

SDSS (e)BOSS



# Structures dans le Sloan

N. Palanque-Delabrouille  
CEA-Saclay (IRFU)

**Sloan: grande saga de la structuration**

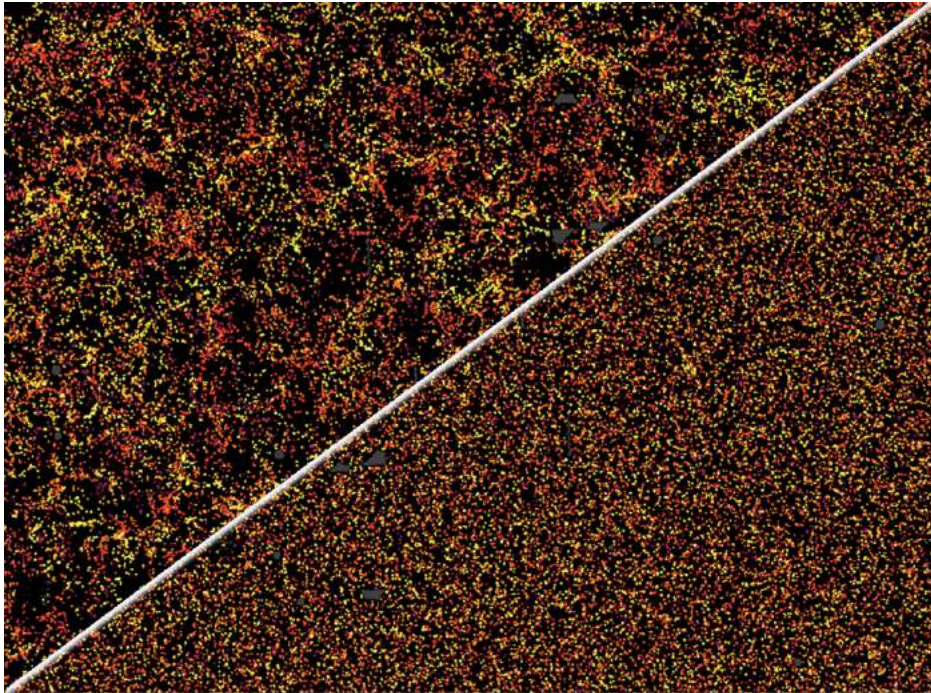
- Objectifs cosmologiques principaux
  - BAO (énergie noire)
  - RSD (gravité)
- Objectifs additionnels
  - Libres propagations

**BOSS & Lyman- $\alpha$**

**Contraindre  $\Sigma m_\nu$**

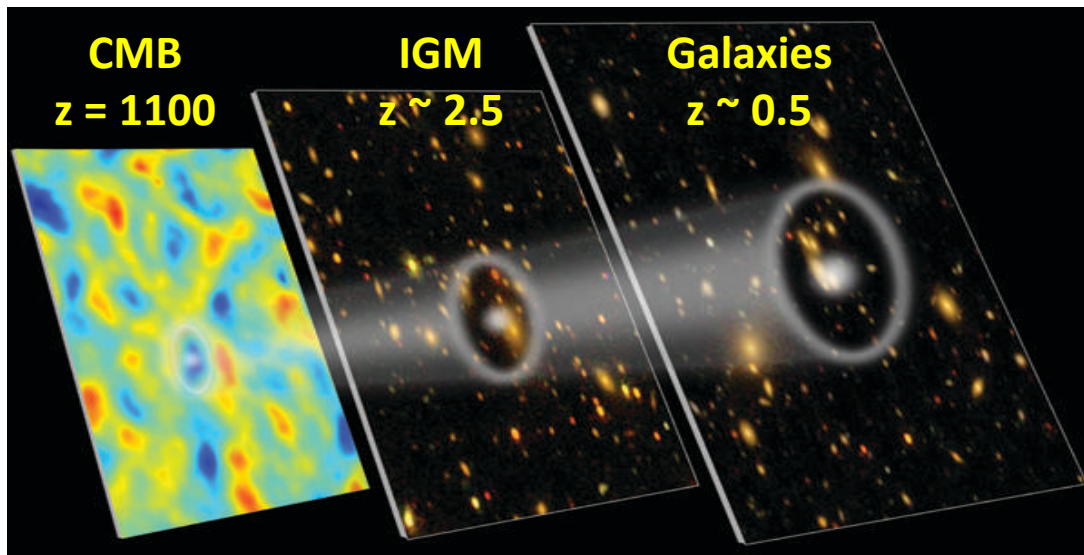
**Nature de la matière noire**

500 deg<sup>2</sup> BOSS galaxies (0.50<z<0.55)



500 deg<sup>2</sup> random (0.50<z<0.55)

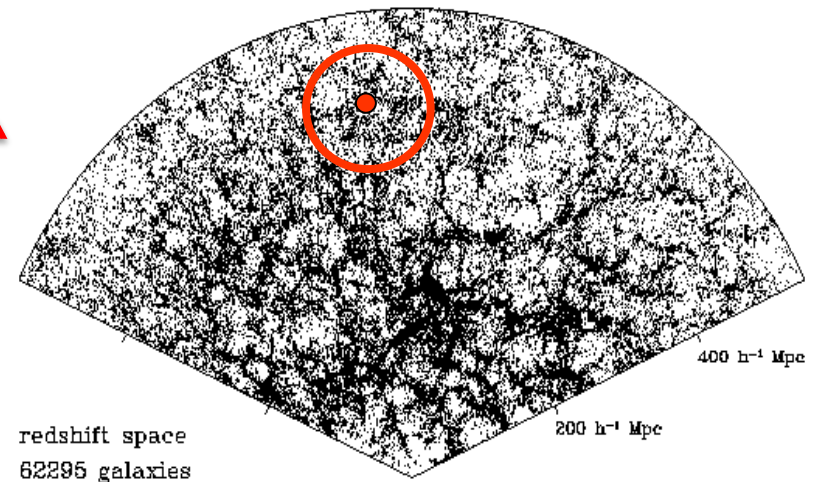
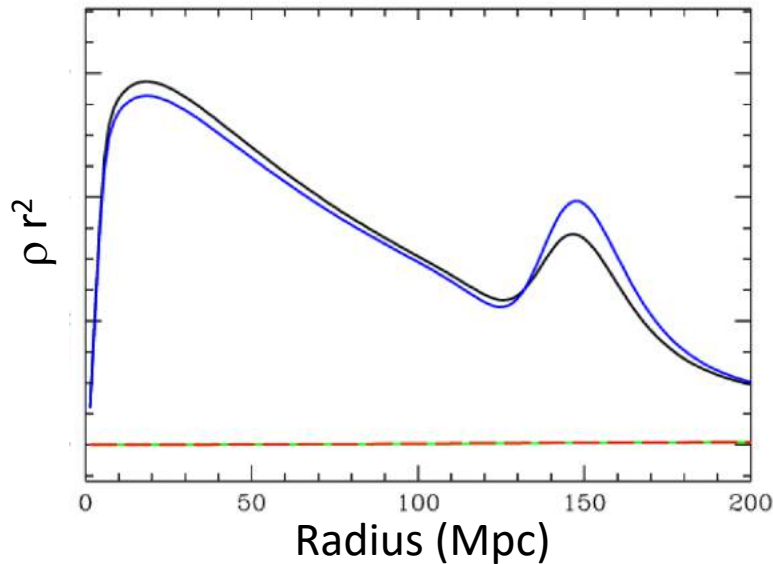
# Oscillations Acoustiques des Baryons (BAO)



Propagation des ondes de surdensité ds le plasma primordial

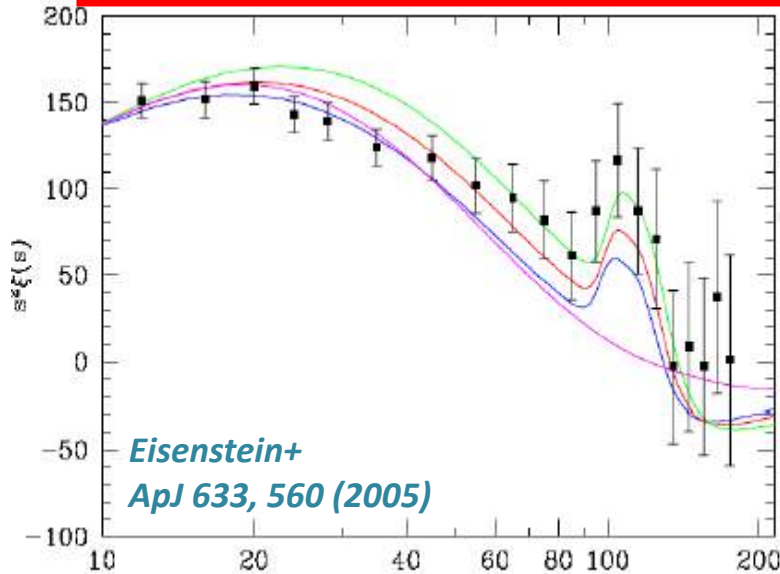
Gel de l'onde à la recombinaison, à distance comobile  $r_s \sim 150$  Mpc

**Règle standard  
des grandes structures  
Une échelle 3D privilégiée**

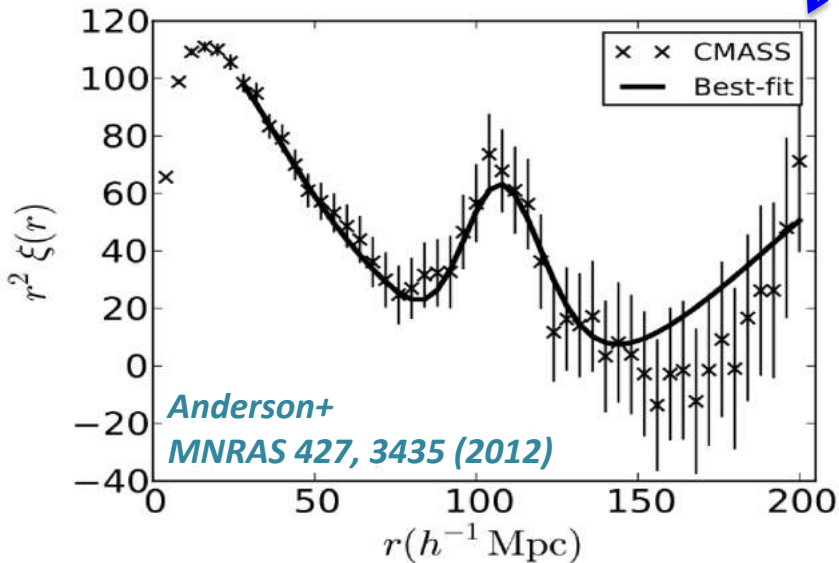


# Oscillations Acoustiques des Baryons (BAO)

## Observations



2005: Première détection du pic BAO  
2012: Confirmation à  $5\sigma$  par BOSS



# Oscillations Acoustiques des Baryons (BAO)

## Observations

2005: Première detection du pic BAO

2012: Confirmation à  $5\sigma$  par BOSS

2014: Première mesure **3D** du **BAO**

### Direction transverse

$$\Delta\theta = r_s / [(1+z) D_A(z)]$$

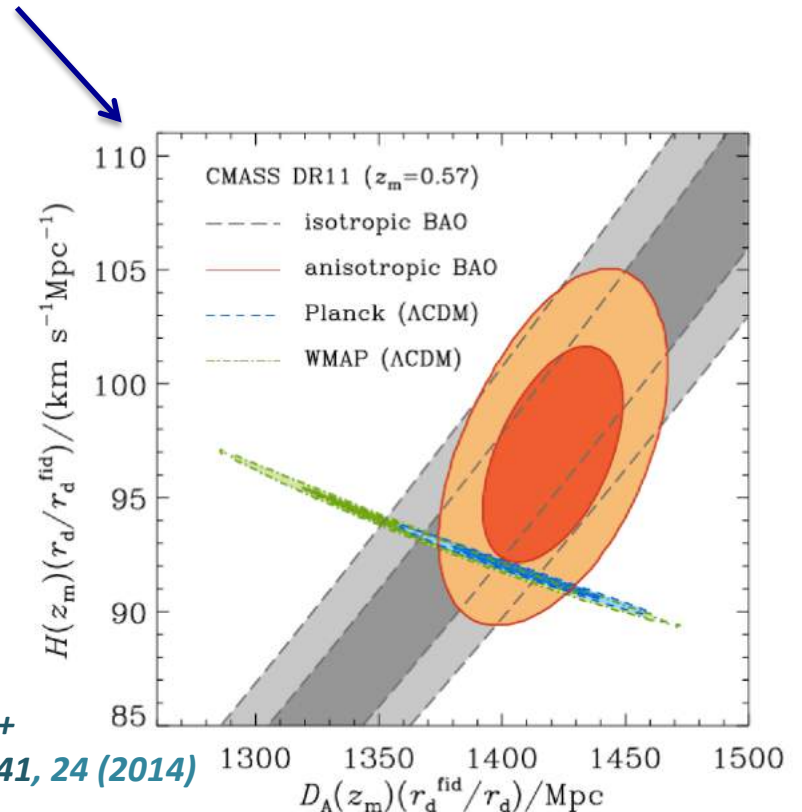
⇒ Distance angulaire  $D_A(z)$

comme SNIa:  $D_L(z) = (1+z)^2 D_A(z)$

### Direction radiale (ligne de visée)

$$\Delta z = r_s H(z) / c$$

⇒ Parameter de Hubble  $H(z)$

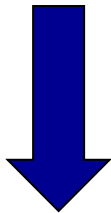
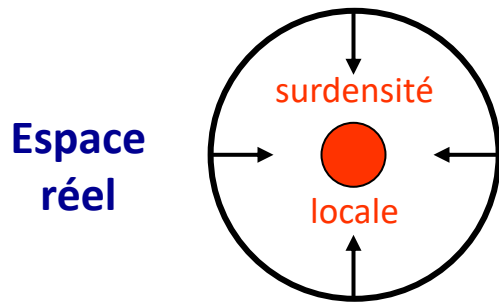


Anderson+

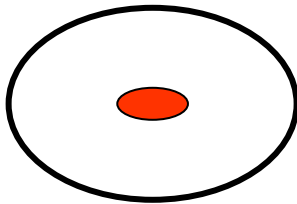
*MNRAS* 441, 24 (2014)

# Redshift Space Distortion (RSD)

→ Vitesses particulières



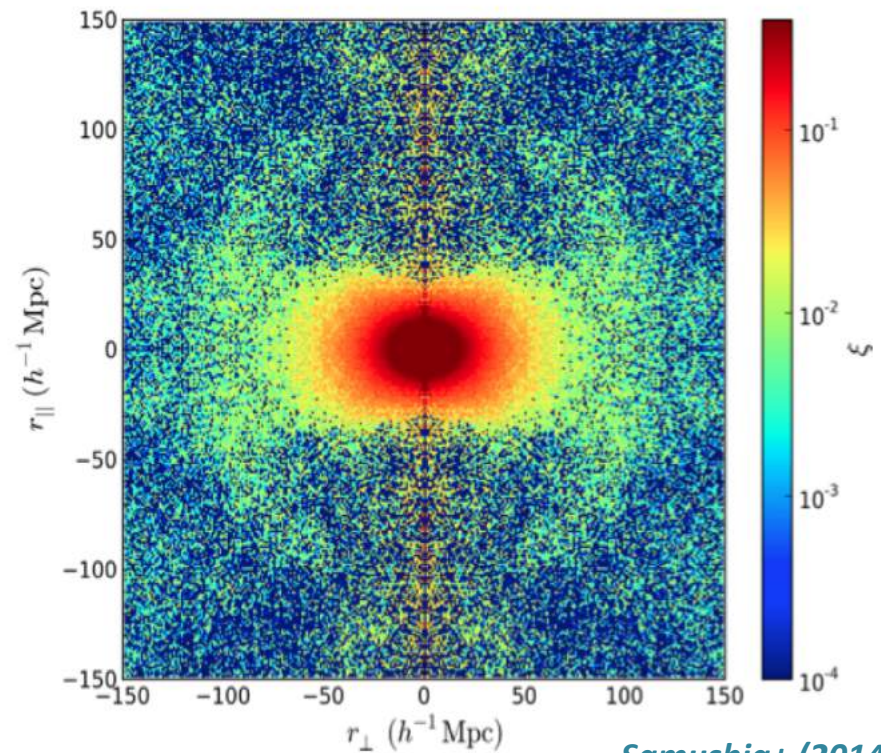
Espace des redshifts



Mesure de la croissance gravitationnelle

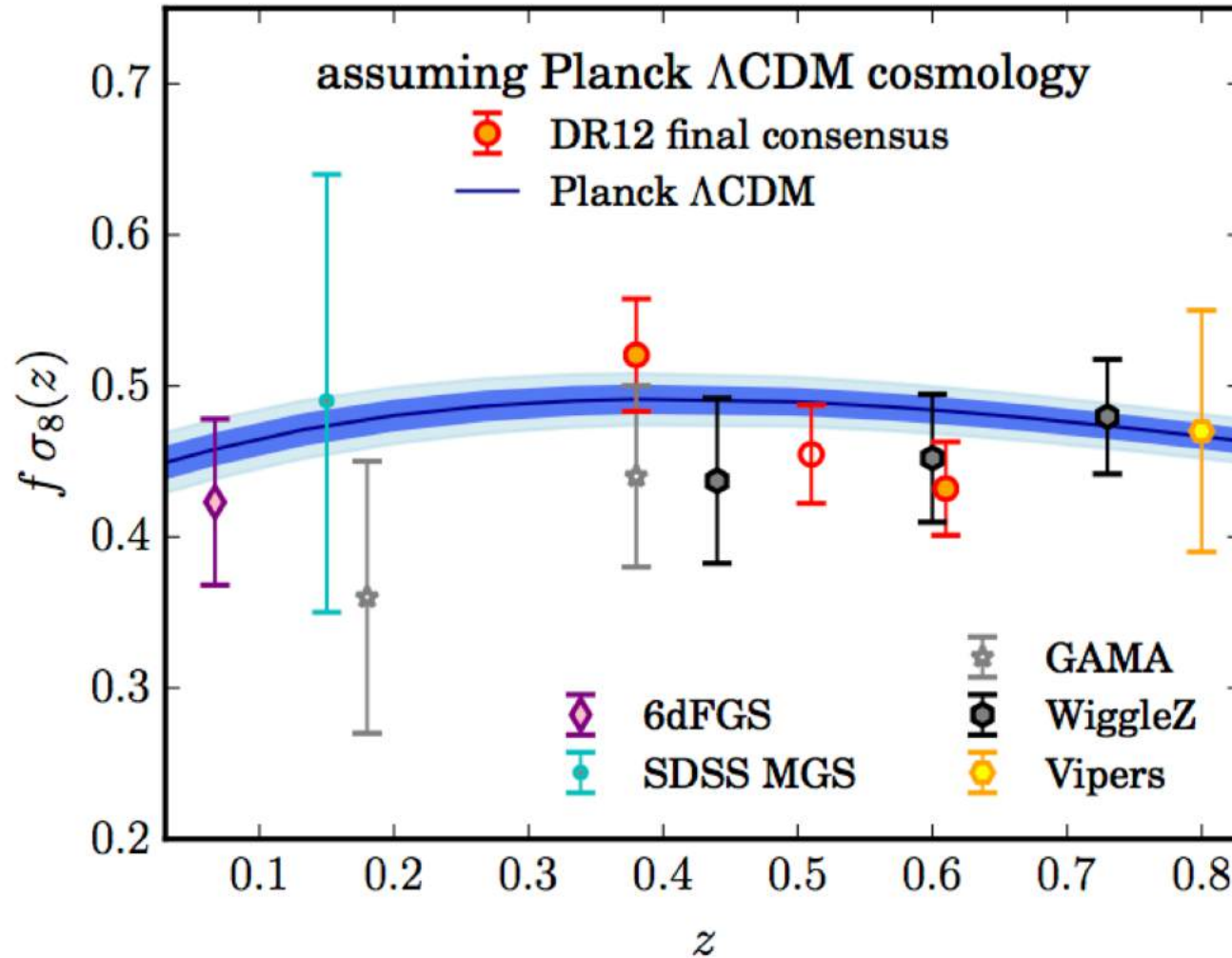
$$P_F(k) = b_F^2 \times \left[ 1 + \beta \cos(\theta)^2 \right]^2 \times P_L(k)$$

$$\beta \rightarrow f\sigma_8$$



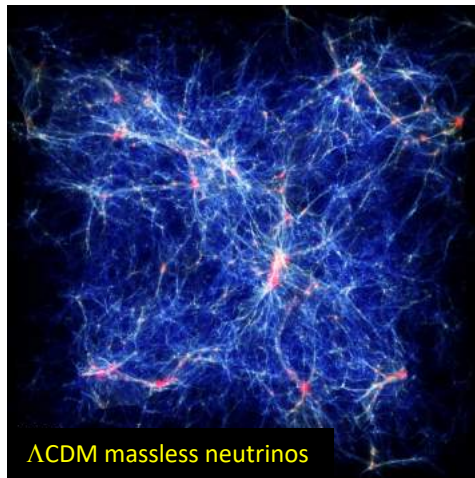
Samushia+ (2014)

# Redshift Space Distortion (RSD)



*Alam+ (2016)*

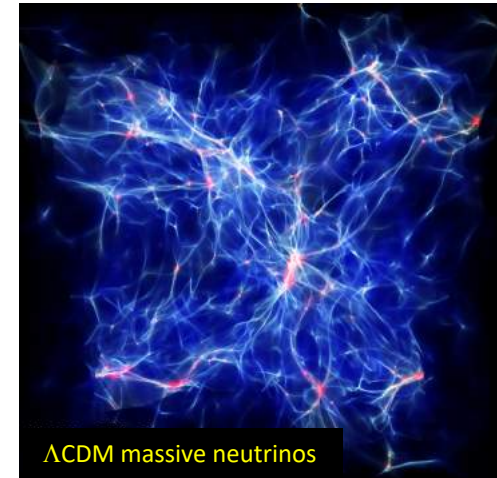
# Structuration petite échelle et libre propagation



Libre propagation des  
particules relativistes  
(simulations hydrodynamiques)



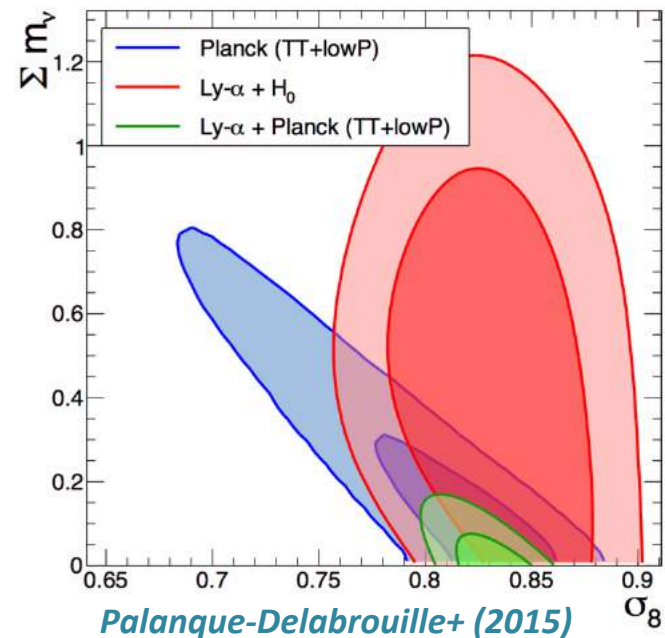
**Suppression des  
petites échelles**



Suppression dépend de masse des particules



**Contrainte sur  $\Sigma m_\nu$**   
**Contrainte sur masse de matière noire tiède**



# *Structures dans le Sloan*

Sloan: grande saga de la structuration

- Objectifs cosmologiques principaux

  - BAO (énergie noire)

  - RSD (gravité)

- Objectifs additionnels

  - Libres propagations

**BOSS & Lyman- $\alpha$**

Contraindre masse des neutrinos

Nature matière noire



# Sloan Digital Sky Survey

- **Télescope de 2.5m (Nouveau Mexique)**
- **Cartes 3D des structures**
  - $(\alpha, \delta)$  à partir de  
BOSS: 10 000 deg<sup>2</sup>  
eBOSS: 7 500 deg<sup>2</sup>
  - $z$  à partir de 1000 fibres

**BOSS 2009-2014**  
**eBOSS 2014-2020**



# Sloan BOSS et eBOSS

Forêt Ly $\alpha$   
z ~ 2.5

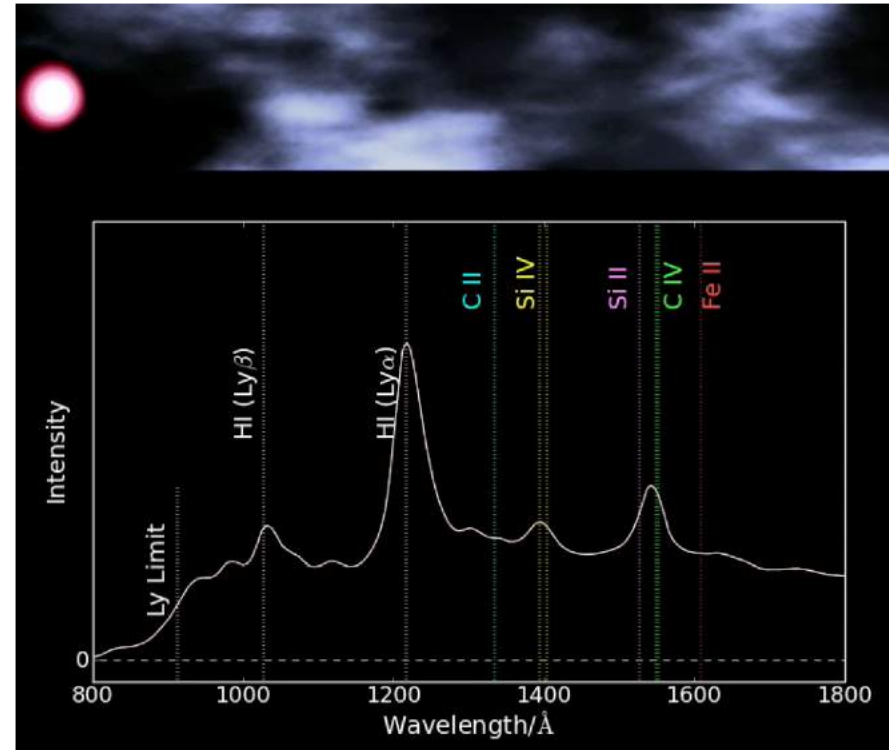
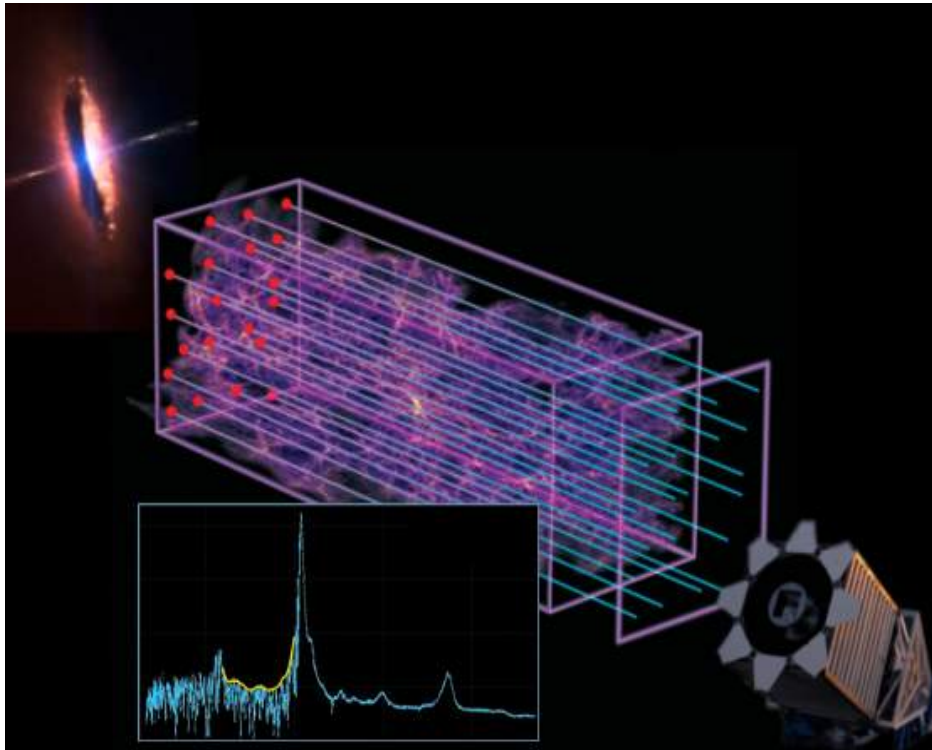
	BOSS		eBOSS	
<b>LRG</b>	1.2 10 <sup>6</sup>	z ~ 0.57	+ 250 10 <sup>3</sup>	z ~ 0.72
<b>ELG</b>	—		200 10 <sup>3</sup>	z ~ 0.87
<b>Quasars</b>	—		500 10 <sup>3</sup>	0.9 - 2.1
<b>Ly<math>\alpha</math></b>	180 10 <sup>3</sup>	z > 2.1	+ 60 10 <sup>3</sup>	z > 2.1

QSO  
z ~ 1.5

ELG  
z ~ 0.87

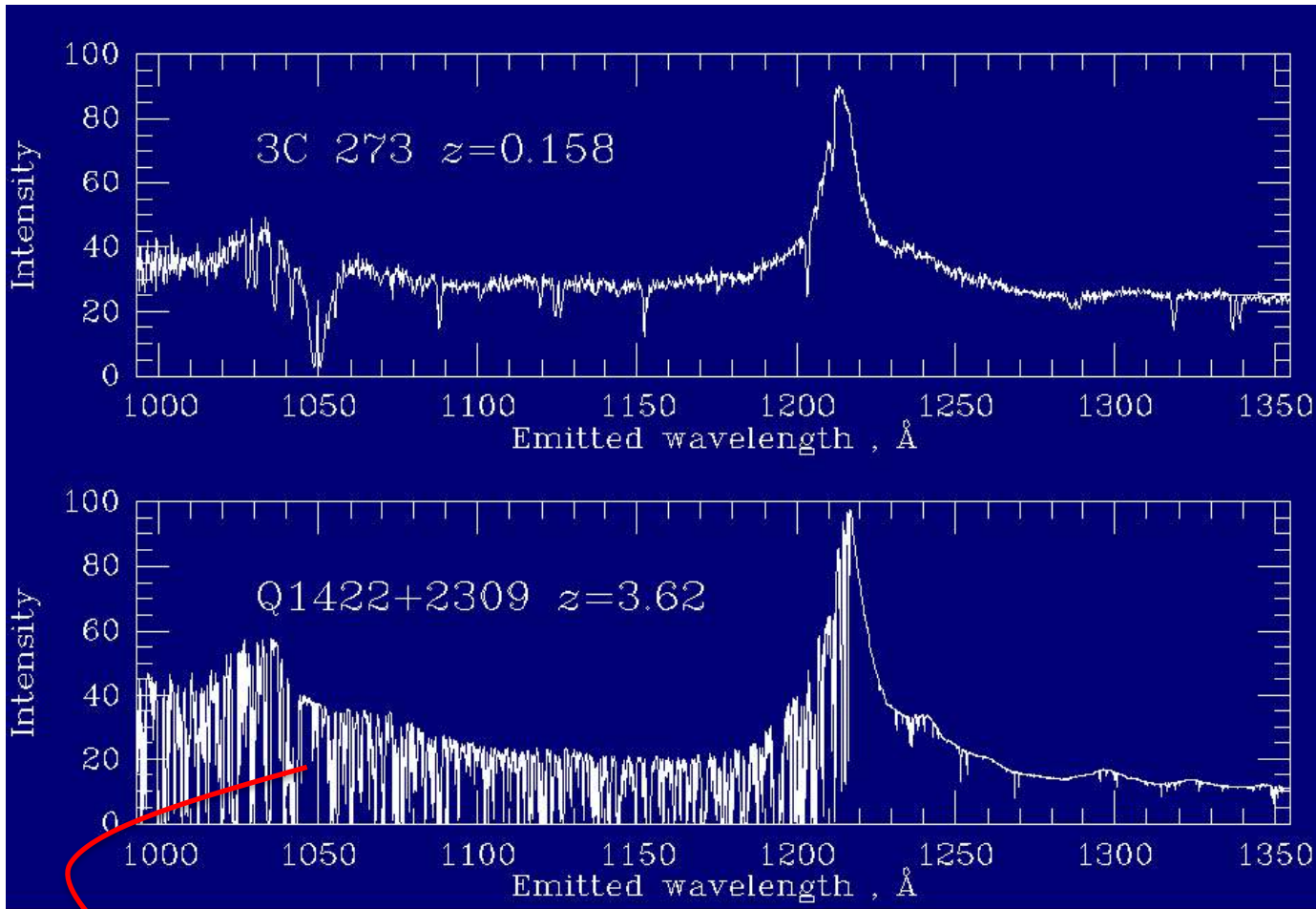
LRG  
z ~ 0.57

# Forêt Ly $\alpha$



- Quasars visibles à **grand redshift** ( $z \sim 5$ )
- Absorption par H neutre (milieu intergalactique) sur trajet de la lumière
- Milieu intergalactique = sonde de la densité de **matière**
- Distribution de la matière **aux petites échelles** ( $v, v_s$ )
- Spectre de puissance 1D (le long de ligne de visée)

# Forêt Ly $\alpha$



Faible densité de  
H neutre  
dans Univers  
local  
(~100% ionisé)

Grande densité de  
H neutre  
dans Univers  
lointain

Fraction de flux transmis:  $\delta = \frac{f - \langle f \rangle}{\langle f \rangle}$

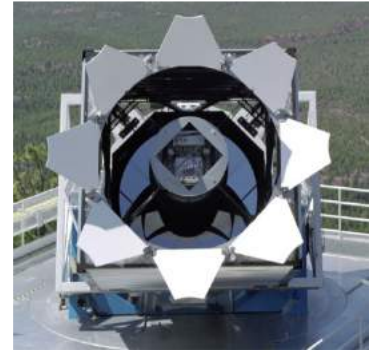
# Spectre de puissance 1D de forêt Ly $\alpha$

---

Selection de **~14 000** sur 60 000 QSOs BOSS ( $z > 2.1$ )

Étude détaillée des contributions

- du détecteur (**resolution spectrale**, **bruit**)
- astrophysiques (émission ciel, corrélation avec autres absorbeurs)



$$P_{\text{Brut}}(k) = [P_{\text{Ly}\alpha}(k) + P_{\text{Ly}\alpha\text{-SiIII}}(k) + P_{\text{metaux}}(k)] \times W^2(k) + P_{\text{Bruit}}(k)$$

# Spectre de puissance 1D de forêt Ly $\alpha$

**BOSS**

NPD, Yeche+ (2013)

12 bins  $z=2.2$  to 4.4

**XQ100**

Yeche, NPD+ (2017)

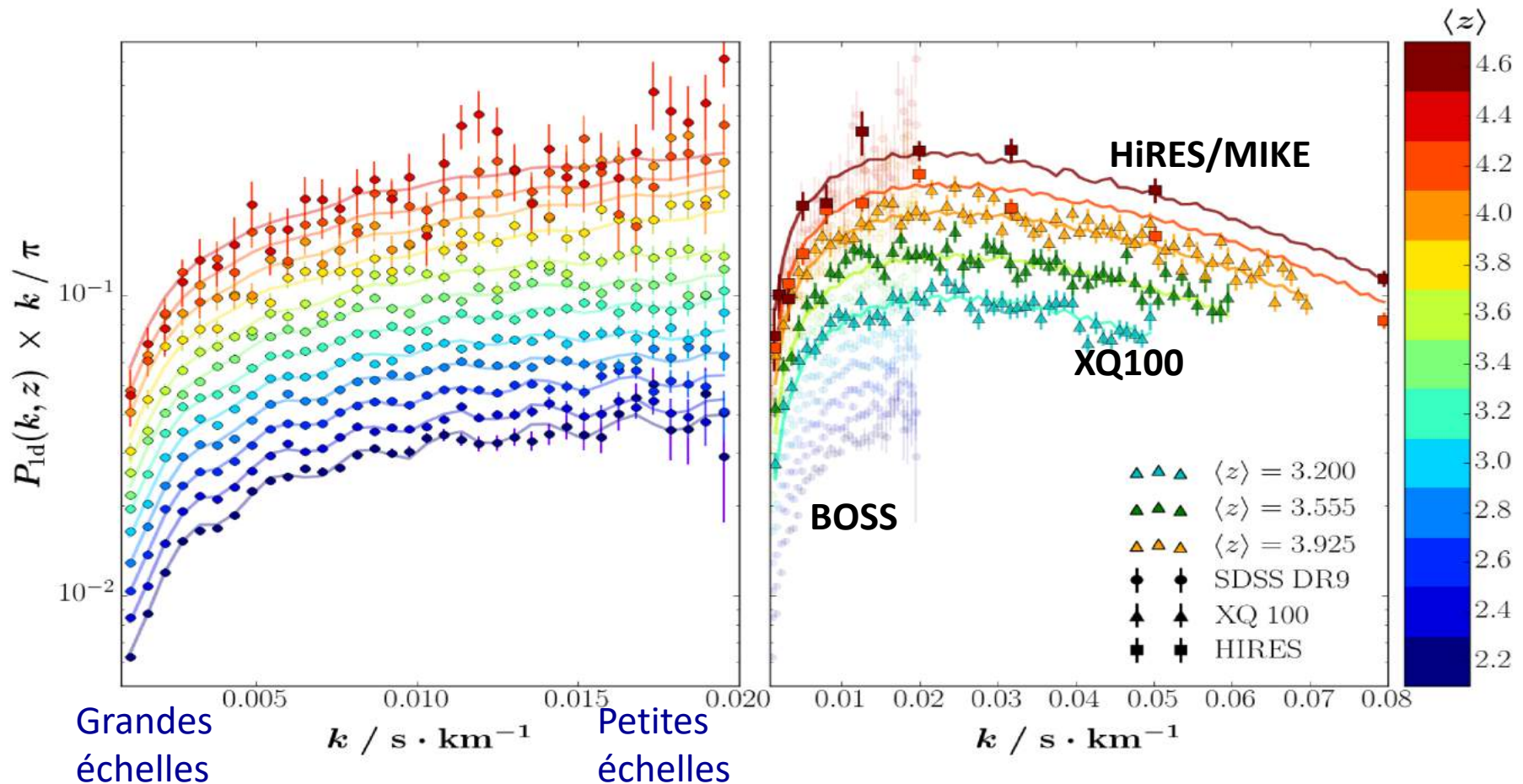
Irsic, Viel+ (2017)

$z=3.2, 3.6, 3.9$

**HiRES/MIKE**

Viel, Becker+ (2013)

$z=4.2, 4.6, (5.4)$



# ***Structures dans le Sloan***

Sloan: grande saga de la structuration

- Objectifs cosmologiques principaux

  - BAO (énergie noire)

  - RSD (gravité)

- Objectifs additionnels

  - Libres parcours

**BOSS & Lyman- $\alpha$**

**Contraindre masse des neutrinos**

**Nature matière noire**

# Pourquoi les $\nu$ ont une masse

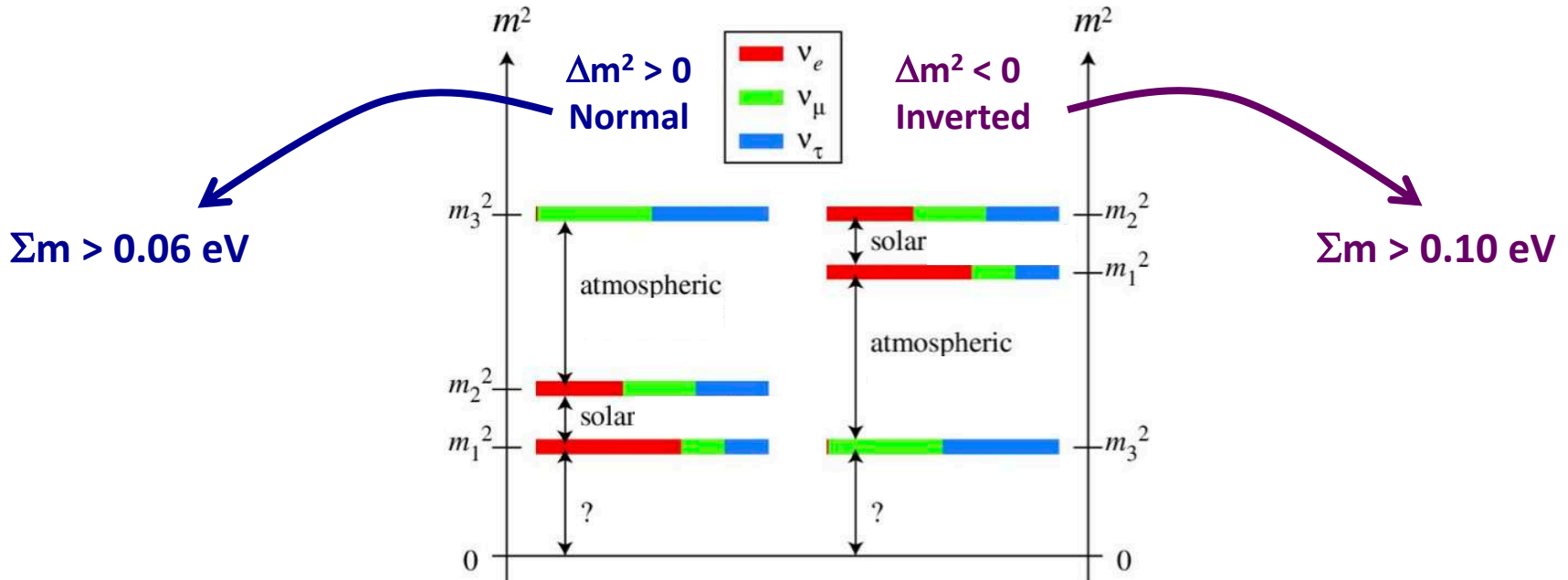
Oscillations des neutrinos  $\Rightarrow$  les  $\nu$  sont massifs

Solaires  $\delta m^2 \sim 7.5 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$   
 Atmosphériques  $\Delta m^2 \sim 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$

$$0.06 \text{ eV} < \Sigma m_\nu < 6 \text{ eV}$$

Détection directe de  $m_\nu$   
 (Désintégration  $\beta$  du Tritium)

$$m_e < 2 \text{ eV}$$





# Pourquoi les $\nu$ ont une masse

---

Dans l'Univers,  $n_\nu \sim n_\gamma \sim 3 \cdot 10^9 n_p$

$\Rightarrow$  même pour  $m_\nu \sim 0.1 \text{ eV} = 10^{-10} m_p$

Masse totale des  $\nu$  ( $n_\nu m_\nu$ )  $\sim$  masse stellaire totale ( $n_p m_p$ ) !

$\Rightarrow$  La cosmologie peut-elle apporter quelque chose?

# $m_\nu$ & grandes structures

Dans l'univers primordial, les neutrinos sont relativistes

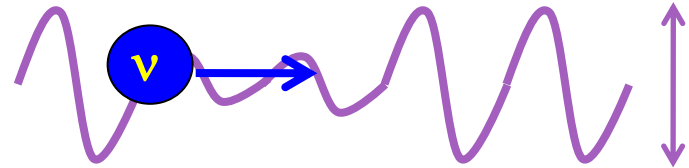
Ils se propagent à  $v=c$  (jusqu'à ce qu'ils deviennent non-relativistes au temps  $t_{nr}$ )

⇒ Lissage des perturbations de longueur d'onde  $\lambda < ct_{nr}$

Mais structuration normale pour  $\lambda > ct_{nr}$

- Neutrinos lourds ( $t_{nr}$  tôt)

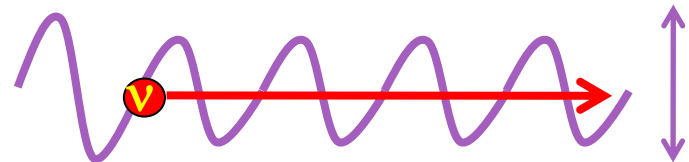
Forte suppression sur courte distance



$m_\nu \sim \text{keV} \Rightarrow$  lissage des perturbations de la taille de galaxies naines

- Neutrinos légers ( $t_{nr}$  tard)

Faible suppression sur grande distance



$m_\nu \sim \text{eV} \Rightarrow$  lissage des perturbations de la taille d'amas de galaxies

# Impacte de $m_\nu$ sur grandes structures

## Spectre de puissance de la matière

Espace réel (Mpc)  $\leftrightarrow$  Mode  $k$  ( $\text{Mpc}^{-1}$ )

Horizon causal  $\nearrow$  avec le temps

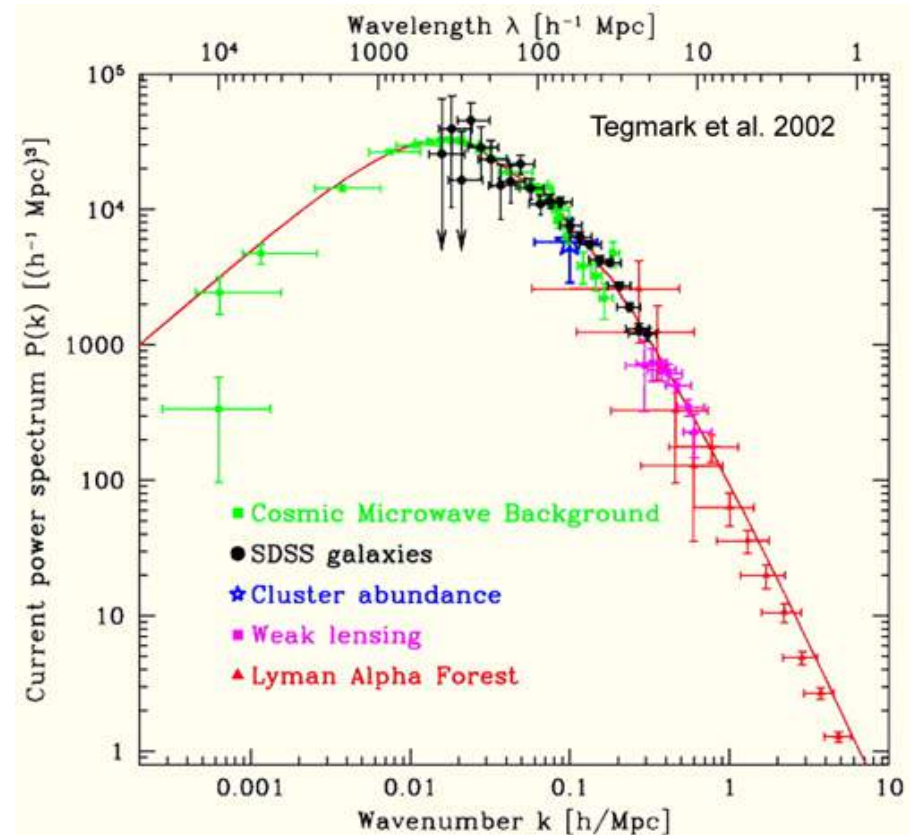
- Événements tôt  $\leftrightarrow$  petites échelles
- Événements tardifs  $\leftrightarrow$  grandes échelles

La libre propagation

des  $\nu$  relativistes

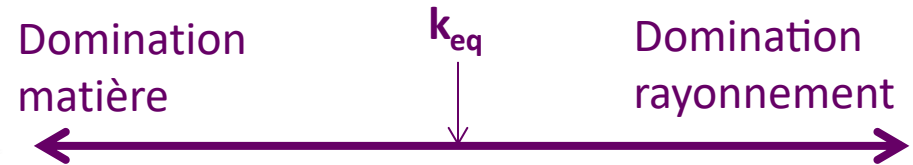
réduit la puissance aux petites échelles

Domination matière  $\leftarrow$   $k_{\text{eq}}$   $\rightarrow$  Domination rayonnement



$\leftarrow$  Grandes échelles  $\rightarrow$  Petites échelles

# Impact of $m_\nu$ on large-scale structures



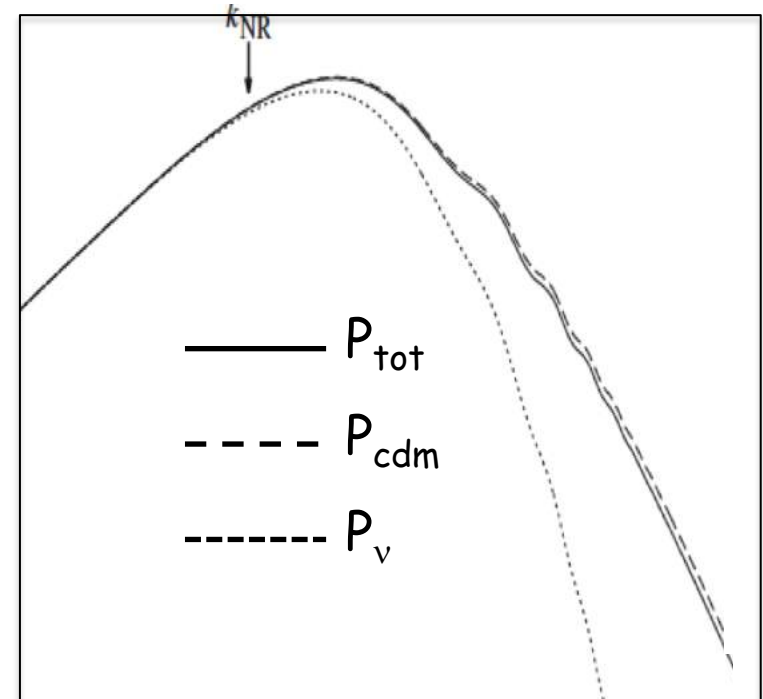
## Spectre de puissance de la matière

Espace réel (Mpc)  $\leftrightarrow$  Mode  $k$  ( $\text{Mpc}^{-1}$ )

Horizon causal  $\nearrow$  avec le temps

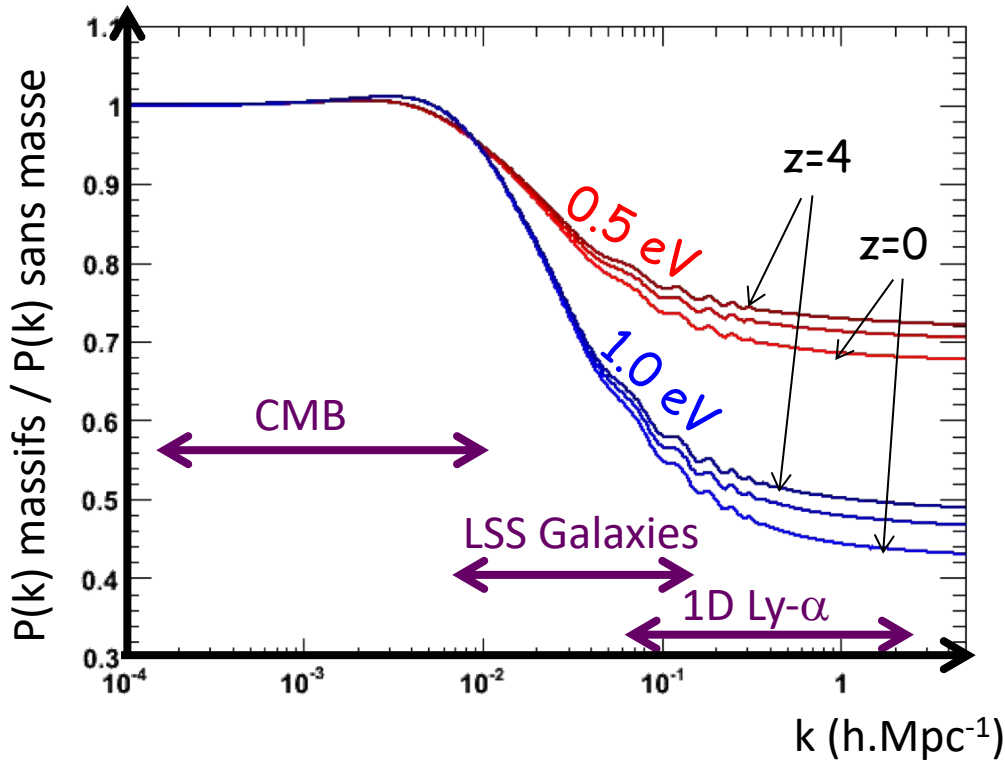
- Événements tôt  $\leftrightarrow$  petites échelles
- Événements tardifs  $\leftrightarrow$  grandes échelles

La libre propagation  
des  $\nu$  relativistes  
réduit la puissance aux petites échelles



# Neutrinos and large-scale structures

Sondes différentes  $\Leftrightarrow$  différentes échelles



Grandes  
échelles

Petites  
échelles

- Facteur de suppression  $\Leftrightarrow \Sigma m\nu$

- Suppression dépend de  $z$

- **Ly- $\alpha$**

- Petites échelles, effet max

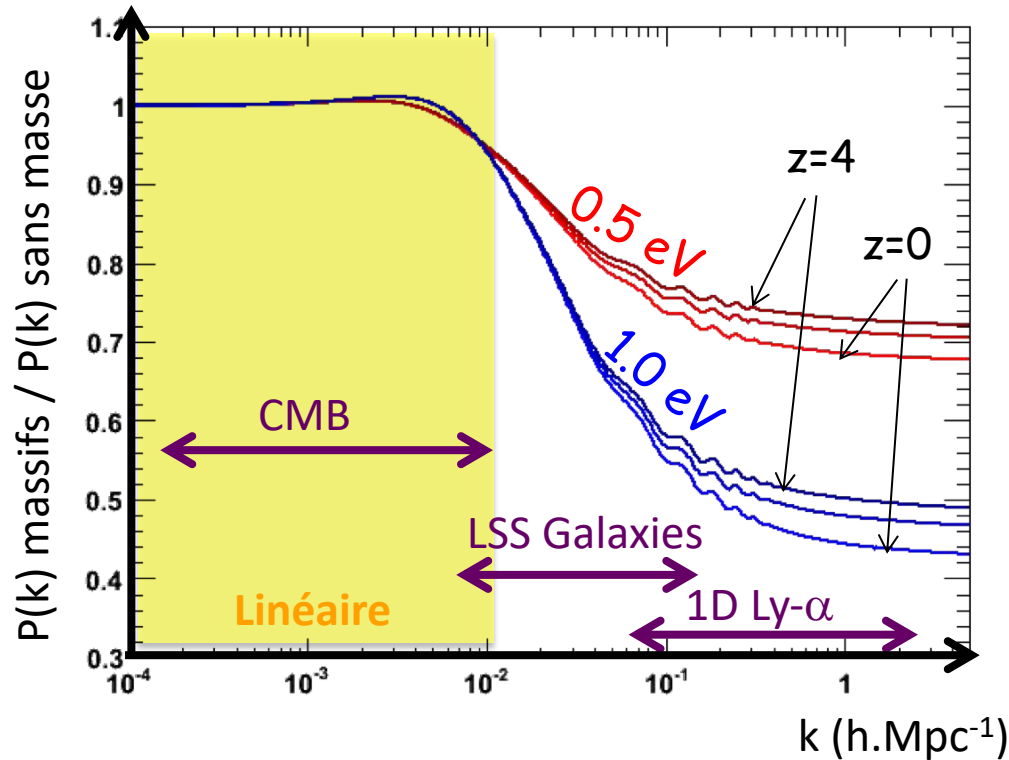


- Large gamme en  $z$  [2.1 ; 4.5]



# Neutrinos et grandes structures

Sondes différentes  $\Leftrightarrow$  différentes échelles



Grandes échelles

Petites échelles

- Facteur de suppression  $\Leftrightarrow \Sigma m\nu$

- Suppression dépend de  $z$

- **Ly- $\alpha$**

- Petites échelles, effet max



- Large gamme en  $z$  [2.1 ; 4.5]



- Régime non-linéaire,  $P(k)$  du flux (et non masse)

- $\Rightarrow$  Simulations hydro



# Simulations hydrodynamiques

$(100 h^{-1} \text{Mpc})^3$  avec  $3072^3$  particules/espèce

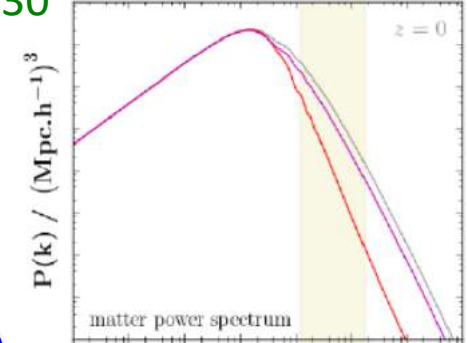
*McDonald (2003) splicing approach*

- matière noire
- baryons
- neutrinos (tous de même masse)

2LPTic

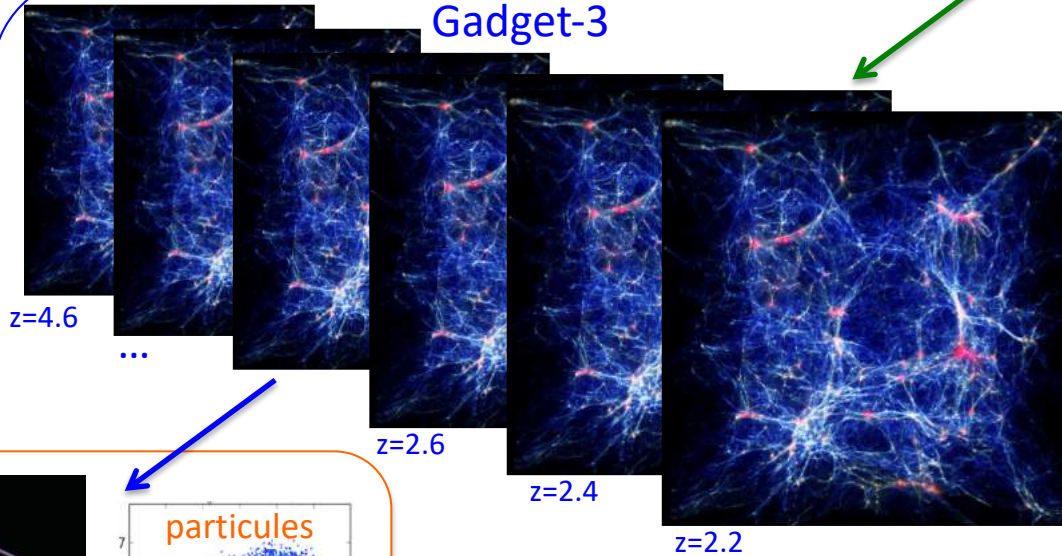
$z=30$

CAMB



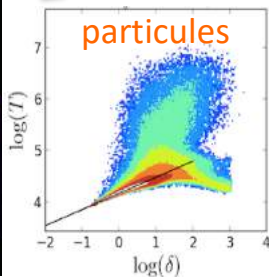
conditions Initiales

Gadget-3



simulation  
N-body + SPH

Spectre de puissance Ly- $\alpha$



*Borde, NPD et al. (2014)*

*Rossi, NPD et al. (2014)*

# Simulations hydrodynamiques

## Grille de simulations

→ Expansion de Taylor du 2ème ordre pour paramètres cosmo & astro centrée sur Planck (2013)

$$f(\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + \sum_i \frac{\partial f}{\partial x_i}(\mathbf{x}) \Delta x_i + \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}(\mathbf{x}) \Delta x_i \Delta x_j$$



TGCC Bruyères-le-château

Cosmology

Intergalactic Medium

Optical Depth

parameter	central	range
$keV / m_X$	0.0	+0.2 +0.4
$\Sigma m_\nu / eV$	0.0	+0.4 +0.8
$h$	0.675	$\pm 0.05$
$\Omega_M$	0.31	$\pm 0.05$
$\sigma_8$	0.83	$\pm 0.05$
$n_s$	0.96	$\pm 0.05$
$dn_s / d \ln k$	0.00	$\pm 0.04$
$z_{reio}$	12	$\pm 4$
$N_{eff}$	3.046	$\pm 1$
$T_0^{z=3} / K$	14,000	$\pm 7,000$
$\gamma^{z=3}$	1.3	$\pm 0.3$
$A^\tau$	0.0025	$\pm 0.0020$
$\eta^\tau$	3.7	$\pm 0.4$



# Simulations hydrodynamiques

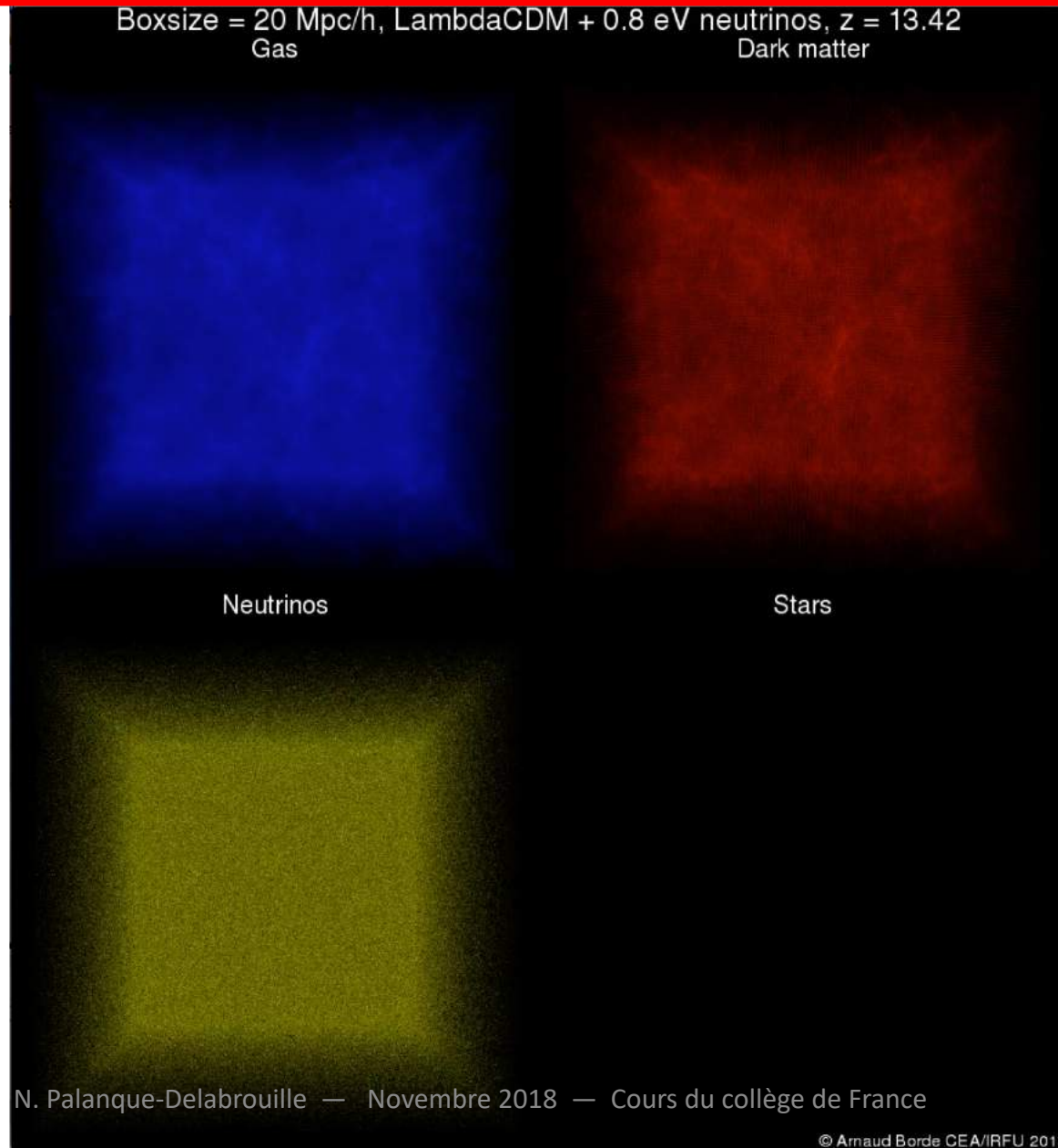
Boxsize = 20 Mpc/h, LambdaCDM + 0.8 eV neutrinos,  $z = 13.42$   
Gas Dark matter

$z = 15 \rightarrow 0$

3 espèces

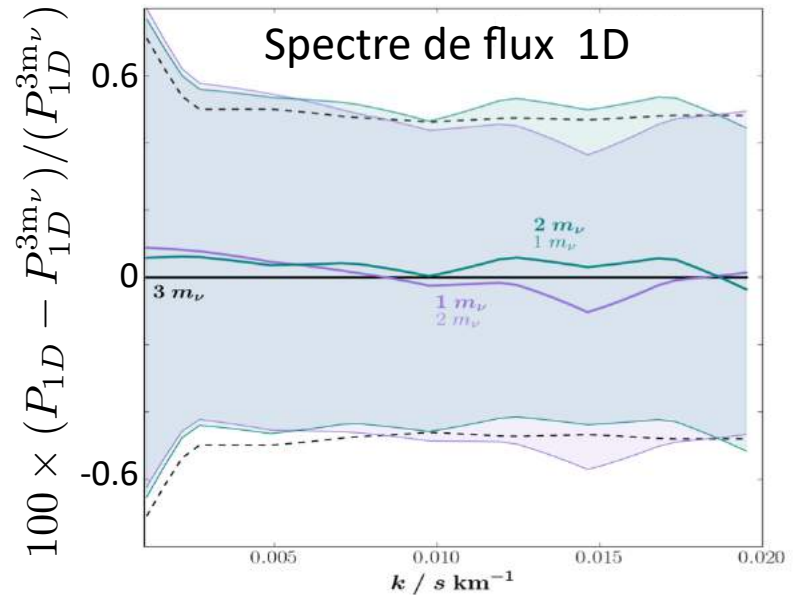
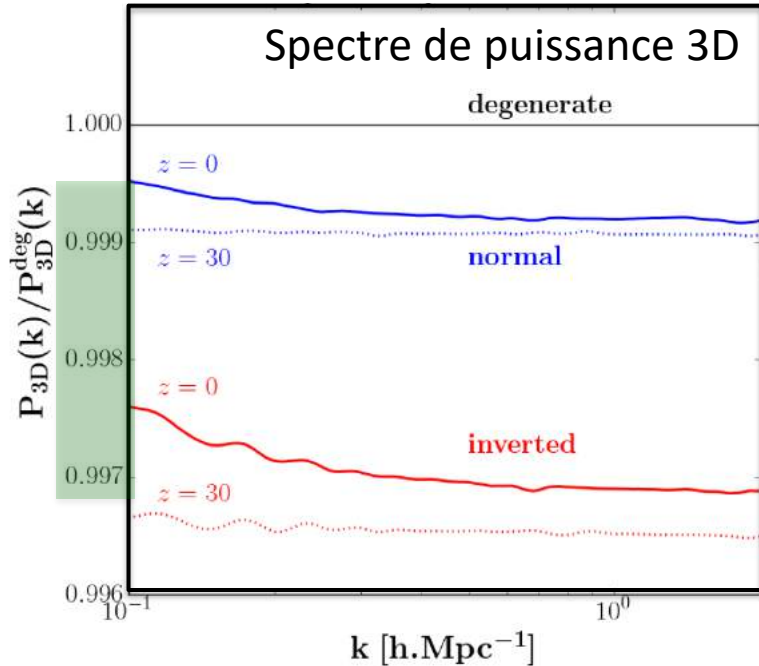
- Baryons
- Matière noire
- Neutrinos

Etoiles formées  
à partir  
des baryons



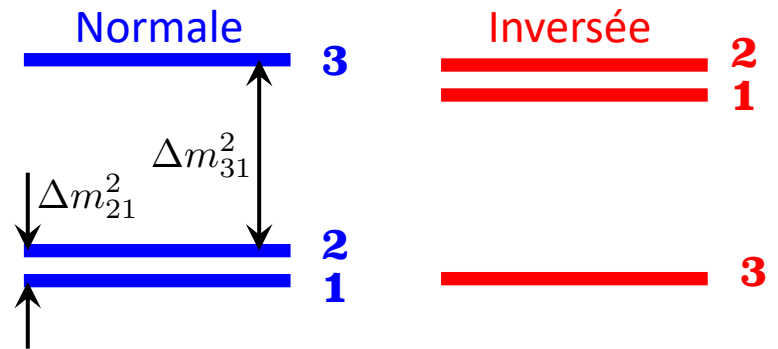
@ A. Borde  
(CEA-Saclay)

# Masse ( $\Sigma m$ ) ou masses ( $m_i$ ) des neutrinos?



Hierarchie	$m_1$	$m_2$	$m_3$
Dégénérée	0.033	0.033	0.033
Normale	0.022	0.024	0.055
Inversée	0.0007	0.049	0.050

$\Sigma m = 0.10 \text{ eV}$

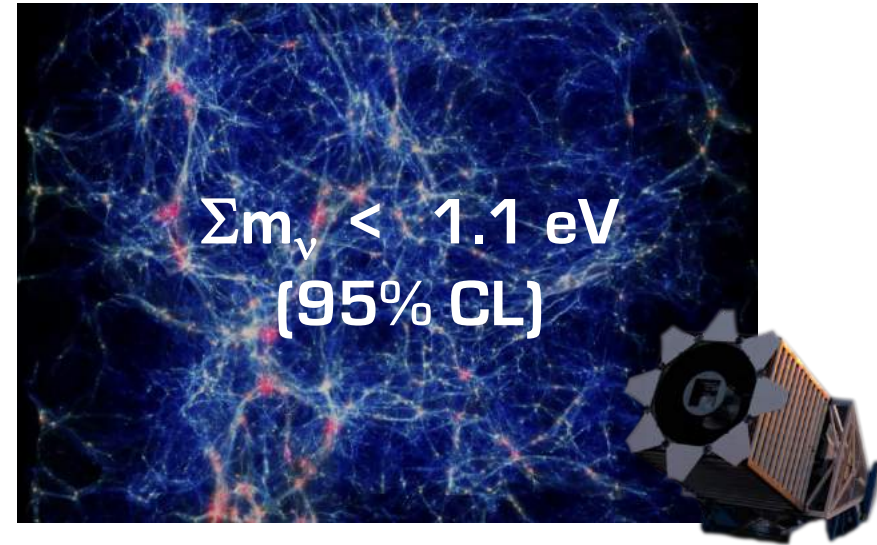


NPD, Yeche, Baur+ (2015)

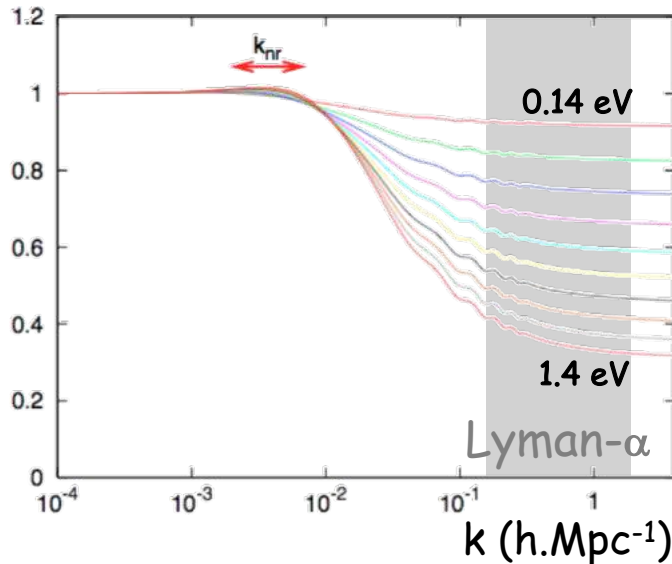


'Exclusivement' effet de  $\Sigma m$

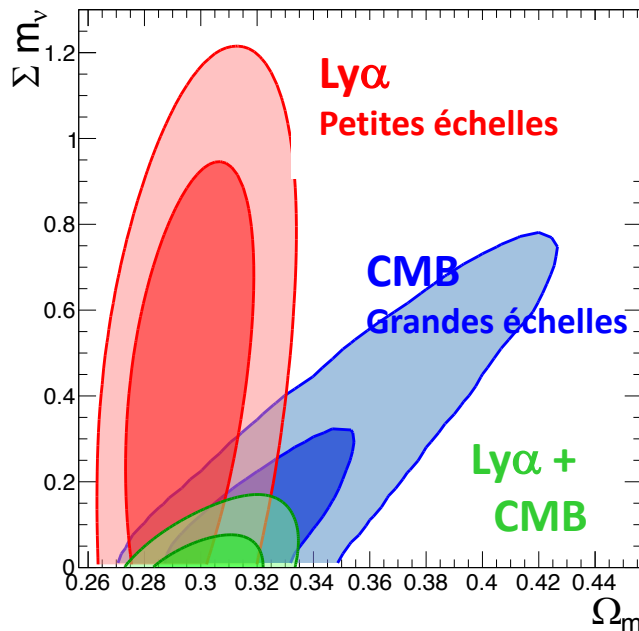
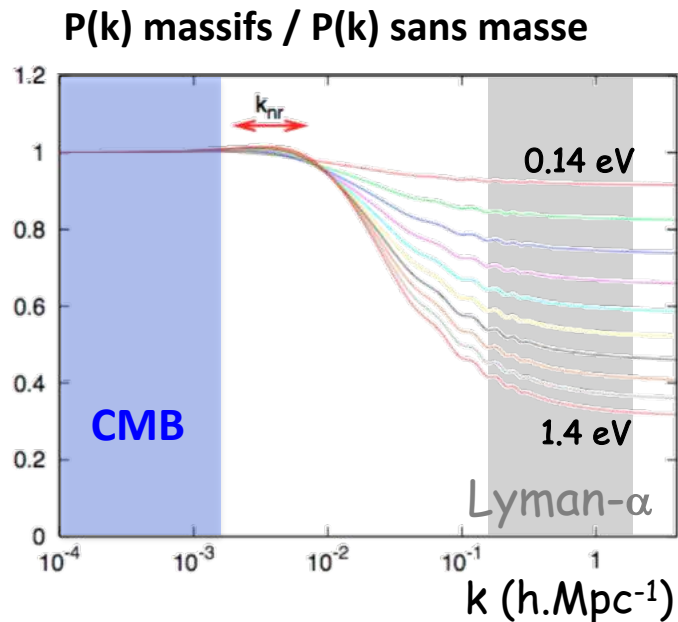
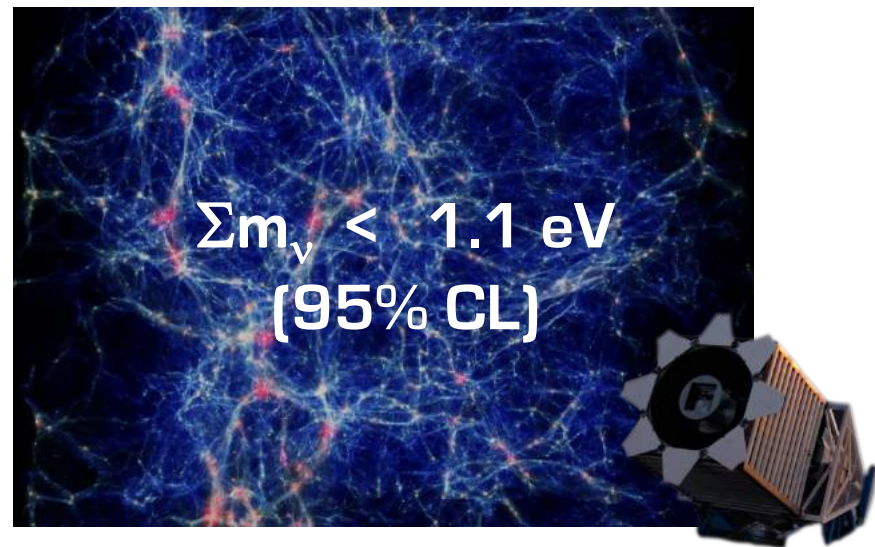
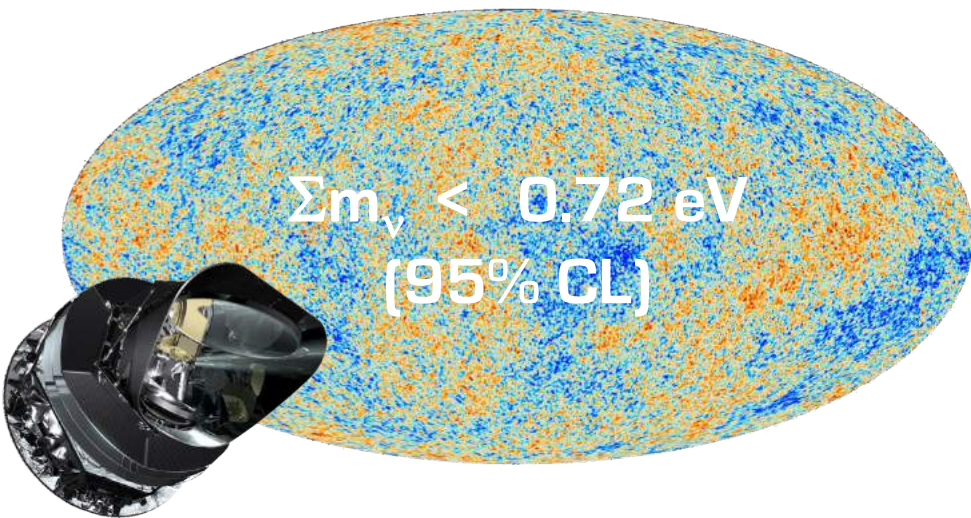
# Contrainte sur $M_\nu$



$P(k)$  massifs /  $P(k)$  sans masse



# Contrainte sur $M_\nu$



$\Sigma m_\nu < 0.12 \text{ eV}$

*NPD, Yèche, Borde  
et al. (2015)*

*NPD, Yèche, Baur,  
et al. (2015)*

# *Structures dans le Sloan*

Sloan: grande saga de la structuration

- Objectifs cosmologiques principaux

  - BAO (énergie noire)

  - RSD (gravité)

- Objectifs additionnels

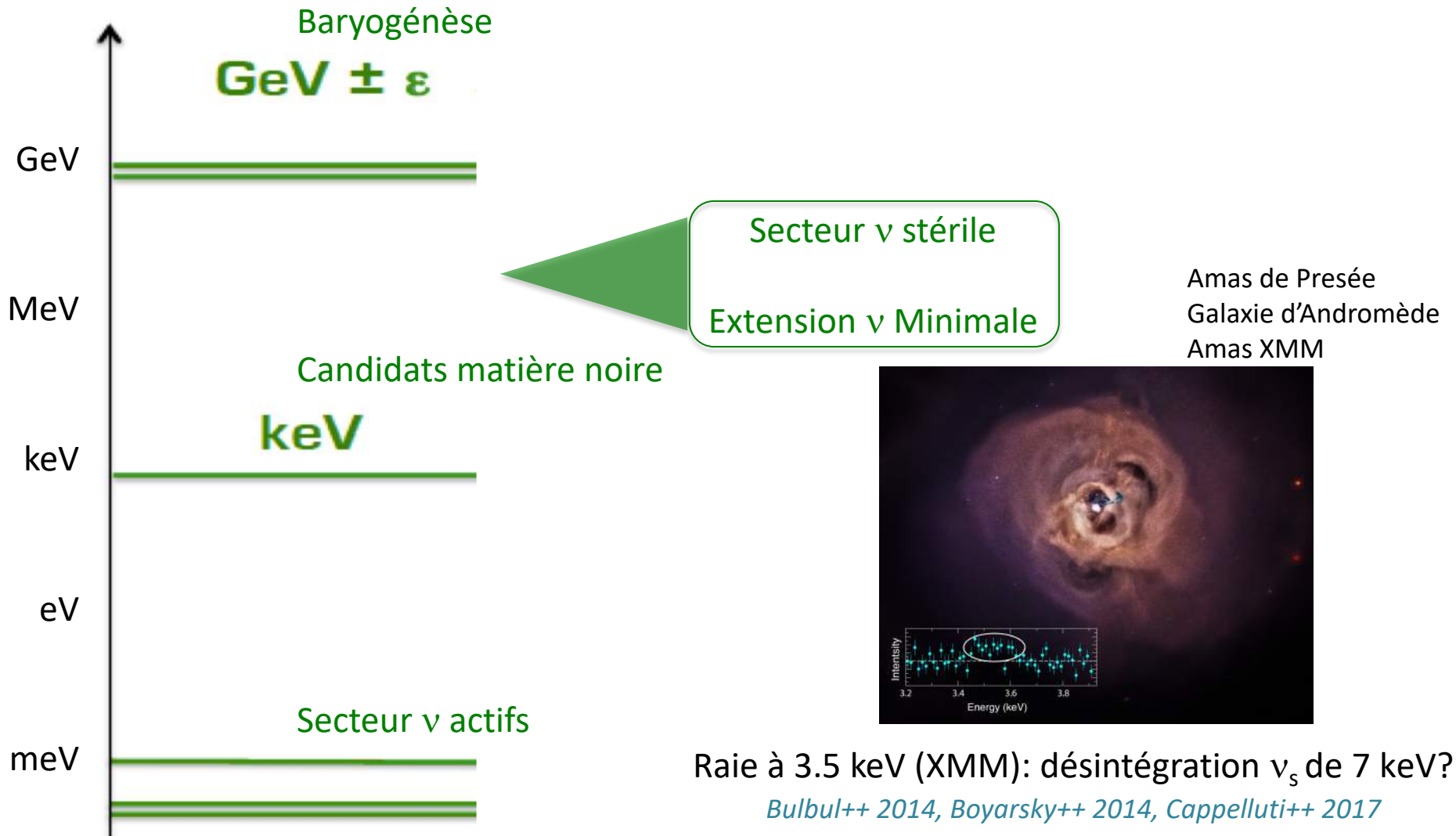
  - Libres propagations

BOSS & Lyman- $\alpha$

Contraindre masse des neutrinos

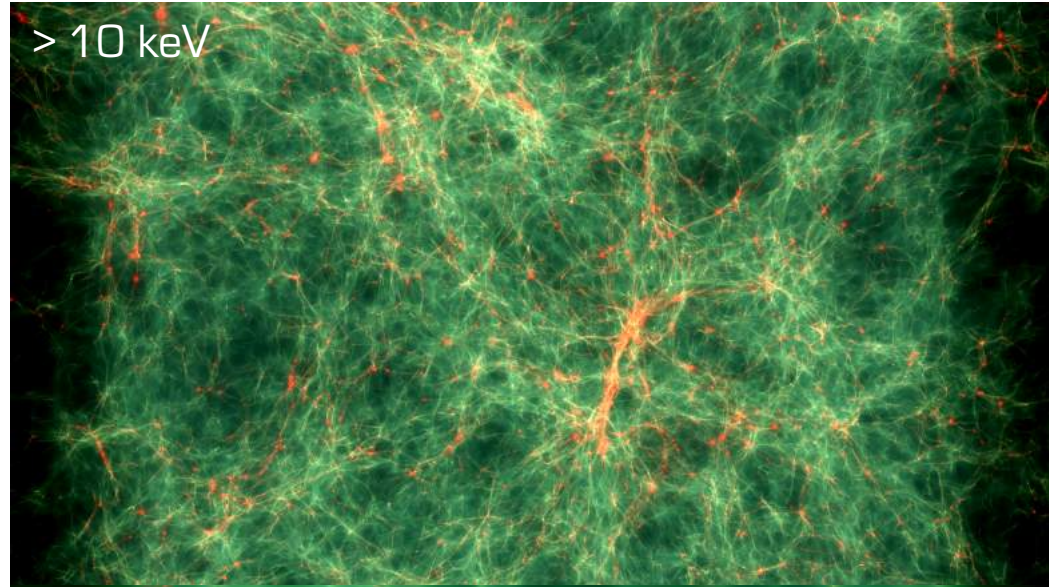
**Nature matière noire**

# Secteur des neutrinos stériles



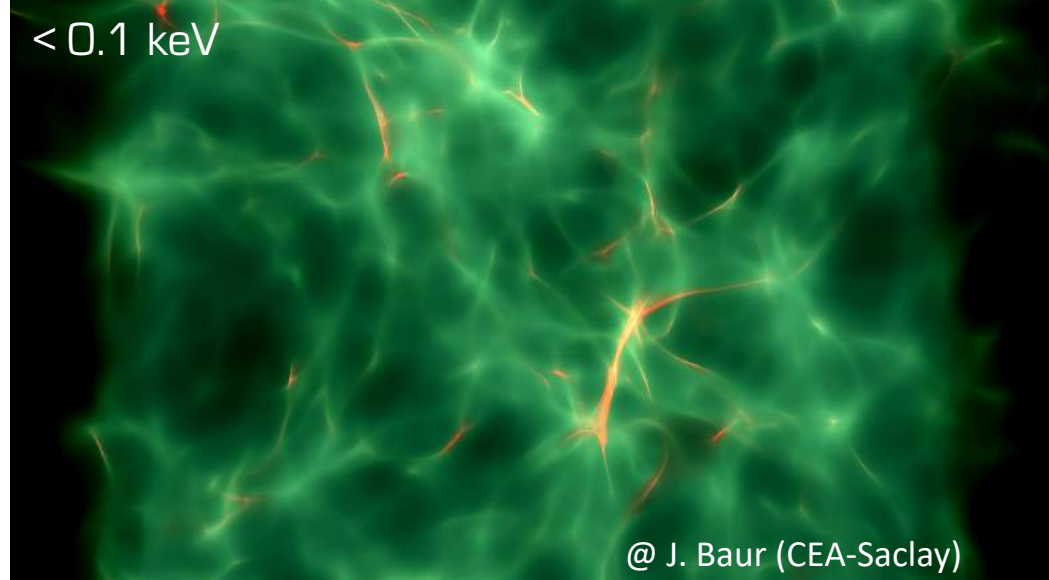
# Matière noire tiède

Matière noire **Froide** > 10 keV



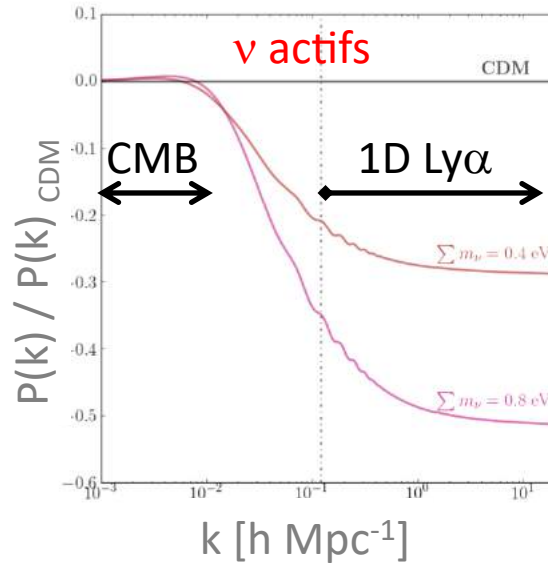
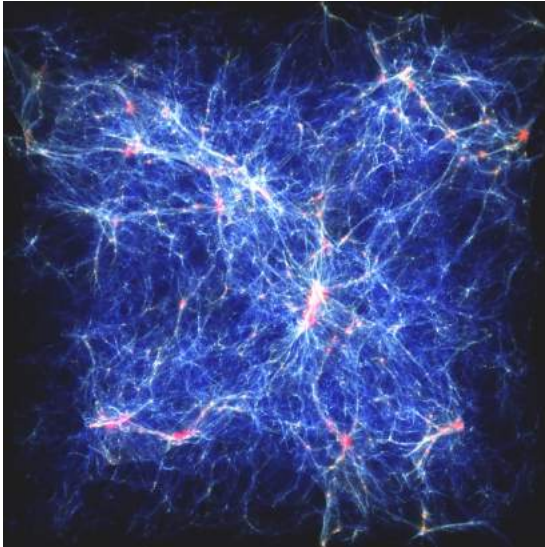
Si toute la  
matière noire  
était

Matière noire **Chaude** < 0.1 keV



@ J. Baur (CEA-Saclay)

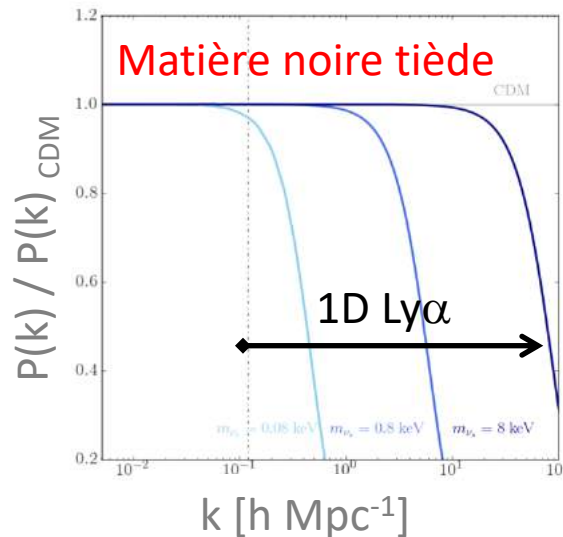
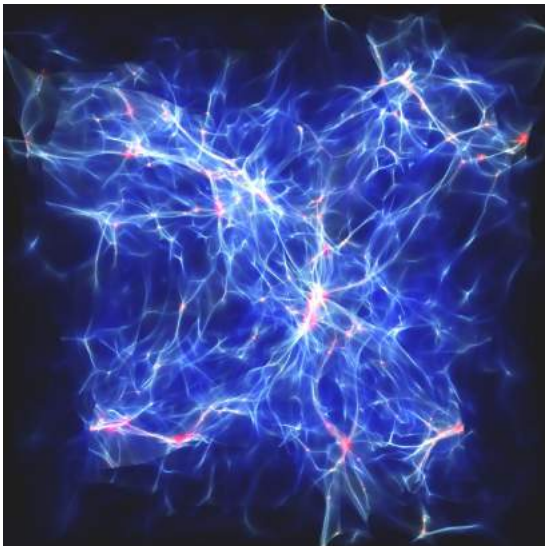
# Forêt Lyman- $\alpha$ et cosmologie



## Neutrinos actifs

- Comparaison CMB vs.  $P(k)$  Ly $\alpha$
- Impact plus grand quand  $m_\nu$  croît

⇒ Limite sup sur  $m_\nu$



## Matière noire tiède

- Suppression de puissance aux petites échelles
- Impact plus grand quand  $m_{\text{WDM}}$  décroît

⇒ Limite inf sur  $m_{\text{WDM}}$



# Forêt Lyman- $\alpha$ & matière noire tiède

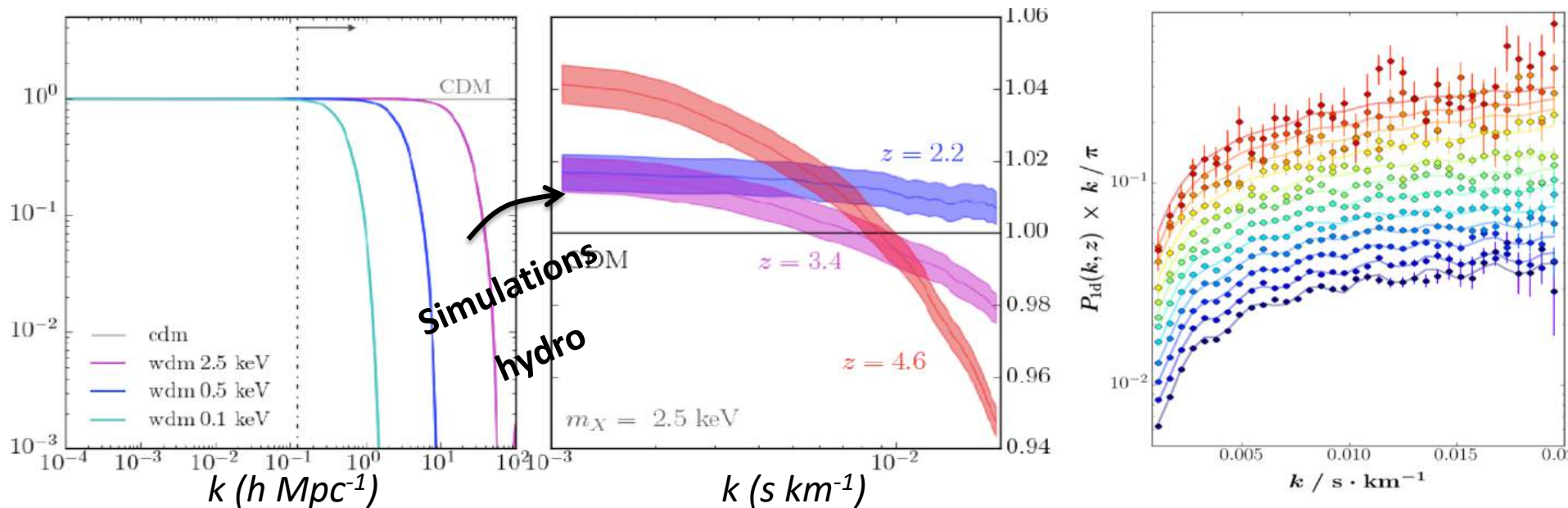
$$P_{\text{WDM}}(k) / P_{\text{CDM}}(k)$$

$$P_{\text{Ly}\alpha}(k) \cdot k / \pi$$

Spectre de puissance matière

Spectre de puissance flux Ly $\alpha$

Ajustement données



Meilleure contrainte provient de **grand z** et **grand k**  
(meilleure sensibilité à coupure du régime linéaire)

# Matière noire tiède: $\nu_s$

---

Meilleure contrainte provient de **grand z** et **grand k**  
(meilleure sensibilité à coupure du régime linéaire)

Données	BOSS $z < 4.1$	<b>BOSS <math>z &lt; 4.5</math></b>	BOSS + XQ100 + HIRES/MIKE
Limite inf sur $m_s$ (keV)	16.1	<b>24.4</b>	28.8 ( $z \leq 4.6$ ) <sup>1</sup> / 34.1 ( $z \leq 5.4$ ) <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Yèche, NPD+ (2017)

<sup>2</sup> Irsic, Viel+ (2017)

# Matière noire tiède: $\nu_s$

Meilleure contrainte provient de **grand z** et **grand k**  
(meilleure sensibilité à coupure du régime linéaire)

Données	BOSS $z < 4.1$	<b>BOSS <math>z &lt; 4.5</math></b>	BOSS + XQ100 + HIRES/MIKE
Limite inf sur $m_s$ (keV)	16.1	<b>24.4</b>	28.8 ( $z \leq 4.6$ ) <sup>1</sup> / 34.1 ( $z \leq 5.4$ ) <sup>2</sup>

Conservatif

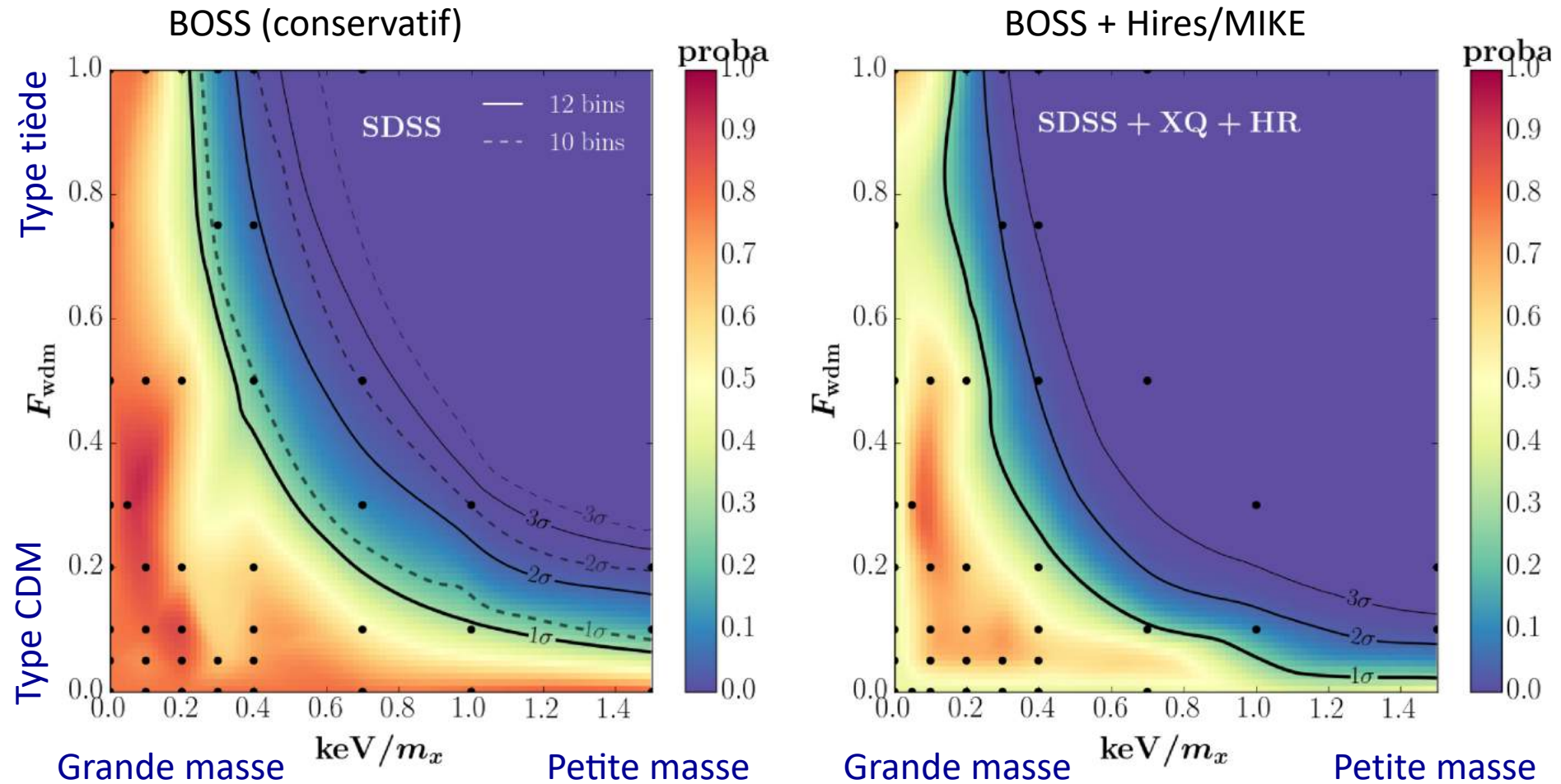
Plus sensible aux systematiques  
(histoire thermique  
du milieu intergalactique)

**Parmi les limites les plus fortes à ce jour**

**En combinaison avec données X ( $m_s < 4$  keV),**

**exclusion des modèles de neutrinos stériles (production non-résonante)**

# Matière noire mixte



Préférence pour mélanges matière noire tiède de **grande masse** ou **faible fraction de tiède** (proches de CDM)

*Baur, NPD++ (2017)*

# Neutrinos stériles: scénario plus générique

Neutrinos stériles en production résonante (Shi & Fuller, 1999)

Asymétrie leptonique

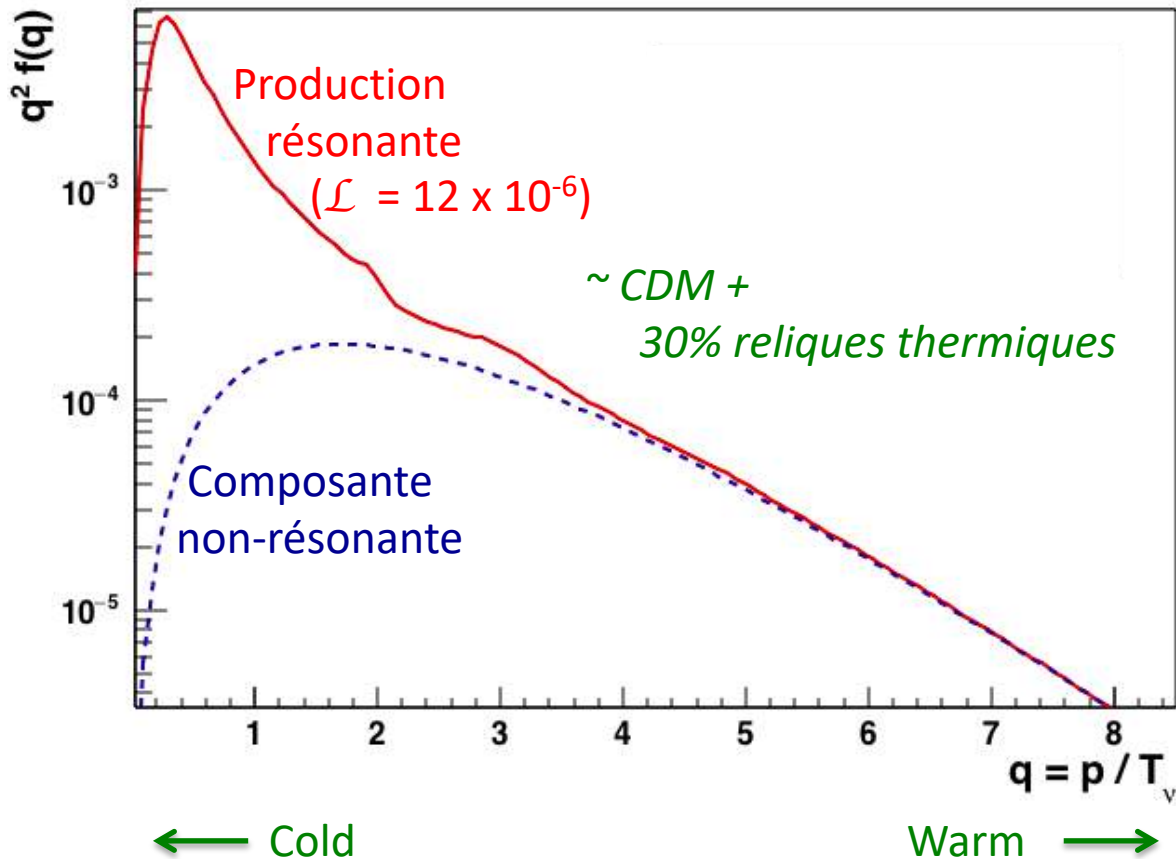
$$\mathcal{L} = \frac{|n_\nu - n_{\bar{\nu}}|}{s}$$

Oscillations amplifiées

$$\nu_{e,\mu,\tau} \longleftrightarrow \nu_s$$

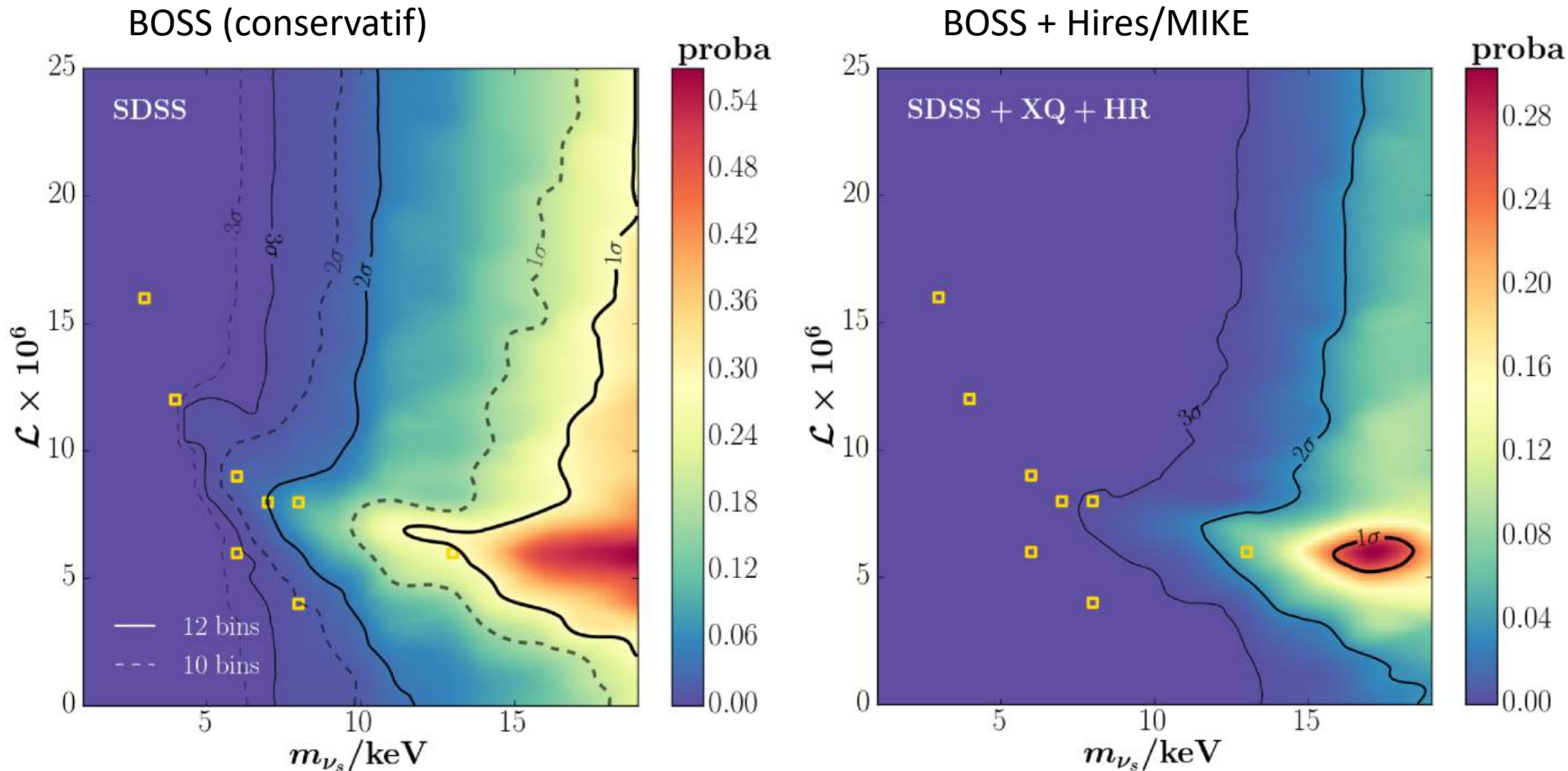
Distribution non-thermique  
Matière noire plus froide que  
en production non-résonante

Distribution espace des phases pour  $m_s=4\text{keV}$



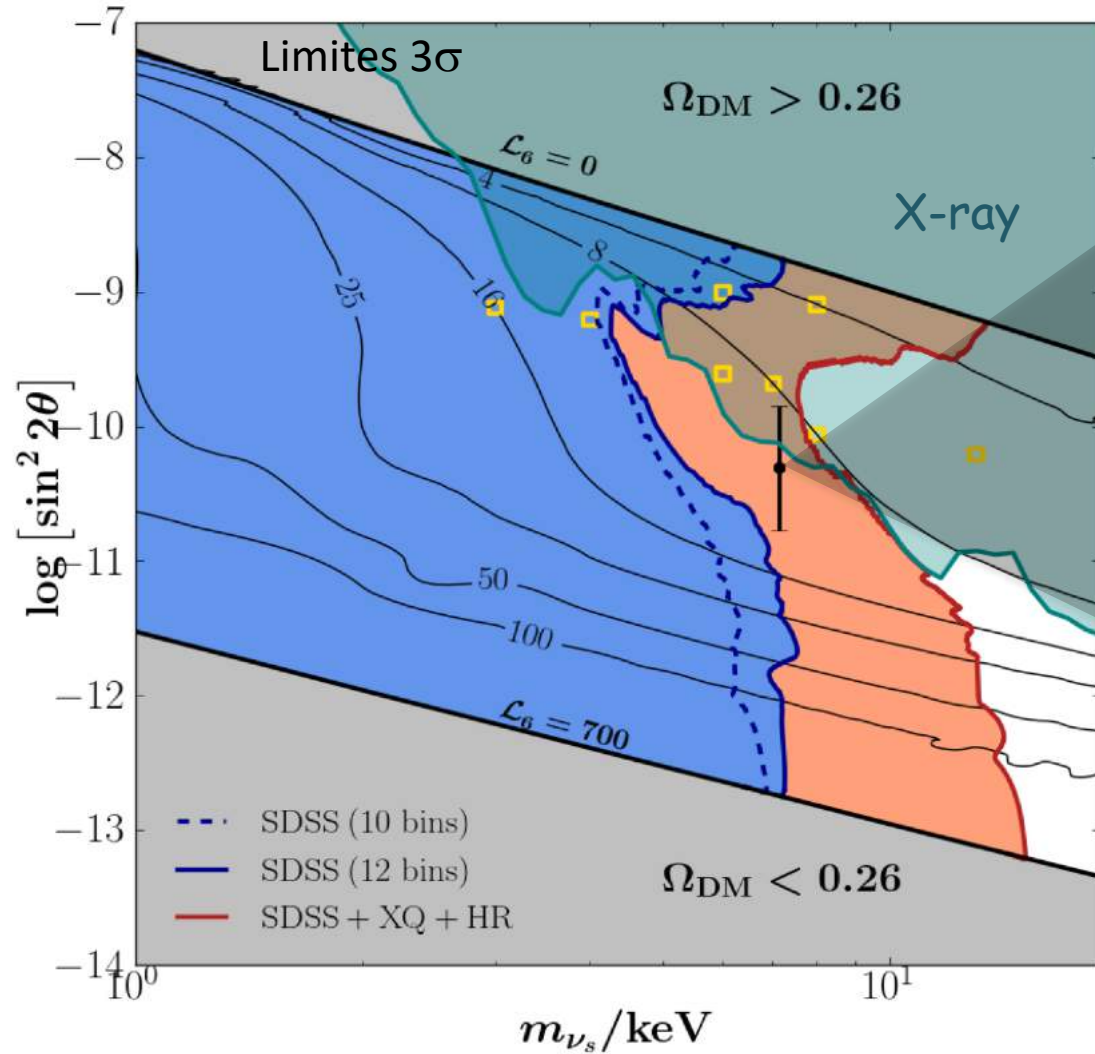
# Neutrinos stériles: scénario plus générique

Avec modèles mixtes  $\rightarrow$  transformation des contours d'exclusion des  $\nu_s$  non-résonants  
+ 8 simulations hydro pour validation



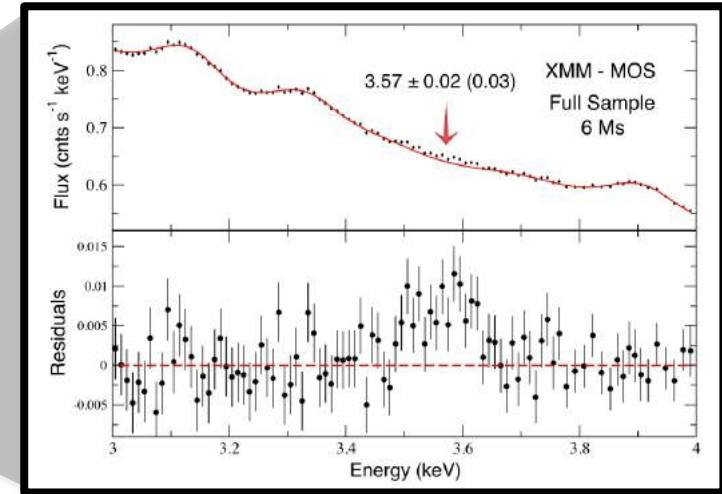
Baur, NPD++ (2017)

# Neutrinos stériles: scénario plus générique



*Bulbul et al. 2014, [ApJ 789 13](#)*

*Boyarsky et al. 2014, [PRL 113, 251301](#)*



*Baur, NPD++ (2017)*

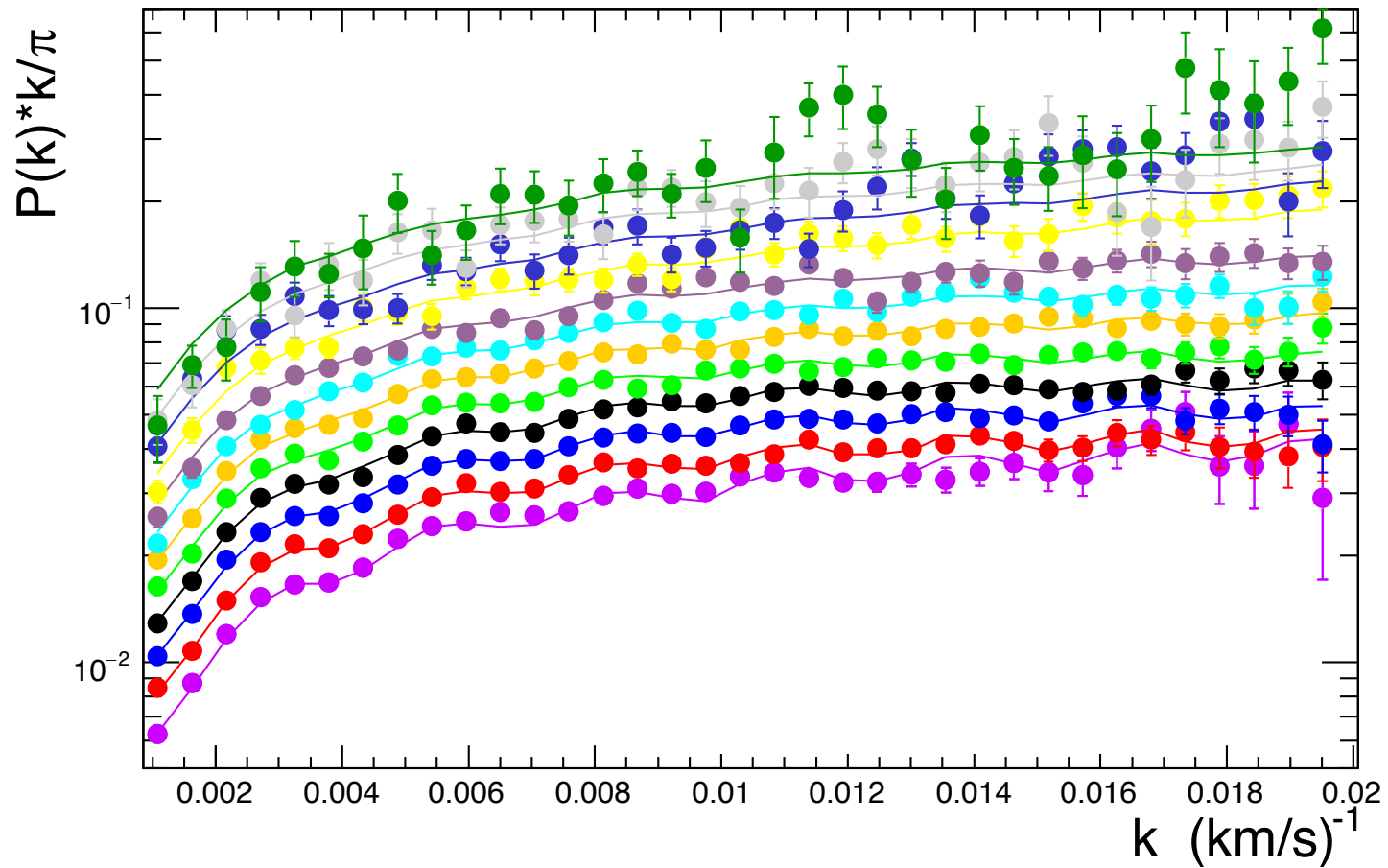
Données Lyman- $\alpha$  en tension avec  $\nu$  stérile de 7 keV (données X)

***Et au delà?***



# Bientôt ...

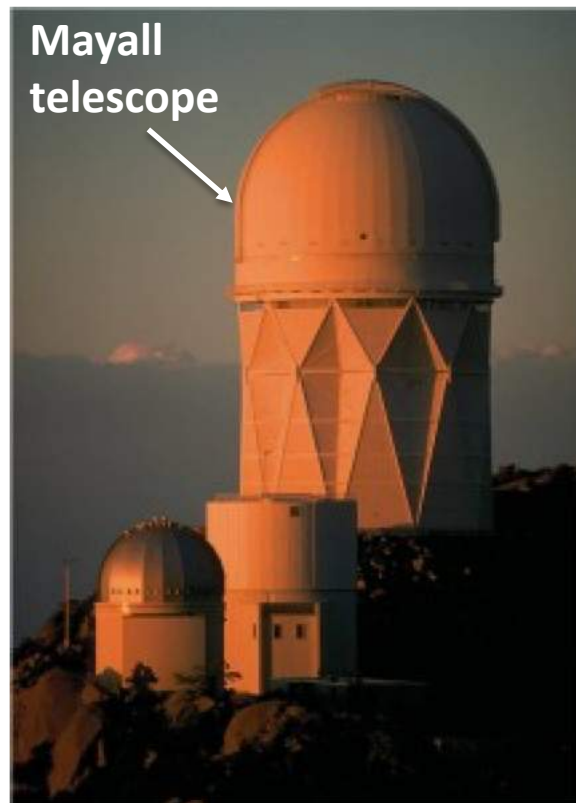
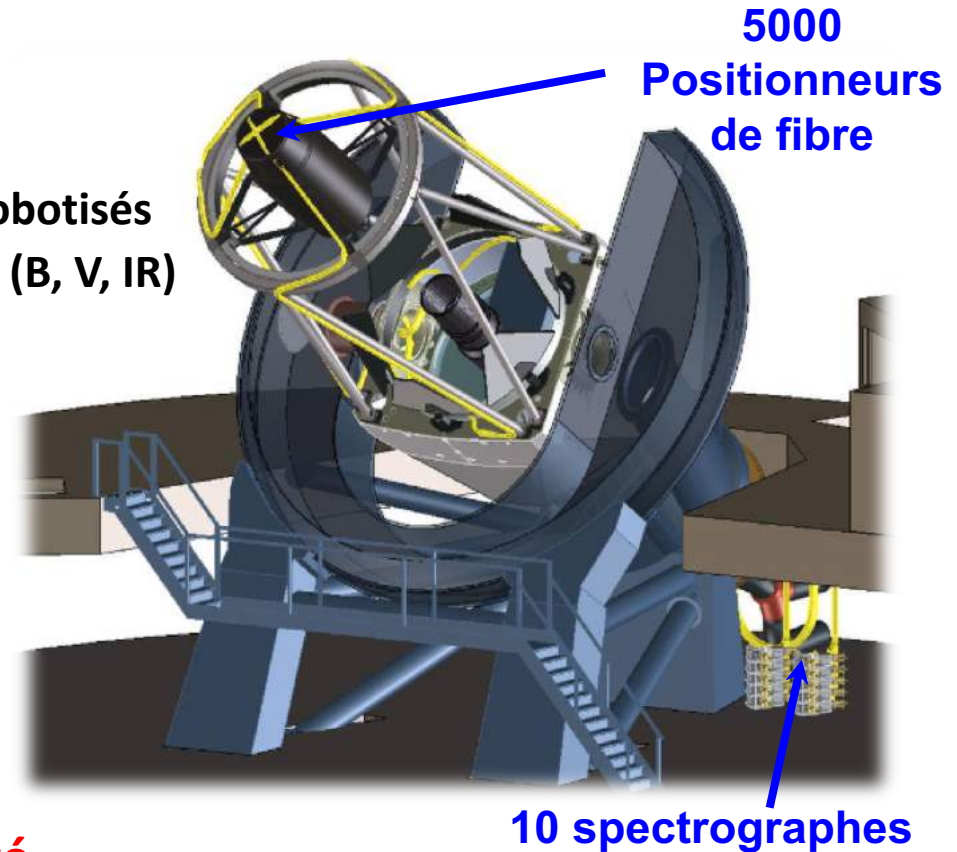
Tout BOSS (5 ans) + 1ere année eBOSS:  
avec selection des 44 000 meilleurs quasars sur 200 000



# DESI (2020-2025)

## DESI: l'instrument

- Télescope de 4m en Arizona
- 5000 positionneurs de fibre robotisés
- 10 spectrographes x 3 bandes (B, V, IR)



## DESI: le relevé

Relevé spectroscopique de 14,000 deg<sup>2</sup>

sur  $0 < z < 4.5$  pour BAO & RSD

Collaboration internationale (74 instituts, 46 hors US)

> 600 membres, 40 ingénieurs & physiciens français

# DESI (2020-2025)

- **Cinq catégories de cibles** couvrant redshifts 0 → 4.5
- **35 millions de redshifts** sur 14,000 deg<sup>2</sup> en cinq ans
- Volume **30x plus grand** que pour cartographie du Sloan

**2.4 millions de quasars**

**Ly $\alpha$**   $z > 2.1$

**Tracers**  $1.0 < z < 2.1$

**17 millions d'ELGs**

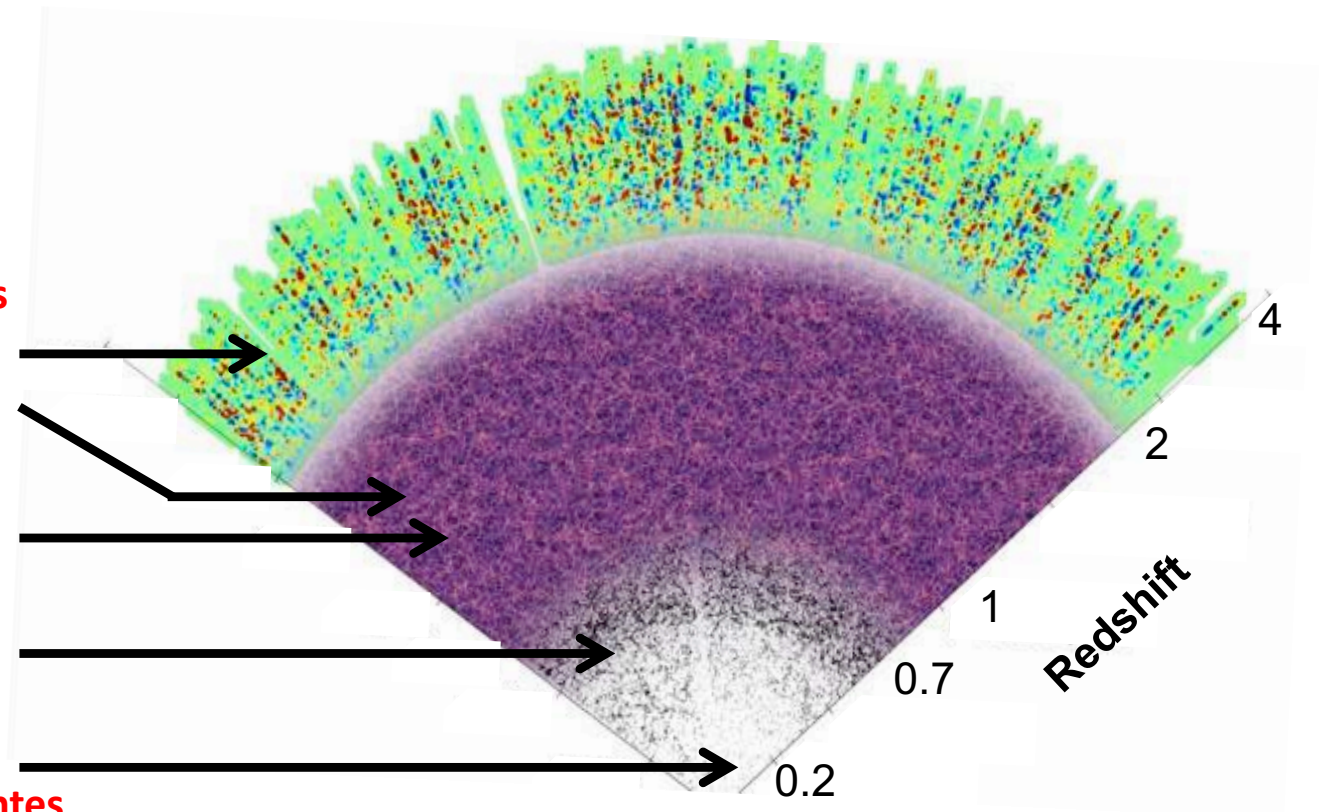
$0.6 < z < 1.6$

**6 millions de LRGs**

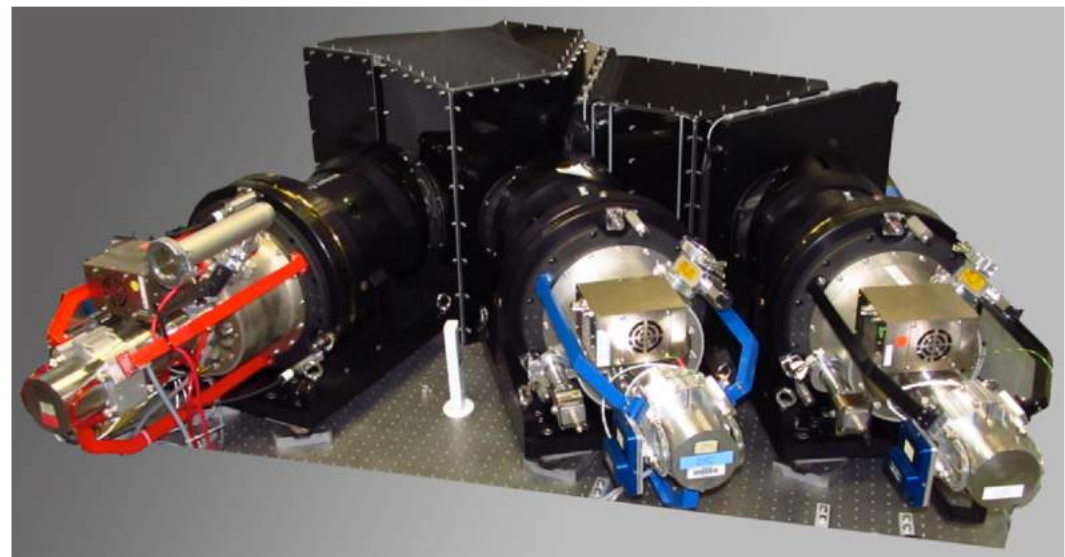
$0.4 < z < 1.0$

**10 millions des  
galaxies les plus brillantes**

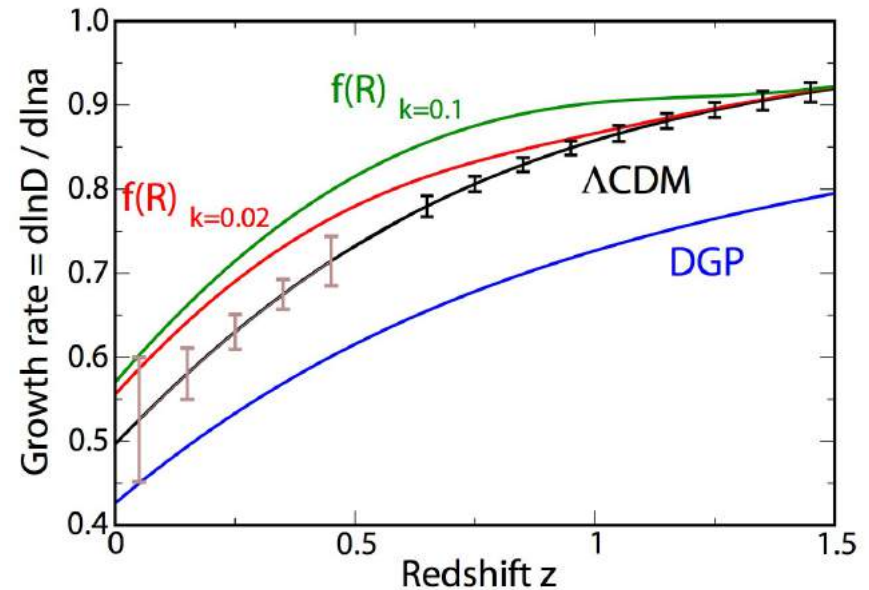
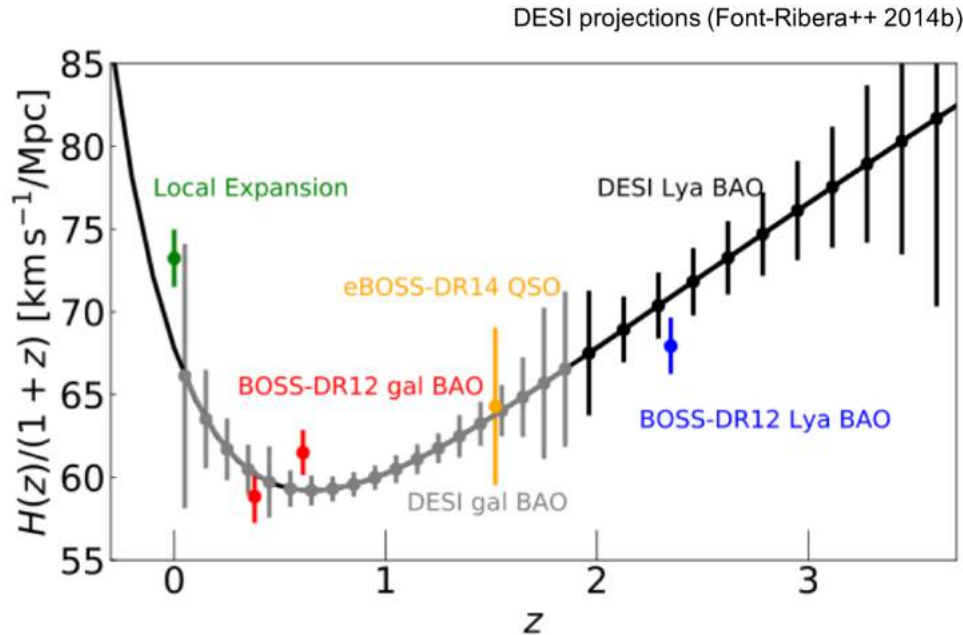
$0.05 < z < 0.4$



# DESI (2020-2025)



# DESI (2020-2025)



## Améliorations par rapport au Sloan

- **BAO:** 1 ordre de grandeur de mieux,  $\sigma(a) \sim 0.1\%$
- **RSD:** à mieux que 1% sur toute la gamme en redshift
- **Masse des neutrinos:** précision de  $\sim 20\text{-}25$  meV sur  $\Sigma m_\nu$
- **Inflation (non-gaussianités):**  $\sigma(f_{\text{NL}}) \sim 5$  (pour DESI seul)

# Conclusion

**Physique des particules** borne masse des neutrinos à  $0.06 < \Sigma m < 6 \text{ eV}$

## Apport de la cosmologie

- **Contrainte sur masse des neutrinos actifs**
  - Somme des masses  $\Sigma m_\nu < 0.12 \text{ eV}$  (95% CL) par  $\text{Ly}\alpha + \text{CMB}$
- **Contrainte sur matière noire tiède & neutrinos stériles**
  - $m_s$  (production non résonante) en conflit avec interprétation de raie à 3.5 keV comme  $\nu$  stérile
  - $m_s$  (production résonante) exclu par cosmologie
- **Prospectives**
  - Court terme: Mise à jour avec tout SDSS BOSS + eBOSS
  - Moyen terme: Planck + DESI  $\text{Ly}\alpha$   $\sigma(\Sigma m_\nu) = 0.039 \text{ eV}$
  - Moyen terme: Planck + DESI Galaxy  $\sigma(\Sigma m_\nu) = 0.024 \text{ eV}$

