

A cosmological simulation showing a complex network of filaments and clusters of galaxies. The filaments are primarily blue and green, while the clusters are highlighted in red and orange. The background is a dark blue space filled with numerous small, distant stars.

# *Forêts Ly- $\alpha$ et simulations pour la cosmologie*

Nathalie Palanque-Delabrouille,  
J. Baur, Ch. Magneville, Ch. Yèche

IRFU/SPP

# Neutrinos dans l'Univers

---

Simulations cosmologiques pour répondre aux grandes questions sur les neutrinos

Introduction forêts Lyman- $\alpha$

1/ Masse des neutrinos?

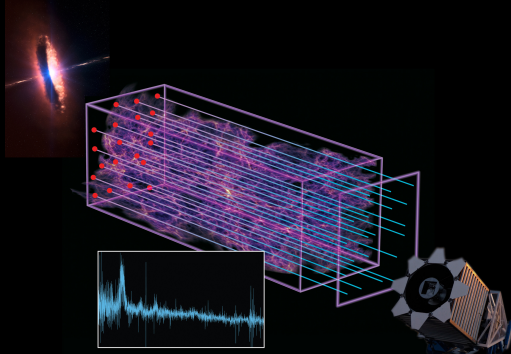
Physique des particules  
Cosmologie

$0.06 < \Sigma m_\nu < 6 \text{ eV}$   
 $\Sigma m_\nu \sim 0.1 - 1 \text{ eV}$

2/ Matière noire: neutrinos stériles?

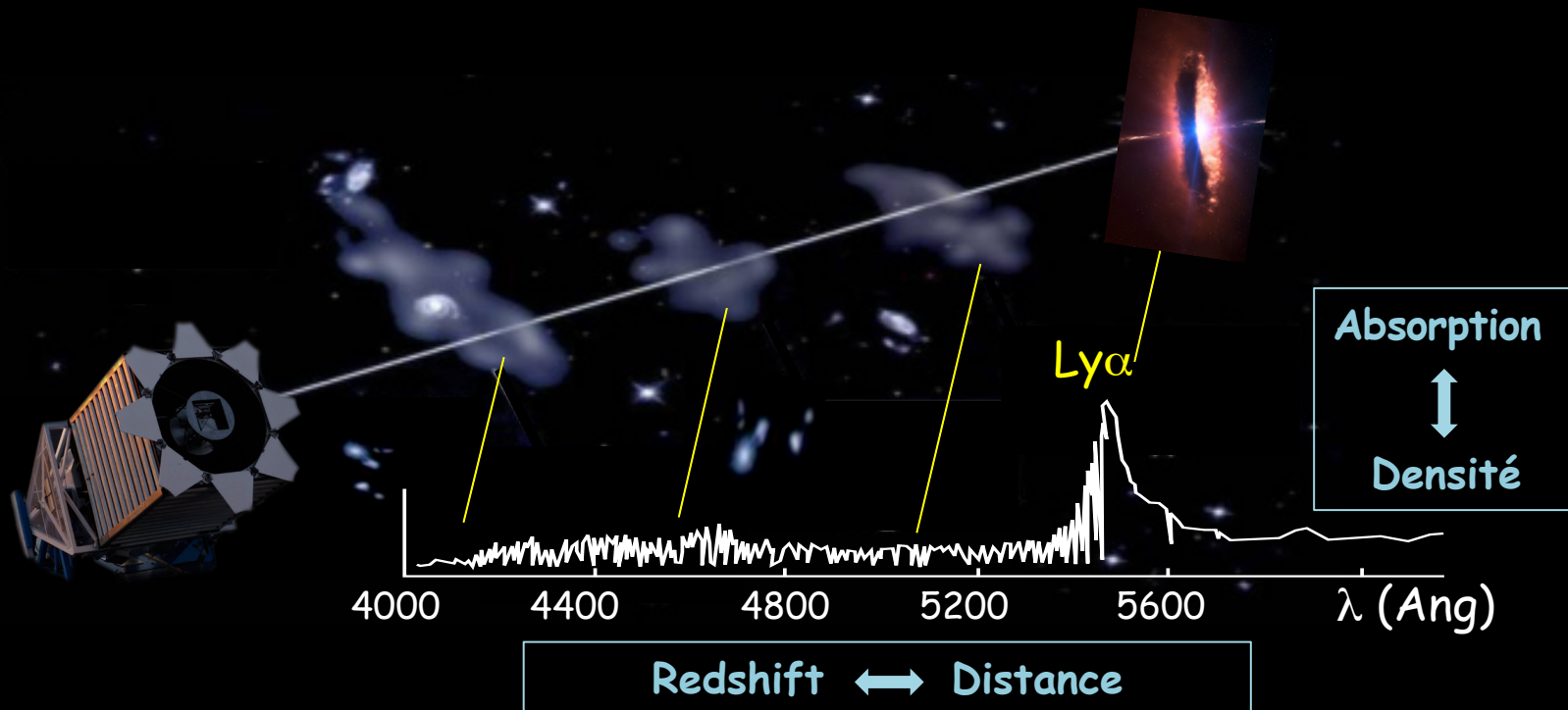
Froide?  
Tiède?  
Neutrinos stériles?

# Forêts Lyman- $\alpha$

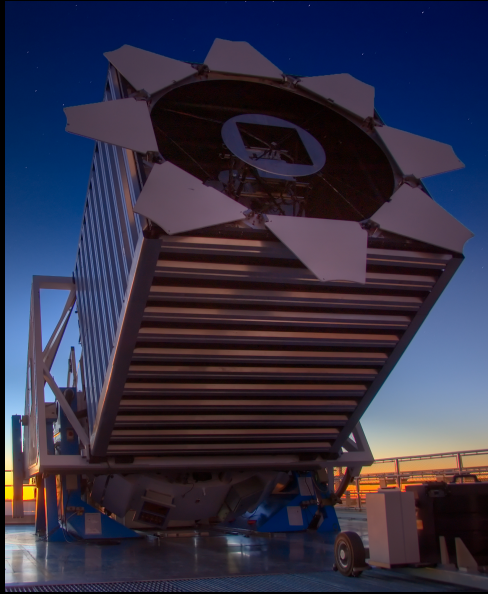


## Principe

- Quasars visible à **grands  $z$**  ( $>5$ )
- Absorption sur ligne-de-visée par H neutre dans **IGM**
- IGM reproduit densité de **matière noire**
- Distribution de la matière **aux petites échelles** ( $v, v_s$ )



# Les données



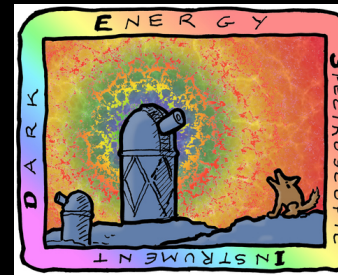
**BOSS**  
2009-2014

**eBOSS**  
2014-2020

## Relevé spectroscopique SDSS

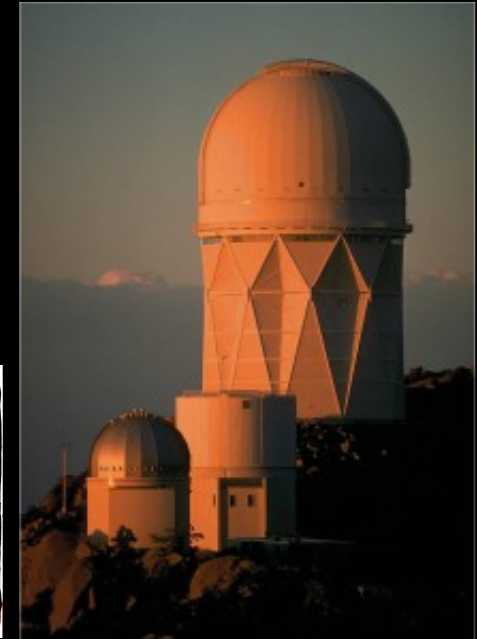
Telescope 2.5 m (New Mexico)  
Surface: 10,000 deg<sup>2</sup>  
Redshifts: 1000 fibres

**DESI**  
2019-2024



## Relevé spectroscopique DESI

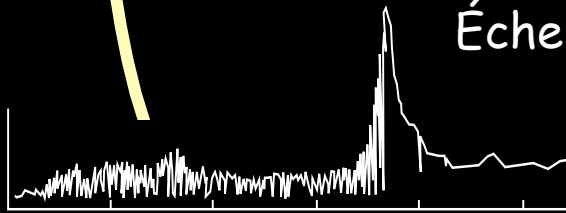
Telescope 4.0 m (Arizona)  
Surface: 14,000 deg<sup>2</sup>  
Redshifts: 5000 fibres  
**Cryostats + alignement CCD: CEA**



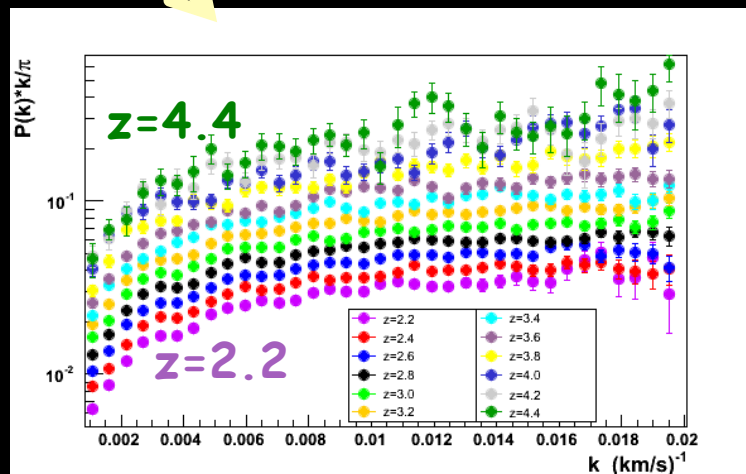
# Outils d'analyse

Corrélation spatiale  
des absorptions  
(spectre de puissance)

Échelles ~ 1 à 100 Mpc



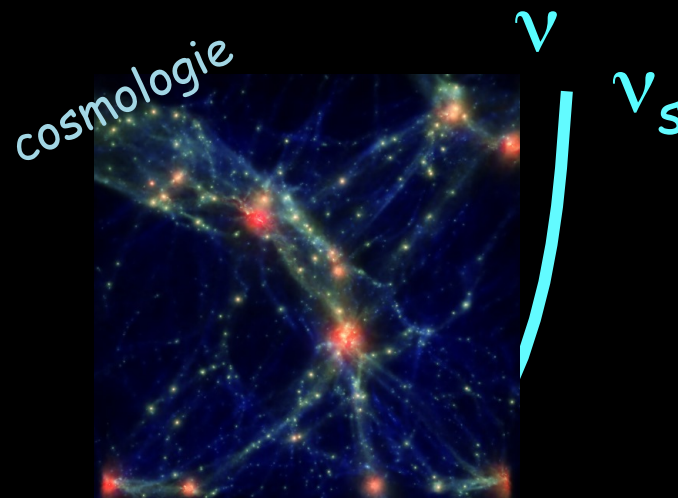
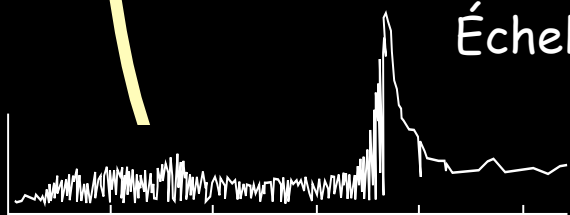
Données



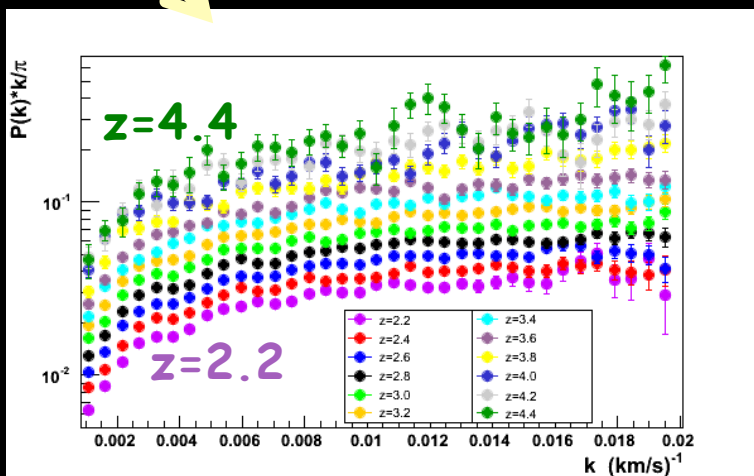
# Outils d'analyse

Corrélation spatiale  
des absorptions  
(spectre de puissance)

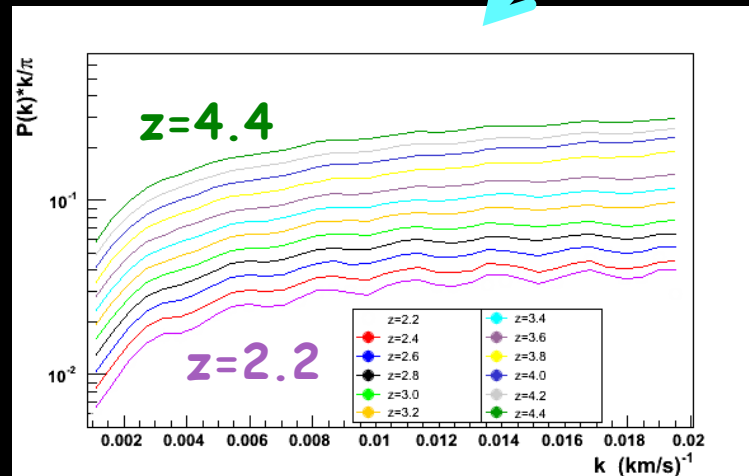
Échelles ~ 1 à 100 Mpc



Données



Simulations



# Neutrinos dans l'Univers

---

Simulations cosmologiques pour répondre aux grandes questions sur les neutrinos

Introduction forêts Lyman- $\alpha$

1/ Masse des neutrinos?

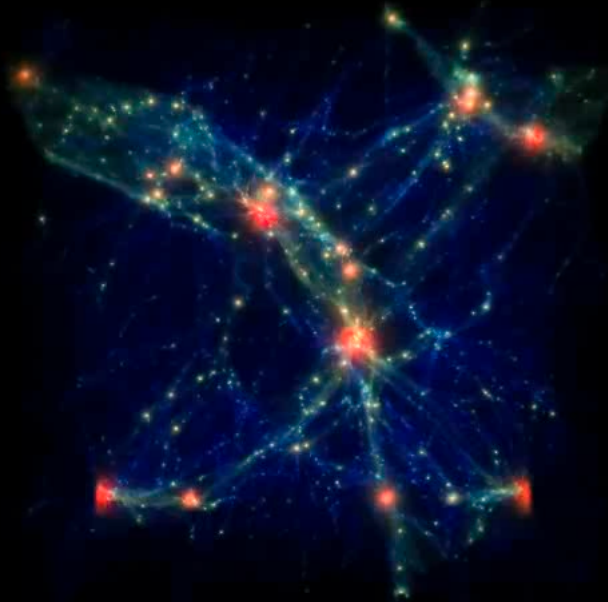
Physique des particules  
Cosmologie

$0.06 < \Sigma m_\nu < 6 \text{ eV}$   
 $\Sigma m_\nu \sim 0.1 - 1 \text{ eV}$

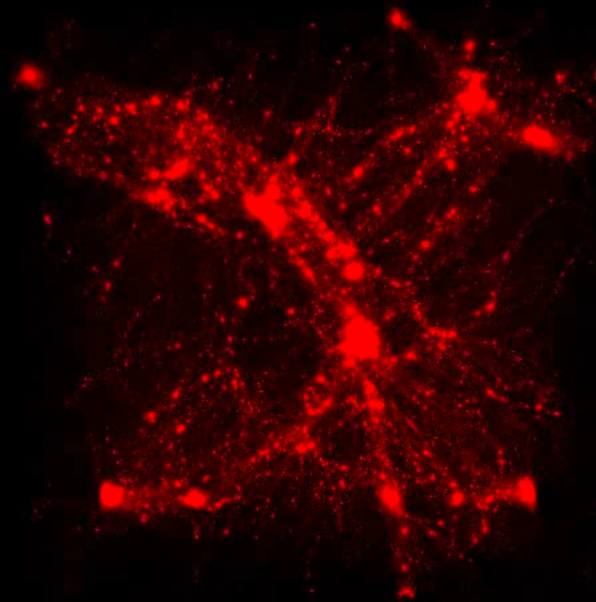
2/ Matière noire: neutrinos stériles?

Froide?  
Tiède?  
Neutrinos stériles?

Boxsize = 20 Mpc/h, LambdaCDM + 0.8 eV neutrinos, z = 0.10  
Gas Dark matter



Neutrinos



Stars

**Gadget-3** avec  
**3 types** de particules

- Matière noire
- Gaz (hydro)
- Neutrinos

Âge initial :  
300 millions années  
(z=15)

Âge final :  
14 milliards années  
(z=0)

@ A. Borde (IRFU/SPP)



# Grille de simulations hydro Ly- $\alpha$

- Cube  $100 h^{-1} \text{ Mpc}$  de côté,  $3072^3$  particules de chaque type  
Interpolation entre simulations haute résolution ou grande boîte  
Précision  $\sim 1\%$  (évaluée avec simu hydro d' $\sim 1$  million d'heures CPU)
- $\sim 50$  simulations ( $\neq$  cosmologies,  $\Sigma m_\nu$  ou propriétés astrophysiques)  
Expansion quadratique du spectre de puissance Ly $\alpha$ .

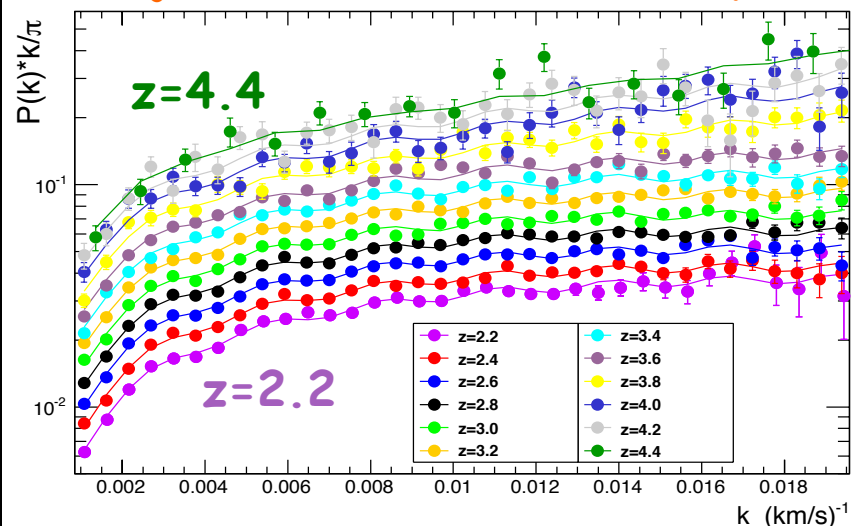
Parameter	Central value	Range	
$n_s$ .....	0.96	$\pm 0.05$	} <b>Cosmologie</b>
$\sigma_8$ .....	0.83	$\pm 0.05$	
$\Omega_m$ .....	0.31	$\pm 0.05$	
$H_0$ .....	67.5	$\pm 5$	
$T_0(z=3)$	14000	$\pm 7000$	} <b>Temp. IGM</b>
$\gamma(z=3)_{..}$	1.3	$\pm 0.3$	
$A^\tau$ .....	0.0025	$\pm 0.0020$	} <b>Fond UV</b>
$\eta^\tau$ .....	3.7	$\pm 0.4$	
$\Sigma m_\nu$ (eV)	0.0	0.4, 0.8	} <b>Neutrino</b>



**15+ Mh sur Curie (TGCC Bruyères)**  
 1 accès DARI  
 2 accès préparatoires PRACE  
 2 PRACE

# Grille de simulations hydro Ly- $\alpha$

## Ajustement aux données Ly- $\alpha$



### 2 papiers simulations

Borde, P-D, Rossi et al. 2014

Rossi, P-D, Borde et al. 2014

### 3 papiers interprétation

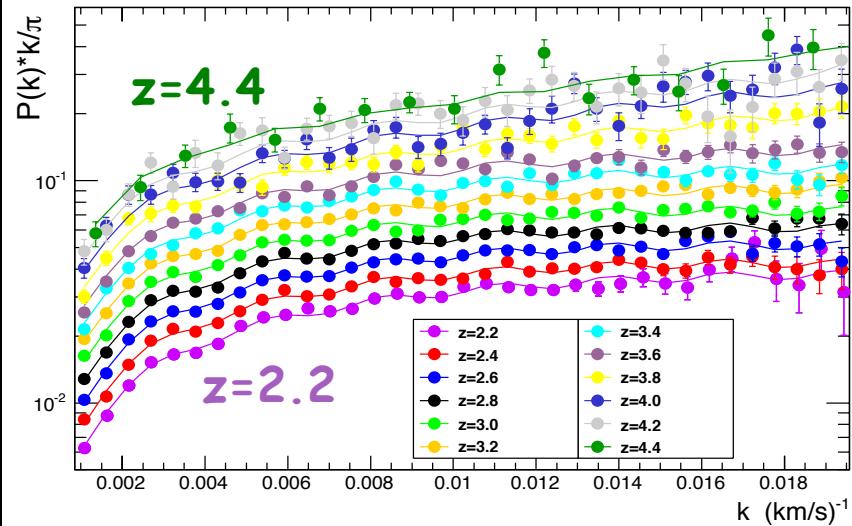
P-D, Yèche, Lesgourgues et al. 2015

Rossi, Yèche, P-D et al. 2015

P-D, Yèche, Baur et al. 2015

# Grille de simulations hydro Ly- $\alpha$

## Ajustement aux données Ly- $\alpha$



## 2 papiers simulations

Borde, P-D, Rossi et al. 2014

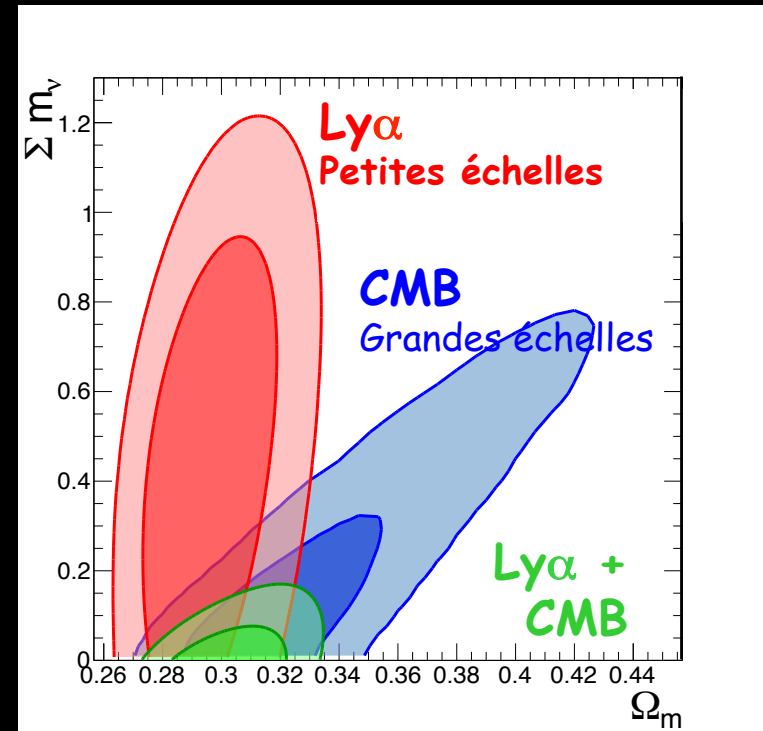
Rossi, P-D, Borde et al. 2014

## 3 papiers interprétation

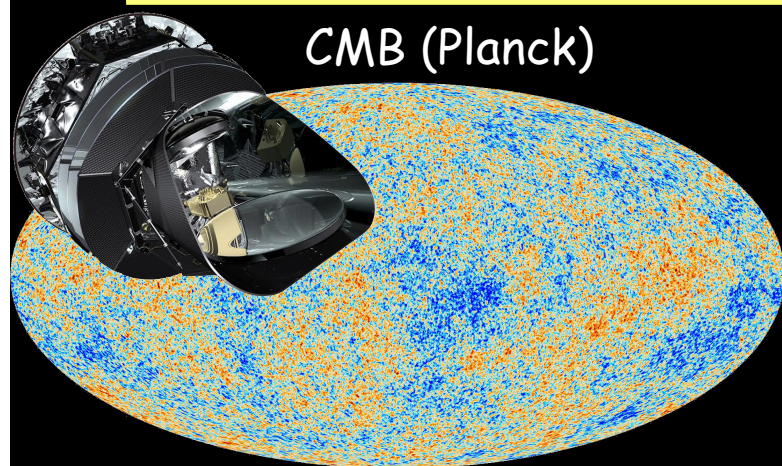
P-D, Yèche, Lesgourgues et al. 2015

Rossi, Yèche, P-D et al. 2015

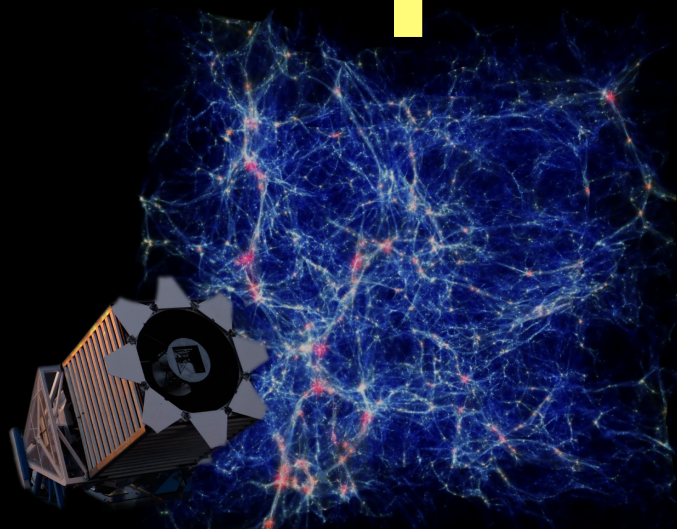
P-D, Yèche, Baur et al. 2015



# Masse des neutrinos



+



Planck seul 2015  $\rightarrow \Sigma m_\nu < 0.72 \text{ eV}$  (95% CL)  
Ly- $\alpha$  seul  $\rightarrow \Sigma m_\nu < 1.1 \text{ eV}$  (95% CL)

Ly- $\alpha$  + Planck 2013  
 $\rightarrow \Sigma m_\nu < 0.15 \text{ eV}$  (95% CL)  
*P-D, Yèche, Lesgourgues et al. 2015*

Ly- $\alpha$  + Planck 2015  
 $\rightarrow \Sigma m_\nu < 0.12 \text{ eV}$  (95% CL)  
*P-D, Yèche, Baur et al. 2016*

$\Rightarrow$  Meilleure limite mondiale

# Neutrinos dans l'Univers

---

Simulations cosmologiques pour répondre aux grandes questions sur les neutrinos

Introduction forêts Lyman- $\alpha$

1/ Masse des neutrinos?

Physique des particules  
Cosmologie

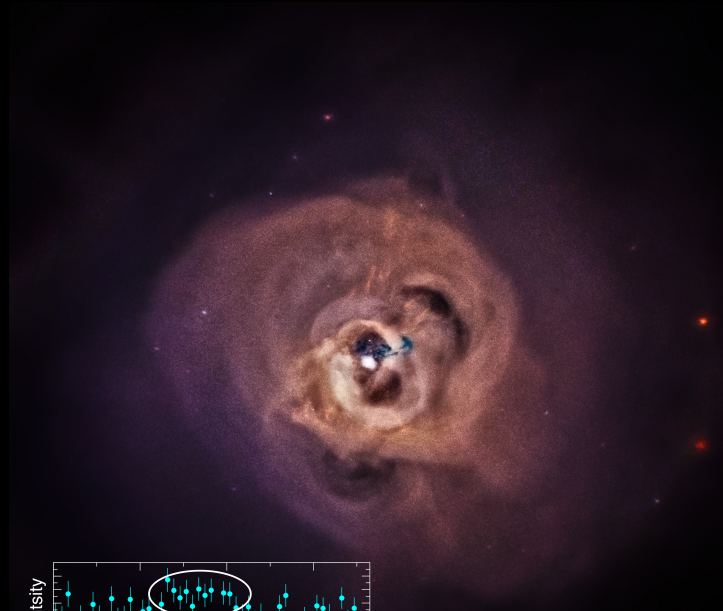
$0.06 < \Sigma m_\nu < 6 \text{ eV}$   
 $\Sigma m_\nu \sim 0.1 - 1 \text{ eV}$

2/ Matière noire: neutrinos stériles?

Froide?  
Tiède?  
Neutrinos stériles?

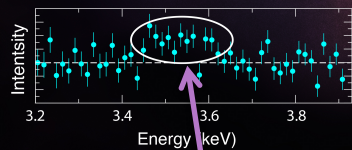
# Neutrinos stériles?

---



2014: Excès de signal en X à  $E \sim 3.5$  keV

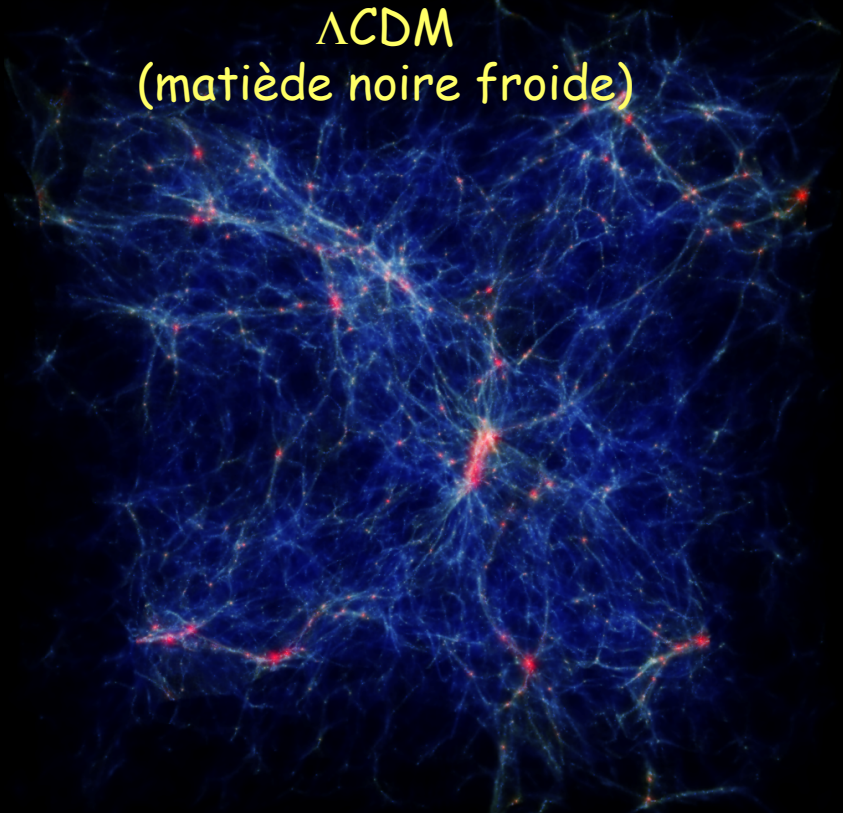
→ Interprétation possible:  
Désintégration particule matière noire  
(neutrino stérile) de  $m \sim 7$  keV



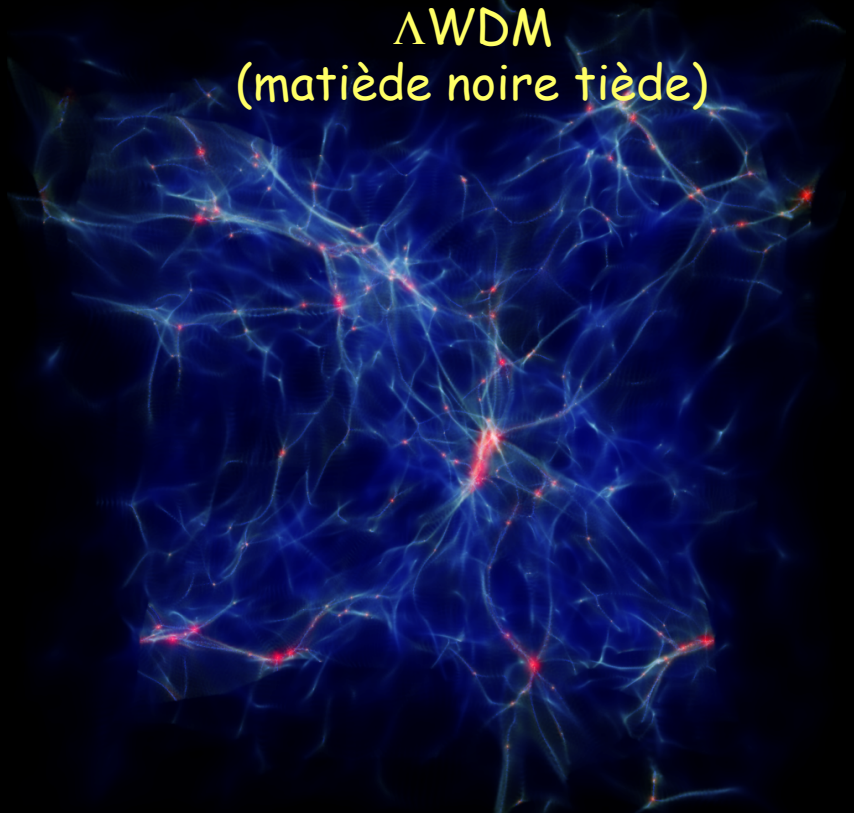
$E=3.5$  keV

# Neutrinos stériles?

$\Lambda$ CDM  
(matière noire froide)



$\Lambda$ WDM  
(matière noire tiède)



© J. Baur (IRFU/SPP)

Hypothèse: TOUTE la matière noire est TIEDE (neutrino stérile  $m \sim keV$ )  
Ajout de **neutrinos stériles** dans grille de **simulations hydro**

→ Perte de puissance aux petites échelles

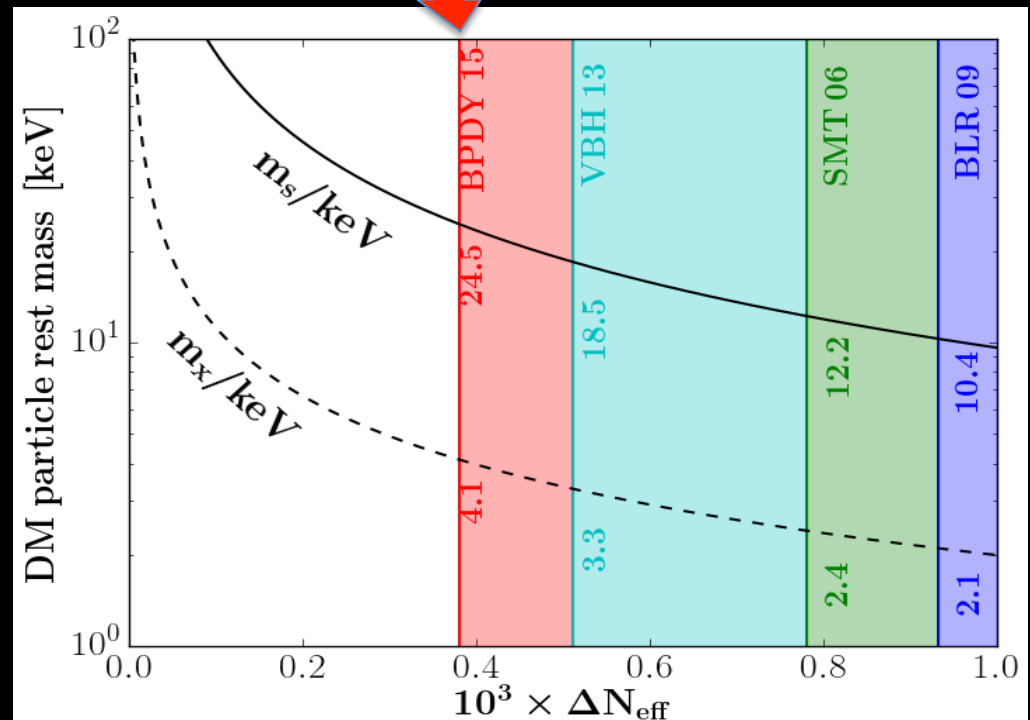
# Neutrinos stériles?

Fit sur données Ly- $\alpha$  de SDSS/BOSS

$m_{\text{WDM}} > 4.1 \text{ keV}$  et  $m_{\text{sterile}} > 24.6 \text{ keV}$  P.-D., Baur, Yèche et al., 2016

→ Meilleure limite mondiale

→ Exclut interprétation  
"neutrinos stériles"  
(production non-résonante)  
des observations X





# Conclusion

---

- Grille de simulations hydrodynamiques de forêts Ly- $\alpha$   
Allocations DARI 2012, PRACE 2012, 2014, préparatoire PRACE 2015  
→ 15 Mh sur Curie thin nodes  
300 kh sur Curie fat nodes
- Meilleure limite sur masse des neutrinos  
Ly- $\alpha$  + Planck 2015  
→  $\Sigma m\nu < 0.12$  eV (95% CL)
- Meilleure limite pour neutrinos stériles (production non-résonante)  
→  $m_{\text{sterile}} > 24.5$  keV
- Améliorations en perspective  
Nouvelles données (BOSS, eBOSS, haute résolution)  
Etudes plus fines de l'IGM (feedbacks, avec SAp)  
Nouveaux modèles de neutrinos stériles (production résonante)

