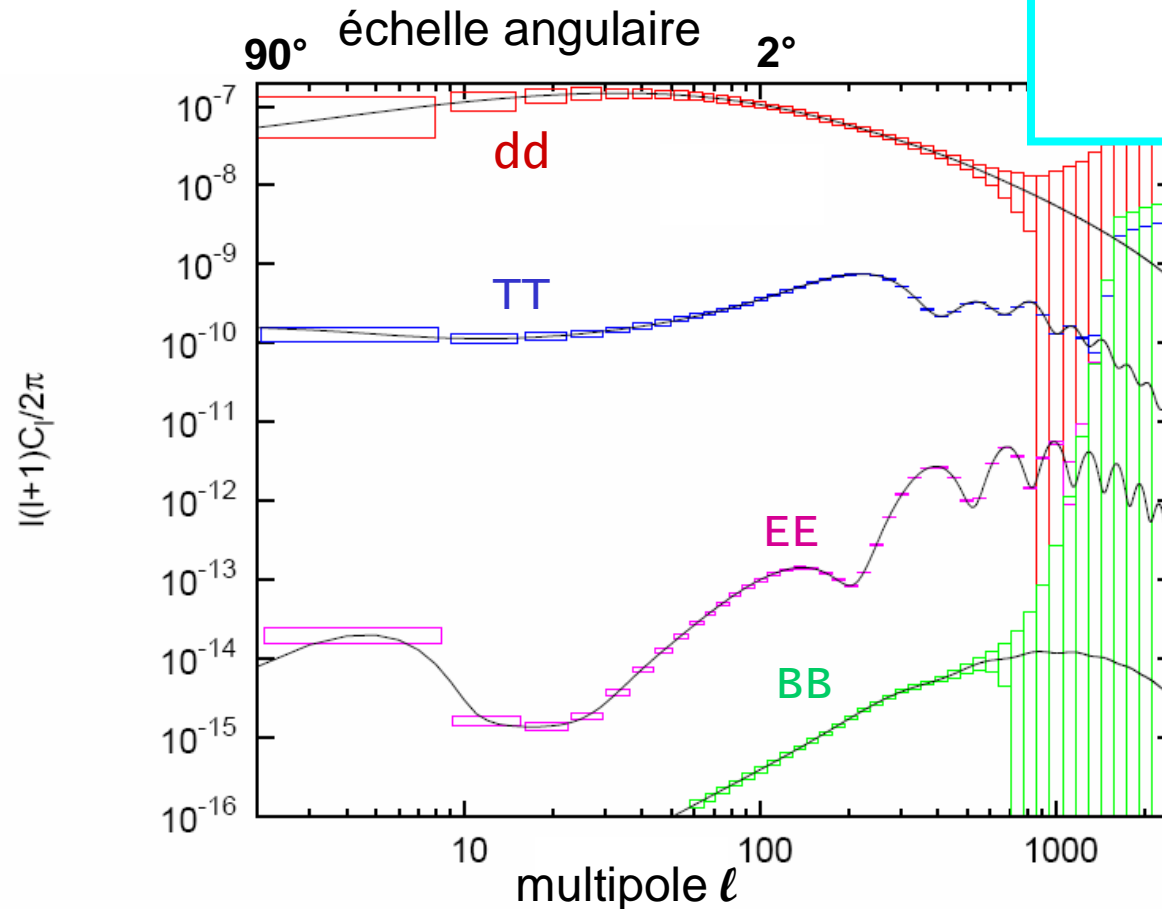
Prédiction de l'erreur à 1σ
sur la reconstruction des spectres angulaires:

« BPol-like »

FWHM ~ 30 arcmin

$\sigma T = 0.15 \mu\text{K}$

$\sigma P = 0.2 \mu\text{K}$



Déflexion

Temperature

mode E
(curl-free)

mode B
(gradient-free)

J. Lesgourgues, L. P., S. Pastor, M. Piat [Phys. Rev. D (2006)]

Sonder la matière avec les futures expériences CMB

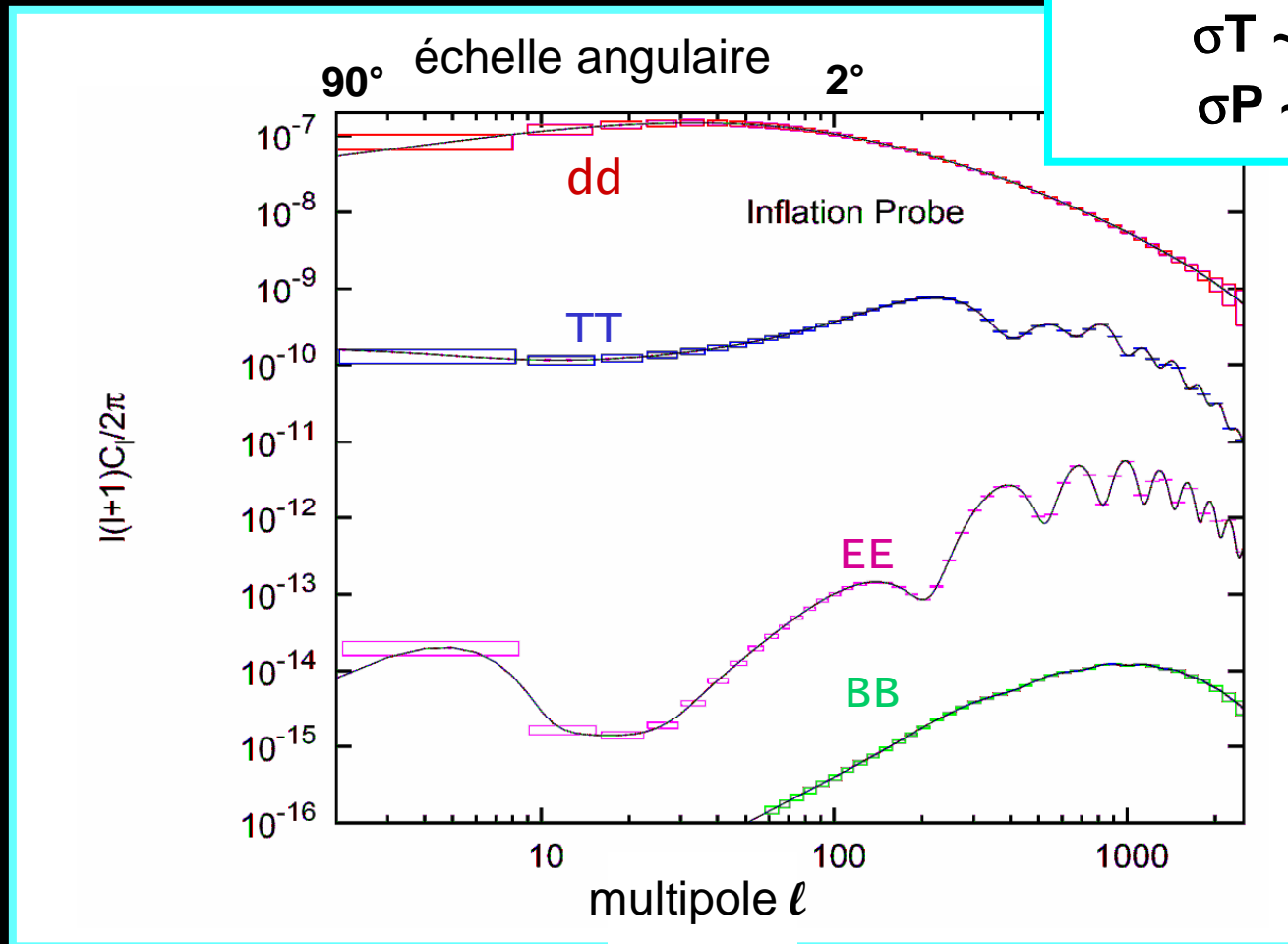
Prédiction de l'erreur à 1σ
sur la reconstruction des spectres angulaires:

« **lensing designed** »

FWHM ~ 3 arcmin

$\sigma T \sim 0.6 \mu\text{K}$

$\sigma P \sim 0.9 \mu\text{K}$



Déflexion

Temperature

**mode E
(curl-free)**

**mode B
(gradient-free)**

J. Lesgourgues, L. P., S. Pastor, M. Piat [Phys. Rev. D (2006)]

Prédiction des contraintes sur M_ν : la méthode

Une application de la méthode de Fisher

hypothèse : \mathcal{L} (paramètres) gaussien

Le choix du modèle nominal (*fiducial model*):

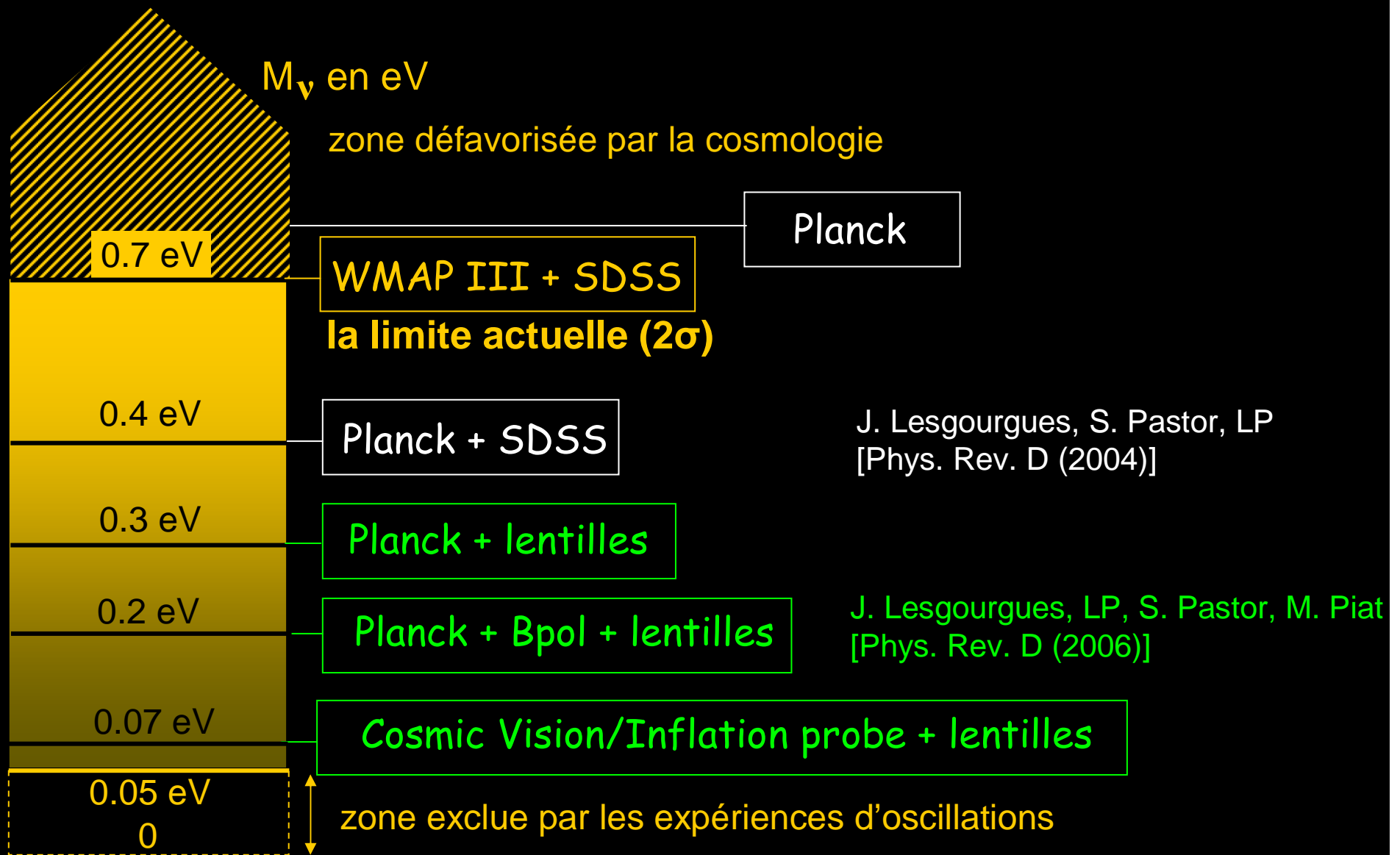
$$(\Omega_b h^2, \Omega_m h^2, \Omega_\Lambda, A_s, n_s, \tau, Y_{\text{He}}, \Sigma m_\nu, w, \alpha, N_{\text{eff}}) = (0.0245, 0.148, 0.70, 0.8, 0.98, 0.12, 0.24, 0.1, -1, 0, 3.04)$$

all data best-fit model

well-motivated
potentially detectable
parameter

extra
parameters

Prédiction des contraintes sur M_ν : les résultats

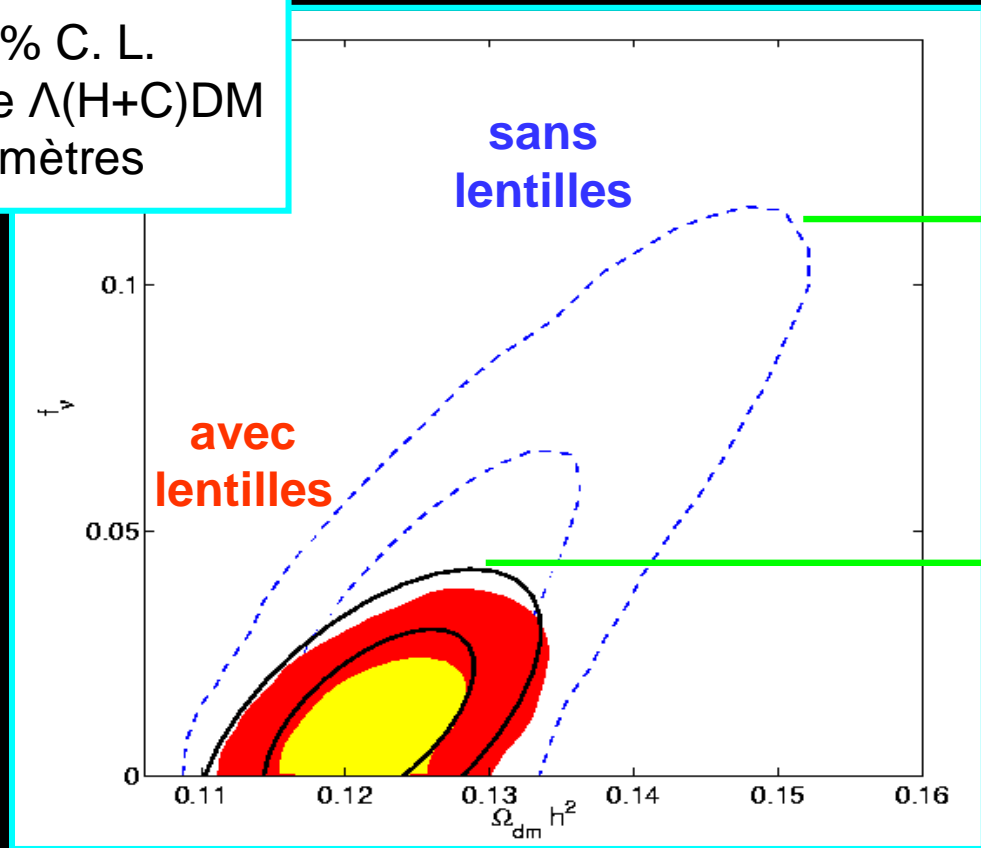


Au-delà de l'analyse de Fisher : une étude MCMC

Contraindre M_ν avec Planck

68% et 95% C. L.
dans le modèle $\Lambda(H+C)DM$
à 11 paramètres

$$f_\nu = \Omega_\nu / \Omega_{dm}$$

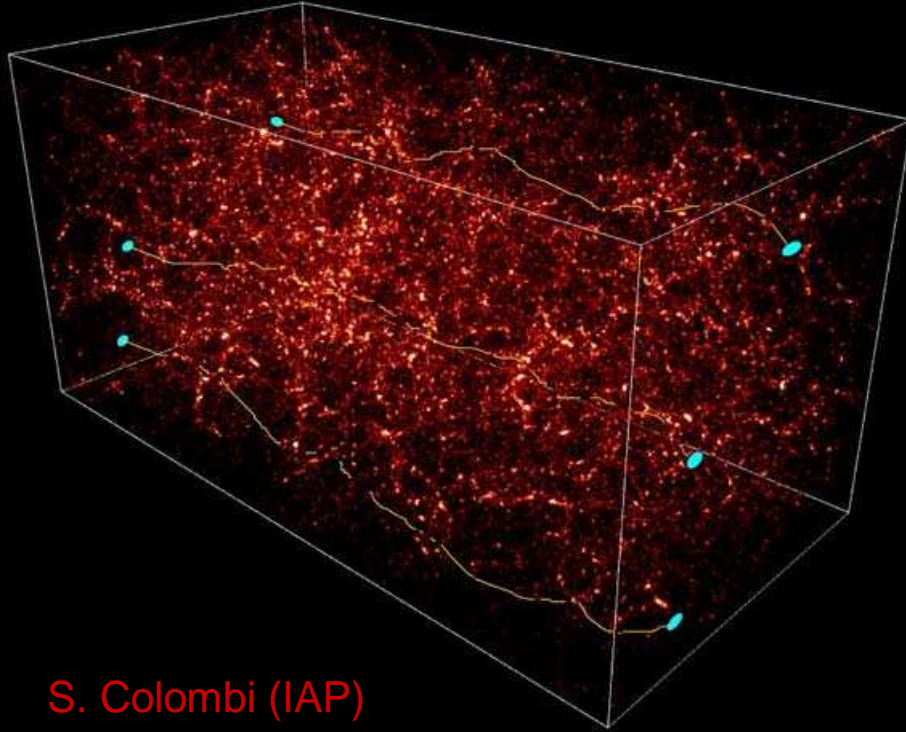


sensibilité à 2σ
sur $M_\nu = 1$ eV

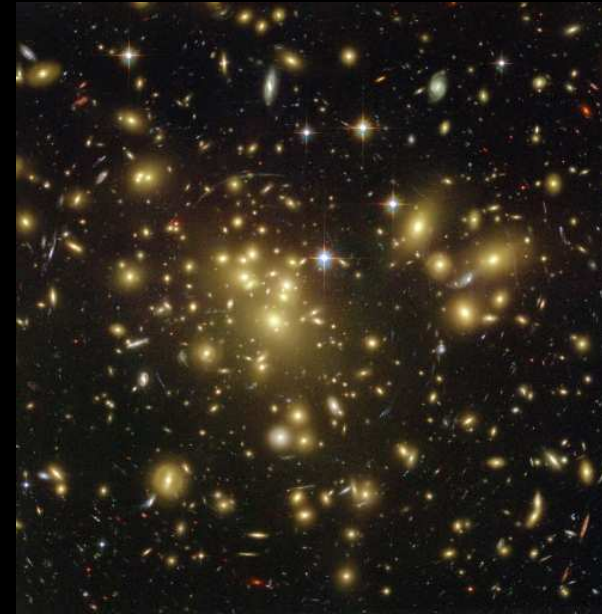
sensibilité à 2σ
sur $M_\nu = 0.3$ eV

LP, J. Lesgourgues, S. Hannestad, H. Tu, Y. Wong [astro-ph/06062271]

Combinaison avec le cisaillement des galaxies



S. Colombi (IAP)



$$\psi^i(\hat{\mathbf{n}}) \equiv -2 \int_0^{\chi_h} d\chi W^i(\chi) \Psi(\chi \hat{\mathbf{n}}; \eta_0 - \chi)$$

Une étude tomographique

contraindre la masse des neutrinos

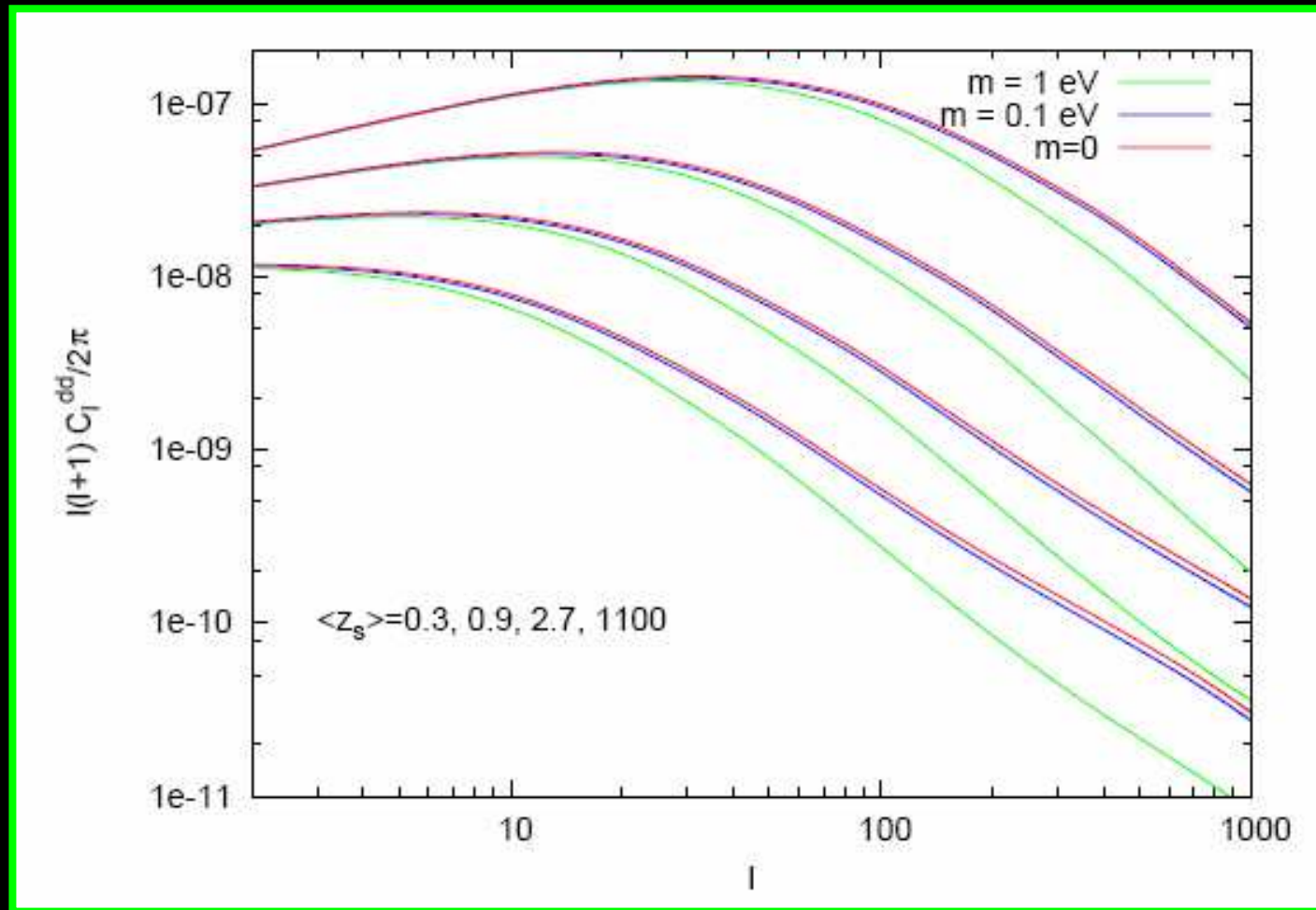


figure réalisée par Julien Lesgourgues

Les corrélations Température / Cosmic shear l'effet Sach-Wolfe intégré tardif (ISW) contraindre la masse des neutrinos

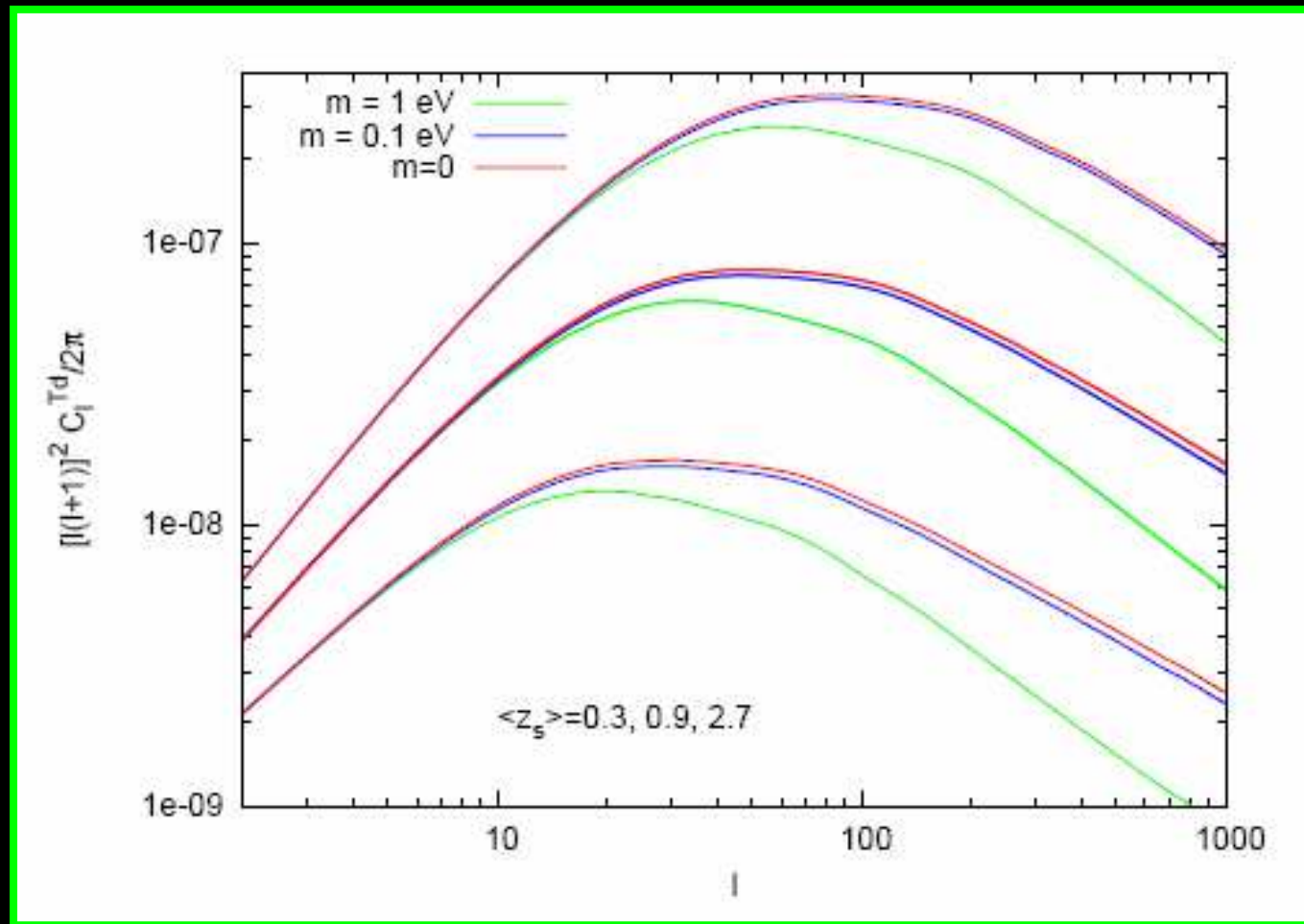
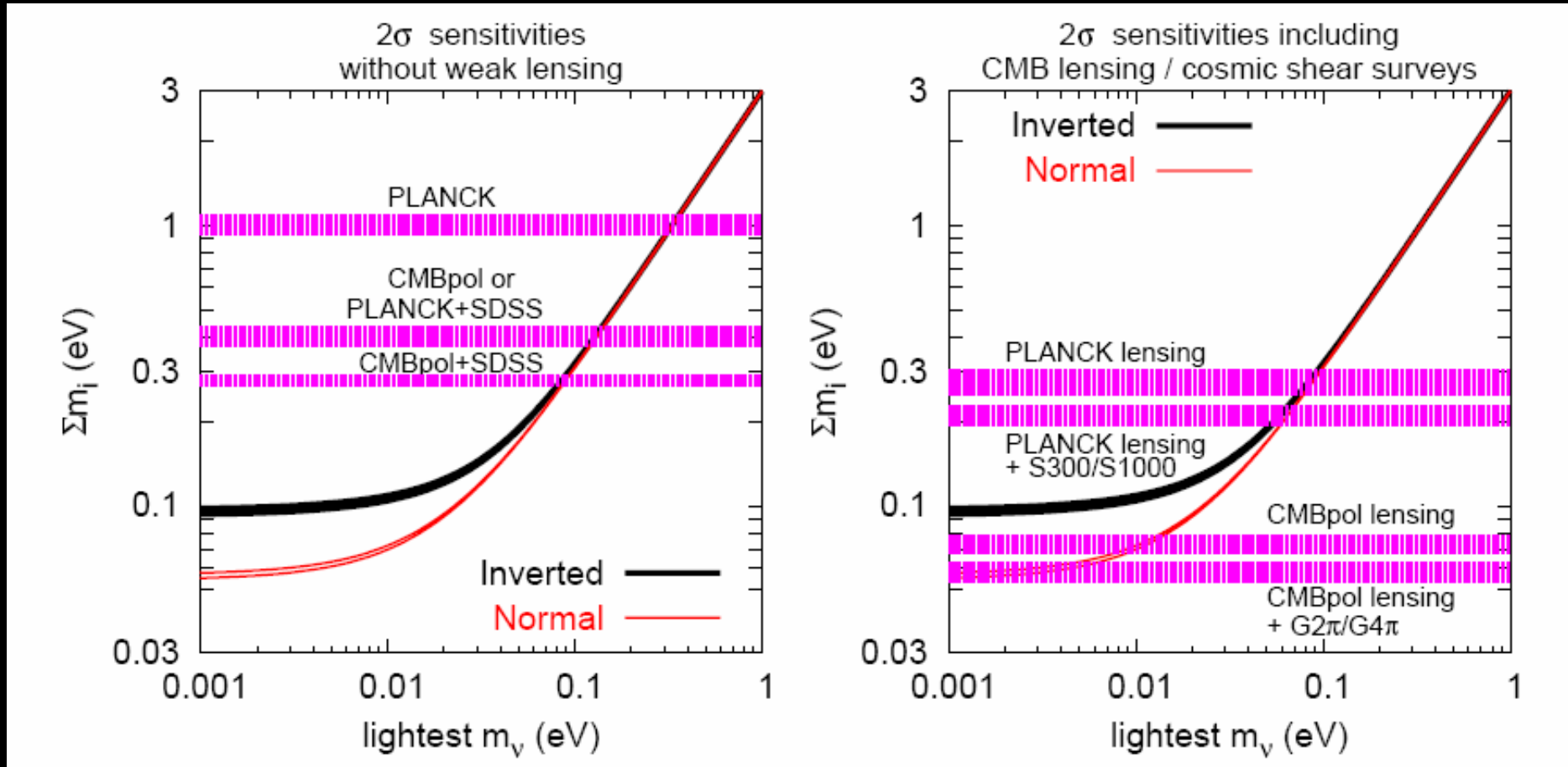


figure réalisée par Julien Lesgourgues

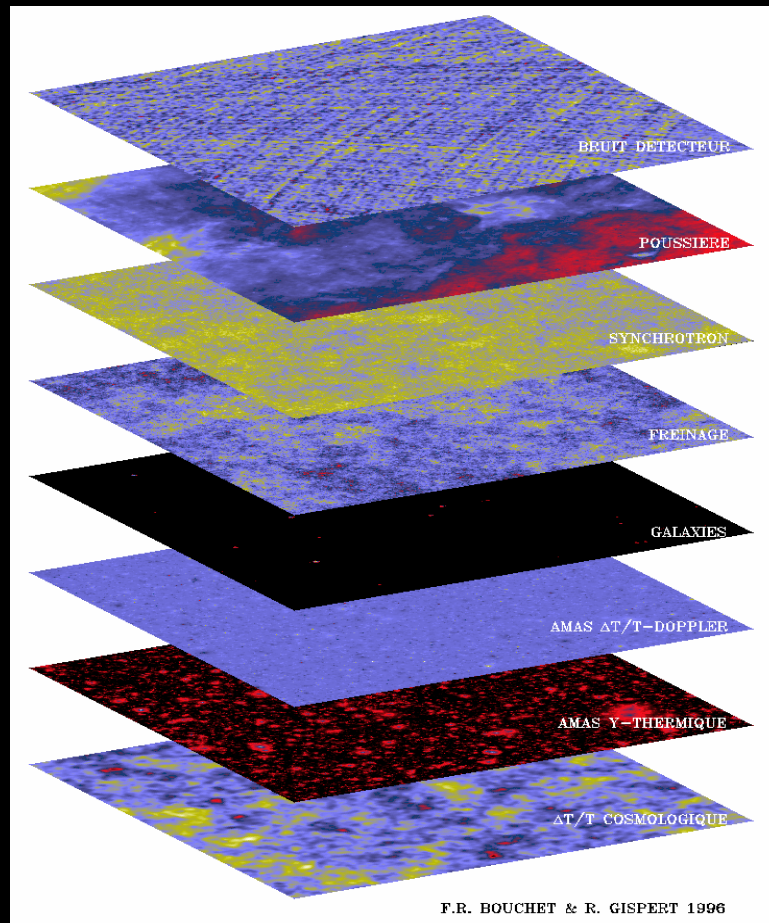
L'impact de l'effet de lentille sur la sensibilité à M_ν : résumé



J. Lesgourgues & S. Pastor, Phys. Rep. 429 (2006) 307

Un défi expérimental

De nombreux contaminants peuvent mimer les signatures de l'effet de lentille...



← les effets systématiques :
instrument + analyse des données

les avant-plans astrophysiques :

➔ résidus non-gaussiens après
séparation de composantes

➔ masquage des cartes

← carte du CMB lentillée

De l'extraction à l'exploitation de l'effet de lentille gravitationnelle

- Une méthode puissante pour sonder les grandes structures
 - ➔ contraindre la physique au-delà du découplage (M_ν, w_{DE})
 - ➔ combinaison effet de lentille sur le CMB et cisaillement des galaxies: A long terme, détection à 2σ de M_ν aussi petite qu'elle soit !
- PLANCK : des caractéristiques expérimentales qui laissent espérer une bonne reconstruction des lentilles
- Est-ce faisable sur les « vraies données » ?
 - ➔ Vers une méthode d'extraction des lentilles optimisée pour PLANCK (S. Plaszczynski (LAL), J. Lesgourgues (LAPTH), Karim Benabed (IAP), ...)

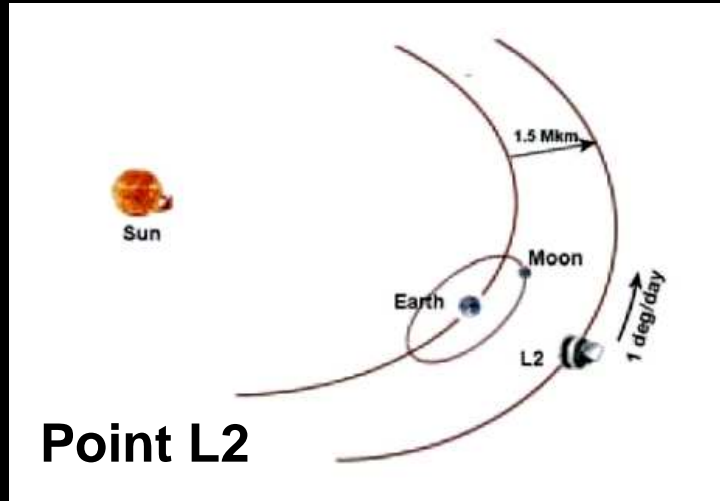
FIN

Probing the matter distribution with Planck

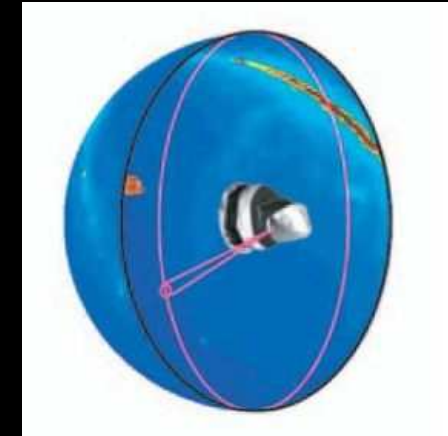


- an european satellite launched in early 2008
- designed to produce high resolution ($\sim 5'$) maps of **temperature** and **polarisation** of CMB anisotropies, with microkelvin sensitivity per resolution element.

La mission Planck



~6 mois :
un ciel complet



Télescope :

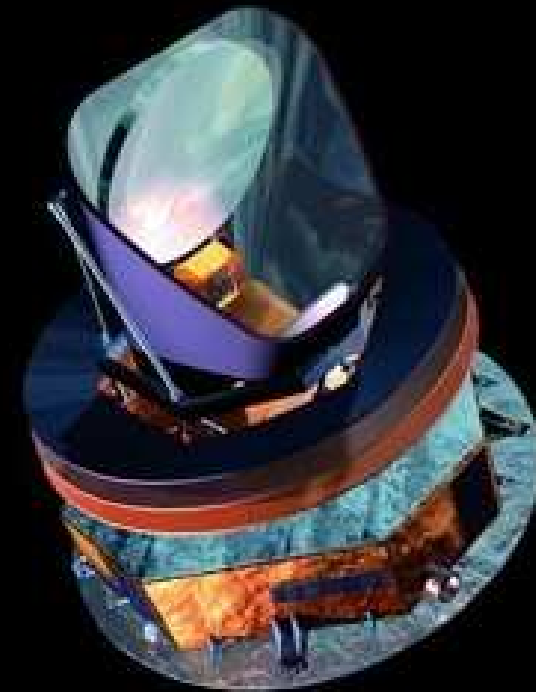
Refroidissement passif

Plan focal :

2 instruments LFI et HFI

9 canaux couvrant de 20 GHz à 1 THz

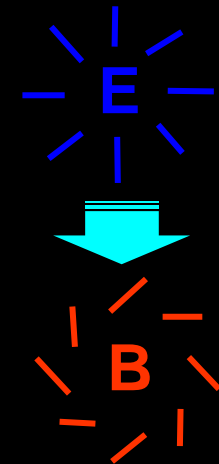
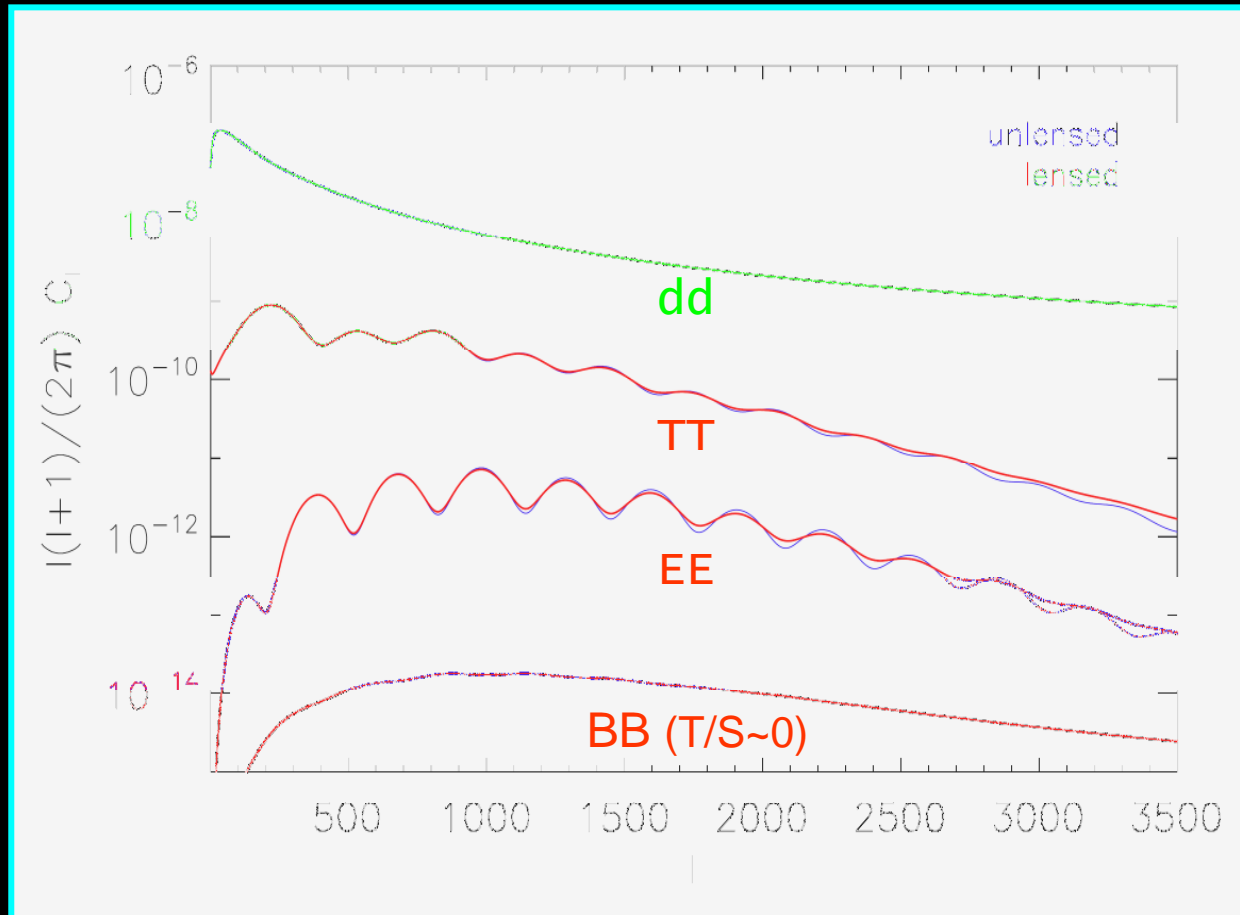
Cryogénie



Effet sur les spectres de puissance angulaires

$$\frac{\Delta T}{T}(\vec{n}) = \sum_{l,m} a_{lm}^T Y_l^m(\vec{n})$$

$$\langle a_{lm}^T a_{l'm'}^{T*} \rangle = \delta_{ll'} \delta_{mm'} C_l^{TT}$$



Expérience	f_{sky}	ν	θ_{fwhm}	σ_T (μK)	σ_P (μK)
BICEP [38]	0.03	100	60'	0.33	0.47
		150	42'	0.35	0.49
QUaD [11]	0.025	100	6.3'	3.5	5.0
		150	4.2'	4.6	6.6
BRAIN [63]	0.03	100	50'	0.23	0.33
		150	50'	0.27	0.38
		220	50'	0.40	0.56
CLOVER [46]	0.018	100	15'	0.19	0.30
		143	15'	0.25	0.35
		217	15'	0.55	0.76
PLANCK [17]	0.65	30	33'	4.4	6.2
		44	23'	6.5	9.2
		70	14'	9.8	13.9
		100	9.5'	6.8	10.9
		143	7.1'	6.0	11.4
		217	5.0'	13.1	26.7
		353	5.0'	40.1	81.2
		545	5.0'	401	∞
857	5.0'	18300	∞		
SAMPAN [10]	0.65	100	42'	0.13	0.18
		143	30'	0.16	0.22
		217	20'	0.26	0.37
Inflation Probe (<i>hypothétique</i>) [9]	0.65	70	6.0'	0.29	0.41
		100	4.2'	0.42	0.59
		150	2.8'	0.63	0.88
		220	1.9'	0.92	1.30