



Campagne de demande de post-docs 2013

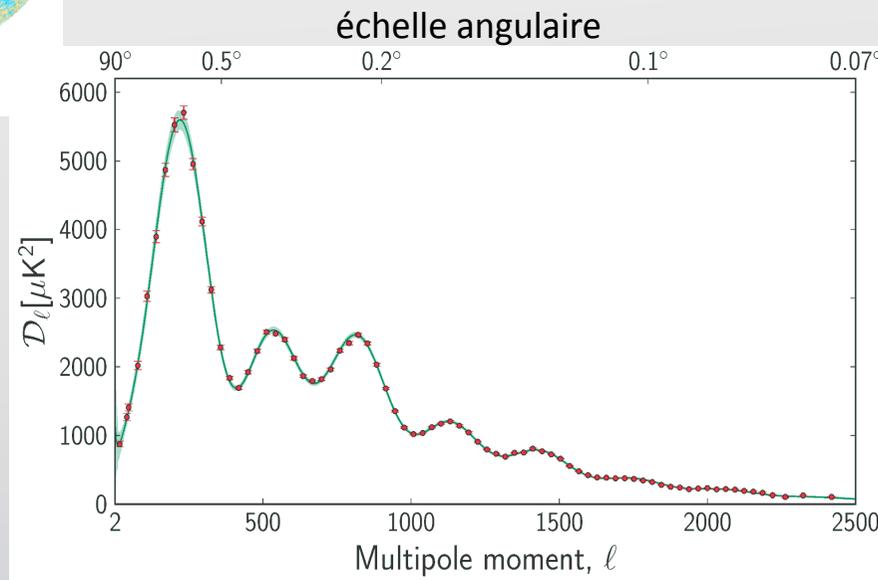
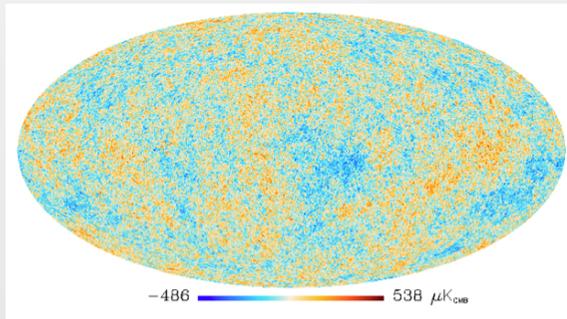
La polarisation du CMB avec PLANCK

traitement des données et interprétation cosmologique

Julien Lesgourgues (LAPTh), Juan Macías-Pérez, Laurence Perotto (LPSC)



Contraindre la cosmologie avec le CMB



contrainte sur les modèles cosmologiques :

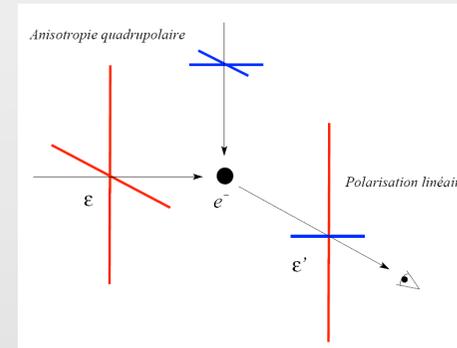
- physique de l'univers primordial, inflation
- mesure de la géométrie et du contenu de l'Univers, énergie noire, CDM, baryon, physique des neutrinos

La polarisation du CMB

A la surface de dernière diffusion:

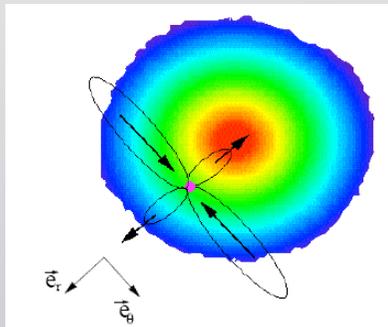
diffusion thomson + quadrupôle local

↳ polarisation linéaire



Les flux de matière à la surface de dernière diffusion créent localement des quadrupoles :

La polarisation linéaire sur la sphère est décrite par 2 champs scalaires :

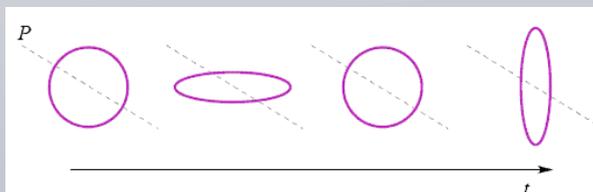


perturbations scalaires

produisent

• mode E (à rotationnel nul)

• mode B (à divergence nulle)

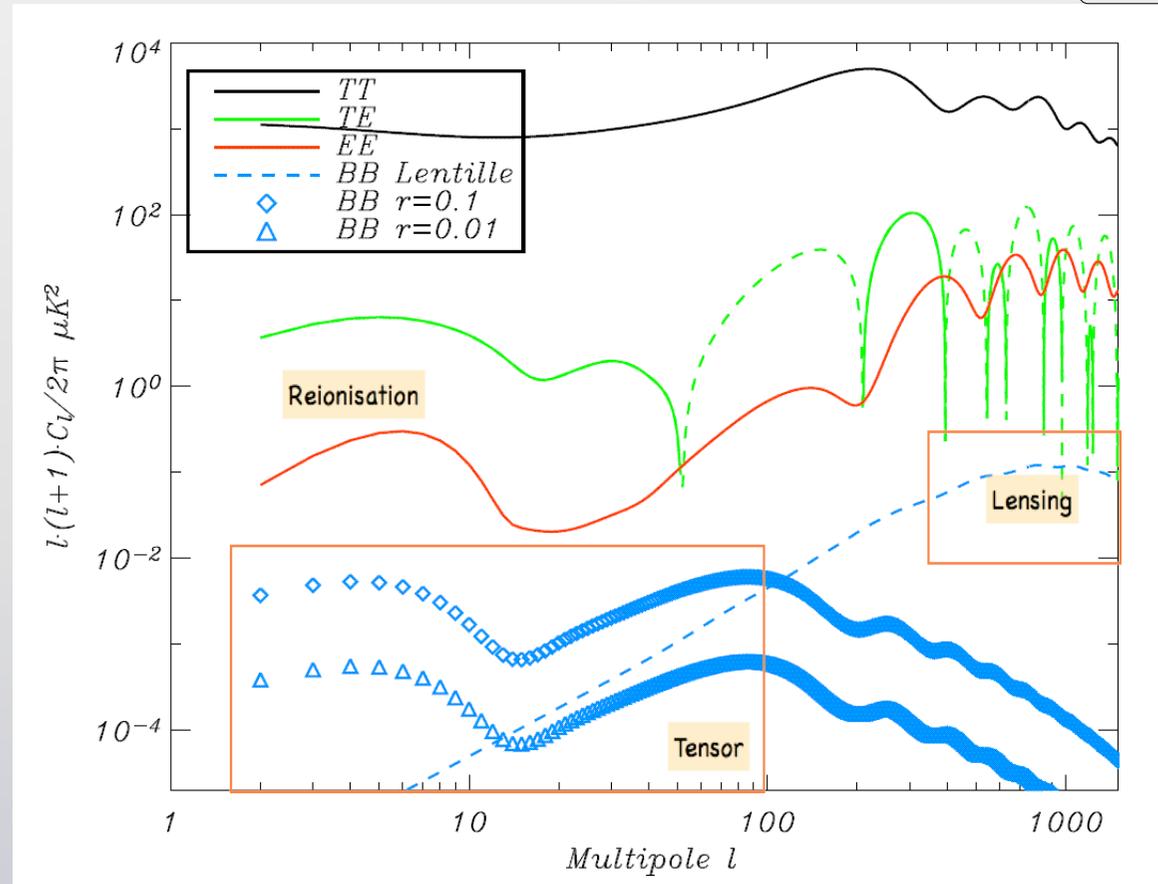


perturbations tensorielles

(ondes gravitationnelles générées lors de l'inflation)

Les spectres de puissance angulaires du CMB

3 observables (T, E, B) → 6 combinaisons possibles TT, TE, EE, BB, TB, EB = 0 (par symétrie)



Enjeux:

- levée de dégénérescences entre paramètres
- contrainte sur l'époque de réionisation
- ondes gravitationnelles primordiales, contrainte sur l'inflation
- distribution de matière, physique des neutrinos

Le satellite PLANCK

- 3^{ème} génération de satellites dédiée au CMB (après COBE et WMAP) lancé par l'ESA, le 14 mai 2009 (L2 Lagrange point)
- Stratégie de balayage en grands cercles sur le ciel (1 rpm, 40 minutes) couverture complète du ciel (survey) en 6 à 7 mois
- Telescope grégorien hors-axe de 1,5 m résolution jusqu'à 5 minutes d'arc
- Deux instruments:

- **LFI** : radiomètres (**OMT**) refroidis à 18 K

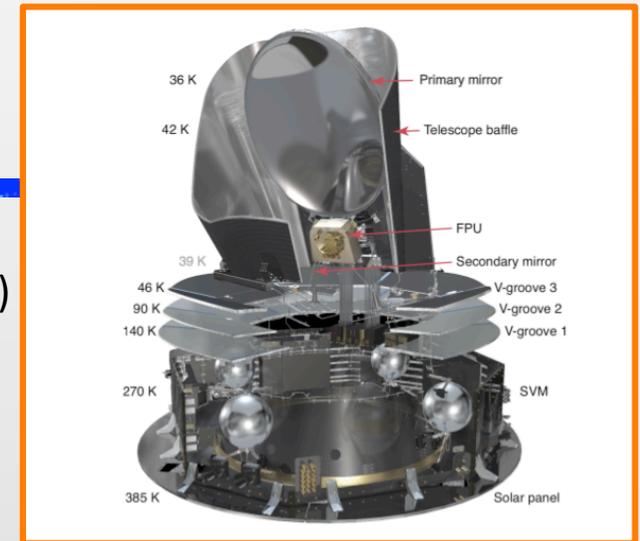
30 [4], 44[6] et 70 [12] GHz

- **HFI** : bolomètres (SW & **PSB**) refroidis à 100 mK

100 [8], 143 [8+4], 217 [8+4], 353[8+4],

545 [4] et 857 [4] GHz + 2 Dark

- Système cryogénique raffiné : 50 (V-grooves), 18 (H sorption cooler), 4 (JT ⁴He), 1.4 et 0.1 K (dilution ³He-⁴He) sensibilité 10xWMAP (jusqu'à 20 microK s^{1/2})



Premiers résultats cosmologiques en mars 2013 sur la mission nominale en Température

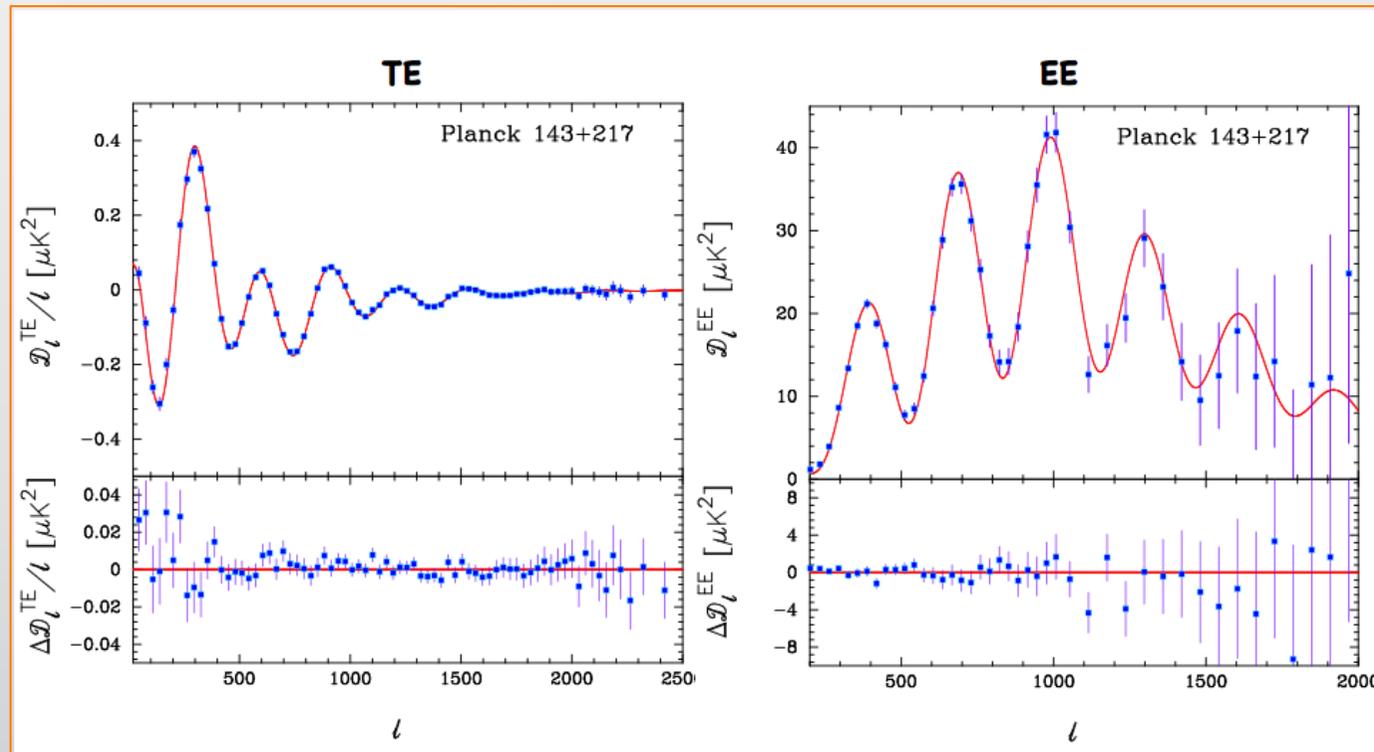
Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters

Abstract: This paper presents the first cosmological results based on *Planck* measurements of the cosmic microwave background (CMB) temperature and lensing-potential power spectra. We find that the *Planck* spectra at high multipoles ($\ell \geq 40$) are extremely well described by the standard spatially-flat six-parameter Λ CDM cosmology with a power-law spectrum of adiabatic scalar perturbations. Within the context of this cosmology, the *Planck* data determine the cosmological parameters to high precision: the angular size of the sound horizon at recombination, the physical den-

Une excellente sensibilité à la polarisation

Spectres de puissance polarisés aux petites échelles angulaires ($l > 100$)

Planck 2013 results. XVI.
Cosmological parameters



- La sensibilité à la polarisation est excellente
 - Très bon accord avec le modèle cosmologique estimé sur les données de température
 - Nécessité d'améliorer le contrôle des effets systématiques (surtout aux grandes échelles angulaires)
- ↳ Les résultats cosmologiques basées sur les données polarisées sont prévus en 2014.

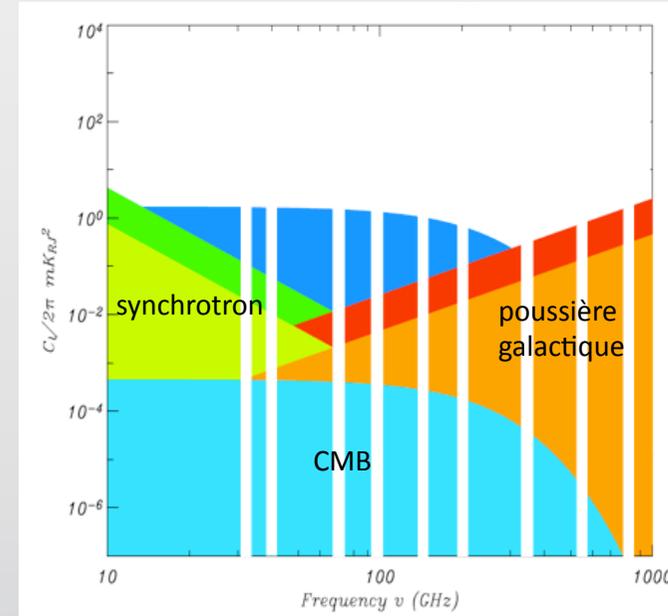
Problématiques spécifiques à la polarisation (I)

Les avant-plans astrophysiques polarisés :

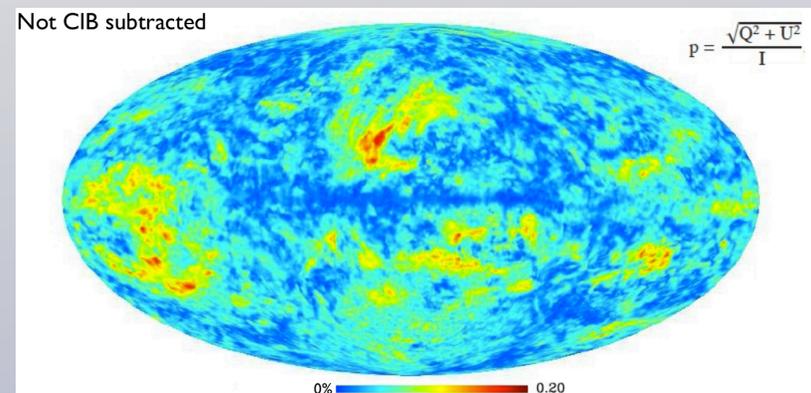
- moins bien connus qu'en température
- dominants à toutes les fréquences
- importants à haute latitude galactique

La séparation des composantes est inévitable pour l'exploitation cosmologique
→ caractérisation des résidus et propagation jusqu'aux contraintes sur les paramètres cosmologiques

Spectre électromagnétique (unité Rayleigh-Jeans)



Intensité de l'émission polarisée de la poussière à 353GHz



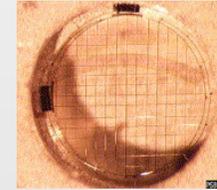
Problématiques spécifiques à la polarisation (II)

La mesure de la polarisation avec PLANCK :

$$\text{Pour un PSB : } \text{signal} = \frac{1}{2} ((1 + \epsilon) I + (1 - \epsilon) (Q \cos(2\phi) + U \sin(2\phi)))$$

La stratégie de pointage fait que ϕ reste \sim constant:

→ pour obtenir I,Q,U (et ensuite T, E, B), on combine des couples de PSB :

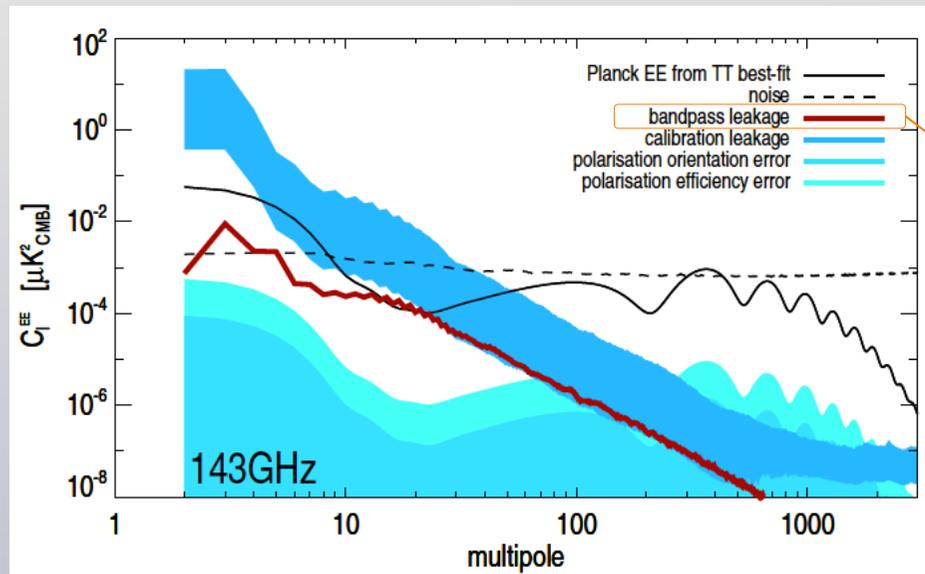


PSB a et b

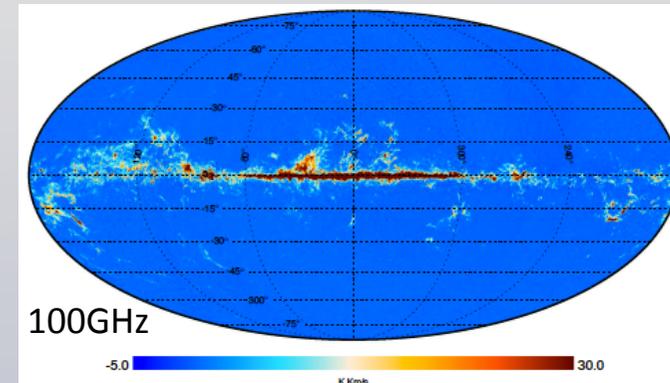


Tout effet affectant différemment les détecteurs induits une fuite de l'intensité vers la polarisation

Incertitudes sur C_l^{EE} dues aux systématiques résiduelles



Carte des régions contaminées par la raie de CO (responsabilité du LPSC)



différence de réponses spectrales (bande passante) des PSB → fuite de l'intensité du CO (et de la poussière) dans la polarisation

Planck@enigmass

Les groupes PLANCK dans enigmass sont bien positionnés pour jouer un rôle clef dans l'exploitation de la polarisation



Au LAPTH, expertise dans la modélisation des spectres de puissance du CMB
expertise dans les méthodes d'estimation des paramètres
forte implication et visibilité sur ces activités dans Planck



Au LPSC, forte implication dans l'analyse des données et contrôle des effets systématiques de Planck
responsabilité de l'étude et la correction des effets systématiques liés aux bandes passantes
expertise sur la modélisation des avant-plans diffus (poussière, synchrotron,...)
expertise sur l'effet de lentille gravitationnel



Une complémentarité qu'il va être nécessaire de mettre à profit pour les résultats cosmologiques utilisant la polarisation
(e. g. les incertitudes sur les systématiques doivent être propagées jusqu'aux contraintes sur les paramètres cosmologiques)

Post-doc ENIGMASS (1+1 an)

Motivations & enjeux :

- La mesure de la polarisation par PLANCK devrait améliorer significativement les contraintes actuelles sur les paramètres cosmologiques et devenir la référence du domaine pendant plusieurs décénies.
- Le LAPTh et le LPSC ont été très fortement impliqués dans l'analyse et l'exploitation des données en température et ont été des acteurs majeurs dans la publication des premiers résultats cosmologiques
- La mesure de la polarisation a des problématiques spécifiques qui demandent un gros efforts de développement d'outils d'analyse et qui imposent de trouver des synergies entre l'analyse des données et leur interprétation cosmologique

Objectifs scientifiques :

- I. Correction conjointe des avant-plans et des effets systématiques (confusion due aux bandes passantes des détecteurs)
- II. Détection (ou limite supérieure) des ondes gravitationnelles primordiales par la mesure du spectre du mode B primordial
- III. Première mesure du spectre du mode B dû à l'effet de lentille gravitationnelle
- IV. Etude de la distribution de matière de l'Univers et physique des neutrinos (mesure de l'échelle absolue de masse, N_{eff})

Description du postdoc demandé

Le post-doc s'effectuera dans le cadre du « Core Team » de Planck : ce qui garantit un accès privilégié aux moyens de la collaboration et à l'ensemble des données, avec participation aux publications de 2014.

Le travail demandé :

1. Correction des effets de confusion de bandes passantes (responsabilité du LPSC)
2. Soustraction des émissions d'avant-plans polarisées (objectif premier : les grandes échelles angulaires) et évaluation des résidus
3. Propagation des incertitudes liées aux émissions d'avant-plans et aux effets systématiques au niveau de l'estimation de paramètres cosmologique (modification des codes de vraisemblance)
4. Revisiter les codes de vraisemblance pour les grandes échelles angulaires (réionisation, mode B primordial) et tester leur robustesse aux résidus d'avant-plans
5. Mesure du spectre de puissance du mode B (caractérisation des incertitudes, séparation mode B primordial / effet de lentille)
6. Participation aux analyses de physique des neutrinos (amélioration des contraintes sur la masse, confirmation des contraintes sur N_{eff})



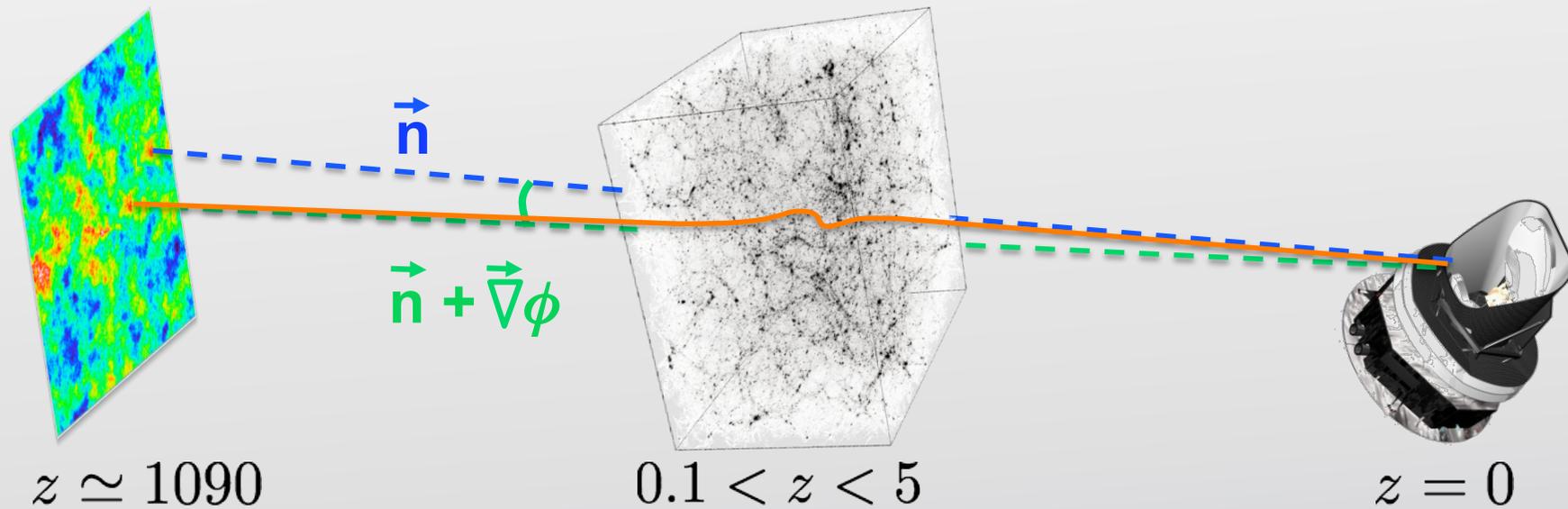
Ce projet assurera une visibilité exceptionnelle au postdoc dans le domaine CMB.

Conclusions

- Une mesure très prometteuse :
Les données nominales ont montré que la sensibilité de PLANCK à la polarisation est excellente
- De fortes contraintes de temps :
Les données polarisées doivent être délivrées à la communauté au plus tard en septembre 2014
- Des résultats marquants à la clef :
Première détection (?) du mode B primordial, première mesure du mode B dû à l'effet de lentille, contrainte compétitive sur la masse des neutrinos, réionisation
- Les difficultés :
Les effets systématiques et le résidus d'avant-plans peuvent sévèrement limiter l'exploitation de la polarisation pour contraindre la cosmologie
→ il est nécessaire de traiter conjointement les effets systématiques et avant-plans et de propager précisément les incertitudes associées dans l'estimation des paramètres cosmologiques
- Nos atouts :
Le LAPTH et le LPSC ont une expertise reconnue et complémentaire qui pourrait permettre de mener à bien la tâche
- Un post-doc ENIGMASS est un élément clef pour atteindre cet objectif
- Il aurait une visibilité et une reconnaissance exceptionnelles au sein de la collaboration PLANCK et de la communauté CMB

Matériel supplémentaire

Gravitational Lensing by large-scale Structure



Remapping: $T(\hat{\mathbf{n}}) = T^{\text{unlensed}}(\hat{\mathbf{n}} + \nabla\phi(\hat{\mathbf{n}}))$

Lensing potential:

$$\phi(\hat{\mathbf{n}}) = -2 \int_0^{\chi_*} d\chi \left(\frac{\chi_* - \chi}{\chi_* \chi} \right) \Psi(\chi \hat{\mathbf{n}}; \eta_0 - \chi)$$

kernel in a flat universe
conformal distance
lookback conformal time

- max. efficiency at $z \sim 2$
- typical size ~ 300 Mpc
- linear growth

CNB (Cosmic Neutrino Background)

decoupling at $T \simeq 1$ MeV; relic neutrino temperature $\simeq 2$ K, number density = 112 cm^{-3} per species

Contribution to the radiation energy density in the early Universe:

$$\rho_{\text{rad}} = \left[2 + \frac{7}{4} \left(\frac{4}{11} \right)^{4/3} N_{\text{eff}} \right] \frac{\pi^2}{30} T_{\gamma}^4$$

N_{eff} : Number of relativistic dof:

- standard model of 3 active thermalised neutrino: $N_{\text{eff}} = 3.046$
- account for any process affecting ρ_{rad} , including any other light relics (sterile neutrinos axions, ...)

Contribution to the dark matter after their non-relativistic (NR) transition:

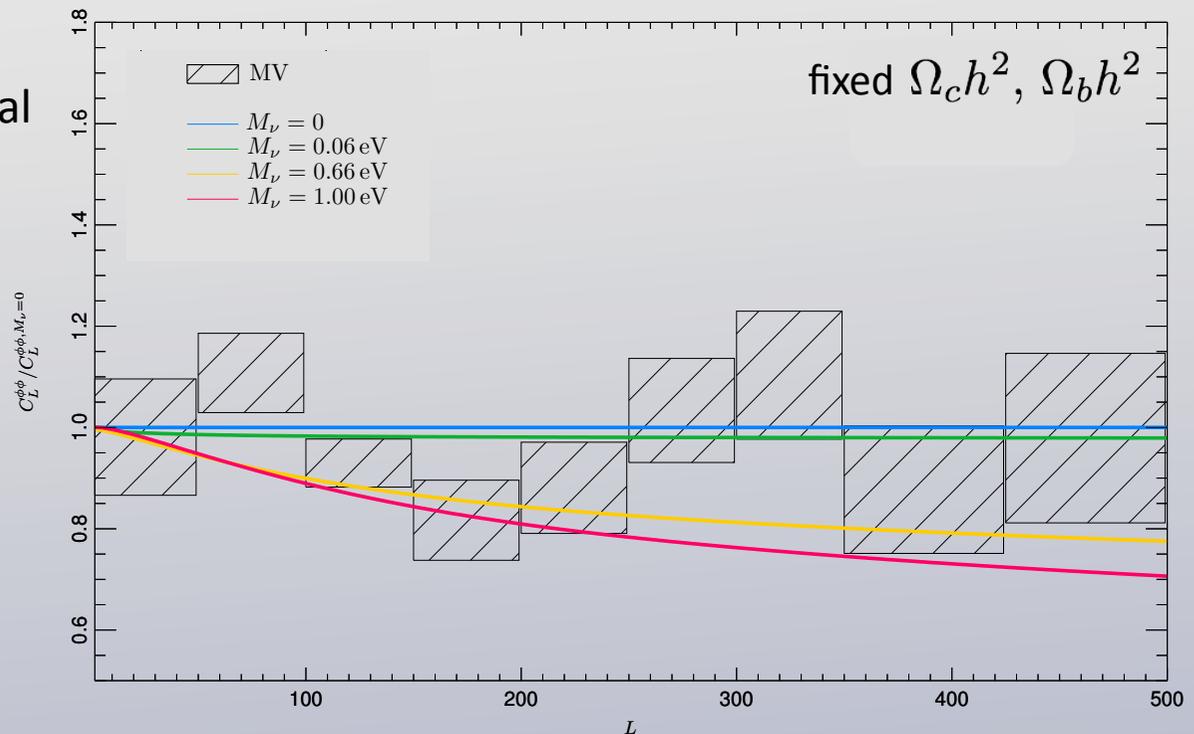
oscillation measure: $\sum_{\nu} m_{\nu} \geq 0.06 \text{ eV}$ at least 2 ν non-relativistic today

$$\Omega_{\nu} = \frac{\sum m_{\nu}}{93.04 h^2 \text{ eV}}$$

The neutrino masses signature

- for $\sum_{\nu} m_{\nu} \lesssim 1.3 \text{ eV}$: tiny constraints from TT alone
- After the NR transition: contribution to the expansion rate but not to the clustering of small-scale structure.

- Step-like signature in the power spectrum of the potential



Constraint on neutrino masses

In a $\Lambda\text{CDM}6 + \sum_{\nu} m_{\nu}$ model with $N_{\text{eff}} = 3$ degenerate massive neutrinos:

$$\sum_{\nu} m_{\nu} < 0.66\text{eV} \quad (95\%; \text{Planck} + \text{WM} + \text{highL})$$

$$\sum_{\nu} m_{\nu} < 0.85\text{eV} \quad (95\%; \text{Planck} + \text{lensing} + \text{WM} + \text{highL})$$

- CIT prefers small masses (negative!)



$$\sum_{\nu} m_{\nu} \searrow \Rightarrow C_L^{\phi\phi} \nearrow \Rightarrow \text{more TT smoothing}$$

more level-arm to mitigate the C_{ℓ}^{TT} low- l /high- l tension

- constraint weaken but more robust

The tightest constraint is obtained from $C_{\ell}^{TT} + \text{BAO}$:

$$\sum_{\nu} m_{\nu} < 0.23\text{eV} \quad (95\%; \text{Planck} + \text{WM} + \text{highL} + \text{BAO})$$

Constraint on the relativistic d.o.f. (N_{eff})

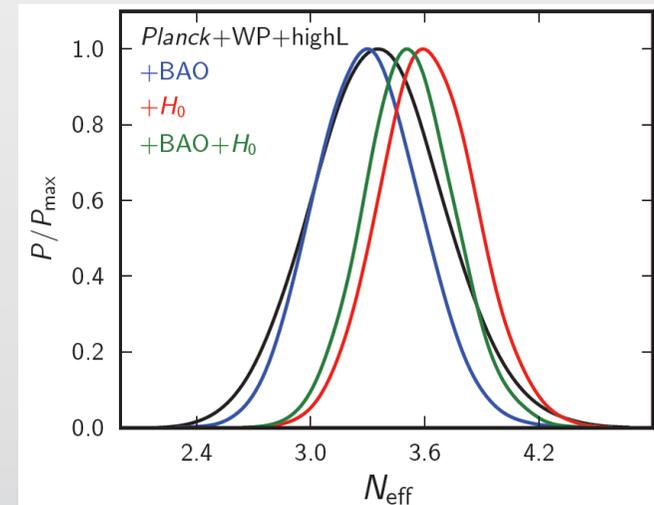
- main signature: power decrease in the CIT damping tail (γ diffusion at larger angular scale)

In a $\Lambda\text{CDM}6 + N_{\text{eff}}$ model with $\Sigma m_\nu = 0.06 \text{ eV}$:

$$N_{\text{eff}} = 3.36_{-0.64}^{+0.68} \quad (95\%; \text{CMB})$$

- partially degenerated with H_0 :
distance measures help in constraining:

$$N_{\text{eff}} = 3.30_{-0.51}^{+0.54} \quad (95\%; \text{CMB} + \text{BAO})$$



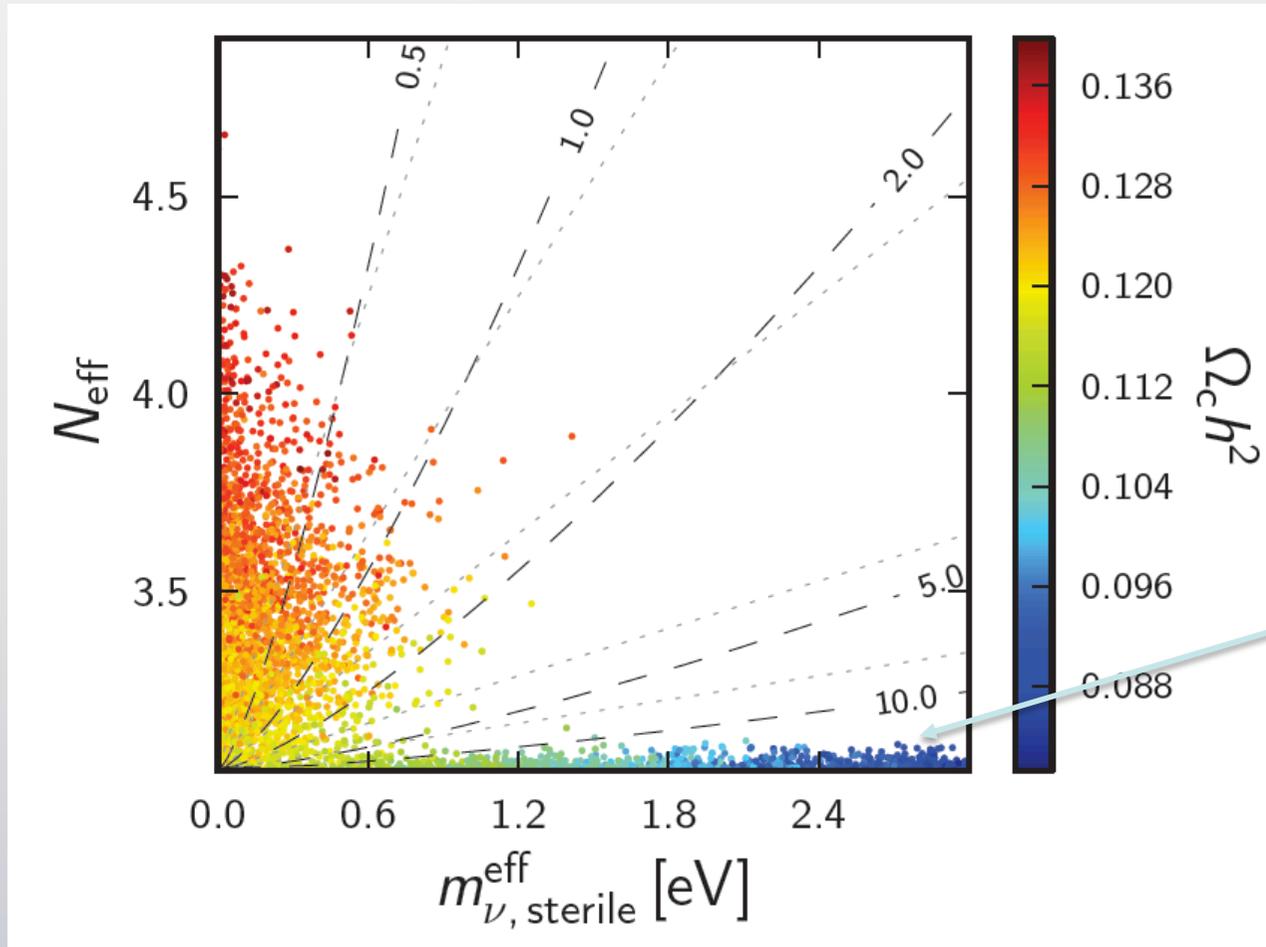
- Conjoint constraints on N_{eff} & Σm_ν
NB: model dependencies (mass splitting, non-thermal phase-space distribution, etc.)
Assumptions: 3 active ν with $\Sigma m_\nu = 0.06 \text{ eV}$ + a light thermalised sterile ν with $m_\nu^{\text{sterile}} < 10 \text{ eV}$

$$N_{\text{eff}} < 3.80 \quad \& \quad m_{\nu, \text{sterile}}^{\text{eff}} < 0.42 \text{ eV} \quad (95\%; \text{Planck} + \text{WP} + \text{highL} + \text{BAO})$$

(where $m_{\nu, \text{sterile}}^{\text{eff}} = m_\nu^{\text{sterile}}$ for a fully thermalised sterile neutrino)

Conclu: a light sterile neutrino as «hinted» by MiniBoone + reactor experiments not excluded
(but parameter space reduction)

Constraints in presence of a sterile neutrino



WDM

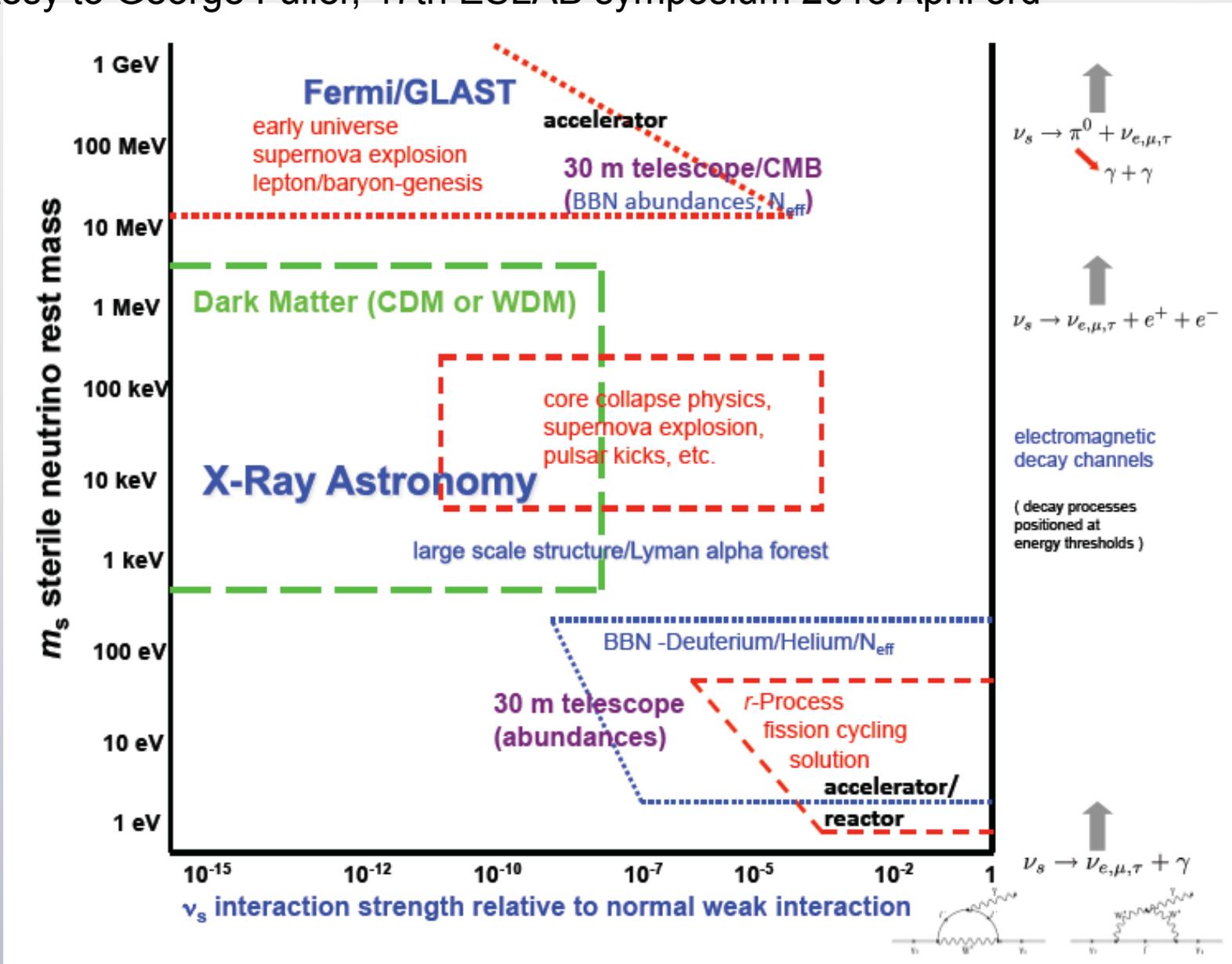
$$m_{\nu, \text{sterile}}^{\text{eff}} = (T_s/T_\nu)^3 m_{\text{sterile}}^{\text{thermal}}$$

$$m_{\nu, \text{sterile}}^{\text{eff}} = \chi_s m_{\text{sterile}}^{\text{DW}}$$

thermal = thermal phase-space distribution with T_s
 Dodelson-Widrow = distribution proportional to that of active nu

Sterile Neutrino parameter space

Courtesy to George Fuller, 47th ESLAB symposium 2013 April 3rd

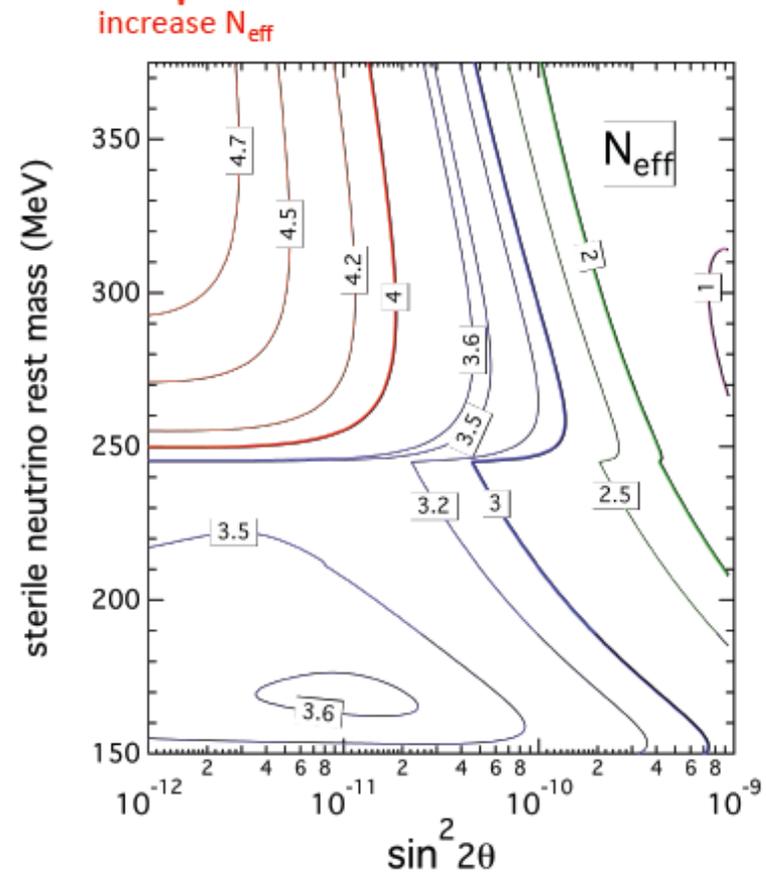
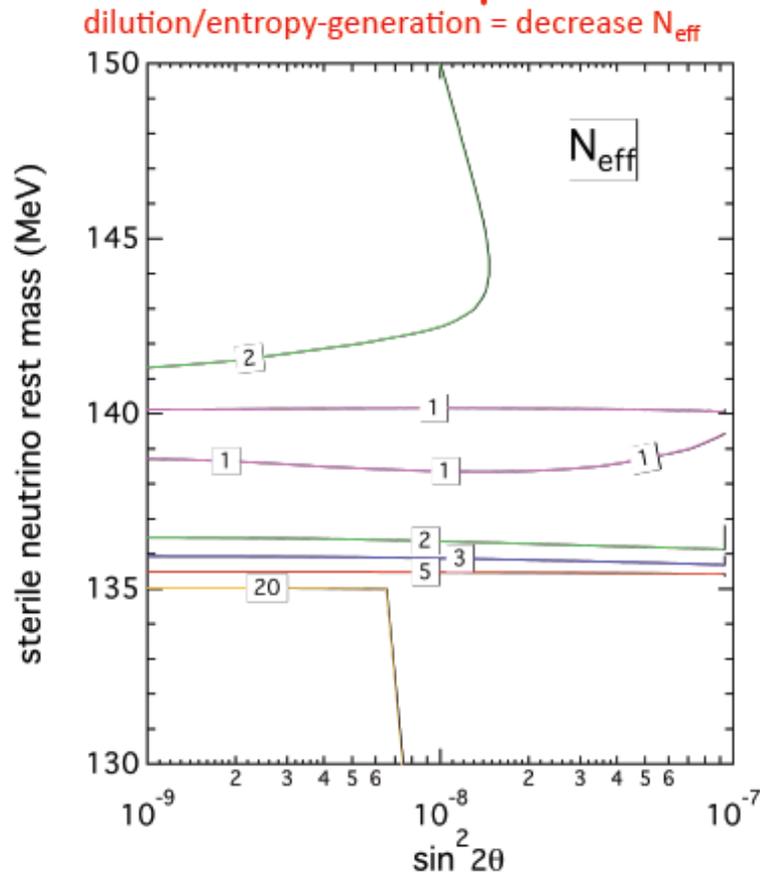


What about the *heavy* sterile neutrino ?

Courtesy to George M. Fuller, 47th ESLAB symposium 2013 April 3rd

G.M.F., C. Kishimoto, A. Kusenko [arXiv:1110.6479](https://arxiv.org/abs/1110.6479) astro-ph.CO

heavy sterile neutrino decay causes **dilution** of ordinary background neutrinos and generation of radiation energy density (N_{eff})



Other astrophysical probes of the nu mass

Abazajian et al., arXiv:1103.5083

Probe	Current $\sum m_\nu$ (eV)	Forecast $\sum m_\nu$ (eV)	Key Systematics	Current Surveys	Future Surveys
CMB Primordial	1.3	0.6	Recombination	WMAP, Planck	None
CMB Primordial + Distance	0.58	0.35	Distance measurements	WMAP, Planck	None
Lensing of CMB	∞	0.2 – 0.05	NG of Secondary anisotropies	Planck, ACT [39], SPT [96]	EBEX [57], ACTPol, SPTPol, POLAR-BEAR [5], CMBPol [6]
Galaxy Distribution	0.6	0.1	Nonlinearities, Bias	SDSS [58, 59], BOSS [82]	DES [84], BigBOSS [81], DESpec [85], LSST [92], Subaru PFS [97], HETDEX [35]
Lensing of Galaxies	0.6	0.07	Baryons, NL, Photometric redshifts	CFHT-LS [23], COSMOS [50]	DES [84], Hyper SuprimeCam, LSST [92], Euclid [88], WFIRST[100]
Lyman α	0.2	0.1	Bias, Metals, QSO continuum	SDSS, BOSS, Keck	BigBOSS[81], TMT[99], GMT[89]
21 cm	∞	0.1 – 0.006	Foregrounds, Astrophysical modeling	GBT [11], LOFAR [91], PAPER [53], GMRT [86]	MWA [93], SKA [95], FFTT [49]
Galaxy Clusters	0.3	0.1	Mass Function, Mass Calibration	SDSS, SPT, ACT, XMM [101] Chandra [83]	DES, eRosita [87], LSST
Core-Collapse Supernovae	∞	$\theta_{13} > 0.001^*$	Emergent ν spectra	SuperK [98], ICECube[90]	Noble Liquids, Gad-zooks [7]

Table I: Cosmological probes of neutrino mass. “Current” denotes published (although in some cases controversial, hence the range) 95% C.L/ upper bound on $\sum m_\nu$ obtained from currently operating surveys, while “Reach” indicates the forecasted 95% sensitivity on $\sum m_\nu$ from future observations. These numbers have been derived for a minimal 7-parameter vanilla+ m_ν model. The six other parameters are: the amplitude of fluctuations, the slope of the spectral index of the primordial fluctuations, the baryon density, the matter density, the epoch of reionization, and the Hubble constant.